

Projet de Fin d'Etudes (P.F.E) 2019/2020

Modélisation numérique (TELEMAC 2D) de l'impact des dunes sur la migration des barres sédimentaires à Saint-Mathurin-sur-Loire



AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE, PROJET DE FIN D'ETUDES EN GENIE DE L'AMENAGEMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique de Polytech Tours, de nous permettre, en tant qu'étudiant, de nous confronter à des sujets de recherche en vue de s'initier au domaine de la recherche scientifique.

Je tiens également fortement à remercier Monsieur Jules Le Guern, à l'origine du sujet de projet de fin d'études (P.F.E.), auquel j'ai pu participer. Grâce à vous, tout au long de ces quelques mois, j'ai pu découvrir le domaine de la modélisation hydrosédimentaire. Cette expérience fut très enrichissante et m'a permis de développer de nouvelles compétences. Je tiens donc, encore une fois, à remercier Monsieur Jules Le Guern pour son aide précieuse dans la compréhension du sujet et la méthodologie à adopter.

SOMMAIRE

Introduction.....	5
I. Description des unités sédimentaires étudiées	6
II. Enjeux de détermination des flux hydrosédimentaires d'un cours d'eau	6
III. Intérêts de la prise en compte des dunes dans la migration des barres sédimentaires.....	7
IV. Modélisation des flux hydrosédimentaires	8
A. Principes généraux de la modélisation du transport sédimentaire	8
B. Système de modélisation TELEMAC-MASCARET.....	9
C. Logiciel TELEMAC 2D	10
1. Informations générales sur le logiciel TELEMAC 2D	10
2. Gestion des fichiers du logiciel TELEMAC 2D.....	11
D. MODULE SISYPHE :	12
1. Informations générales sur le logiciel SISYPHE.....	12
2. Ensemble de fichiers de simulation de SISYPHE.....	13
3. Couplage modules hydrodynamique/morphodynamique.....	13
V. Matériels et méthodes	15
A. Géométrie	15
B. Maillage	16
C. Conditions aux limites	17
D. Rugosité du modèle.....	17
VI. Résultats.....	19
A. Cas géométrie du 05/12/2017	19
B. Cas géométrie du 19/01/2018	20
VII. Discussion.....	22
A. Cas géométrie du 05/12/2017	22
B. Cas géométrie du 19/01/2018	23
Conclusion	26
Bibliographie.....	27

Introduction

Le sujet de P.F.E formulé s'intègre dans un projet plus vaste nommé R-TEMUS pour Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'USages en Basse Loire. Les objectifs de ce projet sont d'élaborer une gestion intégrée sur le tronçon Montsoreau-Nantes, en s'intéressant au fonctionnement biotique (écosystèmes) et abiotique (transport sédimentaire), ainsi qu'en tenant compte de la dimension sociale (activités et usages). Le projet R-TEMUS s'oriente sur une démarche alliant la recherche scientifique et le monde socio-économique, à travers un ensemble de sujets de thèse. Le financement est effectué à l'aide de subventions de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et de l'Union européenne (FEDER) sur une période de 4 ans (2016-2020). Les résultats de ces recherches auront pour vocation de guider les futurs choix de restauration/d'aménagement du milieu, à l'aide de données du système naturel sur la Basse Loire (écologique, hydrologique, sédimentaire), couplées aux usages et futurs besoins identifiés (navigation, irrigation).

Le sujet de P.F.E s'inscrit dans le cadre de la thèse de Monsieur Jules Le Guern, doctorant à l'Université de Tours. L'objectif étant de mieux appréhender les flux hydrosédimentaires sur un tronçon entre les villages de Saint-Mathurin-sur-Loire et de La Bohalle (département de Maine-et-Loire, France). Le travail de P.F.E s'appuie sur une précédente étude, dont le but final était la constitution d'un modèle hydrosédimentaire sur le même tronçon que cité précédemment. La géométrie du modèle, ayant été effectuée en période d'étiage, ne tenait pas compte de la présence de dunes sédimentaires surimposées périodiquement sur les barres sédimentaires lors de crues. Ainsi, l'objectif du sujet de PFE était de trouver une méthodologie afin d'inclure les dunes dans le modèle existant et d'identifier dans quelle mesure la présence de ces mésoformes pouvait impacter les conditions hydrodynamiques et morphodynamiques du tronçon étudié.

La problématique mise en évidence lors de la lecture du sujet et des différentes études présentes dans la littérature était : Comment intégrer les dunes superposées aux barres sédimentaires dans les modèles numériques de transport sédimentaire ?

L'ensemble de ce rapport a été organisé de manière à discuter sur la modélisation numérique hydrosédimentaire. La première partie aura pour objectif de définir les objets d'étude (dunes/barres sédimentaires) et l'intérêt d'étudier les interactions entre ces corps sédimentaires. La suite du rapport présentera les principes généraux de la modélisation numérique hydrosédimentaire, en détaillant le système de modélisation TELEMAC-MASCARET. Enfin, les résultats de l'analyse de l'influence des dunes sédimentaires sur la migration des barres sédimentaires au niveau de Saint-Mathurin-sur-Loire seront explicités et discutés.

I. Description des unités sédimentaires étudiées

Dans le cadre du sujet de P.F.E, plusieurs corps sédimentaires sont présents sur le site d'étude : dunes sédimentaires (mésoformes) et barres sédimentaires (macroformes). Le projet vise donc à étudier l'influence de mésoformes surimposées à des macroformes, notamment dans une optique de migration du stock sédimentaire contenu dans les barres sédimentaires.

Un ensemble d'unités sédimentaires existent en sédimentologie et sont liées à des conditions hydrodynamiques (type d'écoulement, vitesse, hauteur d'eau, etc...) et des conditions sédimentaires (quantité de sédiment disponible, granulométrie, etc..).

