
Rapport de stage

5^{ème} année

Approche de l'évolution des marges alluviales par le biais de la modélisation hydro-sédimentaire

Compagnie Nationale du Rhône
2 rue André Bonin, 69001 Lyon



Tuteur entreprise :

Carole Wirz

*Ingénieur hydraulique et
sédimentaire*

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues

Gaël Chéneau

Étudiant

IMA

Remerciements

La réalisation de ce stage au sein de la CNR a été un grand plaisir, très formateur et me conforte dans mes choix professionnels.

Je voudrais remercier en premier lieu ma maîtresse de stage Mme. Carole Wirz, ingénieur hydraulique et sédimentaire, pour son accueil et ses conseils. Cela n'a pas été simple avec la période pandémique actuelle mais le déroulement du stage s'est passé à merveille. Elle a toujours été présente pour répondre à mes questions et me former sur différents logiciels. Merci pour cet accompagnement de qualité.

Je tiens à remercier M. François-Xavier Cierco, responsable du pôle Ecoulements et Ressources en Eau (ERE), pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et pour tous ses bons conseils pour ma poursuite professionnelle.

J'adresse aussi mes remerciements à M. Christophe Mora, technicien environnement, pour sa connaissance du site de Banc Rouge qu'il m'a partagé avec enthousiasme, ainsi que pour cette sortie terrain, sur le site d'étude, fort passionnante.

J'aimerai aussi remercier Pierre Nunes qui m'a fortement aidé dans le débogage de la simulation multi-granulométriques et avec qui j'ai eu de nombreuses discussions qui m'ont éclairé sur les rouages du module Sisyphe.

Merci aussi au thésard M. Nicolas Tissot avec qui nous avons réalisé la campagne terrain et partagé les informations.

J'aimerai remercier mon tuteur pédagogique M. Stéphane Rodrigues qui a été présent pour répondre à mes questions et pour suivre ce stage.

Merci à Mme. Axelle Faure, M. Aurélien Gudot et M. Emilio Corrales Lalindes pour avoir partagé avec moi ce bureau ainsi que votre bonne humeur et votre aide.

Enfin j'adresse un très gros remerciement à toute l'équipe du pôle ERE, les stagiaires et les alternants pour votre accueil et pour toutes ces discussions très intéressantes autour d'un café. Je vous remercie pour l'aide que vous m'avez apporté tout au long de ce stage.

Table des matières

Remerciements	3
Table des figures.....	6
Table des tableaux.....	7
Introduction.....	8
I. Site d'étude	9
II. L'opération de restauration	10
Matériel et méthode	12
I. Données utilisées	12
a. Données LiDAR (laser imaging detection and ranging) topographiques.....	12
b. Données Bathymétriques.....	12
c. Données hydrauliques.....	13
d. Données sédimentaires.....	15
II. Traitement des données et analyse	16
a. Données LiDAR	16
b. Données bathymétriques du Vieux-Rhône	16
c. Données bathymétriques de la lône	16
d. Création des MNT.....	17
e. Comparaison des différents TIN	17
f. Sectorisation de la zone d'étude.....	18
g. Analyse de l'évolution du site d'étude entre 2017-2021	19
h. Analyse des données granulométriques	24
i. Conclusion	26
III. Modélisation sous Télémac 2D	26
a. Principe général de Télémac 2D.....	26
b. Création du modèle.....	27
c. Comparaison de l'évolution sédimentaire entre le TIN et le maillage.....	28
d. Calage et simulations hydrodynamiques	28
e. Calage et simulations hydro-sédimentaires	34
f. Exploitation du modèle hydro-sédimentaire	37
Résultats.....	38
I. Calage sédimentaire	38
a. Différence Couplage 1 et Couplage 10.....	38
b. Volumes finis ou éléments finis.....	39
c. Simulation initiale.....	40
d. Simulations de calage.....	44

e. Simulations avec plusieurs classes granulométriques	50
f. Les apports de sable par le Vieux-Rhône	50
g. Facteur d'accélération morphologique	53
II. Exploitation du modèle hydro-sédimentaire	54
Discussions	55
I. Données.....	55
II. Calage hydraulique	55
III. Transport sédimentaire	55
Conclusion	56
Bibliographie.....	57
Annexes	58

Table des figures

Figure 1: Carte de localisation du site d'étude.....	9
Figure 2: Carte de l'emplacement des ouvrages Girardon au droit de la lône de Banc Rouge	10
Figure 3 : Graphique présentant la comparaison entre le débit au barrage de Donzère et le débit à l'entrée du modèle 2D.....	13
Figure 4 : Graphique de comparaison des débits entre la station de Bourg-Saint-Andéol et Saint-Montan.....	14
Figure 5:Loi $Z(Q)$ à la frontière aval du modèle 2D	15
Figure 6 : Graphique de comparaison de valeur Z de crues réelles et la loi $Z(Q)$	15
Figure 7: Carte présentant la localisation des différentes emprises.....	18
Figure 8: Carte de l'évolution topographique réelle du site d'étude entre 2018 et 2021	19
Figure 9: Carte de localisation des lignes de fond.....	20
Figure 10 : Représentation graphique de la ligne de fond du lit mineur de la lône	21
Figure 11 : Représentation graphique de la ligne de fond de berge rive droite de la lône	21
Figure 12 : Représentation graphique de la ligne de fond de berge rive gauche de la lône	22
Figure 13 : Carte de l'évolution morphologique de l'amont de la lône entre 2018 et 2021	22
Figure 14: Carte de localisation des relevés granulométriques (Gauche : Amont / Droite : Aval)	24
Figure 15: Schéma de création d'un maillage 2D.....	27
Figure 16:Maillage final du site d'étude sous BlueKenue	27
Figure 17 : Graphique de la différence de niveau d'eau entre le pas de temps 1 et 0.5	30
Figure 18:Carte de positionnement des nœuds observés	30
Figure 19 : Carte du positionnement des échelles limnimétriques sur le site d'étude.....	32
Figure 20 : Graphique des résultats RMSE entre les différents modèles.....	33
Figure 21: Diagramme de Shields.....	35
Figure 22: Hydrogramme de la station de Saint-Montan entre 2018 et 2021.....	36
Figure 23: Couplage Telemac - Sisyphé (WikiCNR).....	38
Figure 24: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du modèle.....	40
Figure 25: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 1	41
Figure 26: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 2	41
Figure 27 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 3	42
Figure 28 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 4	43
Figure 29 : Graphique des volumes d'érosion entre les observations et les différentes simulations de calage.....	45
Figure 30 : Graphique des volumes de sédimentation entre les observations et les différentes simulations de calage	46
Figure 31 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 1	46
Figure 32 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 2	47
Figure 33 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 3	47

Figure 34 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 4	48
Figure 35 : Photo aérienne de l'amont de la lône de Banc Rouge	51
Figure 36 : Comparaison du dépôt de sable à l'amont de la lône entre la simulation et les observations	52
Figure 37 : Comparaison du dépôt de sable sur une zone de la berge rive droite entre la simulation et les observations.....	52
Figure 38 : Comparaison du dépôt de sable sur l'île et ses bras entre la simulation et les observations	53

Table des tableaux

Tableau 1: Tableau de l'évolution sédimentaire à partir du TIN.....	23
Tableau 2 : Tableau des résultats de la granulométrie de Wolman	25
Tableau 3 : Tableau des résultats de la granulométrie par caméra du lit mineur	25
Tableau 4: Tableau de comparaison de l'évolution sédimentaire entre le TIN et le maillage.....	28
Tableau 5: Tableau de l'évolution sédimentaire entre 2018 et 2021 dans le maillage pour les données observées	28
Tableau 6 : Tableau des débits des différentes crues historiques	31
Tableau 7 : Tableau des différents choix de calage pour le coefficient de Strickler	33
Tableau 8 : Tableau des résultats de l'étude sur les différents coefficients de Strickler	33
Tableau 9 : Tableau des résultats de la comparaison entre la période de couplage à 1 et à 10	39
Tableau 10 : Tableau des résultats de la comparaison entre la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis	39
Tableau 11 : Tableau des résultats de l'évolution morphologique entre la simulation initiale et les observations	43
Tableau 12 : Tableau des écarts entre la simulation initiale et les observations.....	44
Tableau 13 : Tableau de la comparaison entre la simulation initiale et les observations	44
Tableau 14 : Tableau des résultats des tests de paramètres de calage.....	44
Tableau 15 : Tableau des résultats des simulations de calage.....	48
Tableau 16 : Tableau des résultats de la simulation du paramètre de l'épaisseur de la couche érodable	49
Tableau 17 : Tableau de comparaison entre la simulation initiale et la simulation C84	49
Tableau 18 : Tableau des résultats de la comparaison entre la v7p2 et la v8p2	50
Tableau 19 : Tableau des résultats de la simulation du transport des sables en suspension.....	51
Tableau 20 : Tableau des résultats du test du paramètre "facteur morphologique" à 10	54
Tableau 21 : Tableau des résultats du test du paramètre "facteur morphologique" à 5	54

Introduction

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) fut créée en 1933 et s'est vu confier la concession du Rhône, son aménagement et sa valorisation en 1934. Les trois missions principales de la CNR sont : la production d'électricité, la navigation et l'irrigation des terres agricoles. C'est la première entreprise française en production exclusive d'énergies renouvelable (4000 MW). La CNR a installé 19 centrales hydroélectrique d'une puissance totale de 3000 MW et leurs parc éoliens et solaires produisent 1000 MW. Cette entreprise est organisée en différentes directions dont celle de l'Ingénierie et des Grands Projets (DIGP). Cette direction comporte cinq pôles métiers : ENV (environnement), ERE (Ecoulements et ressources en eau), GCR (Génie Civil), ELM (Electromécanique), AH (Aménagements hydrauliques). Ce stage s'inscrit dans le pôle ERE qui regroupe les domaines d'activités suivants : l'hydrologie, l'hydrométéorologie, l'hydraulique et le transport sédimentaire. Le pôle ERE traite plusieurs domaines d'expertises :

- Mesures et expérimentations in-situ
- Modélisation
- Conception
- Développement et amélioration d'outils
- Recherche et Innovation
- Communication scientifique

Au cours des années, le Rhône a été aménagé pour de multiples raisons. Dans un premier temps, les aménagements Girardon ont été mis en place (digue, seuil ...) afin de concentrer l'eau dans le chenal principal et permettre la navigation. Dans un second temps, les aménagements de la CNR ont été construits sur le Rhône afin de dériver le débit vers les centrales hydroélectriques. Un débit réservé est maintenu dans les Vieux-Rhône. Ces aménagements anthropiques ont modifié la morphologie du Rhône et des Vieux-Rhône avec la fermeture des annexes ou marges alluviales qui ne sont plus en eau sauf lors de crues importantes.

Depuis quelques années, la Compagnie Nationale du Rhône a lancé de grandes opérations de restaurations des marges alluviales du Vieux-Rhône. Certains sites ont déjà fait l'objet de restauration cherchant à retrouver une dynamique naturelle et faire revenir la biodiversité qui a disparu. C'est dans ce projet que s'inscrit ce stage. Le stage consiste, au travers d'un cas d'application, à définir les possibilités que peut offrir la modélisation hydro-sédimentaire pour étudier la pérennité des actions de restauration sur les marges alluviales du Vieux-Rhône. Ce stage se découpe en plusieurs étapes :

- 1) Collecte et traitement des données (Topographiques, Bathymétriques, Hydrauliques, Sédimentaires)
- 2) Construction et calage du modèle 2D hydrodynamique
- 3) « Calage » sédimentaire
- 4) Exploitation du modèle sédimentaire

Le rapport va s'articuler en plusieurs parties :

- L'introduction : présentant le site et le contexte de l'étude
- Matériel et méthode : présentant les données et les traitements réalisés
- Résultats : montrant l'évolution dans les différentes simulations sédimentaires
- Discussion : mettant en avant les avantages et inconvénients rencontrés ainsi que les perspectives
- La conclusion : permettant de faire un retour sur l'ensemble de cette étude

I. Site d'étude

Le site d'étude choisi est la lône (terme vernaculaire pour parler d'un bras mort sur le Rhône) de Banc Rouge (Figure 1). Cette lône se situe au Sud de Montélimar dans la commune de la Lapalud. Cette zone se situe entre le barrage de Donzère et la confluence du Vieux-Rhône et de l'Ardèche.



Figure 1: Carte de localisation du site d'étude

Le modèle hydro-sédimentaire mis en œuvre dans le cadre du stage couvre l'ensemble du site d'étude délimité en noir sur la carte.

Avant les opérations de restaurations, cette zone comprenait de nombreux ouvrages Girardon (épis, digues, tenons ...) (Figure 2)

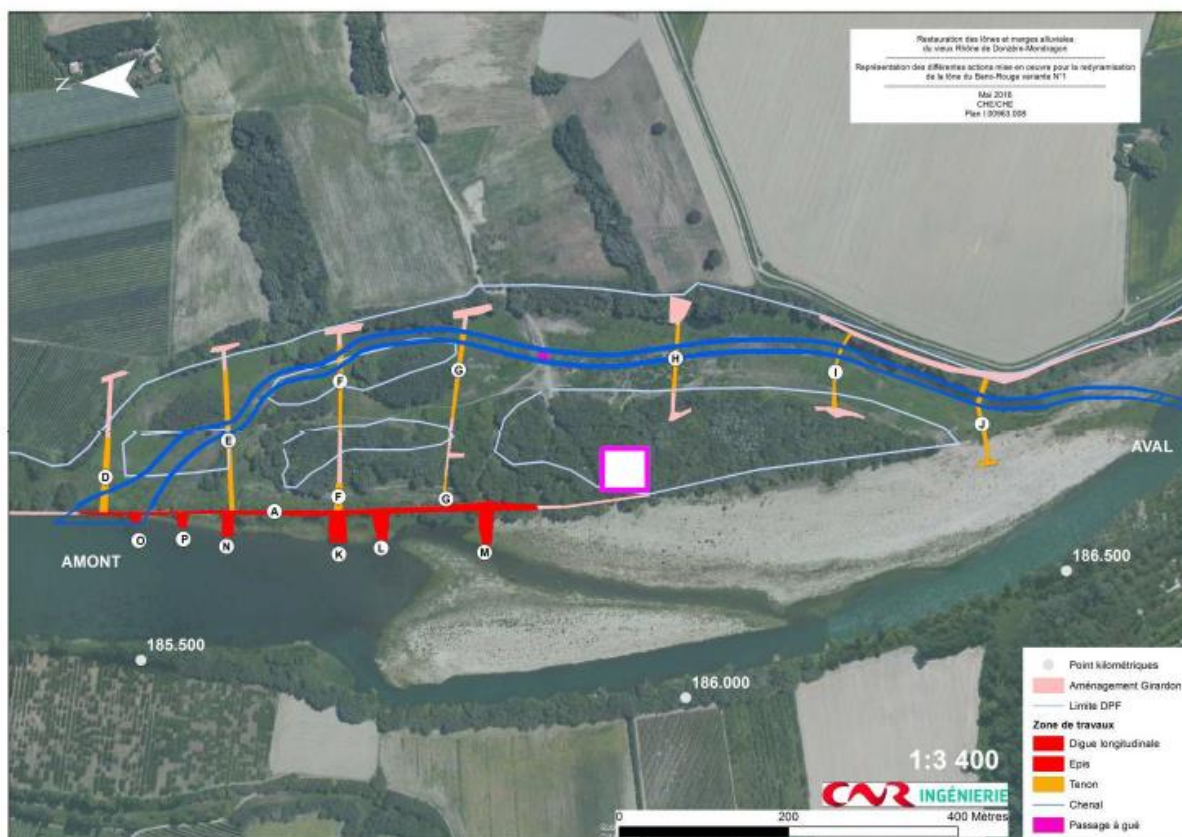


Figure 2: Carte de l'emplacement des ouvrages Girardon au droit de la lône de Banc Rouge

II. L'opération de restauration

La lône de Banc-Rouge se localise au niveau d'une île et d'un grand banc de galet. Avant les travaux fin décembre 2017 – janvier 2018, au débit réservé, la lône était déconnectée à l'amont du fait de la présence d'une digue. Mais elle était connectée au Vieux-Rhône à l'aval.

Le Programme décennal de restauration hydraulique et écologique du Rhône, initié à partir de l'an 2000 par l'Etat, a identifié quatre Vieux-Rhône « prioritaire », dont celui de Donzère-Mondragon, nécessitant la mise en œuvre d'actions de réhabilitation hydro-écologiques sur le Rhône et ses milieux annexes. A la suite des crues majeures en 2002 et 2003 ainsi que l'élaboration du Plan Rhône, la CNR s'est engagée sur un Schéma Directeur de réhabilitation des îlots et des marges alluviales du Vieux-Rhône. Celui-ci permet de répondre aux demandes du volet « qualité des eaux, ressource et biodiversité » du Plan Rhône. Dans ce cadre, 52 îlots et marges alluviales ont été recensés et hiérarchisés sur la priorité de restauration. La lône de Banc Rouge fait partie des 3 secteurs retenus.

L'objectif de restauration est de reconnecter la lône au débit réservé. L'opération de restauration a consisté à la réalisation des travaux suivants (Figure 2) :

- Démantèlement de la digue longitudinale (A) sur 100 m à la cote (47.7)
- Démantèlement complet des tenons et épis (D, E, F, G, H, I, J et L, M, N, O, P)
- Mise en œuvre d'un passage à gué en graviers
- Création d'un chenal sur une distance de 1300 mètres dans le lit originel de la lône

L'objectif du stage est d'évaluer la pérennité des actions de restauration du site de Banc Rouge en mettant en œuvre une modélisation hydro-sédimentaire afin de déterminer si la lône va s'auto-entretenir ou non.

Matériel et méthode

I. Données utilisées

La création et l'utilisation d'un modèle 2D hydro-sédimentaire nécessite de nombreuses données :

- Données topographiques et bathymétriques pour la création du modèle
- Données hydrauliques pour le calage et l'exploitation du modèle
- Données granulométriques pour l'utilisation du module sédimentaire.

Cette première partie fait un état des lieux des différentes données qui étaient disponibles et celles qui ont dû nécessiter une campagne de terrain afin de compléter les premières. Dans un deuxième temps, les traitements appliqués à ces données sont détaillés.

Le but de l'ensemble de ces données est de créer 3 jeux de données :

- L'état initial qui correspond à l'état après-travaux (2018-2019)
- L'état intermédiaire qui correspond à l'état du site en 2020
- L'état actuel qui correspond à l'état du site en 2021. N'ayant aucune donnée pour cette année, une campagne terrain a été réalisée les 10 et 11 Mars afin d'obtenir les données topographiques, bathymétriques et granulométriques.

a. Données LiDAR (laser imaging detection and ranging) topographiques

Le LiDAR est un outil de télédétection qui utilise les propriétés du laser. En effet, le système émet une lumière infrarouge qui, au contact du sol, renvoie un écho à l'appareil. Chaque seconde, le système LiDAR prend des millions de points de mesures. A partir du temps d'envoi et du temps de réception de l'écho ainsi que la vitesse de propagation des ondes infrarouges, il est possible de déterminer l'altitude. Ce laser émet de la lumière proche de l'infrarouge et cette longueur d'onde est absorbée par l'eau. Il n'y a donc pas d'échos de retour ce qui explique l'absence de points sur les zones en eau. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir de la bathymétrie dans ces zones.

Données LiDAR disponibles :

- 2018-2019 : Le LiDAR est complet sur toute la zone d'étude.
- 2020 : N'ayant pas de données LiDAR pour cette année, le choix a été fait d'utiliser le LiDAR de 2019 pour la création du modèle numérique de terrain de 2020.
- 2021 : une campagne LiDAR a été réalisée par l'entreprise AvionJaune. Cependant l'emprise de la campagne était plus petite que l'emprise du modèle 2D. Il a donc fallu compléter le modèle avec les données LiDAR de 2019 pour la berge droite du Vieux-Rhône ainsi que pour la berge amont gauche.

b. Données Bathymétriques

i. Données sur le Vieux-Rhône

Entre 2018 et 2021, une campagne bathymétrique sur le Vieux-Rhône et comprenant le secteur de l'étude a été réalisée en 2019 par la CNR. Cette campagne a donc été utilisée pour les trois états.

ii. Données sur la lône

Les données bathymétriques de la lône n'étant pas toutes complètes pour les différents états, des adaptations ont dû être opérées :

- 2018-2019 : Les données de l'état après-travaux ont été fournies par le bureau d'étude Géocart'eau. Il manquait, cependant, des profils en travers pour l'amont de la lône ainsi que pour l'aval. Pour l'aval, le choix a été fait d'utiliser les profils en travers de la bathymétrie de données de 2014. Pour l'amont, des profils bathymétriques ont été recréés à partir des profils bathymétriques de 2020 au même endroit.
- 2020 : Les données de l'état intermédiaire, fourni par le bureau d'étude Géocart'eau étaient complètes.
- 2021 : N'ayant pas de données pour cette année, une campagne bathymétrique de la lône a été réalisée lors de la campagne terrain du 10 et 11 mars, afin d'actualiser la bathymétrie de la lône de Banc-Rouge. Cette opération consiste à prendre des points d'altitudes sur des transects afin d'avoir un profil en travers du lit mineur de la lône. Pour faire ces relevés, l'équipe a utilisé : un GPS différentiel avec abonnement Orphéon.

c. Données hydrauliques

Pour réaliser les simulations hydrauliques, il est nécessaire d'avoir des données de débit et de niveaux à imposer aux conditions aux limites du modèle.