Les dunes sont des mésoformes, impliquant que la hauteur des dunes est proportionnelle à la hauteur d'eau (Jackson, 1975). Ces unités sont généralement plurimétriques et composées de sédiments dont la taille de grains est comprise entre celle des silts grossiers (2 à 50 μm (ou 63 μm) et celle des graviers (2 à 50 mm) (Bridge, 2003). Néanmoins, les dunes de graviers sont faiblement documentées (P. Carling, 1999). Ces formes de lits se retrouvent donc principalement dans des lits plutôt sablo-graveleux comme observé dans la Loire. Plusieurs types de dunes existent en fonction de la dynamique de l'écoulement et se différencie par la morphologie de la crête : rectiligne (dunes 2D) et sinueuse (dunes 3D). Les dunes sont caractérisées par une asymétrie avec une pente douce au niveau de la face érosive et une pente abrupte (environ 30 °), au niveau de la face d'abris. Les dunes ne sont pas en phase avec les ondulations de la surface libre, qui sont, elles-mêmes, générées par les dunes (De Linares, 2007). Ces structures exercent donc un contrôle aval sur la hauteur d'eau, traduisant ainsi une apparition dans des régimes fluviaux (nombre de Froude < 1). Cette observation oppose les dunes aux antidunes qui sont en phase avec les ondulations de la surface libre. De plus, les antidunes sont symétriques et migrent vers l'amont contrairement aux dunes qui migrent, quant à elles, vers l'aval. La migration vers l'aval s'explique par la géométrie de la face d'abris d'une dune, qui a un fort pouvoir dissipateur d'énergie, engendrant le dépôt des sédiments par la chute brutale de la vitesse d'écoulement. Cet exemple suggère donc que les irrégularités de fond, même de taille modeste, ont un impact sur les écoulements et sur le transport solide (M. De Linares, 2007).

Les barres sédimentaires ou bancs alluviaux, sont des corps sédimentaires plus imposants que les dunes. Ces macroformes ont une longueur proportionnelle à la largeur du chenal et une hauteur proportionnelle à la hauteur d'eau (Jackson, 1975). Les barres sédimentaires correspondent à du matériel en transit à la différence des îles qui ont été colonisées par de la végétation. Néanmoins, une stabilisation dans le temps d'une barre sédimentaire peut apparaître après colonisation par de la végétation, comme c'est le cas dans les rivières de l'Isère et de la Durance (Scorpio et al, 2018). Plusieurs types de barres sédimentaires existent en fonction de la dynamique de formation : barres forcées induisant un forçage et barres libres dans les autres cas (barres alternes ou multiples). Le forçage peut être mis en relation avec une courbure (barres de méandres) ou avec un élargissement de la section (ratio d'aspect) (Seminara et Tubino, 1989). De plus, il est également possible de dissocier barres simples et barres composées. Ces dernières sont souvent issues de la fusion de barres simples.

II. Enjeux de détermination des flux hydrosédimentaires d'un cours d'eau

Les barres sédimentaires sont des macroformes et représentent donc des stocks importants de sédiments en transit qu'il est nécessaire de prendre en compte. En effet, l'évolution d'une structure sédimentaire dans le temps ou la création de nouvelles peuvent être problématiques pour les activités humaines (centrale nucléaire, barrages, etc..).

Ainsi, les enjeux principaux de la modélisation du transport solide sont, d'une part, de comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire d'un système fluvial et, d'autre part, d'améliorer le management d'une rivière pour répondre aux différentes activités et aux différents besoins tout au long du bassin versant.

La réalisation d'un modèle de transport sédimentaire est intéressante à plusieurs titres :

Pérennité des activités et des usages

Dans les lits sablo-graveleux, la relative mobilité des sédiments en lien avec un seuil de mise en mouvement plus faible, engendre, fréquemment, une rapide migration des barres sédimentaires comme c'est le cas dans la Loire (France), au niveau de la Centrale Nucléaire d'Avoine-Chinon (Claude et al, 2014). Des enjeux forts sont présents dans cette configuration du fait que la migration d'une barre sédimentaire peut obstruer la prise d'eau utile au refroidissement des réacteurs. La sécurité publique est mise en danger dans cette situation.

Efficacité des travaux entrepris

La compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire d'un cours d'eau peut aussi permettre d'améliorer l'efficacité des travaux (d'aménagement ou de restauration). Des économies peuvent donc être réalisées à l'aide de l'outil de modélisation.

A titre d'exemple, la connaissance de la migration des barres sédimentaires évitera de réaliser des opérations de dragage ou de curage inutiles, si l'ensemble de la zone se retrouve rapidement comblée par une autre barre sédimentaire.

Autre exemple, la présence d'une barre sédimentaire engendre une diminution de la section du lit mineur. Par conséquent, une élévation de la hauteur d'eau sera observée dans cette zone aboutissant à un accroissement du risque inondation. Ce risque est aussi augmenté du fait que la barre sédimentaire représente une rugosité, et, selon le type d'écoulement, va contrôler la hauteur d'eau en amont (régime fluvial, nombre de Froude < 1). Des dispositifs de renforcement de berge et de réduction du risque inondation (merlon, digues, etc...), peuvent devenir inefficaces dans le cas d'une forte augmentation de la ligne d'eau lors de la variation de la géométrie de la section par exemple.

Préservation des habitats pour la biologie

Les barres sédimentaires peuvent aussi avoir un rôle de niche écologique et d'habitat (Rodrigues, 2014). Certaines peuvent être colonisées par des oiseaux pendant la zone de ponte par exemple. De même, la libération rapide de sédiments dans le cours d'eau lors de crue ou de fort débit pourraient aussi impacter les différents habitats le long du cours d'eau.

III. Intérêts de la prise en compte des dunes dans la migration des barres sédimentaires

Des études ont pu montrer l'impact de la présence de dunes sur les écoulements qui, par rétroaction, vont influencer la migration des dunes. En effet, la réponse de la surface libre à la présence de ce type de forme de lit induit une accélération des vitesses d'écoulement près du fond sur la face érosive (Ferret, 2011). Dans ces conditions, la force de cisaillement, motrice de la mise en mouvement des sédiments, augmente sur la face érosive et diminue sur la face d'abris. Par conséquent, l'impact majeur des dunes sur les écoulements est représenté par une action de résistance (rugosité de peau et rugosité de forme) (Villard et Church, 2005). Ces impacts induisent des macro-turbulences comme les bouillonnements à la surface de l'eau parfois visibles (Ferret, 2011).

Néanmoins, ces structures n'affectent pas uniquement l'écoulement et leur migration. Les dunes sont fréquemment superposées aux barres sédimentaires (Rodrigues, 2014). Or, peu d'études se sont

intéressées à ces interactions dunes/barres, pouvant se définir comme des interactions à échelles différentes selon la taille respective des structures. Les dunes surimposées à des unités sédimentaires peuvent jouer un rôle dans la migration de la structure hôte. En effet, l'étude de Reesink & Bridge de 2009, schématise les « boucles » ou macro turbulences au niveau de la face d'abris, symbolisant les interactions entre les écoulements et les corps sédimentaires lors de rugosité de forme (Fig 1). Une modification des positions des zones érosives et de dépôt est donc identifiable et représente un impact des structures superposées sur leur structure hôte. Concernant les vitesses de migration de ces deux corps sédimentaires, il est généralement admis que la forme superposée possède des vitesses de migration plus importantes que la structure hôte (Reesink & Bridge, 2009).

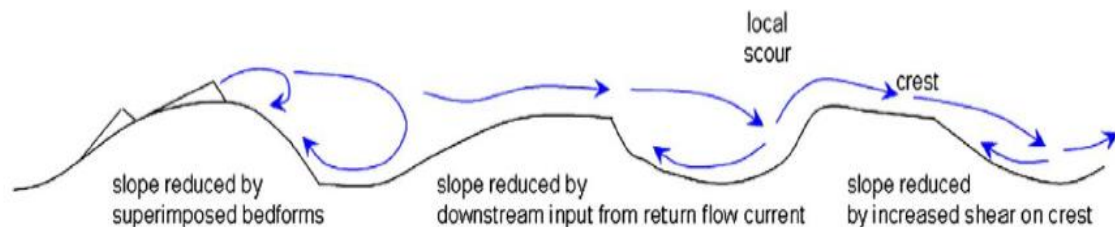


Figure 1: Positionnement des boucles ou macro-turbulences selon plusieurs configurations (source : Reesink & Bridge, 2009)

Certains auteurs ont essayé d'introduire une hauteur seuil des structures surimposées selon laquelle des effets significatifs sur la migration de la structure hôte apparaîtraient. En effet, une hauteur de la dune supérieure à 25 % de la hauteur de la structure hôte engendrerait des modifications suffisantes des conditions hydrodynamiques pour impacter la morphologie et la migration de cette dernière (Reesink, A., & Bridge, J., 2011). D'autres auteurs ont émis l'hypothèse que la fusion de dunes serait un catalyseur pour la création des barres sédimentaires (Ashworth, et al., 2000).

IV. Modélisation des flux hydrosédimentaires

Tout l'enjeu du sujet de P.F.E proposé est de trouver une méthode de modélisation de dunes superposées aux barres sédimentaires, afin de déterminer l'impact de ces dernières sur la migration de la structure hôte.

Dans la présente étude, deux modules (TELEMAC 2D et SISYPHE), rattachés au système de modélisation TELEMAC-MASCARET ont été utilisés du fait de la gratuité et du caractère opensource de ces outils. Le fonctionnement de ce système de modélisation sera explicité ultérieurement.

A. Principes généraux de la modélisation du transport sédimentaire

La modélisation est une tentative de représentation de la réalité. Cette méthode est simplifiée du fait de nombreuses hypothèses simplificatrices permettant de représenter des systèmes complexes. Ces outils sont importants de nos jours, notamment pour les décideurs lors de projets d'aménagement par exemple.

Néanmoins, plusieurs types de modèle existent. D'un point de vue terminologique, les modèles physiques sont des modèles impliquant la réalisation d'une maquette du phénomène étudié à une échelle adaptée. Les modèles numériques sont, quant à eux, basés sur des équations mathématiques afin de décrire le phénomène étudié (transport solide, écoulement, etc...).

L'activité de modélisation numérique nécessite l'utilisation de formules mathématiques appropriées aux problèmes d'étude. Ces systèmes numériques sont en perpétuel amélioration afin de résoudre des problèmes de plus en plus complexes et d'associer représentativité des résultats avec un temps de calcul raisonnable. De manière générale, la modélisation numérique des flux sédimentaires nécessite le couplage de deux composantes : la partie hydrodynamique et la partie morphodynamique.

Equations mathématiques gouvernant les modélisations numériques :

La partie hydrodynamique est représentée à l'aide des travaux d'Adhémar Barré Saint-Venant (F.Cordier, 2018). Les équations obtenues, appelées Equations de Saint-Venant ou Shallow Water Equation (SWE), permettent de résoudre des problèmes unidirectionnels ou bidimensionnels caractérisant des milieux de faibles profondeurs. Dans le détail, ce système d'équations se décompose en deux équations permettant de représenter la loi de conservation de la masse et la loi de conservation de la quantité de mouvement.

La partie morphodynamique est généralement décrite selon l'équation d'Exner (1920), prenant en compte la loi de conservation de la masse (F.Cordier, 2018). Concernant la capacité de transport théorique d'un cours d'eau, plusieurs formules empiriques sont utilisées telles que les équations de Meyer Peter & Muller ou d'Engelund-Hansen par exemple. Néanmoins, la plupart de ces équations de capacité de transport néglige l'effet de la gravité, en prenant comme hypothèse la présence d'un lit plat. Par conséquent, les capacités de transport sont minimisées. Des méthodes de correction existent et se basent sur d'autres formules empiriques (Koch and Flokstra, 1980).

B. Système de modélisation TELEMAC-MASCARET

Ce système se définit comme un ensemble de solveur pour résoudre des problématiques d'écoulement à surface libre. Le développement de ces outils a débuté dans les années 1970 par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction des Recherches et Développement d'EDF. Le système TELEMAC-MASCARET a continuellement été amélioré au cours du temps et est, de nos jours, développé par un consortium d'organisations scientifiques dont Artelia (formerly Sogreah, France), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Germany), Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA, France), Daresbury Laboratory (United Kingdom), Electricité de France R&D (EDF, France), and HR Wallingford (United Kingdom) (<http://www.opentelemac.org>).

Les thématiques principalement visées par ce système de modélisation numérique sont celles de l'étude d'impact et de dimensionnement pour des projets d'aménagement. Des études de zones inondables, de transport sédimentaire ou encore de propagation d'une pollution peuvent ainsi être effectuées par exemple. Ce système de modélisation s'organise sous forme d'un ensemble de solveur, réparti dans plusieurs modules différents. Chaque module a donc des objectifs prédéfinis.