Ces données sont extraites du modèle 1D de concession du bief de Caderousse réalisé sous le logiciel Fudaa-Crue développé par CNR. Ce modèle, mis à jour en 2021, comprend le Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon et son champ majeur avec la plaine d'inondation en rive gauche, le canal de fuite de l'usine de Bollène, la retenue de Caderousse et le canal d'amenée de l'usine de Caderousse.

Les débits :

Le site d'étude étant situé dans le lit majeur rive gauche du Vieux-Rhône, à partir d'un certain débit, le débit entrant dans le Vieux-Rhône (au barrage de Donzère) est écrêté dans la plaine d'inondation, engendrant une différence de débit entre le barrage de Donzère et la frontière liquide amont du modèle 2D.

C'est ce que montre le graphique suivant :

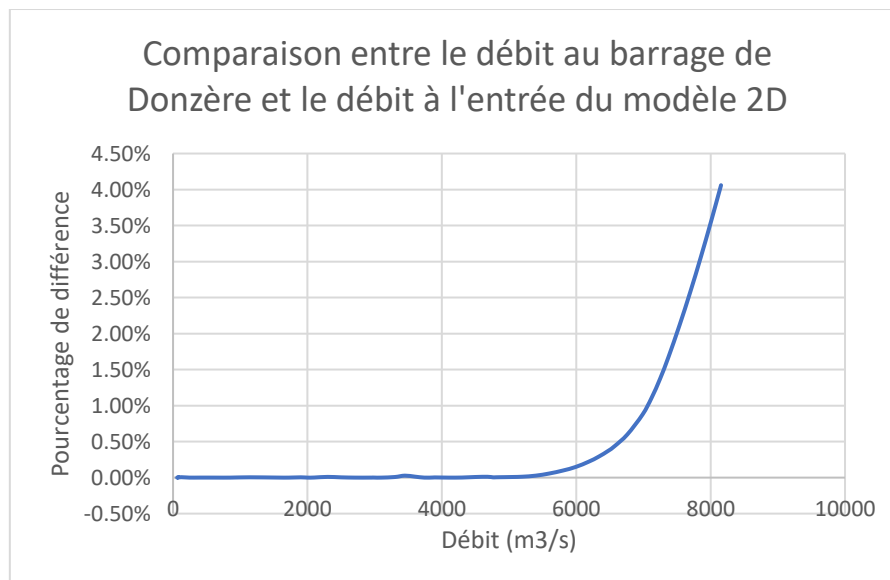


Figure 3 : Graphique présentant la comparaison entre le débit au barrage de Donzère et le débit à l'entrée du modèle 2D

Jusqu'à 5500-6000 m³/s, les débits donnés par le modèle 1D à la frontière liquide amont du modèle 2D sont similaires (<1% de différence) aux débits du barrage de Donzère. Les simulations à réaliser visant à explorer des débits allant jusqu'à environ Q10 (4860 m³/s), l'emprise du modèle est bien compatible avec la gamme de débits à étudier.

Deux stations sur le Vieux-Rhône après le barrage de Donzère propose un débit moyen horaire référent : la station de Saint-Montan et la station de Bourg-Saint-Andéol.

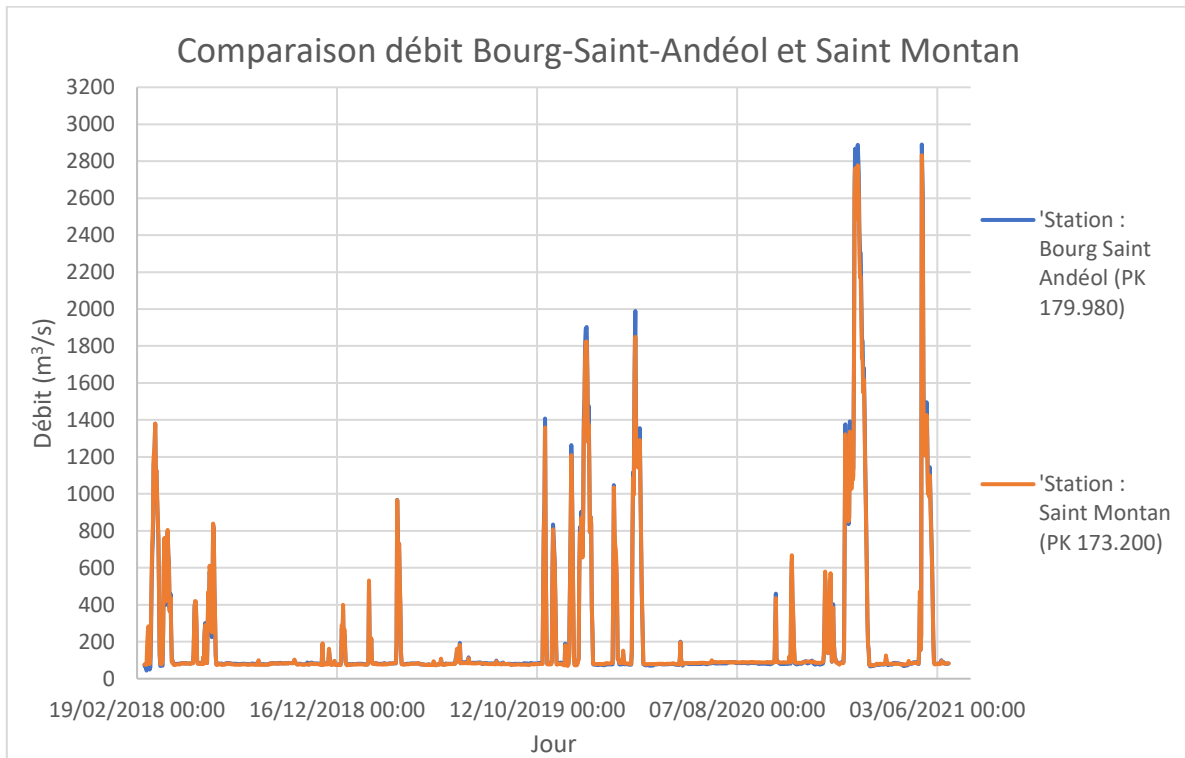


Figure 4 : Graphique de comparaison des débits entre la station de Bourg-Saint-Andéol et Saint-Montan

La courbe du débit de la station de Bourg-Saint-Andéol dépasse pour chaque crue le débit estimé à Saint-Montan d'une centaine de m³/s.

L'étude du CACOH (laboratoire de la CNR) portant sur la cohérence des débits aux stations hydrométriques indique que la station de Bourg-Saint-Andéol a tendance à surestimer les débits par rapport à la station de Saint-Montan. La station retenue pour les données de débit est donc celle de Saint-Montan.

Les niveaux d'eau :

Les niveaux d'eau et de débits ont été extraits au profil 187.1 du modèle 1D correspondant à la frontière liquide aval du modèle 2D, permettant de constituer la loi Z(Q) suivante :

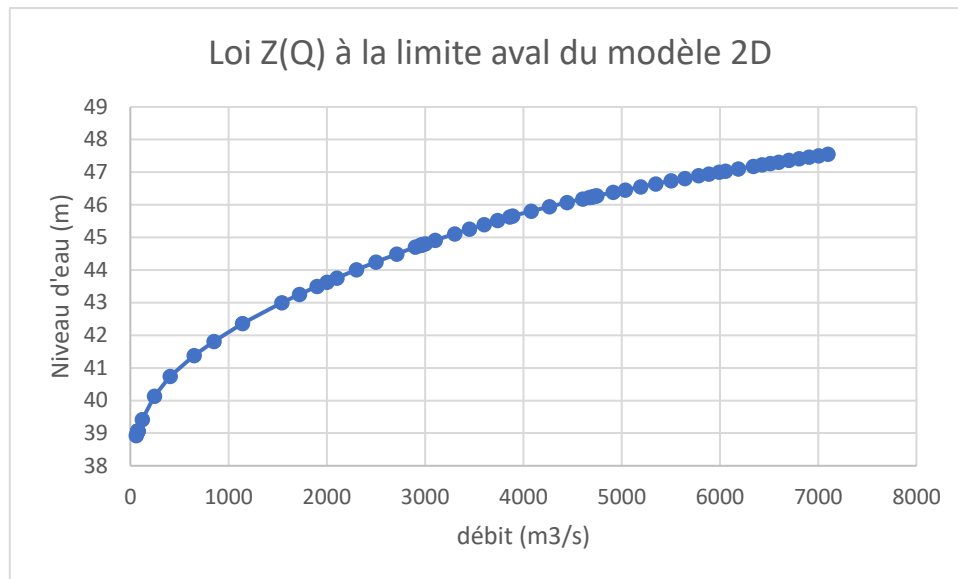


Figure 5: Loi $Z(Q)$ à la frontière aval du modèle 2D

Cette loi $Z(Q)$ a été comparée à des données de crues observées à la limite aval du modèle 2D. Les niveaux d'eau observés lors d'épisodes de crues sont proches des niveaux d'eau fournis par la loi $Z(Q)$ (Figure 6).

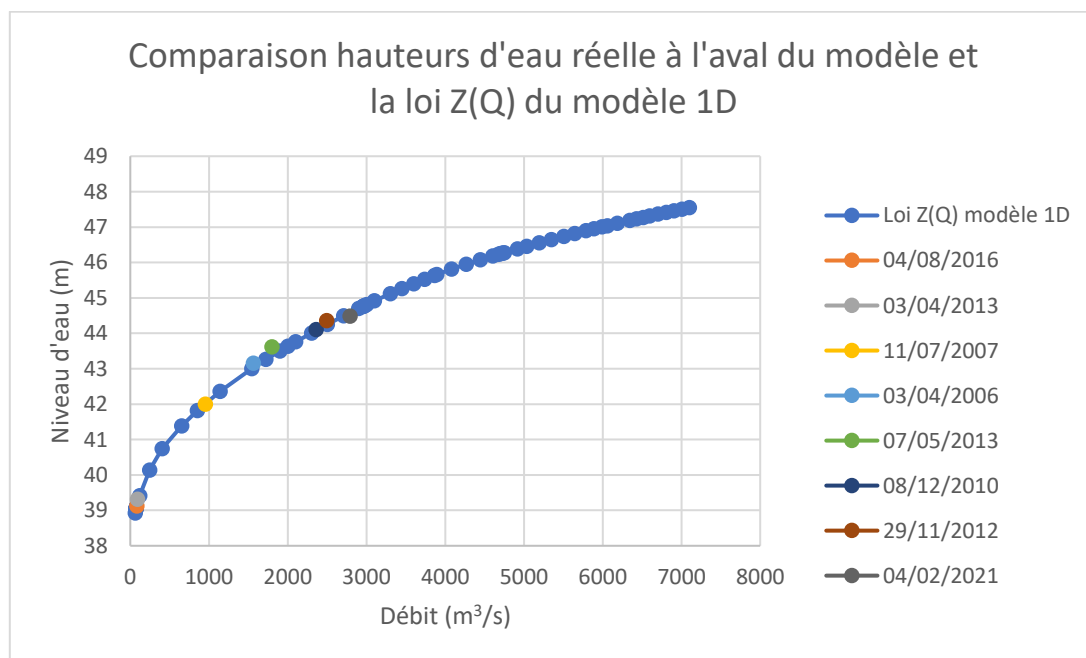


Figure 6 : Graphique de comparaison de valeur Z de crues réelles et la loi $Z(Q)$

La loi $Z(Q)$ du modèle 1D est cohérente avec les observations et est retenue pour les simulations.

d. Données sédimentaires

Les données granulométriques nécessaires au fonctionnement du module sédimentaire ont été récupérées lors de la campagne terrain de mars 2021. Deux types de granulométrie ont été réalisées :

- La méthode de Wolman a été utilisée pour les relevés granulométriques sur les bancs exondés possédant une granulométrie plus grossière. C'est une méthode granulométrique de surface.

Elle consiste à échantillonner une centaine de sédiments en mesurant la taille de l'axe b du sédiment. L'intervalle entre chaque sédiment est de deux fois la taille de l'axe b du plus gros sédiment présent dans la zone d'étude. Une fois les 100 sédiments récupérés, il est possible de calculer différents indicateurs granulométriques comme le D_{50} . Pour cette campagne, la mesure de l'axe b s'est faite avec des pieds à coulisses.

- Une granulométrie par caméra-vidéo pour le lit mineur de la lône qui est en eau.

L'ensemble des données granulométriques serviront à définir les diamètres de sédiments à utiliser dans le modèle hydro-sédimentaire.

II. Traitement des données et analyse

Les différents jeux de données ont pour but de générer un TIN pour chaque état avec Arcmap. Ces TIN pourront être comparés spatialement les uns avec les autres afin de voir l'évolution topographique et bathymétrique réelle entre les différents états.

a. Données LiDAR

Du fait du nombre conséquent de points dont les fichiers LiDAR (.las) sont composés, un pré-traitement sur ces fichiers est appliqué avec le logiciel CleverExtract. Le facteur de comparaison choisi ici est l'altitude car dans cette étude la topographie est très importante. En effet, étudiant les érosions et dépôts de sédiments au niveau des berges de la lône, il faut une grande précision dans les zones de pente. Les zones planes demandent moins de précision. Ce logiciel permet donc d'alléger le champ de points sur les zones planes en fonction du deltaZ choisi. Son fonctionnement consiste à comparer l'altitude (Z) d'un point aux points qui sont à côté de lui. Si le deltaZ est supérieur à celui demandé alors le point est conservé. Si le deltaZ est inférieur à celui demandé, alors le point est supprimé. Cette manipulation permet de réduire le nombre de points dans les fichiers LiDAR, permettant un traitement plus rapide sur les logiciels de cartographie. Dans le cas de cette étude, après le test de plusieurs valeurs de deltaZ, le choix s'est porté sur un deltaZ de 10 centimètres. Cette valeur est un bon compromis pour garder une bonne précision au niveau des pentes.

b. Données bathymétriques du Vieux-Rhône

Le traitement des données bathymétriques du Vieux-Rhône se réalise en plusieurs étapes :

- 1) Importation des données bathymétriques de « Bathy » (base de données CNR) dans Arcmap grâce à l'extension géoGAMA
- 2) Sélection des profils en travers dans le site d'étude
- 3) Importation des profils et d'un axe hydraulique dans le mailleur « Tatooine Mesher »
- 4) Interpolation et génération d'un semis de points
- 5) Ajout des semis bathymétriques aux MNT

Un contrôle du semis de points est cependant nécessaire afin d'éviter les éventuels problèmes d'interpolation. Des lignes de contrainte peuvent s'avérer nécessaires pour améliorer l'interpolation au moment de la génération du semis de points.

c. Données bathymétriques de la lône

Le traitement de la donnée bathymétrique de la lône a été sensiblement le même que pour les données bathymétriques du Vieux-Rhône. En effet, les données à disposition pour les différents états

étaient, soit des nuages de points en transect avec la donnée altimétrique, soit des lignes en transect possédant aussi la donnée altimétrique. Pour une simplification de l'utilisation de Tatooine Mesher, tous les jeux de données ont été mis sous forme de polyligne. Le passage de points vers ligne s'est réalisé de la façon suivante :

- 1) Création d'un TIN avec tous les points
- 2) Création de polygones, toujours dans le même sens (gauche vers droite ou inversement) car Tatooine Mesher prend en compte le sens de construction des polygones dans l'interpolation
- 3) Interpolation des données altimétriques du TIN pour les polygones.

L'étape suivante consistait à réaliser le nuage de points bathymétriques à l'aide du logiciel Tatooine Mesher en ajoutant des lignes de contraintes afin d'éviter les problèmes d'interpolation de berge à berge.

d. Création des MNT

Avant de générer les TIN, il faut épurer les différents fichiers de points pour éviter d'avoir pour une même zone plusieurs sources de fichier forme.

Le choix a été fait de réaliser des TIN (Triangulated irregular network) qui est une forme de données géographiques numériques vectorielles. Les TIN sont réalisés avec l'outil « Créer un TIN » de Arcmap. Il faut lui spécifier tous les fichiers de points ainsi que le polygone délimitant le périmètre du modèle. Ce processus a été utilisé pour la création des 3 TIN. Cela donne des résultats comme la Figure 8.

e. Comparaison des différents TIN

Afin de voir l'évolution de la topographie entre 2018 et 2021, les TIN de l'état initial et de l'état actuel ont été comparés. Pour cela, l'outil « Différence de surface » (Outils 3D Analyst -> Surface Triangulée -> Différence de surface) a été utilisé. Cet outil proposé par ArcGis permet de soustraire l'altitude d'un TIN choisi à un TIN de référence. Cet outil produit une carte en sortie donnant les volumes d'érosion et de sédimentation. Avec l'ajout de « l'option TIN », l'outil peut fournir un nouveau TIN représentant la différence d'altitude entre les deux TIN en entrée (Figure 8).

L'état intermédiaire (2020) fait partie des perspectives pour la suite. En effet, cet état peut être utilisé pour travailler à une échelle de temps plus restreinte (2018-2020 ou 2020-2021). Mais peut aussi être une source de comparaison supplémentaire pour valider les hypothèses qui seront élaborées

f. Sectorisation de la zone d'étude

Différentes zones ont été délimitées afin d'aider et de simplifier l'analyse des données :

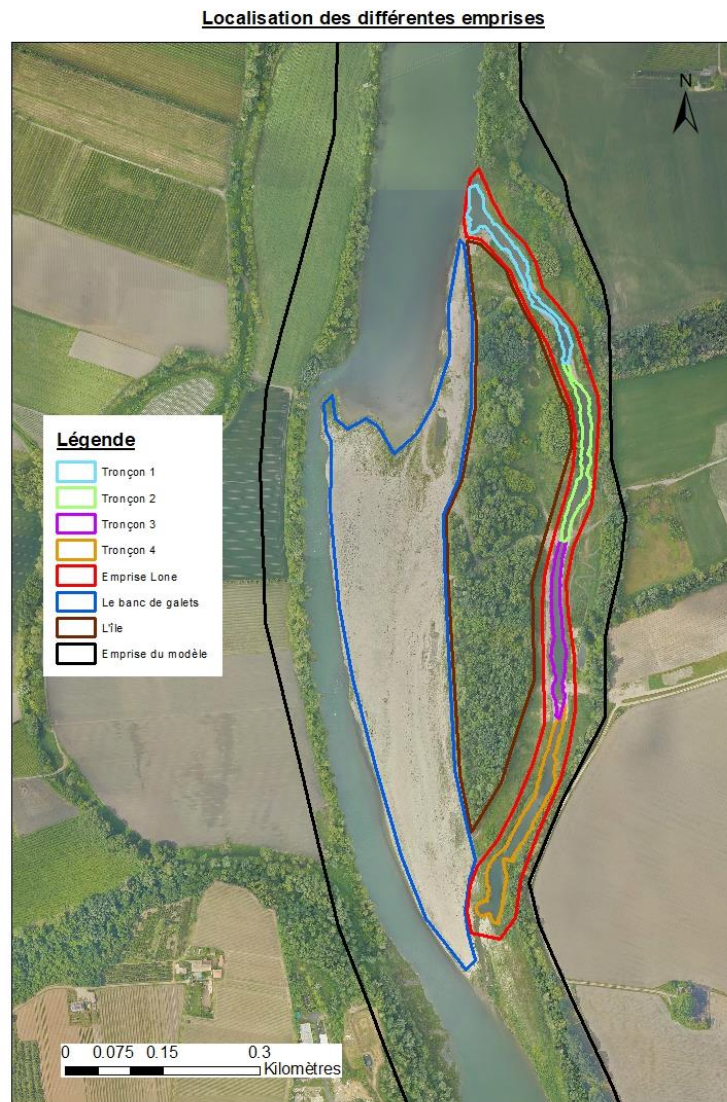


Figure 7: Carte présentant la localisation des différentes emprises

A noter que le rassemblement de l'emprise des 4 tronçons donne l'emprise du lit mineur de la lône.

g. Analyse de l'évolution du site d'étude entre 2017-2021

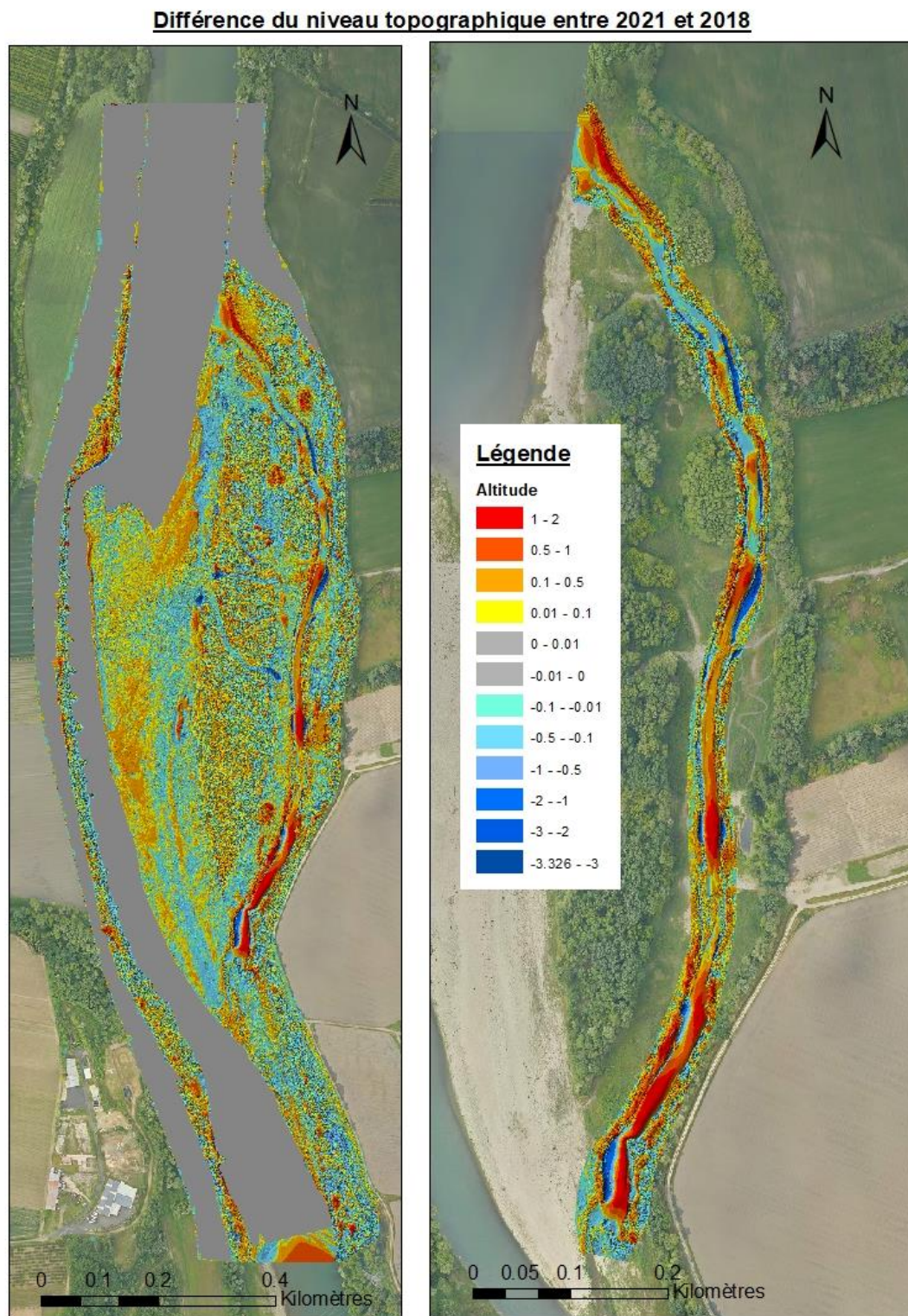


Figure 8: Carte de l'évolution topographique réelle du site d'étude entre 2018 et 2021

A partir de la Figure 8, à l'échelle du site d'étude, la tendance sur la période 2018-2021 est plutôt au dépôt. Les zones concernées par ces dépôts sont sur le banc de galets le long du Vieux-Rhône, l'île et le lit mineur de la lône.

Des érosions sont constatées au niveau des berges de la lône, ce qui est possiblement un signe du début d'un processus de méandrage de celle-ci.

Les zones grises sont des zones avec une absence de changement morphologique. Cela s'explique par le fait que la bathymétrie du Vieux-Rhône pour les deux jeux de données est la même. De même pour la berge rive droite du Vieux-Rhône ainsi que pour la berge amont rive gauche du Vieux-Rhône.

Trois profils en long sur le lit mineur de la lône et sur chacune des berges ont été construits afin de voir l'évolution entre 2018 et 2021 (Figure 9).

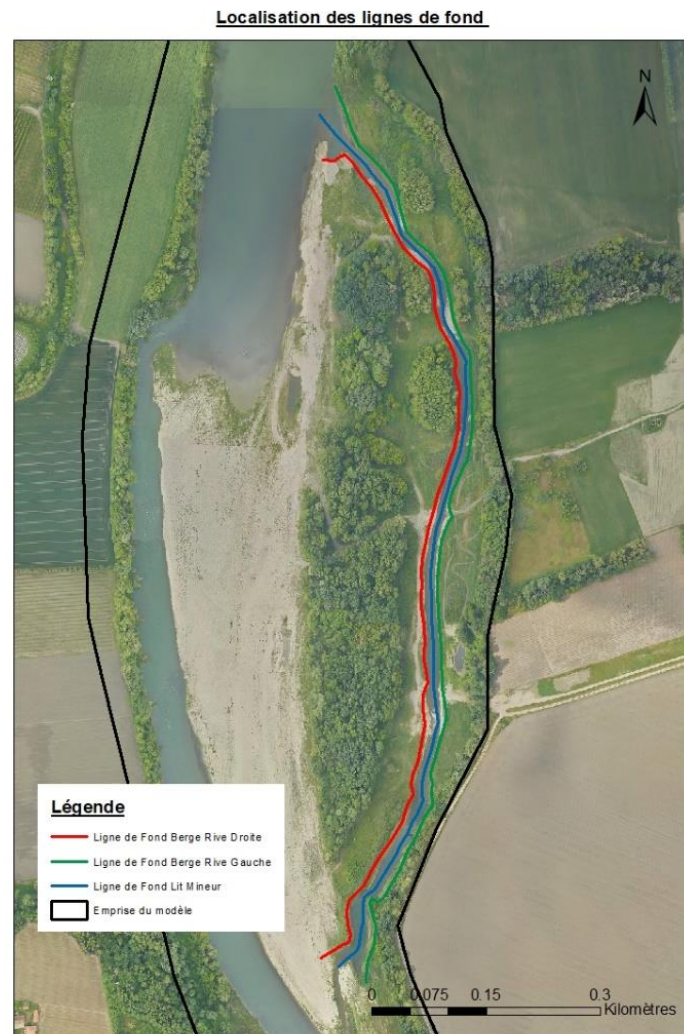


Figure 9: Carte de localisation des lignes de fond

L'évolution de la ligne de fond ainsi que de la topographie de la berge en rive droite et gauche (Figure 10, Figure 11 et Figure 12) permet d'appuyer les remarques faites à partir de la Figure 8.

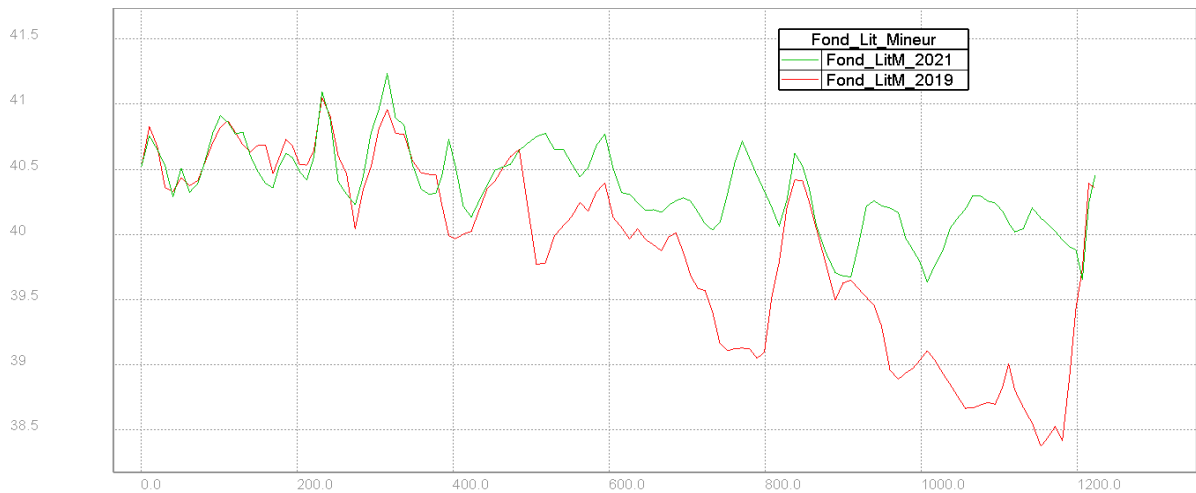


Figure 10 : Représentation graphique de la ligne de fond du lit mineur de la lône

Un fort dépôt de sédiment est observable sur la ligne de fond de la lône entre 2018 et 2021 au niveau du milieu et de l'aval de la lône (Figure 10). Cependant, ce résultat est sans doute biaisé par la qualité des données bathymétriques de l'état initial (2018-2019). En effet, comme énoncé dans le chapitre des données (cf Matériel et méthode.I.b.ii), la bathymétrie de la lône était incomplète pour une partie de l'amont et l'aval de la lône. Les données de remplacement pour l'aval dataient de 2014. Cela peut expliquer un si grand dépôt de sédiment à cet endroit.

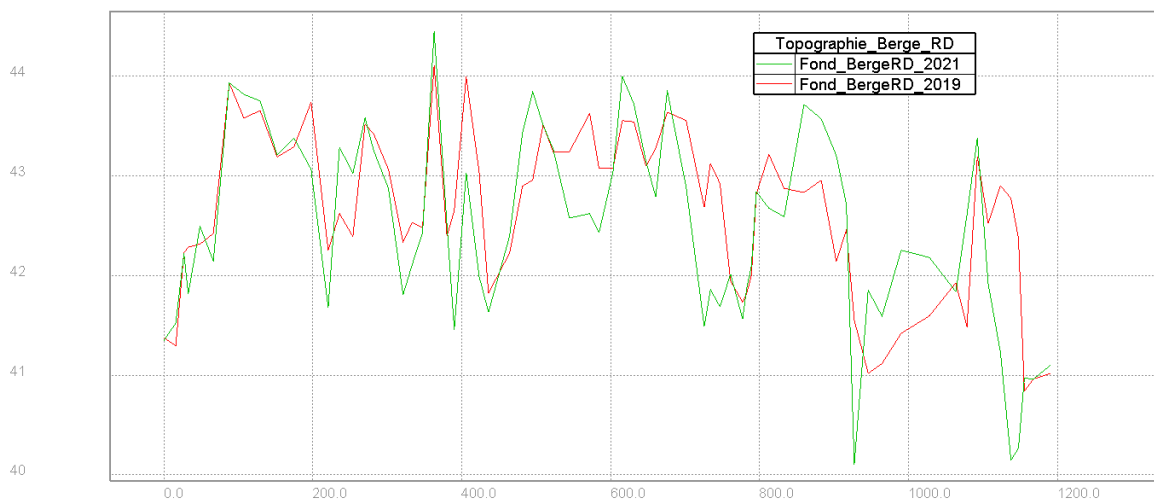


Figure 11 : Représentation graphique de la ligne de fond de berge rive droite de la lône

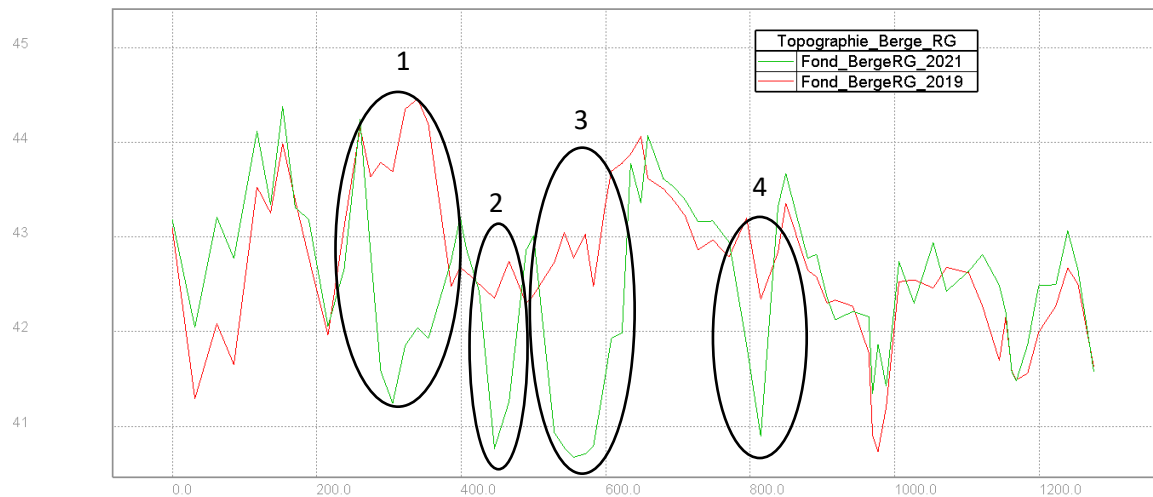


Figure 12 : Représentation graphique de la ligne de fond de berge rive gauche de la lône

Les berges de la rive gauche et de la rive droite présentent une alternance d'érosion et de sédimentation. Mais, les érosions sont plus importantes sur la berge en rive gauche comme le témoigne le linéaire de 200 à 400 mètres de l'amont.

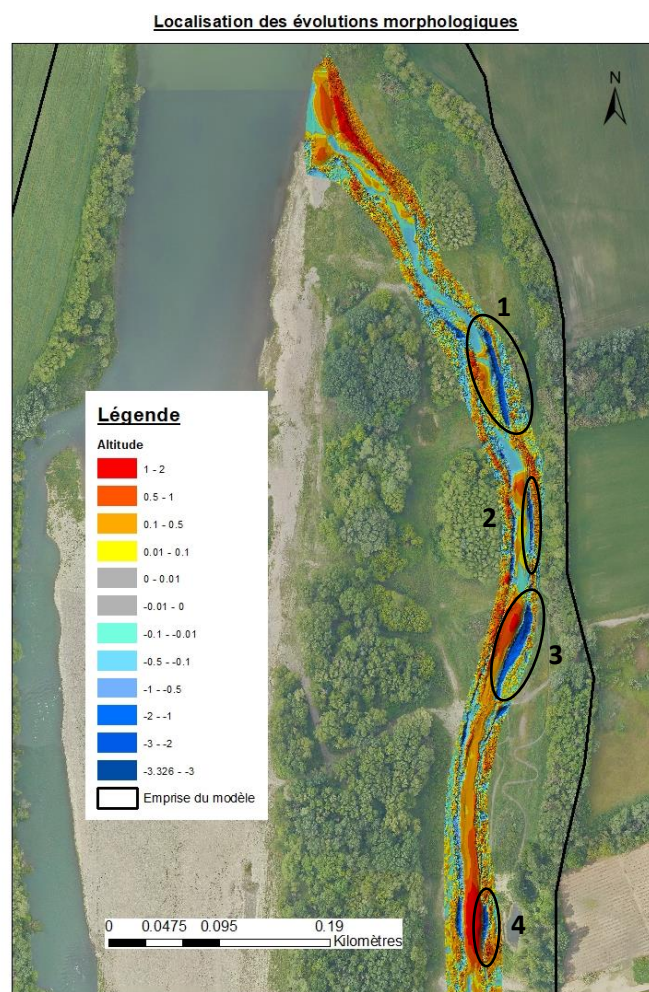


Figure 13 : Carte de l'évolution morphologique de l'amont de la lône entre 2018 et 2021

En terme de bilan sédimentaire, sur l'ensemble de la zone d'étude, il y a plus de sédimentation que d'érosion. La même tendance est observable pour la lône. Les dépôts de sédiments ne sont donc pas juste dû aux déplacements des sédiments érodés mais aussi par l'apport à l'amont de sédiments plus fin dans le Vieux-Rhône. Ceci est visible par la couche de sable présent sur l'île.

Tableau 1: Tableau de l'évolution sédimentaire à partir du TIN

Evolution sédimentaire TIN entre 2018 et 2021		
Emprise modèle	Erosion (m ³)	32152
	Sédimentation (m ³)	46099
Emprise lône	Erosion (m ³)	6757
	Sédimentation (m ³)	14280

h. Analyse des données granulométriques

En ce qui concerne la granulométrie, deux jeux de données ont été obtenus :

- L'un concernant les différents dépôts de galets et radiers réalisés au Wolman (ligne verte sur la Figure 14)
- L'autre concernant les relevés dans le lit mineur avec la caméra (les points vers sur la Figure 14)

Localisation des différents relevés granulométriques

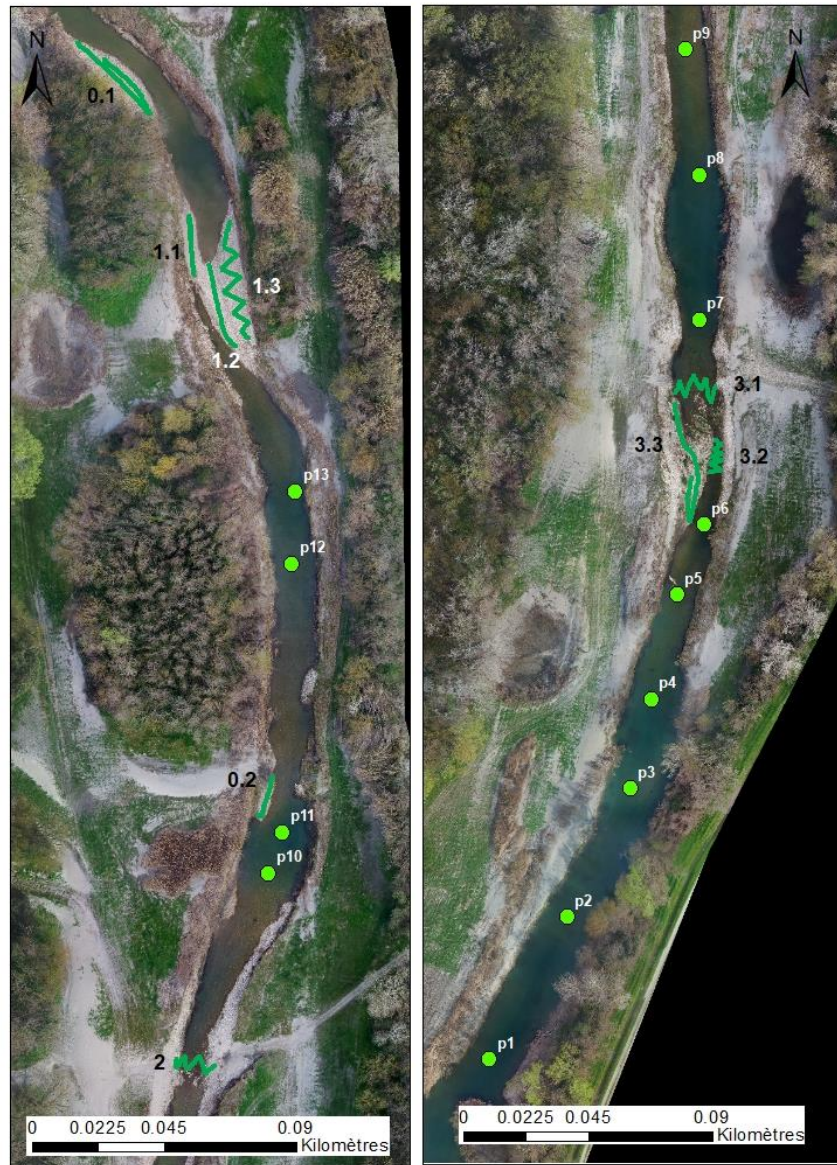


Figure 14: Carte de localisation des relevés granulométriques (Gauche : Amont / Droite : Aval)

Ces différents relevés ont donné les données suivantes :

Tableau 2 : Tableau des résultats de la granulométrie de Wolman

Granulométrie des dépôts de galets et radiers			
Station	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)
0.1	36	71	107
0.2	15	27	54
1.1	14	26	40
1.2	29	50	76
1.3	32	66	99
2	26	57	103
3.1	28	54	104
3.2	26	52	104
3.3	24	49	107
Moyenne	26	50	88

Le diamètre moyen des zones exondées et des radiers est assez grossier. En effet, sur l'ensemble des relevés, la moyenne du D50 est de 50 millimètres.