Liste des modules rattachés au système de modélisation TELEMAC-MASCARET :

- TELEMAC 2D : courantologie 2D et suivi de traceurs (= points d'injection). Ce module permet de résoudre des équations liées aux problématiques d'écoulement à surface libre afin d'obtenir des hauteurs d'eau et une vitesse moyenne sur deux composantes (en x et y)
- TELEMAC 3D : courantologie 3D (en x, y et z) + suivi de traceurs et transport solide en suspension. Ce module permet de résoudre des équations liées aux problématiques d'écoulement à surface libre afin d'obtenir des hauteurs d'eau et une vitesse moyenne sur les trois composantes (en x, y, z)
- SISYPHE : Ce module a été conçu pour résoudre un ensemble de problématiques associées au transport sédimentaire et à l'évolution du lit (cas des rivières, lacs, côtes, fleuves, estuaires)
- NESTOR : Ce module est couplé au module SISYPHE afin de déterminer les impacts dans des projets de dragage de sédiment

- TOMAWAC : Ce module permet de représenter la propagation d'une onde dans des zones côtières afin de déterminer l'état de la mer notamment (houle, vagues, etc...)
- ARTEMIS : Ce module permet de représenter la propagation d'une onde (houle par exemple) dans un port ou à proximité d'une zone côtière afin de déterminer l'influence de ces structures sur l'onde
- ESTEL 2D/3D : Ce module vise à modéliser les écoulements souterrains et les problématiques associées à ces écoulements (interne à EDF et non distribué en opensource actuellement)

La totalité de ces modules, à l'exception du module ESTEL 2D/3D sont gratuits et accessibles en opensource (<http://www.opentelemac.org>). A l'aide de couplages entre plusieurs modules, un ensemble de thématiques peuvent être étudiées. Dans le cadre du sujet de Projet de Fin d'Etudes (P.F.E), un couplage entre les modules TELEMAT 2D et SISYPHE a été utilisé.

La suite du rapport va donc porter sur le détail de ces deux modules.

C. Logiciel TELEMAT 2D

1. Informations générales sur le logiciel TELEMAT 2D

Le logiciel a été conçu pour résoudre les équations de Barré Saint Venant datant de 1871 afin d'estimer la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur deux composantes (en x et y). Pour ce faire, un schéma numérique de résolution de ce type d'équations est nécessaire (type éléments finis ou volumes finis par exemple). Ce schéma numérique est associé à une discrétisation du domaine de simulation, se définissant comme l'étape de création du maillage. La maille (pas d'espace) représente l'entité de calcul et d'obtention de résultats dans le modèle.

Ce module seul est notamment utilisé pour résoudre des problématiques d'écoulement à surface libre dans le domaine maritime et fluvial :

- Maritime : étude d'impact ou étude de dimensionnement (infrastructures portuaires, exutoire d'une canalisation en mer, dragage, etc...), courantologie, transfert de pollution (marée noire par exemple), etc...
- Rivière : étude d'impact ou étude de dimensionnement (pont, seuils, barrage), étude de la rupture de barrage, étude zone inondable, transfert de pollution, etc...

Le logiciel TELEMAT 2D ne possède pas d'interface graphique (graphical user interface = .GUI). Par conséquent, ce logiciel s'articule sous forme d'une interface en ligne de commande qui seront, par la suite, exécutée par le système d'exploitation (Windows, Linus) à l'aide de la commande *telemat2d.py*. Les scripts présents dans le logiciel, décrivent, d'une part, l'ensemble des phénomènes physiques pris en compte par le logiciel, et, d'autre part, les équations d'écoulement à surface libre décrites par les Equations de Barrés Saint-Venant. De plus, des scripts des schémas numériques de résolution de telles équations mathématiques/physiques sont aussi présents. Le langage de codage est souvent sous forme PYTHON. Néanmoins, l'utilisateur a la liberté de pouvoir créer ses propres scripts dans le cas où des fonctions utiles dans son étude ne sont pas disponibles dans le logiciel. Les scripts supplémentaires devront être codés en langage FORTRAN.

Les scripts présents dans TELEMAC-2D possèdent de nombreuses variables qui devront être définies dans des fichiers distincts (*cf partie gestion des fichiers du logiciel TELEMAC 2D*).

2. Gestion des fichiers du logiciel TELEMAC 2D

Plusieurs types de fichiers sont associés à TELEMAC 2D. D'une part, le logiciel TELEMAC 2D nécessite des fichiers d'entrée afin de pouvoir exécuter ses scripts. D'autre part, des fichiers de sortie vont aussi être générés lors de la simulation.

Etape de pré/post-processeur :

Dans une optique de préparation, d'analyse et de visualisation des fichiers de TELEMAC 2D, une compatibilité avec des logiciels ayant une interface graphique, tel que BLUE-KENUE, est présente. Cette interface graphique permet à l'utilisateur de réaliser des étapes de pré-processeur (préparation des fichiers, génération du maillage) et de post-processeur (analyse et visualisation des résultats). Le logiciel TELEMAC 2D sera donc utilisé en tant que logiciel de résolution numérique uniquement (processeur).

Ensemble de fichiers de simulation de TELEMAC 2D

Fichiers d'entrée :

- Fichier paramètre (.cas) pouvant être créé à l'aide du logiciel FUDA PRE-PRO. Ce fichier permet notamment la :
 - Définition des chemins relatifs de chaque fichier de la simulation, permettant ainsi de relier tous les fichiers de la simulation à travers leur chemin respectif,
 - Définition de la configuration de la simulation (durée de simulation, pas de temps calcul et pas de temps résultat, etc...),
 - Définition des équations à résoudre ainsi que le schéma numérique utilisé pour résoudre ces équations (explicite, implicite, méthode des caractéristiques, etc..),
 - Définition des valeurs des conditions initiales et aux limites
 - Définition de la rugosité du domaine ainsi que la loi de frottement utilisée
- Fichier géométrie (.slf, format Selafin), contenant les informations sur le maillage (pas d'espace, nombre de points du maillage et leur coordonnée, leur forme, etc...). Ce fichier contient aussi la topographie ou bathymétrie associée aux points du maillage. Ce fichier est créé à l'aide du logiciel BlueKenue,
- Fichier conditions aux limites (.cli), contenant les informations sur la bordure du domaine de simulation. Ce fichier indique le type de condition aux limites utilisées dans la simulation. Ces conditions peuvent être de différentes formes telles qu'une hauteur d'eau, une côte altimétrique du niveau d'eau, ou encore un débit. Ce fichier est créé à l'aide du logiciel BlueKenue,
- Fichier des courbes de tarage dans le cas d'une simulation non stationnaire (unsteady), dans laquelle une relation hauteur/débit pour les frontières aux limites est utilisée.
- Fichier de précédents résultats dans le cas d'une reprise de calcul ou d'une poursuite avec une réutilisation des données obtenues au précédent pas de temps,

Fichiers de sortie :

- Fichier résultats (.slf), contenant les résultats sous forme graphique
- Fichier de synthèse de la simulation (log file), correspondant au compte rendu de la simulation. Ce fichier est utile lors d'erreur d'exécution notamment (temps d'exécution du script, code d'erreur, nombre d'implémentation, etc...). Le mot-clé DEBUGGER = 1 permet d'obtenir un compte rendu plus détaillé.