Tableau 3 : Tableau des résultats de la granulométrie par caméra du lit mineur

Granulométrie du lit mineur			
Station	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)
p13	12.17	21.58	37.31
p12	11.33	21.85	49.51
p11	10.15	16.1	27.8
p10	12.39	20.6	36.53
p9	9.78	14.45	23.92
p8	10.33	15.55	24.12
p7	10.55	17.65	34.62
p6	11.2	21.5	46.39
p5	11.5	19.39	32.95
p4	10.57	15.66	28.29
p3	11.93	20.39	32.72
p2	11.91	19.81	31.1
p1	10.79	16.69	25.81
Moyenne	11.12	18.56	33.16

Les relevés granulométriques du lit mineur montrent une granulométrie plus fine par rapport aux dépôts exondés. En effet, le D50 moyen est de 18.56 millimètres, ce qui plus de deux fois moins grand que le D50 moyen des dépôts exondés. De plus, une certaine décroissance de la granulométrie est visible entre l'amont et l'aval de la lône. Cependant, la différence entre le D50 le plus bas et celui le plus haut reste faible. Ceux-ci sont de la même classe granulométrique : Cailloux fin (Malavoi et Souchon 1989).

Cette granulométrie homogène permet de choisir un D50 unique pour l'entièreté du lit mineur. Les dépôts proches des berges montrent une granulométrie plus grossière indiquant que ces berges doivent contenir le même genre de sédiments. Il serait donc intéressant de travailler pour le lit mineur en charriage avec ce D50 unique et de modifier le D50 pour les berges.

De grand dépôts de sables sont visibles sur les berges ainsi que sur l'île. Une autre piste serait de comprendre comment ils sont déposés sur ces zones. Un déplacement par suspension serait plutôt à privilégier du fait que le D50 du sable est aux alentours de 400 μm .

i. Conclusion

L'analyse de l'évolution des fonds constatées entre 2018 et 2021 montre des dynamiques d'érosions et de dépôts sur l'ensemble du site d'étude. Les érosions sont principalement présentes au niveau des berges de la lône. La sédimentation se réalise sur les zones exondées (l'île, le banc de galet, le lit majeur) mais aussi dans le lit mineur de la lône. A partir de ces informations et de la granulométrie disponible, plusieurs simulations peuvent être envisagées :

- Une simulation par charriage avec un D_{50} unique correspondant aux sédiments du lit mineur de la lône
- Une simulation par charriage avec plusieurs D_{50} pour prendre en compte les sédiments plus grossiers de la berge
- Une simulation par suspension pour étudier les dépôts de sable

III. Modélisation sous Télémac 2D

a. Principe général de Télémac 2D

La modélisation hydraulique permet d'appliquer les équations utilisées en hydraulique fluviale pour des cas opérationnels complexes. Il existe différents types de modèles hydrauliques (1D, 2D et 3D) qui permettent de répondre à différents cas de figure. Chaque type de modèle a ses avantages et ses inconvénients. Ils ne conviennent pas tous à chaque cas, certains sont plus demandeur en quantité de données et en temps de calcul. Il est donc important de savoir les objectifs du modèle avant de choisir le type de modèle à appliquer. Dans cette étude, le choix s'est porté sur un modèle 2D en utilisant TELEMAC 2D. Ce logiciel, développé par LNHE du service Recherche et Développement de EDF, permet de modéliser des écoulements bidimensionnels avec les équations de Barré de Saint-Venant. De plus, ce logiciel présente un couplage avec un module sédimentaire (Sisyphe) permettant de modéliser les évolutions morphologiques. La modélisation 2D repose sur un maillage représentant la topographie de la zone à étudier. Ce maillage est composé de nœuds reliés entre eux par des triangles.

La v7p2 de Telemac sera utilisé pour les différentes simulations.

b. Création du modèle

La réalisation du modèle suit les étapes suivantes :

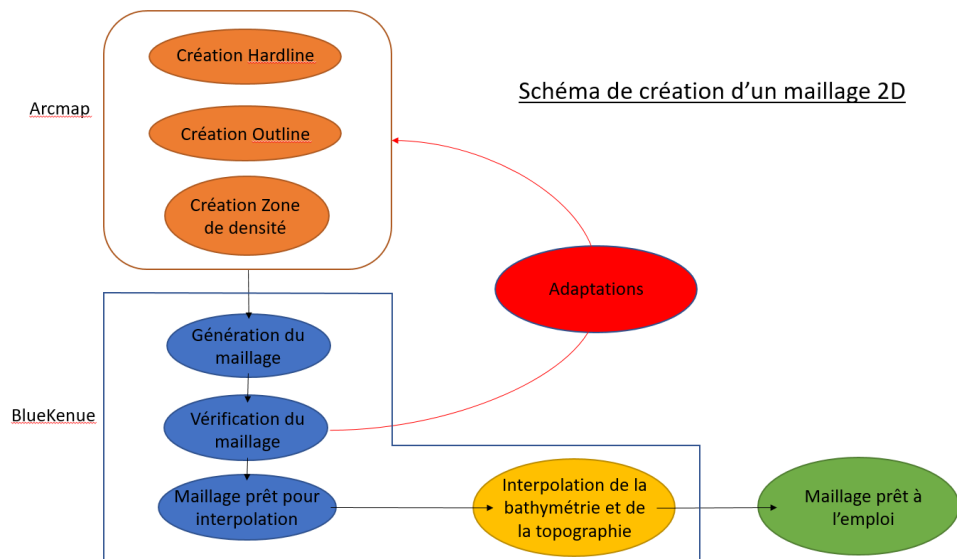


Figure 15: Schéma de création d'un maillage 2D

Définitions des 3 types de données d'entrées :

- Hardlines : correspondent aux lignes de contraintes, elles permettent d'obliger le mailleur à créer des nœuds à chaque point des points de ces lignes
- Outline : correspond au contour définissant l'emprise du maillage
- Zone de densité : la zone de densité permet de définir une densité de nœuds dans les zones sélectionnées.

Il est important de bien dimensionner son maillage que ce soit dans l'aspect des mailles (pas de nœuds en étoiles peuvent poser des problèmes de stabilité ou ralentir les calculs) ou bien sur le nombre nœuds. En effet, un nombre trop important de nœuds entrainera un temps de calcul important. Il est donc préférable de mailler de façon différente en fonction des zones d'intérêt et des critères recherchés. Par exemple, une érosion de berge demande une précision importante afin de voir l'avancement de l'érosion. Le maillage devra donc être très précis à cet endroit. Inversement, une zone avec une faible pente et qui reste plate ne demandera pas une très grande précision. Il faut donc une bonne connaissance des données à disposition et des objectifs recherchés dans l'étude avant de générer son maillage.

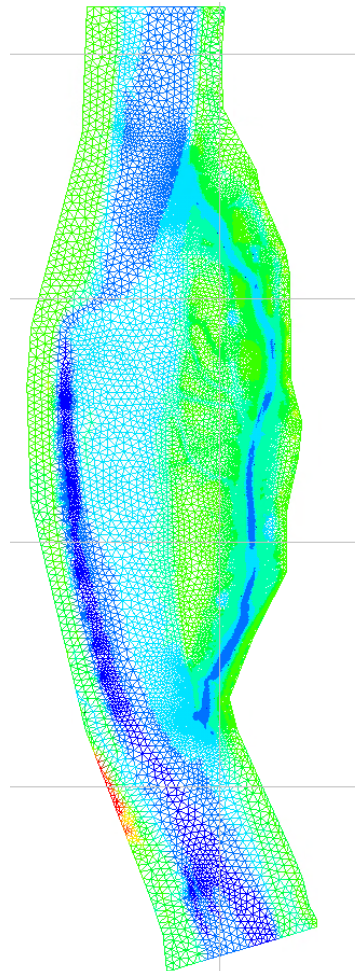


Figure 16: Maillage final du site d'étude sous BlueKenue

c. Comparaison de l'évolution sédimentaire entre le TIN et le maillage

Lors de la création du maillage, la précision du modèle de terrain est diminuée par les différents choix de taille de maille pour l'optimisation du temps de calcul.

Tableau 4: Tableau de comparaison de l'évolution sédimentaire entre le TIN et le maillage

Comparaison des évolutions sédimentaire entre le TIN et le maillage					
Volume en m ³		Evolution TIN	Evolution Maillage	Différence	Pourcentage
Emprise modèle	Erosion	32152	25530	-6622	-21%
	Sédimentation	46099	39510	-6589	-14%
Emprise lône	Erosion	6757	5918	-839	-12%
	Sédimentation	14280	13423	-857	-6%

La comparaison montre une diminution de 20% de l'érosion lors du passage au maillage ainsi qu'une diminution de 14% de la sédimentation sur l'ensemble du modèle. Au droit de la lône, la différence est plus faible mais reste significative : le passage au maillage induit une diminution de 12% de l'érosion et 6% de la sédimentation.

Cette différence en volume entre le TIN et le maillage est due aux choix de densité de maille au niveau du Vieux-Rhône, de l'île et du banc de galet pour la génération du maillage. Le choix du maillage plus fin au niveau de la lône, qui est la zone d'intérêt, permet de réduire cette différence.

Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations s'en devoir prendre en compte les différences entre le modèle TIN et le modèle maillage, tous les résultats sont exploités à partir du maillage.

Tableau 5: Tableau de l'évolution sédimentaire entre 2018 et 2021 dans le maillage pour les données observées

Volume en m3	Données observées	
	Erosion	Sédimentation
Total	25530	39510
Lône	5918	13423
Lit Mineur	1667	7057
Tronçon 1	276	620
Tronçon 2	529	772
Tronçon 3	71	1666
Tronçon 4	791	3987

d. Calage et simulations hydrodynamiques

Pour faire fonctionner un modèle hydraulique sur Telemac 2D, il y a 4 fichiers à fournir :

- Le fichier de commande (.cas) : ce fichier permet de définir les conditions et paramètres de modélisation
- Le fichier de Géométrie (.sif) : ce fichier correspond au maillage réalisé précédemment (ce maillage est interpolé avec les altitudes). Il peut également contenir d'autres variables nécessitant une spatialisation comme par exemple, le coefficient de frottement (distinction lit mineur, lit majeur, présence de végétation ou non...).

- Le fichier des conditions limites (.cli): ce fichier permet de définir les conditions d'entrées et de sorties de l'eau dans le modèle. En régime fluvial, un modèle est conditionné par un débit à l'amont du modèle et une hauteur d'eau à l'aval du modèle. C'est le cas pour cette étude.
- Le fichier des conditions liquides (.liq): ce fichier correspond aux valeurs de débit et de hauteur d'eau appliqués aux limites du modèle dans le temps.

Pour construire les fichiers liquides, on utilise la chronique de débit provenant de la station de Saint-Montan à laquelle on associe des côtes fournies par la loi $Z(Q)$.

Une fois tous ces fichiers réunis, il est possible de commencer la modélisation. Cependant, différentes étapes sont nécessaires avant de pouvoir exploiter le modèle :

i. L'initialisation

La première étape est de créer un état initial pour les simulations. Cette étape consiste à réaliser une simulation avec des conditions hydrauliques maintenues constantes afin d'obtenir un état stabilisé. Le dernier pas de temps de cette simulation est extrait. Il faut au minimum sortir la variable « hauteur d'eau » ou la variable « surface libre » et créer un nouveau fichier Selafin avec ces données. Ce fichier constitue alors les conditions initiales pour les futures simulations. Dans le fichier.cas, ce fichier est utilisé en activant le mot clé « Reprise de calculs ».

ii. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité peut porter sur différents paramètres numériques et physiques comme par exemple le pas de temps, le modèle de turbulence, le coefficient de diffusion des vitesses, le schéma pour la convection des vitesses ...

C'est le pas de temps qui va être analysé ici. On cherche la plage de convergence du modèle pour ce paramètre, c'est-à-dire à partir de quel pas de temps il n'y a plus ou peu de changement. En effet, le pas de temps peut avoir une influence sur les résultats obtenus, notamment sur les débits les plus forts. Il est donc conseillé de réaliser une même modélisation avec des pas de temps différents afin de voir s'il y a des différences ou non. Les différents pas de temps choisis sont : 1, 0.5, 0.2, 0.1 s. L'analyse est faite pour un débit proche de Q_{10} (rampe de débit depuis le débit réservé jusqu'à Q_{10} puis stabilisation).

Le modèle a planté pour les pas de temps à 0.2 et 0.1 s (passage en torrentiel sur la frontière liquide amont). La comparaison a donc été faite sur les pas de temps 1 et 0.5 s.

Pour ce faire, une sortie graphique toutes les heures a été choisie. Deux nœuds ont été sélectionnés sur le maillage, un en amont et l'autre au milieu de la zone d'étude dans le Vieux-Rhône. La comparaison est faite sur les niveaux d'eau obtenus en ces nœuds à la fin de la simulation. La comparaison est donnée sur le graphique suivant :

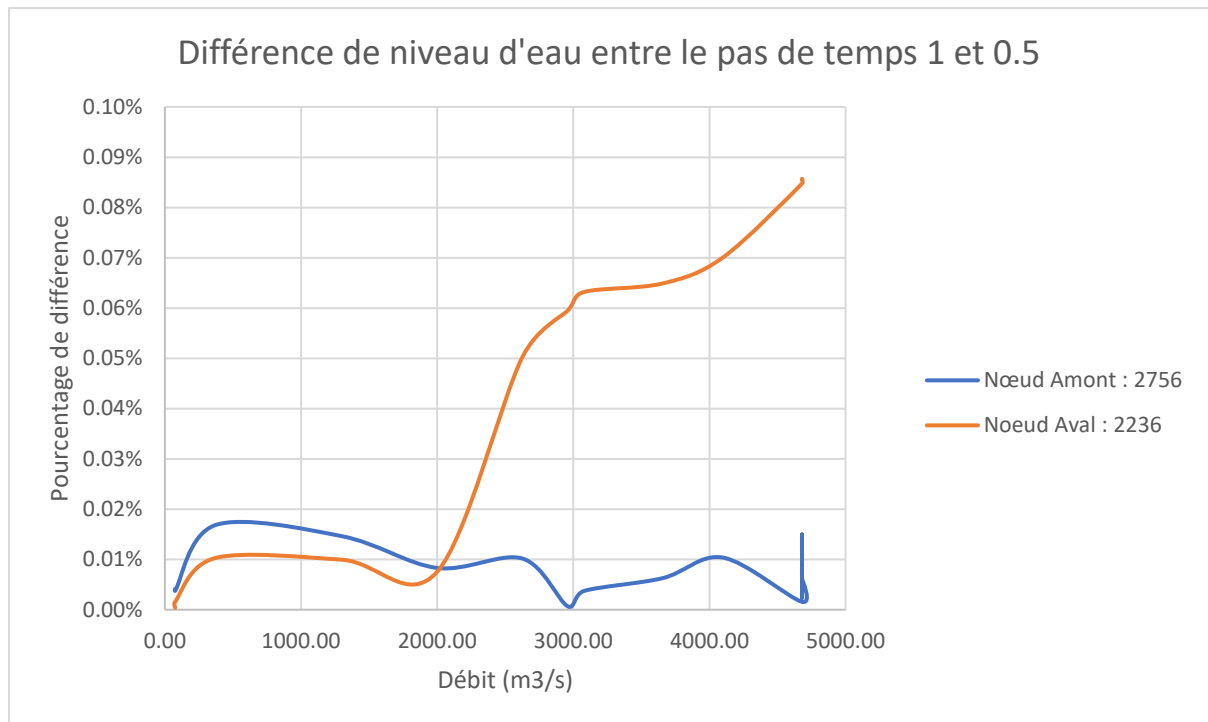


Figure 17 : Graphique de la différence de niveau d'eau entre le pas de temps 1 et 0.5

Le nœud amont est peu sensible à la variation du pas de temps. En revanche, pour le nœud aval, des différences apparaissent. Dans ce cas, le pas de temps privilégié est le pas de temps le plus faible qui permet également d'avoir un nombre de courant maximum proche de 1 (condition de *Courant-Friedrich-Levy*).

Certains schémas de convection des courants imposent cette condition de stabilité et d'autres non. Le schéma utilisé pour les simulations ne l'impose pas. Le nombre de courant peut être supérieur à 1 mais la qualité des résultats se dégrade si ce nombre dépasse 7 ou 8. Ce facteur doit donc autant que possible être inférieur à 1 pour avoir une modélisation optimale. Dans le cas de la modélisation avec un pas de temps à 1 s, le nombre de courant max atteint 2.3, alors qu'avec un pas de temps à 0.5 s, le nombre de courant max vaut 1.1. Le choix s'est donc porté sur un pas de temps de 0.5 s pour le reste des modélisations.

Les différents paramètres sélectionnés pour la suite des simulations :

- Pas de temps : 0.5 s
- Modèle de turbulence : viscosité constante
- Le coefficient de diffusion des vitesses : 0.005
- Le schéma pour la convection des vitesses : 14

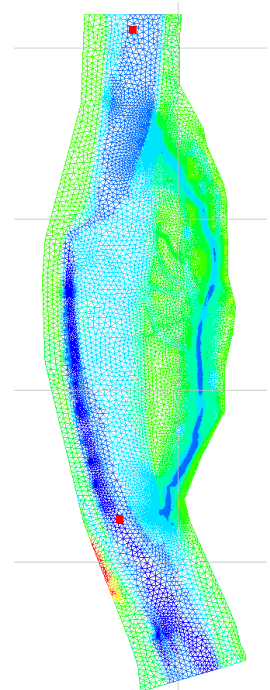


Figure 18: Carte de positionnement des nœuds observés

iii. *Le calage*

La troisième étape consiste à caler le modèle hydraulique. Cela consiste à ajuster les coefficients de frottements du modèle afin de retrouver les niveaux d'eau observés lors de crues.

Il existe plusieurs types de coefficient de frottement. Le coefficient retenu ici est le coefficient de Strickler :

Le coefficient de frottement du fond, avec la loi de Strickler, est calculé de la façon suivante :

$$C_f = \frac{2g}{h^{1/3} K_s^2}$$

C_f : coefficient de frottement du fond

h : hauteur d'eau (m)

K_s : coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$)

La contrainte totale au fond (en N/m^2), à partir de laquelle est calculée le transport de sédiments, dépend de ce coefficient de frottement :

$$\tau_b = 0.5\rho C_f (U^2 + V^2)$$

ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)

U, V : composantes de la vitesse

Pour réaliser le calage, il faut dans un premier temps, différentes données hydrauliques : un débit associé aux crues ainsi que des niveaux d'eau relevés lors de ces crues. Le débit associé aux niveaux d'eau est celui du barrage de Donzère. Les crues historiques ciblées ont eu lieu entre 2006 et 2021 (Tableau 6).

Tableau 6 : Tableau des débits des différentes crues historiques

Débit de crue historique	
Date	Brg Donzere (m3/s)
18/09/2019	86
04/08/2016	81
13/05/2014	93
03/04/2013	89
11/07/2007	950
03/04/2006	1560
07/05/2013	1798
08/12/2010	2360
29/11/2012	2491
04/02/2021	2790

Un régime quasi-permanent est utilisé à chaque crue afin d'obtenir des niveaux d'eau stables. Comme expliqué dans la partie sur les données hydrauliques (cf Matériel et Méthode.I.c) les débits au barrage de Donzère sont similaires au débit que l'on applique à l'entrée du modèle jusqu' 5500-6000 m³/s.

Les niveaux d'eau observés sont fournis grâce à des échelles limnimétriques placées le long du Vieux-Rhône. La carte ci-dessous montre le placement des différentes échelles utilisées sur le site d'étude. L'échelle du pk 185, bien qu'en dehors du modèle, sera utilisée pour qualifier l'amont du modèle.