Autres fichiers en fonction de l'objectif de l'étude :

- Fichier des marées contenant les informations sur les marées (heures des marées, type de marées (grandes/basses), amplitudes de la hauteur d'eau, etc...)
- Fichiers de marées noires dans le cas de simulation de la dispersion de la pollution
- Fichier de seuils, de buses, de ponts dans le cas de modélisation avec des ouvrages hydrauliques
- Fichier de rupture dans le cas d'étude de rupture (cas des barrages par exemple)
- Fichier des sources contenant des informations sur les sources. Les sources correspondent à des points d'injection de traceurs (=espèces chimiques) dans le domaine de simulation

Configuration des fichiers d'entrée TELEMAC 2D :

Une terminologie précise doit être employée afin de respecter la syntaxe utilisée dans les scripts présents dans le logiciel TELEMAC 2D. Une initialisation par mots-clés est à effectuer dans chaque fichier d'entrée. Afin de connaître les mots-clés à utiliser, le manuel de l'utilisateur de TELEMAC 2D aborde ces notions. De plus, un fichier dictionnaire existe dans le logiciel et permet de connaître la liste des mots-clés pour chaque paramètre à fixer ainsi que leur valeur par défaut.

L'utilisateur peut créer des fichiers textes ou se servir de fichiers modèles fournis (cas tests TELEMAC ou FUDAA-PREPRO). Dans tous les cas, ces fichiers servent à attribuer des valeurs aux différents mots-clés. Si aucune valeur n'est attribuée, une valeur par défaut, définie dans le fichier dictionnaire, sera utilisée par le logiciel.

D. MODULE SISYPHE :

1. Informations générales sur le logiciel SISYPHE

Le logiciel SISYPHE a été conçu pour résoudre un ensemble de problématiques morphodynamiques (transport sédimentaire et évolution du lit). Il est à noter que la morphodynamique correspond à la réponse du stock sédimentaire aux conditions hydrodynamiques et, notamment, à la contrainte de cisaillement de fond (bed shear stress).

Ce module peut être utilisé dans le cas de sédiments cohésifs et non-cohésifs ainsi qu'en cas de mélange (sand-mud mixture) (<http://www.opentelemac.org>). Les taux de transport sédimentaire de fond (=charriage), en suspension et totaux (charriage + suspension), peuvent être simulés à l'aide des équations et des concepts présents dans le logiciel SISYPHE. Ainsi, des études en rivières, lacs, fleuves et estuaires peuvent être menées.

2. Ensemble de fichiers de simulation de SISYPHE

Pour effectuer une simulation à l'aide de ce module, il est, à *minima*, nécessaire de créer trois fichiers d'entrée pour exécuter les scripts présents au sein du logiciel SISYPHE :

- Fichier des paramètres physiques et numériques (.cas), dans lequel plusieurs informations doivent être indiquées :
 - Paramètres physiques (taille des grains, type de sédiment (cohésif ou non), vitesse de transport, etc...)
 - Paramètres numériques (schéma numérique, autres options du solveur, etc...)
 - Type de transport dominant (charriage, suspension) et les équations de transport retenues associées
 - Autres informations tel que la présence de courant secondaire par exemple (cas des méandres)

Le fichier paramètre pourra être créé de manière similaire à celle décrite pour le logiciel TELEMAC 2D : fichier texte avec le logiciel FUDAA PRE-PRO en veillant à utiliser les mots-clés appropriés.

- Fichier hydrodynamique contenant des informations en termes de vitesse d'écoulement, de hauteurs d'eau et de contrainte de cisaillement au niveau du lit (bed shear stress). Cette contrainte est à l'origine de la mise en mouvement du stock sédimentaire lors du dépassement d'une valeur seuil.
- Fichier géométrie (.slf, format Sélafin), définit de la même manière que celle détaillée pour le logiciel TELEMAC 2D.

3. Couplage modules hydrodynamique/morphodynamique

Suivant les types de fichiers d'entrée cités précédemment, un lien entre l'hydrodynamique et la morphodynamique existe. Néanmoins, ces interactions sont réciproques dans certains cas. En effet, l'évolution de la géométrie du domaine influence aussi les paramètres hydrodynamiques. Par conséquent, un couplage entre les modules hydrodynamique (TELEMAC 2D ou TELEMAC 3D) et morphodynamique (SISYPHE) du système de modélisation TELEMAC-MASCARET est pertinent.

Plusieurs méthodes de couplage existent en fonction des hypothèses de départ :

➤ Couplage à la chaîne :

Exécution du module hydrodynamique en premier avec considération d'un lit fixe. Les résultats finaux de la simulation seront ensuite introduits comme fichiers d'entrée dans le module morphodynamique. Néanmoins, l'emploi de cette méthode repose sur l'hypothèse que l'influence hydrodynamique domine sur l'aspect morphodynamique dans le domaine de simulation. Autrement dit, la morphodynamique n'influence pas, ou de manière négligeable, l'hydrodynamique. En fonction du temps de mobilisation du stock sédimentaire, cette hypothèse est valable.

➤ Couplage interne :

Ce type de couplage permet de prendre en compte l'influence de la morphodynamique sur l'hydrodynamique. Contrairement à la méthode précédente, il s'agit d'effectuer un couplage à la chaîne avec mise à jour de la géométrie du domaine pour chaque pas de temps (Fig 2). Autrement dit, le module hydrodynamique sera exécuté en premier ; le module morphodynamique sera ensuite exécuté à l'aide des résultats hydrodynamiques et une mise à jour de la géométrie du domaine sera effectuée avant le pas de temps suivant.

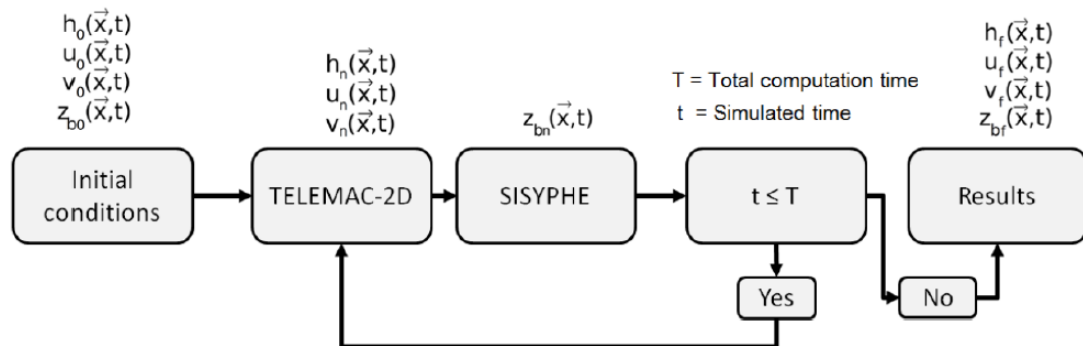


Figure 2: Schéma simplifié du couplage interne (source: A two-dimensional numerical study of the hydrodynamics, sediment transport and morphodynamics in the middle Loire river, R. Pizarro, 2018)

Bien que plus couteuse en ressource et en temps, cette méthode de couplage a été retenue dans la présente étude.

Ce type de couplage nécessite l'utilisation de mots-clés dans le fichier paramètre de TELEMAC 2D (Fig 3). Chaque module peut avoir des pas de temps de calcul différent. Néanmoins, dans la plupart des cas, pour des questions de stabilité du modèle, le pas de temps de calcul dans les deux modules sont identiques, d'où *COUPLING PERIOD = 1 (default value)* (Fig 3).

$$\Delta t \text{ Sisyphe} = \Delta t \text{ Telemac 2D} * \text{COUPLING PERIOD}$$

Keywords

For internal coupling, the following keywords need to be specified in the TELEMAC-2D or TELEMAC-3D steering files :

- COUPLING WITH = SISYPHE
- COUPLING PERIOD =1, default value
- NAME OF SISYPHE STEERING FILE

Figure 3: Mots-clés permettant un couplage interne entre les modules TELEMAC 2D et SISYPHE (source : user manual SISYPHE)

V. Matériels et méthodes

Pour rappel, un modèle existant a été utilisé dans la présente étude. La méthodologie détaillée de création de ce modèle est disponible dans le rapport « A two-dimensional numerical study of the hydrodynamics, sediment transport and morphodynamics in the middle Loire river » (R.Pizarro, 2018).

La méthodologie générale a été de réaliser plusieurs tests en faisant varier la rugosité du domaine de simulation, afin de tenir compte de la présence de dunes surimposées aux barres sédimentaires.

Ces différents tests ont été organisés de manière à réaliser deux types de simulation :

- Simulation avec variations de la rugosité de manière homogène sur l'ensemble du domaine
- Simulation avec variations locales de la rugosité au niveau des barres sédimentaires du domaine d'intérêt

Les éléments principaux de la méthodologie suivie dans la présente étude sont détaillés ci-dessous.

A. Géométrie

Le modèle existant sur la zone d'étude possédait deux géométries différentes, ayant été réalisées en période de basses eaux (05/12/2017) et hautes eaux (19/01/2018).

Les deux géométries ont été utilisées dans la présente étude. La géométrie de basses eaux (05/12/2017) (Fig 4), a été utilisée pour les simulations avec variations de la rugosité de manière homogène sur l'ensemble du domaine, tandis que la géométrie de hautes eaux (19/01/2018) (Fig 5), a été utilisée pour les simulations avec variations locales de la rugosité.

Concernant la géométrie à basses eaux, les campagnes ayant servi à la création de la géométrie du modèle ont été réalisées en période de basses eaux et durant laquelle aucune crue n'a été observée (campagne LIDAR topo-bathymétrique en septembre 2017 et campagne bathymétrique le 5 décembre 2017). La campagne LIDAR a permis de couvrir une longueur de 12 kilomètres avec une résolution de 2 mètres (R.Pizarro, 2018). La période d'acquisition de la topo-bathymétrie n'a pas permis l'enregistrement des mésoformes (dunes) surimposés aux barres sédimentaires.

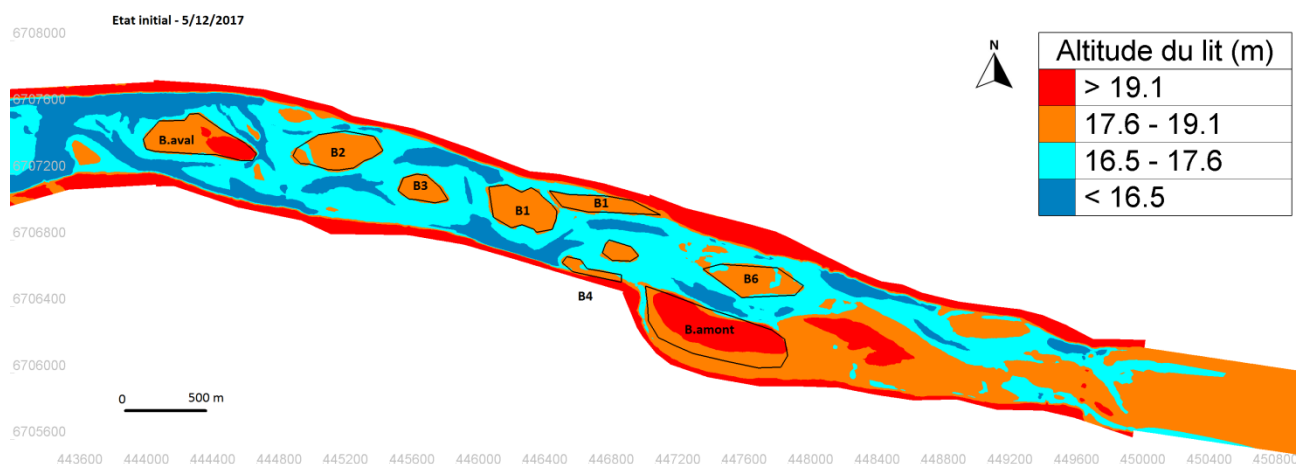


Figure 4: Altimétrie du domaine de simulation durant la période de basses eaux (05/12/2017) selon modèles préexistants

Concernant la géométrie à hautes eaux (19/01/2018), une crue biennale a modifié la géométrie du domaine de simulation. Une campagne bathymétrique réalisée le 19/01/2018, a été utilisée pour la constitution du Modèle Numérique de Terrain.