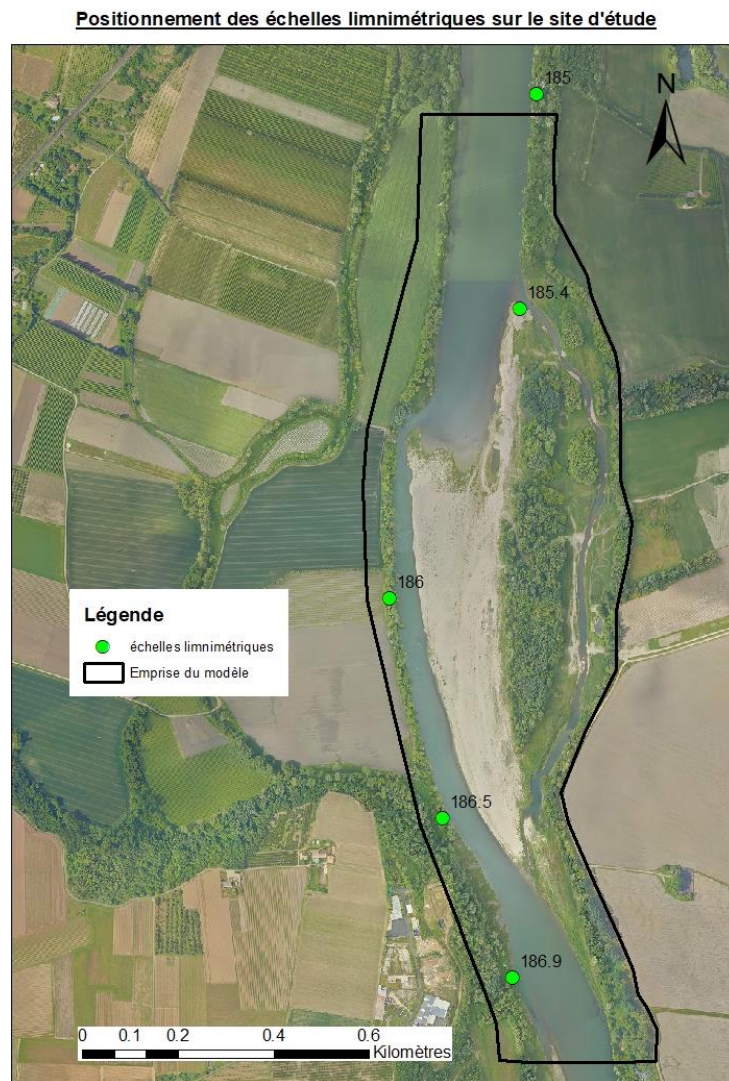


Figure 19 : Carte du positionnement des échelles limnimétriques sur le site d'étude

Pour le cas de Banc Rouge, dans un premier temps, plusieurs zones avec des coefficients de Strickler différents ont été définies :

- Lit mineur de la lône : coefficient à 33
- Lit majeur : coefficient à 30
- Zones boisées : coefficient à 15
- Le Vieux-Rhône : coefficient à 40
- Le banc de galet : coefficient à 35

Cependant, il y avait une différence de 10 à 20 cm pour une partie des données (Annexe 1). D'autres simulations ont été réalisées en modifiant le coefficient de Strickler pour le Vieux-Rhône et le banc de galet :

Tableau 7 : Tableau des différents choix de calage pour le coefficient de Strickler

Coefficient de Strickler				
Zone \ Fichier de Géométrie	V4	V5	V6	V7
Banc de Galet	30	32	32	33
Vieux-Rhône	35	33	32	33

Les variables statistiques utilisées pour déterminer le meilleur calage sont la moyenne absolue et la RMSE (erreur quadratique moyenne). Ce dernier indice permet de donner une indication sur la dispersion des valeurs de prédiction (valeurs modélisées) par rapport aux valeurs réelles.

Tableau 8 : Tableau des résultats de l'étude sur les différents coefficients de Strickler

	Débit	81	89	950	1560	1798	2360	2491	2790
V4	Moyenne	0.17	0.26	0.07	0.06	0.04	0.09	0.01	0.25
	RMSE	0.22	0.26	0.07	0.09	0.06	0.11	0.01	0.26
V5	Moyenne	0.19	0.26	0.04	0.05	0.05	0.13	0.02	0.27
	RMSE	0.23	0.26	0.05	0.08	0.06	0.14	0.02	0.28
V6	Moyenne	0.20	0.26	0.02	0.04	0.05	0.15	0.04	0.29
	RMSE	0.24	0.26	0.03	0.07	0.06	0.17	0.04	0.31
V7	Moyenne	0.19	0.26	0.05	0.06	0.04	0.12	0.01	0.25
	RMSE	0.23	0.26	0.05	0.09	0.06	0.13	0.01	0.27

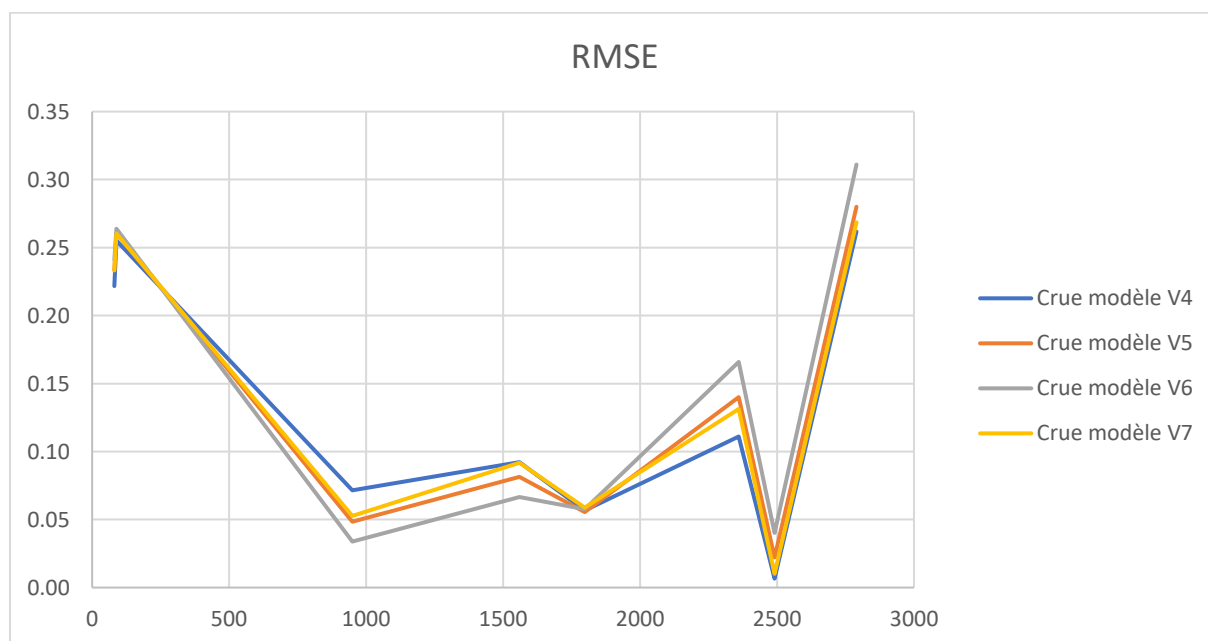


Figure 20 : Graphique des résultats RMSE entre les différents modèles

Le modèle est dans l'ensemble mieux calé pour les débits moyens, or c'est cette gamme de débits qui nous intéresse plus particulièrement pour le transport des sédiments. De manière générale, les

écarts restent compatibles avec les objectifs de l'étude, à savoir la simulation des évolutions morphologiques avec Sisyphe.

LA RSME est la meilleure (la plus faible) pour la version 4 du calage, c'est donc celle-ci qui est retenue pour la suite de l'étude.

Coefficients de Strickler retenus à l'issue de la phase de calage :

- Lit mineur de la lône : coefficient à 33
- Lit majeur : coefficient à 30
- Zones boisées : coefficient à 15
- Le Vieux-Rhône : coefficient à 35
- Le banc de galet : coefficient à 30

e. Calage et simulations hydro-sédimentaires

i. Hypothèses

Dans un premier temps, des choix ont dû être faits sur les processus sédimentaires à représenter. Le module Sisyphe propose différentes formules de transport sédimentaire. Certaines pour représenter le charriage, d'autres pour représenter le transport en suspension et enfin certaines dites totales qui représente le transport sédimentaire par charriage et par suspension. Ces dernières n'ont pas été retenues car pas adaptées à notre cas d'étude.

Pour ajouter le module sédimentaire, un nouveau fichier de commande propre à Sisyphe doit être créé contenant toutes les conditions et paramètres sédimentaires. Le fichier des conditions limites doit également être modifié afin de pouvoir laisser entrer les sédiments par la frontière amont et permettre sa sortie par la frontière aval.

Pour que l'érosion soit possible dans le modèle, il est nécessaire de spatialiser une épaisseur érodable. Il est possible de définir une épaisseur érodable globale au modèle. Il est également possible d'ajouter des modifications au code de Telemac et de Sisyphe en faisant appel à des sous-routines modifiées, contenues dans des fichiers « Fortran ». Ces fichiers permettent pour cette étude de définir des épaisseurs érodables différentes en fonction des zones. De cette manière, il est possible aussi d'empêcher l'érosion sur certaines zones. Pour ce faire, il faut utiliser la sous-routine « noerod » proposé par le module Sisyphe. Il faut ensuite créer une variable dans le fichier de géométrie (.slf), spatialiser les différentes zones d'érosions ou non et faire appel à cette nouvelle variable dans le fichier de commande (.cas).

A partir des différentes données granulométriques, il a été observé une granulométrie homogène dans le lit mineur de la lône, une granulométrie plus importante sur les berges et des dépôts de sables sur le lit majeur et l'île.

Comme précisé en conclusion de l'analyse des données, deux types de modélisation sont mises en œuvre :

- Modélisation du charriage pour reproduire les évolutions morphologiques dans la lône
- Modélisation de type suspension pour reproduire les dépôts de sable sur l'île

ii. Transport par charriage

Pour le charriage, le choix a été de travailler sur un diamètre moyen (D_{50}) de 18 mm sur l'ensemble du modèle. Cette valeur provient de la granulométrie par caméra réalisée sur le lit mineur de la lône. Cette valeur est une moyenne des différents échantillonnages réalisés sur l'ensemble de la lône.

Le choix de la formule de transport par charriage s'est porté sur la formule de Meyer-Peter Müller.

Un moyen d'exprimer la mise en mouvement d'une particule non cohésive est le nombre de Shields (1.1) qui compare la force de l'écoulement sur le grain au poids immergé de ce dernier :

$$\theta = \frac{V_{*cr}^2}{(s-1)gD_{50}} \quad (1.1)$$

$$D_* = D_{50} \left(\frac{(s-1)g}{V^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.2)$$

Le critère de mise en mouvement (θ_{cr}) est directement corrélé au diamètre adimensionnel (1.2) des grains :

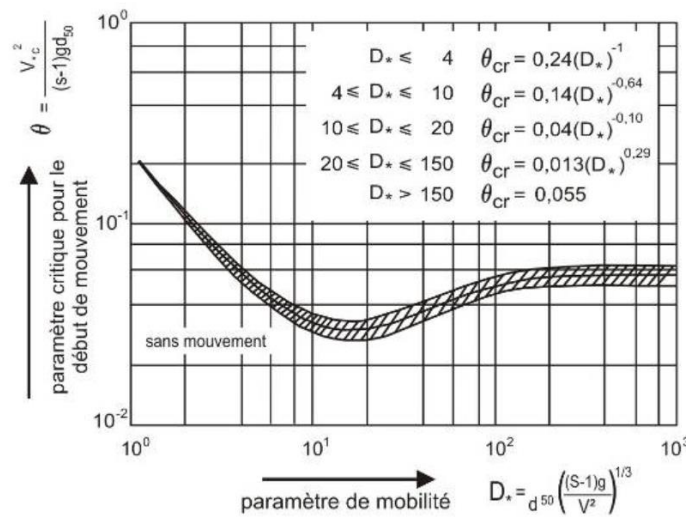


Figure 21: Diagramme de Shields

La loi de Meyer-Peter Müller énonce donc :

$$\text{Si } \theta < \theta_{cr} \text{ alors } \Phi_b = 0$$

$$\text{Sinon } \Phi_b = \alpha (\theta - \theta_{cr})^{3/2}$$

Avec Φ_b le taux adimensionnel de transport par charriage, α le coefficient de Meyer-Peter-Müller (Coefficient MPM). Cette formule permet de caractériser le transport sédimentaire avec des sédiments de taille moyenne (entre 0.4 et 29 millimètres).

Pour l'épaisseur de la couche érodable, le choix a été de rendre le modèle non-érodable sauf sur l'emprise de la lône. Une épaisseur érodable de 1m a été défini (les radiers et les ouvrages Girardons ont été rendus non érodable).

iii. Transport par suspension

Pour le transport des sables par suspension, le choix de la formule de transport solide s'est porté sur la formule de Van Rijn qui est adaptée pour les sables.

$$C_{eq} = 0.015 d_{50} \frac{(\theta' / \theta_{cr} - 1)^{3/2}}{z_{ref} D_*^{0.3}}$$

Avec θ_{cr} le paramètre critique de Shields et $\theta' = \mu\theta$ la contrainte de cisaillement due à la friction de peau. L'élévation de référence $Z_{ref} = 0.5 \cdot k_s$ avec k_s la rugosité totale.

Le diamètre moyen du sable pour la simulation est de 400 μm .

Il a été choisi de rendre le modèle entièrement non-érodable afin de se concentrer sur les dépôts de sable lors de la simulation.

iv. Les simulations

Les débits de la station de Saint-Montan ont été récupérés entre 2018 et 2021 à un pas de temps horaire. Après des tests de simulation de charriage, il a été observé une mise en mouvement des sédiments ($D_{50} = 18 \text{ mm}$) par charriage à un débit de 300 m^3/s . Ce débit seuil a été utilisé pour réduire l'hydrogramme et permettre de réduire le temps de calcul.

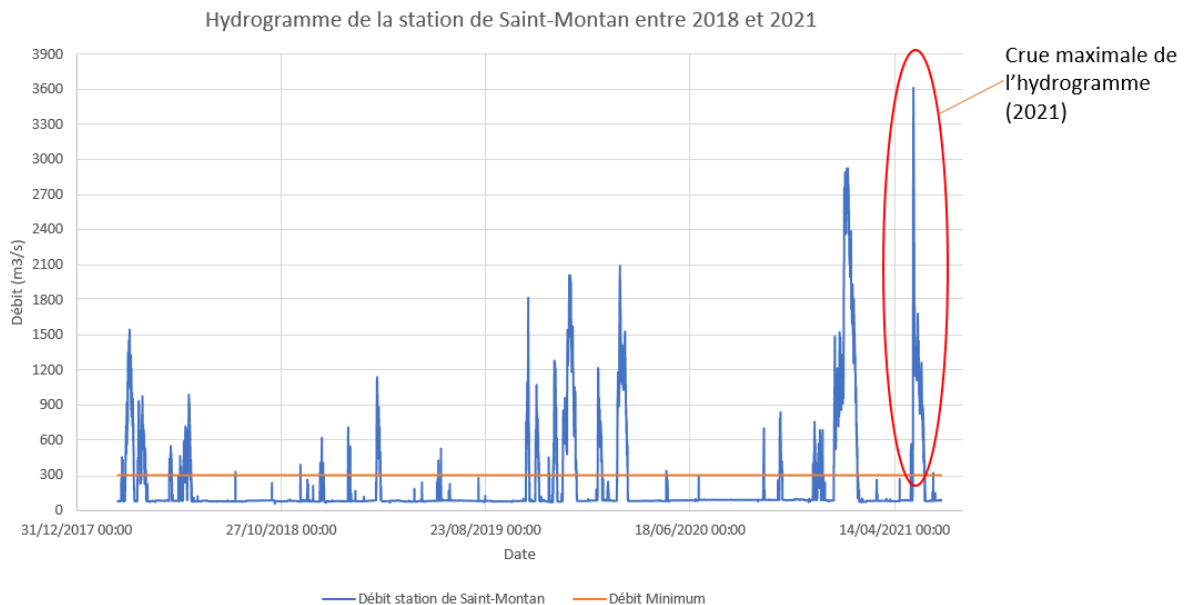


Figure 22: Hydrogramme de la station de Saint-Montan entre 2018 et 2021

A partir de ces données, deux types d'hydrogrammes ont été utilisés pour la réalisation des différentes simulations :

- Un hydrogramme complet prenant en compte les crues entre 2018 et 2021. Cet hydrogramme est utilisé pour évaluer les évolutions morphologiques sur la période 2018-2021 et les comparer aux observations.
- Un hydrogramme avec uniquement la crue ayant le débit de pointe le plus important sur la période 2018-2021 et donc susceptible de générer les évolutions morphologiques les plus

importantes dans la lône (Figure 22). Cet hydrogramme sert à tester les différents paramètres avec un temps réduit.

Différents tests ont été effectués :

- Analyse de la période de couplage entre Sisyphe et Telemac
- Modification du coefficient de Meyer-Peter Müller
- Modification du coefficient de frottement (Strickler)

f. [Exploitation du modèle hydro-sédimentaire](#)

Une fois la phase de calage sédimentaire terminée, le modèle est exploité pour étudier les cas suivants :

- 1) Evolution morphologique de la lône à long terme : simulation sur 25 ans et sur 50 ans à partir de l'hydrogramme des 25 dernières années
- 2) Test d'un autre projet de restauration de la lône : simulation en modifiant la bathymétrie du modèle après travaux pour voir si l'évolution de la lône aurait été différente

Résultats

I. Calage sédimentaire

a. Différence Couplage 1 et Couplage 10

La période de couplage pour Sisyphe peut être expliquée par le schéma suivant :

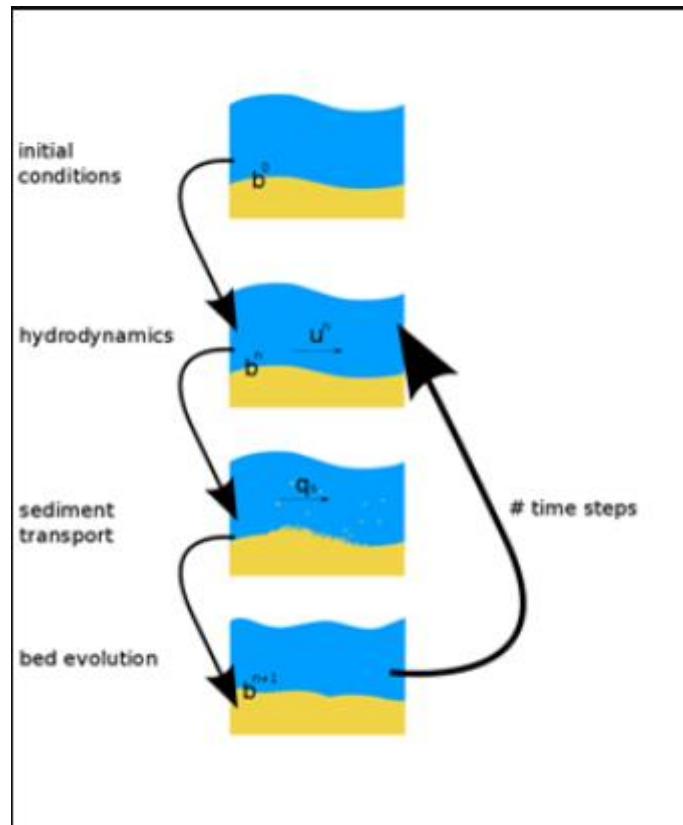


Figure 23: Couplage Telemac - Sisyphe (WikiCNR)

Il est possible de modifier ce pas de temps de couplage dans le fichier de commande (.cas) avec le mot clé « PERIODE DE COUPLAGE POUR SISYPHE ». Ce mot clé permet de modifier le nombre de communication entre Telemac et Sisyphe. La réduction de ces temps de communications et du nombre de calcul sédimentaire permet de gagner du temps sur les simulations. Ce paramètre a été testé uniquement avec l'hydrogramme de la crue maximale de 2021.

Dans notre cas, le passage en couplage à 10 permet un gain de temps de 34% (Tableau 9).

Tableau 9 : Tableau des résultats de la comparaison entre la période de couplage à 1 et à 10

Comparaison entre période de couplage à 1 et à 10					
Volume en m ³		C47 (Couplage 1)	C48 (Couplage 10)	Différence	Pourcentage de différence
Volume total	Erosion	6801.48	6782.23	19.25	0.28%
	Sédimentation	98614.23	98575.98	38.25	0.04%
Volume lit mineur	Erosion	312.93	312.56	0.38	0.12%
	Sédimentation	6075.66	6059.14	16.52	0.27%
Temps de calcul		7h 57min 10sec	5h 15min 54sec	2h 41min 16sec	33.80%

Le pourcentage de différence entre les deux simulations ne dépasse pas 0.30% pour l'ensemble des cas avec un gain de temps de 34%. Considérant que les différences ne sont pas significatives sur les résultats, et que les simulations prospectives seront longues, le choix s'est porté sur une période de couplage pour Sisyphe de 10 pour le reste des simulations.

b. Volumes finis ou éléments finis

La résolution par volumes finis et ou éléments finis sont deux façons différentes de traiter la résolution des équations de conservation de masse pour l'évolution des fonds, l'équation d'Exner.

Des tests ont été réalisés avec ces deux options :

Tableau 10 : Tableau des résultats de la comparaison entre la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis

Volume en m ³	Données Terrains		Simulation en volumes finis		Simulation en éléments finis	
	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
Total	25530	39510	8755	8755	13001	237893
Lône	5918	13423	8166	6807	11736	23339
Lit Mineur	1667	7057	1024	5493	420	18800
Tronçon 1	276	620	750	121	26	5081
Tronçon 2	529	772	191	2262	146	3403
Tronçon 3	71	1666	34	2665	18	3551
Tronçon 4	791	3987	45	424	230	6707

Avec l'option « volumes finis », il n'y a aucune entrée de sédiments dans le modèle et les volumes de d'érosion/dépôts dans la lône sont dans les mêmes ordres de grandeur que les observations.

Avec l'option « éléments finis », des apports sédimentaires amont sont pris en compte dans le modèle.

Ces apports ont le même diamètre que le D50 du lit mineur de la lône. Or en réalité les apports sédimentaires du Vieux-Rhône sont beaucoup plus fins, de type sableux. Par ailleurs, les volumes de d'érosion/dépôts dans la lône ne sont pas du tout dans les ordres de grandeur des observations.

L'apport sédimentaire dans la lône provenant essentiellement de l'érosion des berges, il a été choisi de ne pas prendre en compte d'apports sédimentaire dans le Vieux Rhône et de retenir l'option « volume finis ».

c. Simulation initiale

Cette simulation initiale est la simulation par charriage avec un D_{50} unique ($D_{50} = 18\text{mm}$) utilisant la méthode des volumes finis. L'hydrogramme complet a été utilisé pour cette simulation. L'épaisseur de la couche érodable est 1 mètre pour le lit mineur ainsi que pour les berges de la lône.

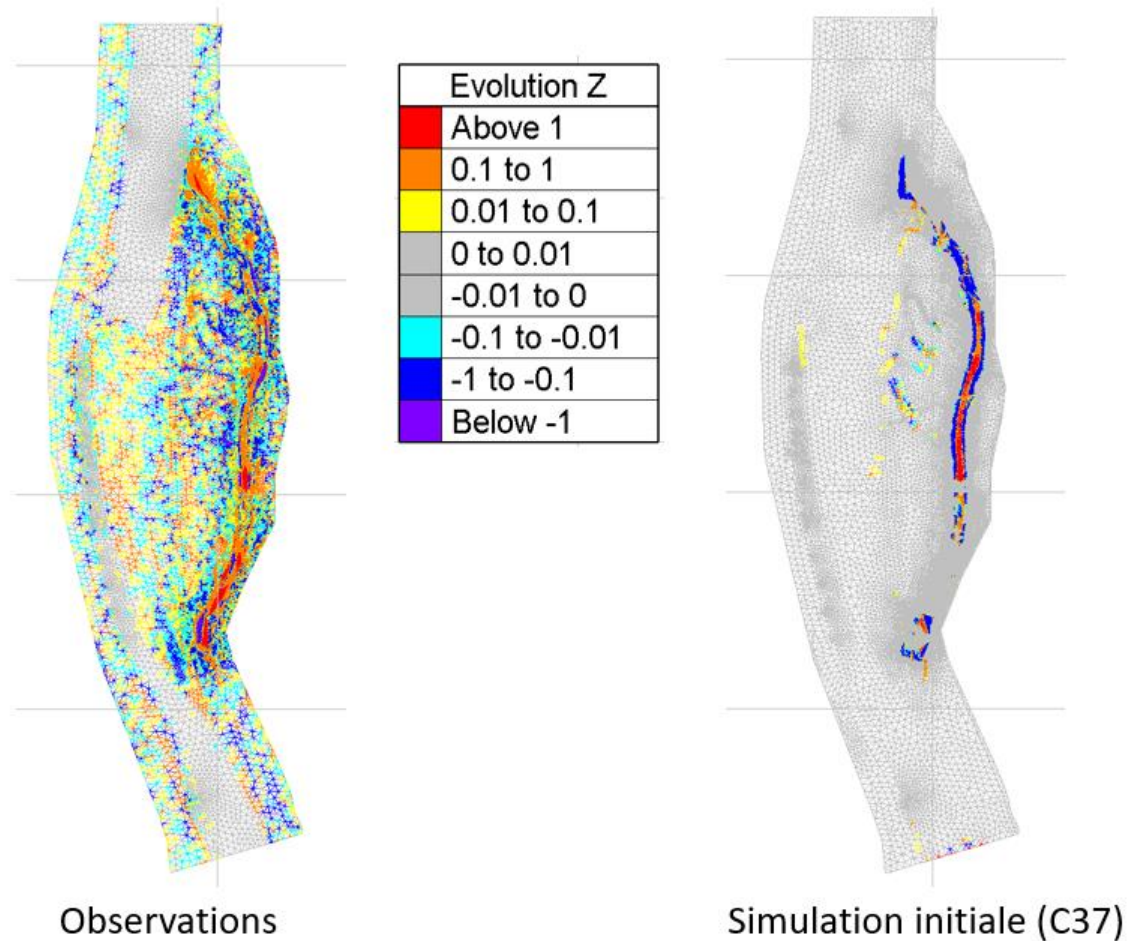


Figure 24: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du modèle

La simulation présente peu ou pas de dépôts sédimentaires sur le lit majeur, l'île et le banc de galet contrairement aux observations. Cela s'explique par le fait qu'il n'y a pas d'entrée de sédiments dans le modèle. Cependant la simulation initiale montre des érosions latérales au niveau des berges de la lône ainsi que des dépôts dans le lit mineur de la lône qui sont aussi présent dans les observations.

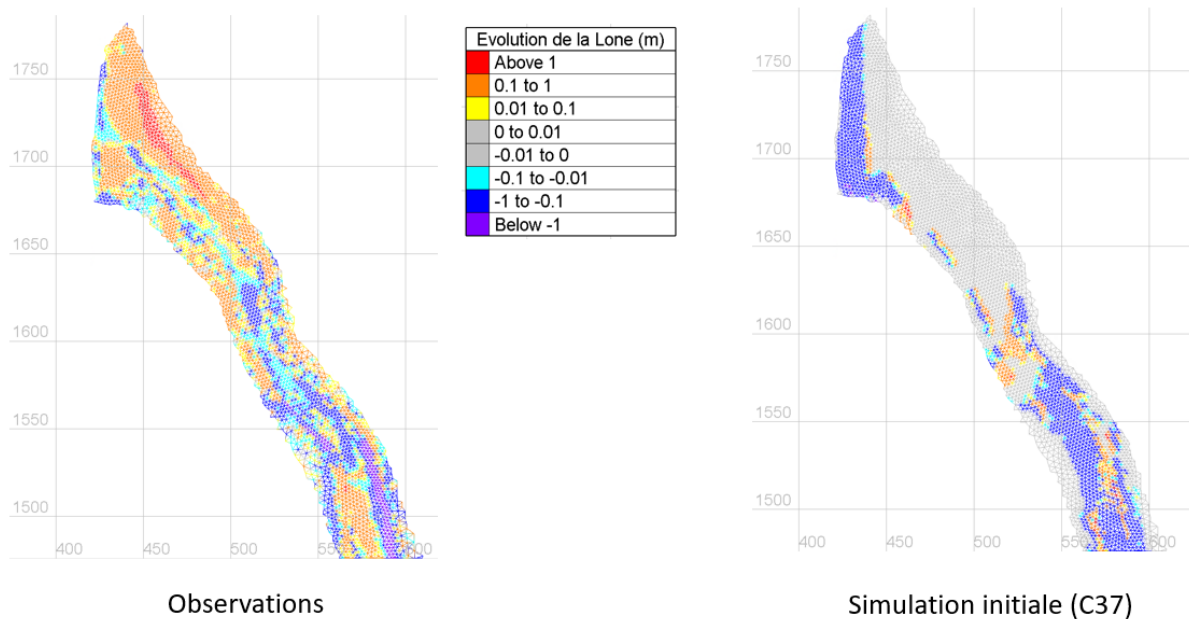


Figure 25: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 1

Le modèle érode l'entrée de la lône ainsi qu'une partie du lit mineur amont de la lône. Ce sont des résultats qui ne figure pas dans les observations qui présentent beaucoup plus dépôts de sédiments que d'érosion pour l'amont de la lône. Les dépôts de sédiments observés en rive gauche en entrée de lône sont cependant constitués de sables, non représentés par le modèle.

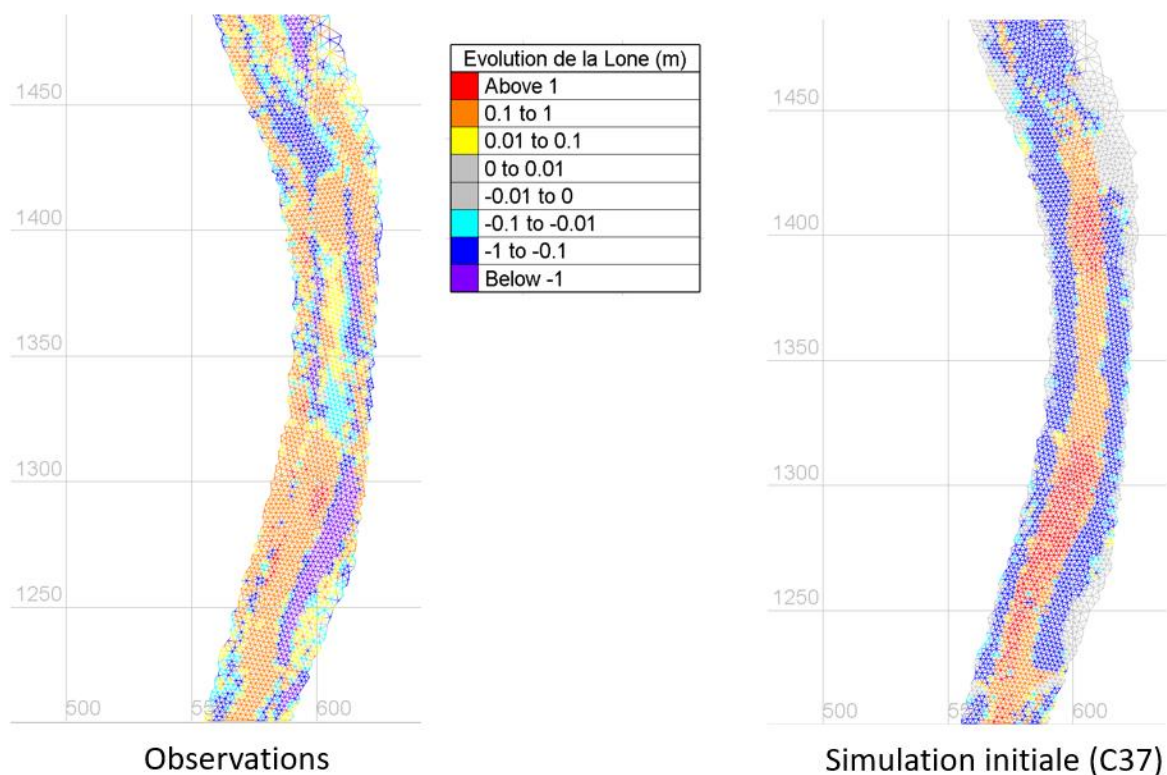


Figure 26: Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 2

Dans le deuxième tronçon de la lône, le modèle érode les berges en rive gauche et droite et dépose des sédiments au sein de son lit mineur. Les observations présentent la même dynamique sauf pour la berge en rive gauche qui présente des dépôts de sédiments fins comme le sable.

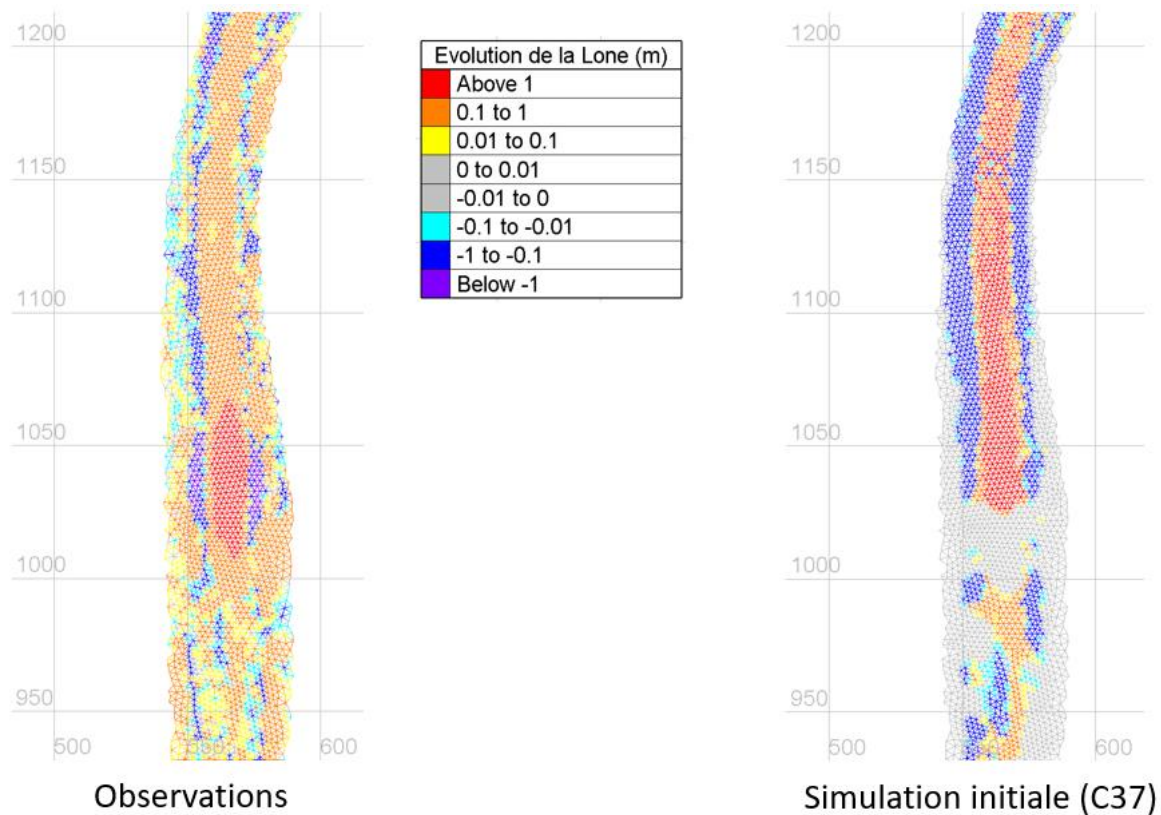


Figure 27 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 3

De la même façon que pour le tronçon 2, la simulation du tronçon 3 présente des érosions sur les berges et des dépôts de sédiments dans le lit mineur de la lône. Les observations présentent la même dynamique sauf pour la berge en rive droite cette fois-ci qui présente des dépôts de sédiments.

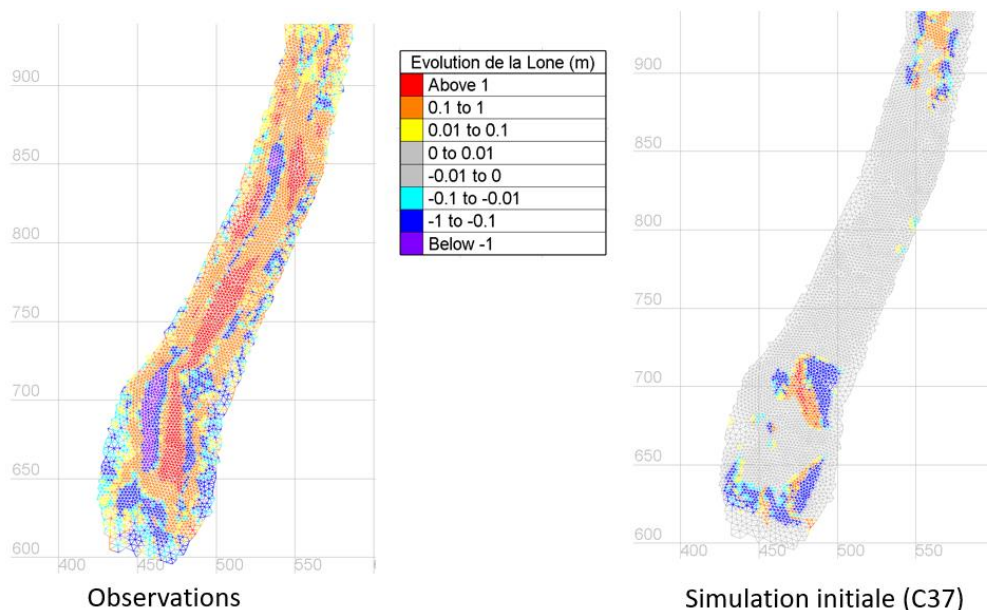


Figure 28 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) de la simulation initiale sur l'emprise du tronçon 4

La simulation présente peu ou pas de dynamique sédimentaire à l'aval contrairement aux observations.

Les Figure 25, Figure 26, Figure 27 et Figure 28 appuient les observations de la Figure 24. En effet des érosions latérales ainsi que des dépôts dans le lit mineur sont bien visible sur les tronçons. Le phénomène d'apports de sédiments par érosion des berges est globalement bien représenté par le modèle.

Lors de la simulation initiale, l'épaisseur maximale érodable a été assez vite atteinte. Pour certaines zones, les simulations avec

Tableau 11 : Tableau des résultats de l'évolution morphologique entre la simulation initiale et les observations

Volume en m ³	Observé		C37	
	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
Total	25530	39510	8755	8755
Lône	5918	13423	8166	6807
Lit Mineur	1667	7057	1024	5493
Tronçon 1	276	620	750	121
Tronçon 2	529	772	191	2262
Tronçon 3	71	1666	34	2665
Tronçon 4	791	3987	45	424

Cependant les volumes sont très différents entre l'évolution réelle et l'évolution simulée. L'évolution réelle a plus de volume de sédimentation que d'érosion au niveau de l'emprise totale et de l'emprise de la lône. Ce qui n'est pas le cas pour la simulation. Cela s'explique aussi par le fait qu'il n'y ait pas d'entrée de sédiments. Une dynamique sédimentaire similaire est observable sur l'emprise du lit mineur de la lône même s'il y a une différence de volume.

Les phénomènes d'érosion et de sédimentation se situent globalement aux mêmes endroits mais les volumes ne concordent pas.

Dans un premier temps, afin d'essayer de caler au mieux le modèle, une comparaison entre les évolutions réelles (2018 – 2021) et les évolutions de la première simulation du modèle ont donné les résultats suivants :

Tableau 12 : Tableau des écarts entre la simulation initiale et les observations

Ecart modèle / observation emprise le lit mineur :		Ecart modèle / observation emprise lône
Erosion :	+ 39%	- 38%
Sédimentation :	+ 22%	+ 49%

Tableau 13 : Tableau de la comparaison entre la simulation initiale et les observations

		Modèle Observé	Simulation initiale C37	Différence	Pourcentage
Volume Lit mineur	Erosion	1660	1020	640	39%
	Sédimentation	7050	5490	1560	22%
Volume Lône	Erosion	5918	8166	-2248	-38%
	Sédimentation	13423	6807	6616	49%

Les résultats montrent que le modèle n'érode et ne sédimente pas assez dans le lit mineur mais à l'échelle de la lône, le modèle réalise trop d'érosion (-38%) et ne sédimente pas assez (+49%).

d. Simulations de calage

Différents cas de figures ont été testés afin d'obtenir des volumes cohérents entre ce qui a été observé sur le terrain entre 2018 et 2021 et la simulation. Les facteurs ciblés étaient :

- Une augmentation du coefficient de Strickler de 5 dans la lône
- Une diminution du coefficient de Strickler de 5
- Un coefficient de Meyer Peter Müller à 12
- Un coefficient de Meyer Peter Müller à 16.
- Augmentation de l'épaisseur de la couche érodable pour les berges

Les résultats sont les suivants :

Tableau 14 : Tableau des résultats des tests de paramètres de calage

Tableau récapitulatif des résultats en pourcentage :						
	Volume total		Volume lône		Volume lit mineur lône	
	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
MPM 10	+ 21%	+ 18%	+ 22%	+ 23%	+ 13%	+ 24%
MPM 12	+ 32%	+ 31%	+ 32%	+ 37%	+ 31%	+ 30%
Strickler -5	- 41%	- 4%	- 45%	- 40%	- 67%	- 50%
Strickler +5	+ 41%	+ 4%	+ 44%	+ 39%	+ 63%	+ 44%

Les différentes variables modifiées permettent une augmentation de l'érosion et de la sédimentation dans le modèle sauf pour la diminution du coefficient de Strickler de -5 dans la lône.