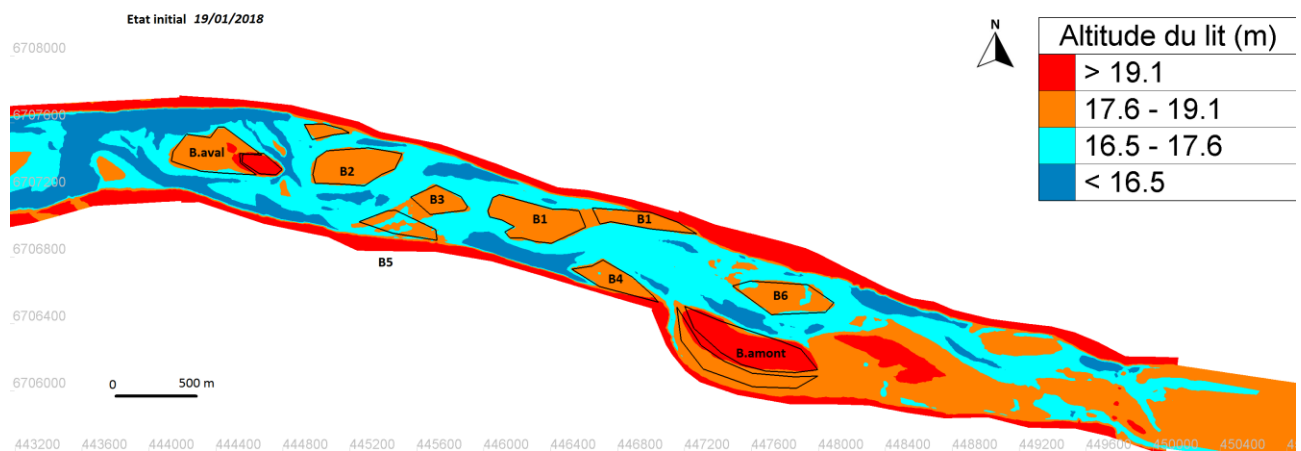


Figure 5: Altimétrie du domaine de simulation durant la période de hautes eaux (19/01/2018) selon modèles préexistants

B. Maillage

Le maillage est identique pour les deux géométries. Aucune modification du pas d'espace n'a été effectuée. Ainsi, le maillage du travail préexistant a été utilisé (Fig 6).

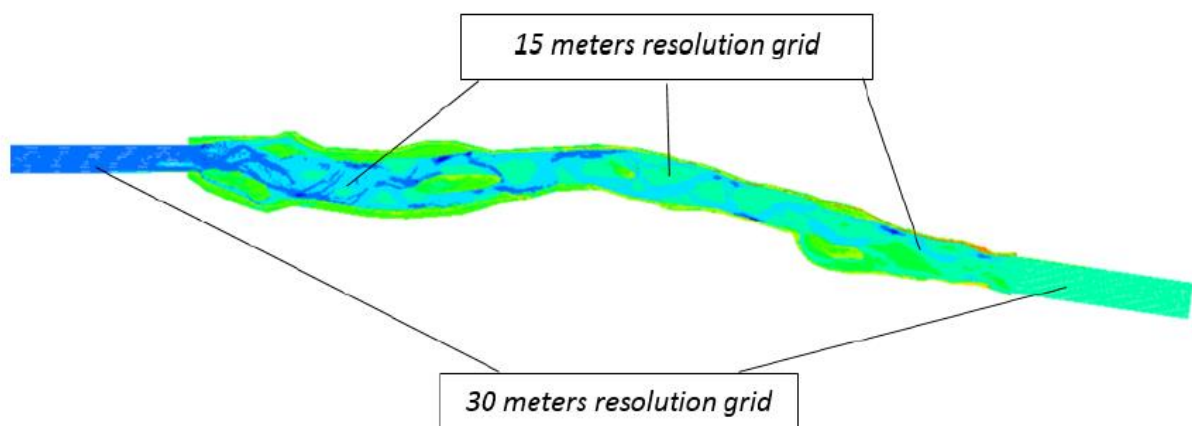


Figure 6: Discretisation du domaine de simulation (source: A two-dimensional numerical study of the hydrodynamics, sediment transport and morphodynamics in the middle Loire river, R. Pizarro, 2018)

Une extension en amont du domaine était présente dans le maillage existant. Ainsi, l'application de la condition amont est appliquée de manière éloignée à la zone d'intérêt, afin de réduire les instabilités du modèle au niveau de cette dernière.

C. Conditions aux limites

Les simulations avec la géométrie du 05/12/2017 ont été effectuées dans un cas non stationnaire. Ainsi, un hydrogramme, enregistré au niveau de la station de jaugeage de Saumur, a été utilisé comme condition amont. Une condition aval de type « hauteur d'eau » a également été utilisée à partir d'une courbe de tarage. L'évolution du lit sur 45 jours a été étudiée dans ce cas.

Dans une optique d'optimisation des temps de calcul, les simulations avec la géométrie du 19/01/2018 ont été effectuées dans un cas stationnaire. Ainsi, la condition amont était de type « débit » avec une valeur fixe de $1525 \text{ m}^3/\text{s}$. Une condition aval de type « hauteur d'eau » a été utilisée. L'évolution du lit sur 10 jours a été étudiée dans ce cas.

D. Rugosité du modèle

Deux composantes sont présentes afin de traduire la rugosité totale observée au niveau d'une zone à simuler : rugosité de peau, en lien avec la granulométrie des sédiments du lit et rugosité de forme, correspondante aux différentes formes de lit observées sur le tronçon de simulation. La rugosité de forme est enregistrée dans la géométrie du modèle, tandis que la rugosité de peau est définie ultérieurement dans le fichier paramètre ou dans l'étape de pré-processing.

Afin de prendre en compte la présence de ces dunes, la rugosité du modèle a été retravaillée :

Cas géométrie du 05/12/2017 :

Un coefficient d'ajustement de la rugosité de peau a été utilisé afin de faire varier de manière homogène l'ensemble de la rugosité du domaine. L'influence de ce paramètre a été déterminé à l'aide de trois tests différents : cas $\alpha = 2.0$ / cas $\alpha = 20.0$ / cas $\alpha = 50.0$.

Ce paramètre permet de calibrer la rugosité des modèles numériques et est défini suivant la formule :

$$K's = \alpha * d_{50}$$

Avec :

$K's$ = rugosité de peau, α = paramètre d'ajustement et d_{50} = diamètre moyen des sédiments

Cas géométrie du 19/01/2018 :

Trois tests différents ont été réalisés avec une adaptation locale de la rugosité au niveau des barres sédimentaires d'étude (Fig 7). Un résumé des valeurs de rugosité (selon la loi de Strickler) est explicité ci-dessous (Tab I).

Les zones où la rugosité a été modifiée ont été déterminées à l'aide d'une analyse topographique et photographique. Des images aériennes du site d'étude ont été utilisées afin de localiser les barres sédimentaires. Une hypothèse de développement de dunes sur l'ensemble de ces barres a été émise et a conduit à une modification de la rugosité sur l'ensemble de ces dernières (zones en jaune Fig 7). Les zones présentant une végétalisation sont caractérisées par une valeur de rugosité les plus élevées (zones en bleu Fig 7).

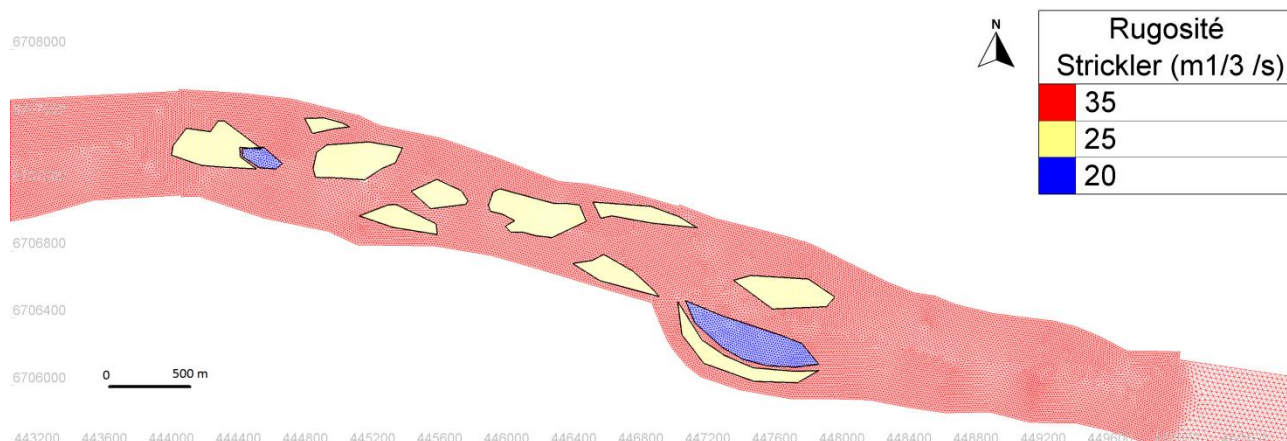


Figure 7: Localisation de l'adaptation locale de la rugosité de peau

Une délimitation topographique de ces zones a également été effectuée aboutissant à une adaptation spatiale de la rugosité suivant la figure ci-dessous (Fig 8). Les barres sédimentaires possèdent une cote altimétrique comprise entre 17.6 et 19.1 mètres (Fig 8 et zones en jaune Fig 7). Les zones présentant une rugosité plus élevée (végétalisation ou cote altimétrique > 19.1 m), possèdent la valeur de rugosité la plus élevée (Fig 8 et zones en bleu Fig 7).

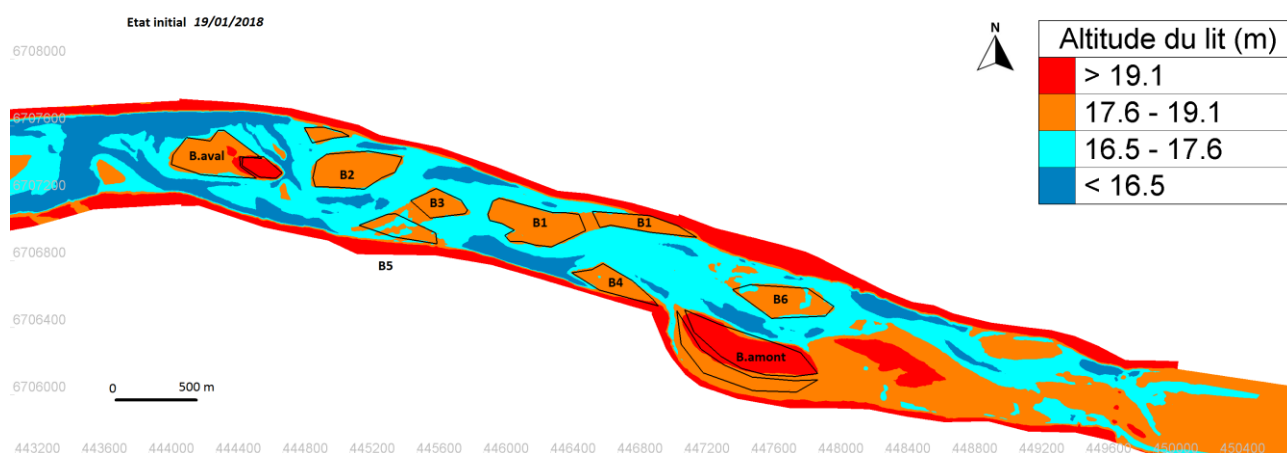


Figure 8: Localisation des barres sédimentaires étudiées et des valeurs de rugosité attribuées

Selon les coefficients de frottement appliqués, le cas 3 correspond à la simulation avec la rugosité la plus élevée.

Tableau I: Attribution des coefficients de frottement pour les différents tests

Tests	Coefficient de rugosité - Strickler ($m^{1/3}/s$)		
	Autres	Barres + dunes	îles - végétalisation
1	35	30	25
2	35	25	20
3	35	20	15

VI. Résultats

La délimitation des barres sédimentaires à l'état initial permet de suivre le déplacement de ces dernières au cours du temps. Ainsi, une comparaison entre la localisation des barres à l'état initial et final a été effectuée pour les différentes valeurs de rugosité. Cette méthodologie a été suivie pour les deux géométries (Fig 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 et 16).

A. Cas géométrie du 05/12/2017