A ce stade, il est compliqué de pouvoir caler le modèle même en faisant varier les différents paramètres car l'apport de sédiments dans la lône provient de l'érosion de ses berges. Or actuellement, le mécanisme d'érosion de celles-ci n'est pas bien représenté par le modèle et l'épaisseur érodable peut constituer un facteur de calage. La suite des simulations va donc avoir pour but de caler le modèle sur la sédimentation de la lône et observer les mouvements sédimentaires dans le lit mineur.

Deux nouvelles simulations ont donc été faites mais cette fois-ci avec l'hydrogramme complet afin de retrouver les volumes d'érosion et de sédimentation dans la lône. L'épaisseur de la couche érodable est de 1m pour le lit mineur et les berges de la lône.

- Coefficient MPM à 12 et augmentation du coefficient de Strickler de 5 dans la lône.
- Coefficient MPM à 16.

Pour la lecture des résultats :

- Observé correspond à l'évolution réelle entre 2018 et 2021
- C37 correspond à la simulation initiale
- C55 correspond à la simulation avec un coefficient MPM à 12 + l'augmentation du coefficient de Strickler de 5 dans la lône
- C56 correspond à la simulation avec un coefficient MPM à 16

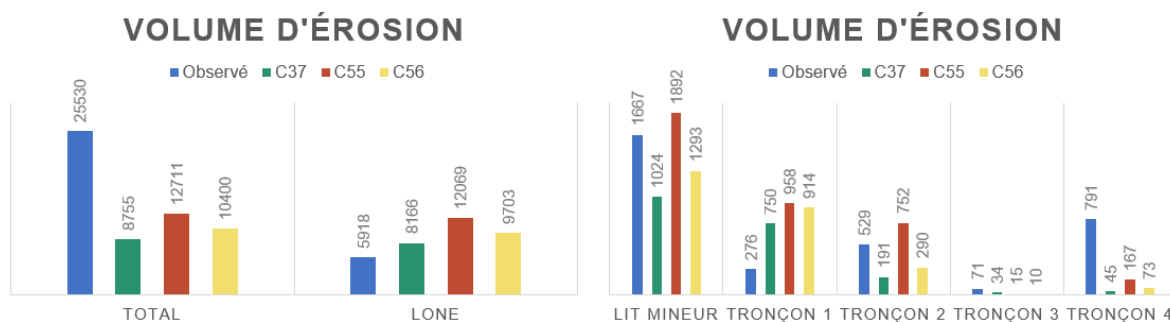


Figure 29 : Graphique des volumes d'érosion entre les observations et les différentes simulations de calage

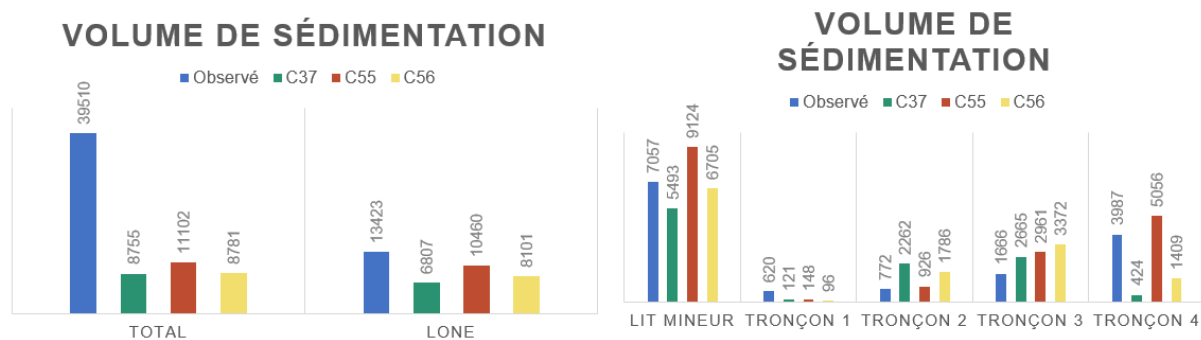


Figure 30 : Graphique des volumes de sédimentation entre les observations et les différentes simulations de calage

La Figure 29 et Figure 30 montrent des différences de volumes que ce soit en érosion ou en sédimentation entre les différentes simulations et les observations. Cependant les valeurs de sédimentations de la simulation C55 sont les plus proches des valeurs observées pour la lône (Figure 30). Une analyse qualitative du lit mineur a donc été réalisée :

Tronçon 1 :

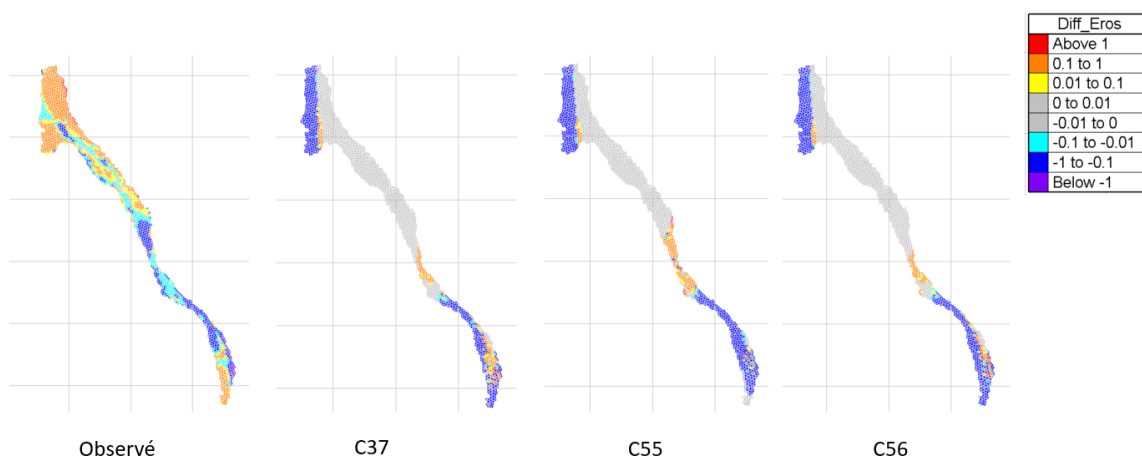


Figure 31 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 1

Tronçon 2 :

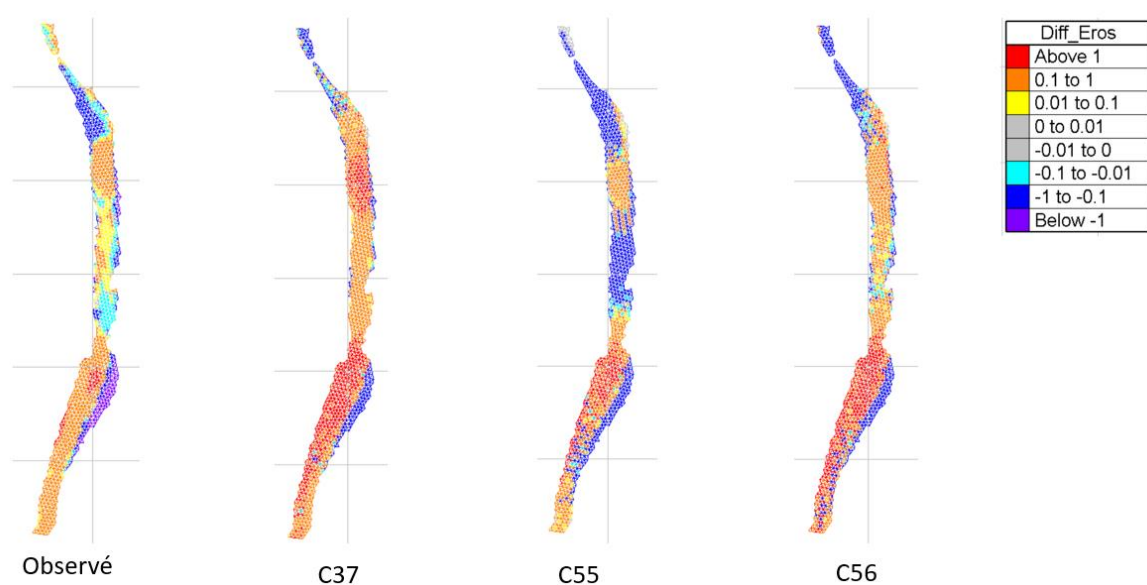


Figure 32 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon
2

Tronçon 3 :

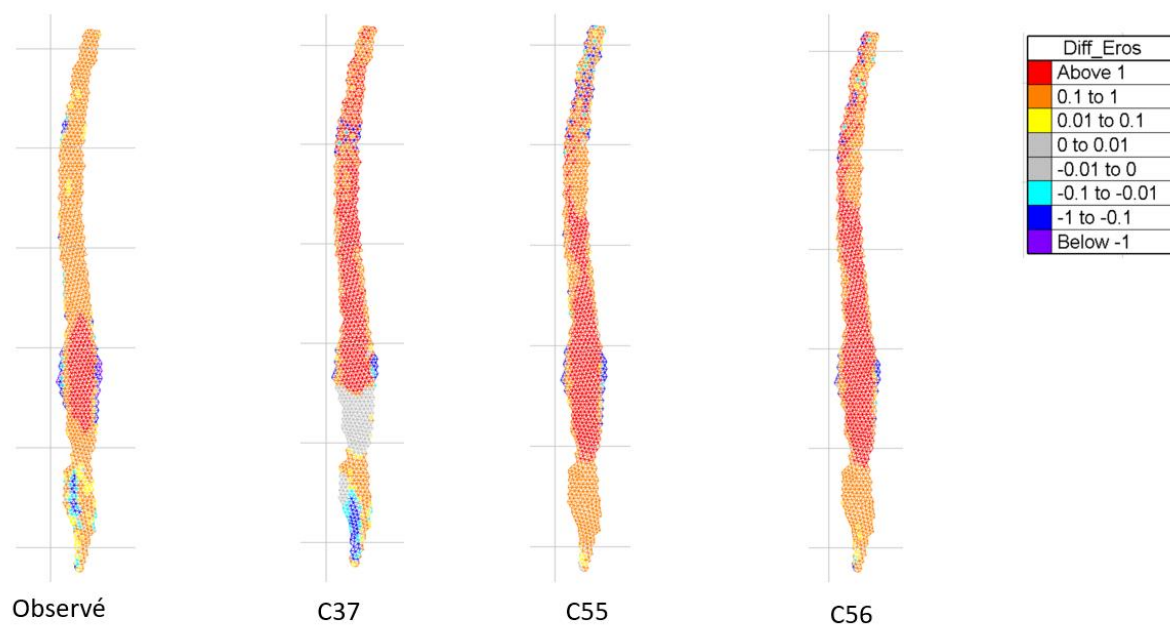


Figure 33 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon
3

Tronçon 4 :

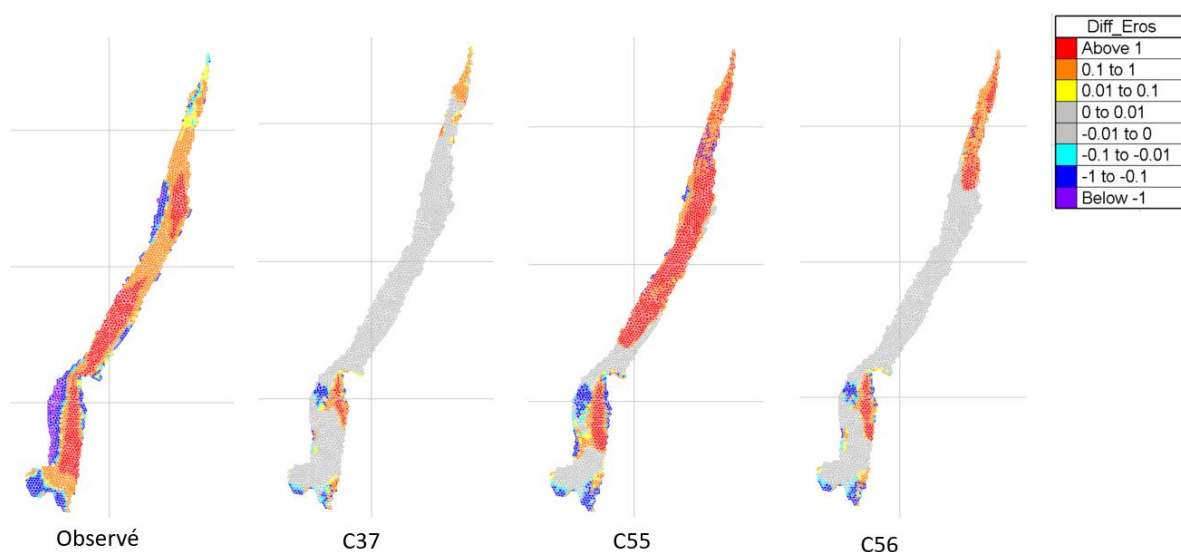


Figure 34 : Comparaison entre l'évolution (Z) réelle et l'évolution (Z) des simulations C37, C55 et C56 sur l'emprise du tronçon 4

L'analyse qualitative des différents tronçons montre de nombreuses similarités dans le déplacement des sédiments entre la simulation C55 et les observations, contrairement aux autres simulations. Il est à noter cependant que pour toutes les simulations, les phénomènes d'érosion et de sédimentation ne sont pas similaire au réel. Cependant, la simulation C55 présente le volume de sédimentation dans la lône le plus proche du volume observé.

Tableau 15 : Tableau des résultats des simulations de calage

	Observé		C37		C55		C56	
Volume en m ³	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
Total	25530	39510	8755	8755	12711	11102	10400	8781
Lône	5918	13423	8166	6807	12069	10460	9703	8101
Lit Mineur	1667	7057	1024	5493	1892	9124	1293	6705
Tronçon 1	276	620	750	121	958	148	914	96
Tronçon 2	529	772	191	2262	752	926	290	1786
Tronçon 3	71	1666	34	2665	15	2961	10	3372
Tronçon 4	791	3987	45	424	167	5056	73	1409

L'épaisseur de la couche érodable :

Lors de la simulation initiale, l'épaisseur maximale de la couche érodable a été atteinte sur certaines zones au cours de la simulation.

Cette simulation (C84) reprend tous les paramètres de la simulation initiale (C37) sauf l'épaisseur de la couche érodable. Celle-ci est augmenté à 3 mètres pour les berges de la lône. Cette simulation a utilisé l'hydrogramme complet afin de pouvoir comparer les résultats avec les observations et la simulation initiale. La simulation donne les résultats suivants :

Tableau 16 : Tableau des résultats de la simulation du paramètre de l'épaisseur de la couche érodable

Volume en m ³	Observations		C37		C84	
	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
Total	25530	39510	8755	8755	8902	8902
Lône	5918	13423	8166	6807	8105	6473
Lit Mineur	1667	7057	1024	5493	815	5232

Tableau 17 : Tableau de comparaison entre la simulation initiale et la simulation C84

Volume en m ³	Différence entre C37 et C84			
	Différence		Pourcentage	
	Erosion	Sédimentation	Erosion	Sédimentation
Total	147	147	2%	2%
Lône	-61	-334	-1%	-5%
Lit Mineur	-209	-261	-20%	-5%

Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur de la couche érodable pour les berges de la lône n'engendre pas des changements significatifs. En effet sur l'ensemble du modèle, ce changement engendre une augmentation de l'érosion et de la sédimentation de 2%. Il est observable qu'à l'échelle de la lône et de son lit mineur, l'augmentation de l'épaisseur de la couche érodable diminue l'activité sédimentaire de ces zones (Tableau 17). Les volumes d'érosion et de sédimentation dans la lône et le lit mineur pour la simulation initiale sont plus proches des observations que les volumes de la simulation avec l'épaisseur érodable à 3 mètres.

Il est important de bien prendre en compte l'impossibilité de bien représenter la structure des berges en utilisant un D50 unique. La composition réelle des berges est de 3 mètres de sédiments fins et 1 mètre de sédiments grossiers.

Le choix de l'épaisseur de la couche érodable est un paramètre n'influant pas directement sur les formules de transport solide comme les deux autres paramètres (coefficient de Strickler et coefficient MPM) mais il peut avoir un impact sur les quantités.

Le paramètre de couche érodable retenu pour les simulations suivantes sera 1m pour le lit mineur et les berges de la lône.

Les paramètres de la simulation C55 sont donc retenus pour l'exploitation du modèle.

Les trois paramètres retenus à l'issue du calage sont :

- Augmentation du coefficient de Strickler de 5 pour la lône
- Le coefficient MPM à 12
- L'épaisseur de la couche érodable : 1 mètre dans le lit mineur et les berges de la lône

Le calage est valide mais il faut tout de même faire attention à l'épaisseur érodable pour la phase d'exploitation du modèle. C'est pourquoi, pour la simulation sur 25 ans, le choix a été de prendre une épaisseur de couche érodable nulle pour les berges de la lône car il est impossible de prédire l'intensité des érosions de berges sur autant d'années. Ce choix permet quand même de voir le transit des sédiments déjà déposés dans la lône en 2021.

e. Simulations avec plusieurs classes granulométriques

La simulation avec plusieurs classes granulométriques a pour but de prendre en compte la taille des sédiments plus grossiers se trouvant sur les bancs exondés dans le lit de la lône. De plus, cette méthode peut ouvrir sur la création de simulations avec plusieurs classes granulométriques différentes selon les couches érodables.

Pour cette simulation, les paramètres sédimentaires de la simulation C55 sont conservés (épaisseur de la couche érodable compris). Seul le D50 change puisqu'il y a 3 classes granulométriques prit en compte :

- 11 mm
- 18 mm
- 33 mm

La simulation du charriage avec plusieurs classes granulométriques fonctionnait mal avec la version v7p2. Cette simulation a ensuite été testée en v8p2 avec le module Gaïa, qui est une mise à jour de la version 7, qui est plus stable pour les calculs sédimentaires. Avec cette nouvelle version, la simulation par charriage fonctionne. Le changement de version peut néanmoins entraîner une modification des résultats.

Après avoir fait tourner les deux simulations identiques sur les deux versions, les résultats suivants sont obtenus :

Tableau 18 : Tableau des résultats de la comparaison entre la v7p2 et la v8p2

Hydrogramme Crue Max 2021				
Volume en m ³	v7p2	v8p2	Différence	Pourcentage de différence
Erosion	9610.88	9397.40	213.48	2.22%
Sédimentation	8588.21	8543.59	44.62	0.52%
Evolution Global	-1022.67	-853.81	168.87	16.51%

Les volumes déposés sont quasiment identiques (écart inférieur à 1%). De faibles différences sont visibles pour l'érosion avec une diminution de 2% des volumes d'érosion entre la version 7 et la version 8. Cependant, ces différences sont considérées comme négligeables.

Le passage au module Gaïa et au multi-classes a largement engendré des temps de calculs beaucoup plus longs, aussi la simulation est à ce jour en cours de réalisation. Les résultats de cette simulation seront présentés lors de la soutenance orale.

f. Les apports de sable par le Vieux-Rhône

L'hydrogramme complet a été utilisé pour cette simulation. L'épaisseur de la couche érodable est nulle pour pouvoir mieux observer les dépôts. Le sable a été modélisé par une formule de transport solide en suspension, la formule de Van Rijn, avec un diamètre de sable moyen de 400 µm. Le modèle a cependant déposé beaucoup plus de sables qu'il n'en a été déposé réellement. En effet comme le montre le tableau plusieurs centaines de milliers de m³ de sables ont été déposés en plus sur le site (Tableau 19). Signalons que cette simulation ne prend pas en compte les phénomènes d'érosion. Cette simulation de l'apport des sables est donc purement qualitative.

Tableau 19 : Tableau des résultats de la simulation du transport des sables en suspension

Volume de dépôt de sable					
Volume en m ³		Observe	C70	Différence	Pourcentage
Emprise total	Erosion	23321	0	-23321	-100%
	Sédimentation	31950	464995	433045	1355%
Emprise lône	Erosion	5918	0	-5918	-100%
	Sédimentation	13423	32672	19249	143%

Dans un premier temps, juste par comparaison de vue aérienne, un dépôt de sable dans le lit majeur est visible comme peut le montrer la Figure 35.

Photos aériennes de l'amont de la lône



2018

— : Emprise du lit mineur de la lône



2021

Figure 35 : Photo aérienne de l'amont de la lône de Banc Rouge

En effet, la rive gauche montre bien un dépôt de sable entre 2018 et 2021. Ceci est confirmé par la Figure 36 qui montre l'évolution topographique du site entre 2018 et 2021.

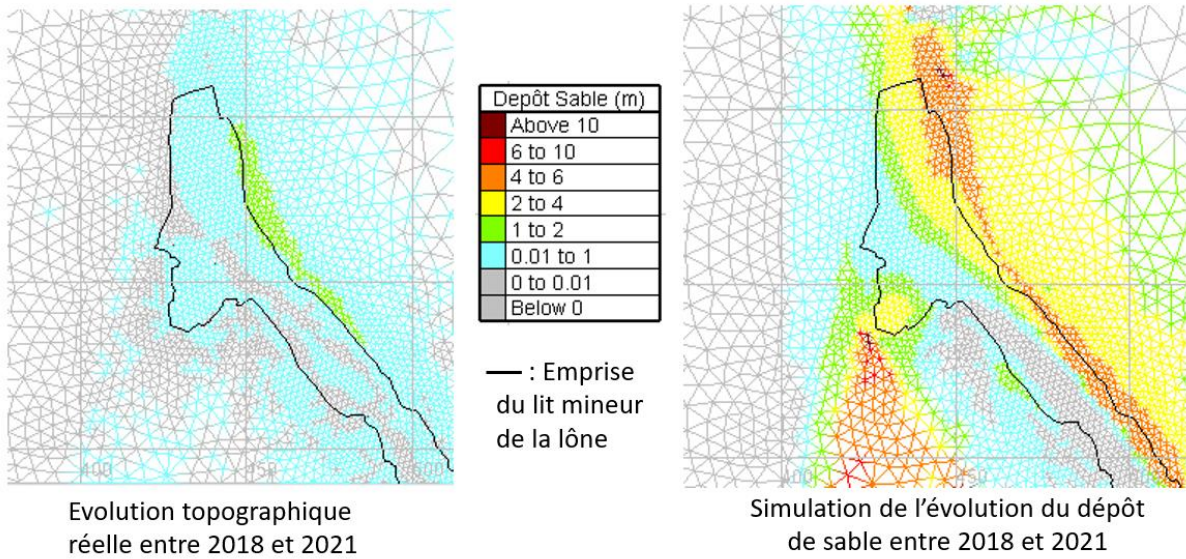


Figure 36 : Comparaison du dépôt de sable à l'amont de la lône entre la simulation et les observations

Même si les hauteurs de dépôts sont totalement différentes, on retrouve quand même certains lieux de dépôts similaires comme par exemple la rive amont gauche de la lône présentée par la Figure 36. Mais aussi au niveau de la rive aval droite de la lône (Figure 37).

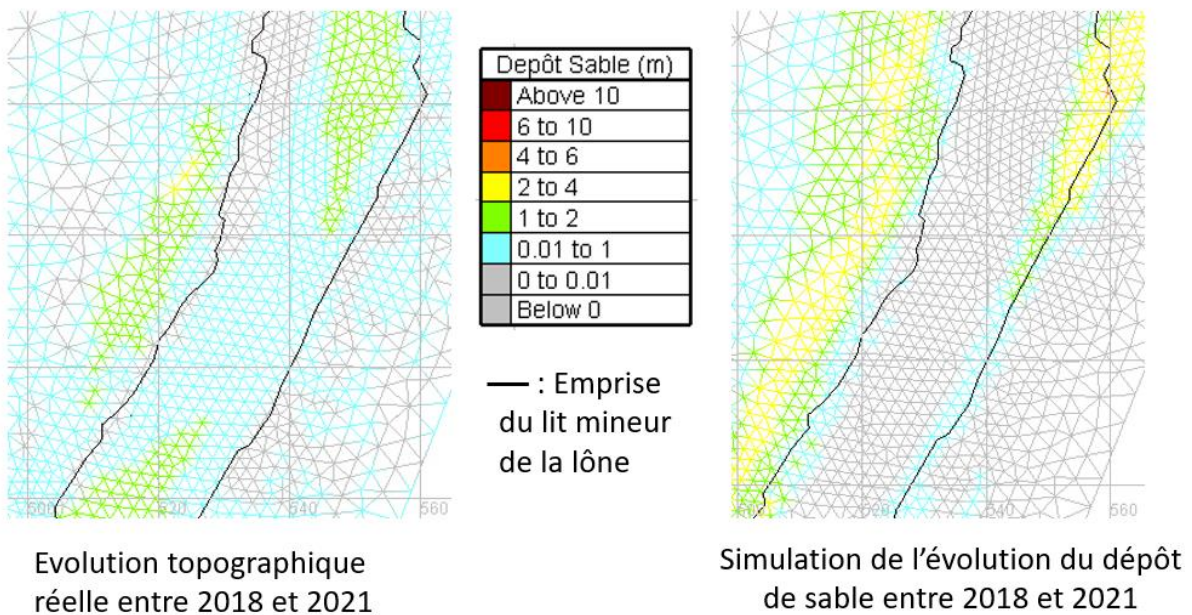


Figure 37 : Comparaison du dépôt de sable sur une zone de la berge rive droite entre la simulation et les observations

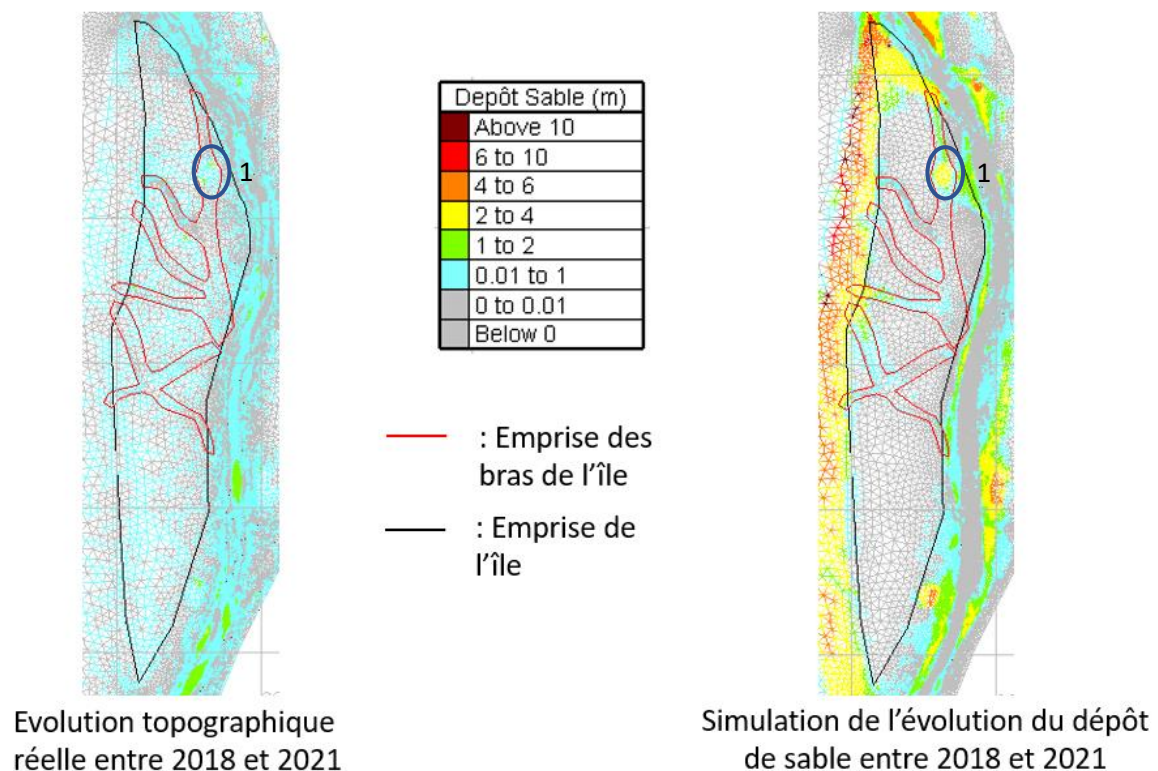


Figure 38 : Comparaison du dépôt de sable sur l'île et ses bras entre la simulation et les observations

La simulation ne présente pas de dépôts de sédiments dans les zones boisées hors des bras de l'île contrairement aux observations. Cependant, des dépôts similaires sont visibles sur les bras de l'île et la mare à l'amont de l'île (petit 1 dans la Figure 38). La simulation présente de gros dépôts à la jonction entre le banc de galets du Vieux-Rhône et l'île. Ces gros dépôts ne sont pas présents sur les observations.

Ces différentes informations montrent que le modèle est possiblement capable de modéliser ses apports de sables au niveau des zones exondées de la lône. Cependant, un gros travail de calage est à réaliser pour obtenir des résultats réels car dans le cas présent de nombreux dépôts se sont fait à des endroits où il n'y en avait pas du fait du trop gros apport sédimentaire.

g. Facteur d'accélération morphologique

Les calculs hydro-sédimentaires sur de longues périodes nécessitent des temps de calculs très longs. Dans le cas présent, les simulations de projections sur 25 voire 50 ans peuvent durer plusieurs semaines. Même en ayant déjà écourté les hydrogrammes en ne sélectionnant que des débits supérieurs à 300 m³/s ainsi que l'utilisation d'une période de couplage avec Sisyphe de 10, la durée de calcul est trop longue.

Cependant, il existe une méthode d'accélération du calcul implémentée dans Telemac qui peut se coupler avec une méthode d'accélération de l'hydrogramme, méthode consistant à réduire la durée réelle de l'hydrogramme simulé en la divisant par un facteur « K ». En effet, dans Sisyphe, il existe un mot clé (« Morphological Factor ») qui permet de définir un facteur permettant de multiplier les évolutions bathymétriques. L'utilisation de ce facteur, en combinaison avec la méthode d'accélération de l'hydrogramme, permet de compenser la réduction de temps de l'hydrogramme de celle-ci.

Cependant, cette méthode peut avoir des incidences sur les résultats. Cette méthode a été testée avec 2 facteurs d'accélération morphologique sur l'hydrogramme de 3 ans : 10 et 5.

Tableau 20 : Tableau des résultats du test du paramètre "facteur morphologique" à 10

Volume en m ³	Hydrogramme Complet Strickler +5, MPM12	T/K et K10	Différence	Pourcentage Différence
Erosion	12711.38	13698.78	987.40	7.77%
Sédimentation	11102.37	12052.53	950.16	8.56%
Evolution Global	-1609.01	-1646.25	-37.24	2.31%

Tableau 21 : Tableau des résultats du test du paramètre "facteur morphologique" à 5

Volume en m3	Hydrogramme Complet Strickler +5, MPM12	T/K et K5	Différence	Pourcentage Différence
Erosion	12666.58	13033.40	366.82	2.90%
Sédimentation	11057.57	11416.02	358.44	3.24%
Evolution Global	-1609.01	-1617.39	-8.38	0.52%

A la vue du Tableau 20 et du Tableau 21, il y a deux fois moins de différence pour le facteur 5 que pour le facteur 10. De plus, les différences pour le facteur 5 ne dépassent pas les 5%. Le choix s'est donc porté sur ce facteur afin de réaliser les simulations longues.

C'est pourquoi, le facteur d'accélération morphologique de 5 a été utilisé pour réaliser une perspective de l'évolution de la lône de Banc Rouge sur 25 ans à partir de 2021.

II. Exploitation du modèle hydro-sédimentaire

Une fois la phase de calage sédimentaire terminée, le modèle est exploité pour étudier les cas suivants :

- 1) Evolution morphologique de la lône à long terme : simulation sur 25 ans et sur 50 ans à partir de l'hydrogramme des 25 dernières années.

Les paramètres retenus sont les paramètres de la simulation C55 ainsi qu'une épaisseur érodable nulle sur les berges. L'objectif de cette simulation est d'observer la dynamique de déplacement des sédiments déposés dans la lône jusqu'en 2021. Cette simulation est en cours de calculs. Les résultats de cette simulation seront présentés lors de la soutenance orale.

- 2) Test d'un autre projet de restauration de la lône : simulation en modifiant la bathymétrie du modèle après travaux pour voir si l'évolution de la lône aurait été différente

Ce nouvel état n'a pas pu être traité au cours du stage. Il fait partie des perspectives à envisager pour la suite.

Discussions

I. Données

Plusieurs remarques peuvent être faites à propos des données. Dans un premier temps, tous les états n'ont pas la même précision de données. Ce sont surtout les données bathymétriques de la lône qui sont les moins nombreuses voir absentes pour certaines zones. Ce sont donc les fonds immergés de la lône qui apporte le plus d'imprécision. Cela engendre donc forcément des incertitudes lors de la réalisation de la différence de TIN entre 2018 et 2021. Deuxièmement, le passage du TIN au maillage du modèle engendre une perte de précision sur les données. C'est pour cela que les résultats sont comparés à maillage équivalent.

II. Calage hydraulique

Le modèle dans son ensemble est calé. Cependant des incertitudes liées au calage du modèle peuvent avoir un impact sur les résultats. Les données de calage sont sur le Vieux-Rhône mais il n'y a pas de données de calage sur la lône. Le coefficient de Strickler influe sur les évolutions morphologiques mais est aussi un critère de calage. Or, le coefficient de Strickler a été modifié pour la lône. Il y a donc des incertitudes sur le calage hydraulique de la lône.

III. Transport sédimentaire

Les résultats actuels montrent de bons résultats dans l'analyse qualitative de l'évolution des cours d'eau sur une période de 3 ans avec des similarités dans les zones de sédimentation et d'érosion. Cela peut permettre d'avoir les grandes tendances de l'évolution hydro-sédimentaire d'un cours d'eau. Pour l'instant la tendance mène au dépôt de sédiments dans la lône ce qui risque de provoquer un colmatage de celle-ci et de la redéconnecter du Vieux-Rhône. Les résultats de la simulation à plus long terme permettront de voir si le lit mineur de la lône garde ses sédiments ou si elle arrive à les évacuer.

La mauvaise représentation du processus d'érosion des berges par le logiciel Telemac reste un problème majeur. En effet, la version 7 de Telemac ne permet pas de reproduire une érosion correcte des berges. Le logiciel érode les berges dès que les eaux submergent celles-ci. Or en réalité, les berges sont soumises à des contraintes latérales, même à débit faible. C'est le sapement de berge. Cela est d'autant plus vraies pour des berges abruties comme celles présentes sur le site d'étude. C'est par ce mécanisme d'érosion de berge que la lône est principalement alimentée en sédiments. Pour pallier ce problème, le choix a été de caler l'épaisseur érodable afin de retrouver les volumes d'érosions et donc de dépôts. Il est donc difficilement concevable d'extrapoler les paramètres du modèle à d'autres situations. Cela explique le choix d'une épaisseur érodable nulle pour la simulation à long terme pour voir le déplacement du stock de sédiments présents dans la lône.

Même si un certain nombre de biais est présent, les résultats montrent l'utilité des modèles hydro-sédimentaire et les perspectives sont grandes. Des modèles plus complexes peuvent aussi être possible comme par exemple en créant différentes épaisseurs érodables avec des granulométries différentes. Il est aussi envisagé de modéliser un autre projet de travaux sur cette lône pour voir si l'évolution aurait été différente.

Conclusion

Les différents résultats du modèle hydro-sédimentaire de la lône de Banc Rouge montrent une tendance à l'érosion des berges. Ces sédiments résultants de l'érosion vont se déposer dans le lit mineur. Cela mènerait vers la conclusion que la lône à tendance à plus sédimenter, ce qui pourrait provoquer un colmatage voir une re-déconnection avec le Vieux-Rhône. Cependant, des simulations supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir l'affirmer. Malgré la difficulté du logiciel Telemac à représenter tous les phénomènes naturels du transport solide, la modélisation hydro-sédimentaire offre de belles perspectives dans l'étude de l'évolution des cours d'eau.

Bibliographie

Ata R. (EDF), 2016. Telemac2d v7.2 User Manual. 131

Compagnie Nationale du Rhône, Avril 2015. Réhabilitation des lônes et des marges alluviales du Vieux-Rhône de Donzère-Mondragon. *Etude de faisabilité*, 230

Compagnie Nationale du Rhône, Avril 2016. Projet de restauration des lônes et marges alluviales du Vieux-Rhône de Donzère à Mondragon : Site de la lône de la Grange-Ecrasée, des Dames et du Banc-Rouge. *Notice technique*, 121

Compagnie Nationale du Rhône, Avril 2016. Projet de restauration des lônes et marges alluviales du Vieux-Rhône de Donzère à Mondragon : Site de la lône de la Grange-Ecrasée, des Dames et du Banc-Rouge. *Pré dossier Sédimentaire*, 70

Compagnie Nationale du Rhône. Qui est CNR ?. Disponible sur : <https://www.cnr.tm.fr/cnr/qui-est-cnr>. (Page consultée en août 2021).

Knaapen M. and Joustra R., 2012. Morphological acceleration factor : usability, accuracy and run time reductions. 6

Lang G., 2019. Analyse de l'érodabilité des dépôts en amont du barrage de Donzère-Mondragon avec une modélisation TELEMAR-3D. 55

Tassi P. (EDF), 2016. Sisyphe v7.2 User Manual. 65

Annexes

Annexe 1 : Différence du niveau d'eau entre crue réelle et crue simulé

Différence hauteur d'eau Crues réelles et Crues du modèle version 4									
noeud dans le maillage :	Pk \ Débit (m3/s)	81	89	950	1560	1798	2360	2491	2790
4680	185	0.31	0.18	-0.05	-0.07	0.01	0.15	0.00	0.38
5199	185.4	/	0.46	-0.04	-0.14	-0.11	/	/	0.25
634	186	0.02	-0.33	/	/	0.04	/	0.00	0.22
2039	186.5	/	-0.14	-0.11	-0.01	-0.02	0.03	-0.01	0.14
Hauteur limite aval	186.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Différence hauteur d'eau Crues réelles et Crues du modèle version 5									
noeud dans le maillage :	Pk \ Débit (m3/s)	81	89	950	1560	1798	2360	2491	2790
4680	185	0.33	0.19	-0.03	-0.05	0.03	0.19	0.03	0.41
5199	185.4	/	0.47	-0.03	-0.13	-0.09	/	/	0.26
634	186	0.05	-0.30	/	/	0.05	/	0.01	0.23
2039	186.5	/	-0.12	-0.07	0.02	0.01	0.06	-0.03	0.16
Hauteur limite aval	186.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Différence hauteur d'eau Crues réelles et Crues du modèle version 6									
noeud dans le maillage :	Pk \ Débit (m3/s)	81	89	950	1560	1798	2360	2491	2790
4680	185	0.33	0.20	-0.01	-0.02	0.06	0.22	0.05	0.46
5199	185.4	/	0.48	-0.01	-0.11	-0.07	/	/	0.29
634	186	0.07	-0.29	/	/	0.06	/	0.03	0.24
2039	186.5	/	-0.11	-0.06	0.03	0.02	0.08	-0.03	0.19
Hauteur limite aval	186.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Différence hauteur d'eau Crues réelles et Crues du modèle version 7									
noeud dans le maillage :	Pk \ Débit (m3/s)	81	89	950	1560	1798	2360	2491	2790
4680	185	0.33	0.19	-0.04	-0.06	0.02	0.18	0.01	0.40
5199	185.4	/	0.47	-0.04	-0.15	-0.11	/	/	0.24
634	186	0.05	-0.30	/	/	0.04	/	0.00	0.21
2039	186.5	/	-0.12	-0.08	0.02	0.01	0.06	0.01	0.16
Hauteur limite aval	186.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Gaël Chéneau

Étudiant

Titre : Approche de l'évolution des marges alluviales
par le biais de la modélisation hydro-sédimentaire

2020-2021

Résumé : Dans le cadre de mes études à l'école d'ingénieurs Polytech Tours, en ingénierie des milieux aquatiques, j'ai réalisé mon stage de fin d'études à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) à Lyon. La CNR a obtenu la concession du Rhône par l'Etat en 1934 et gère depuis la navigation, l'irrigation et la production hydro-électrique sur ce fleuve. Depuis quelques années, la CNR a lancé de grandes opérations de restaurations des marges alluviales du Vieux-Rhône. L'objectif de ce stage, au travers d'un cas d'application, est de définir les possibilités que peut offrir la modélisation hydro-sédimentaire pour étudier la pérennité des actions de restauration sur les marges alluviales du Vieux-Rhône

Abstract : As part of my studies at the Polytech Tours engineering school, in aquatic environment engineering, I completed my end-of-studies internship at the Compagnie Nationale du Rhône (CNR) in Lyon. The CNR obtained the concession of the Rhône from the french government in 1934 and has since managed navigation, irrigation and hydroelectric production on this river. In recent years, the CNR has launched major operations to restore the alluvial margins of the Vieux-Rhône. The objective of this internship, through an application case, is to define the possibilities that hydro-sedimentary modeling can offer to study sustainability of restoration actions on the alluvial margins of the Vieux-Rhône

Mots Clés : Modèle 2D, hydraulique, transport solide, marges alluviales, Rhône

Entreprise : Compagnie Nationale du Rhône

2 rue André Bonin, 69001 Lyon

Tuteur entreprise :

Carole Wirz

Ingénieur hydraulique et sédimentaire

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues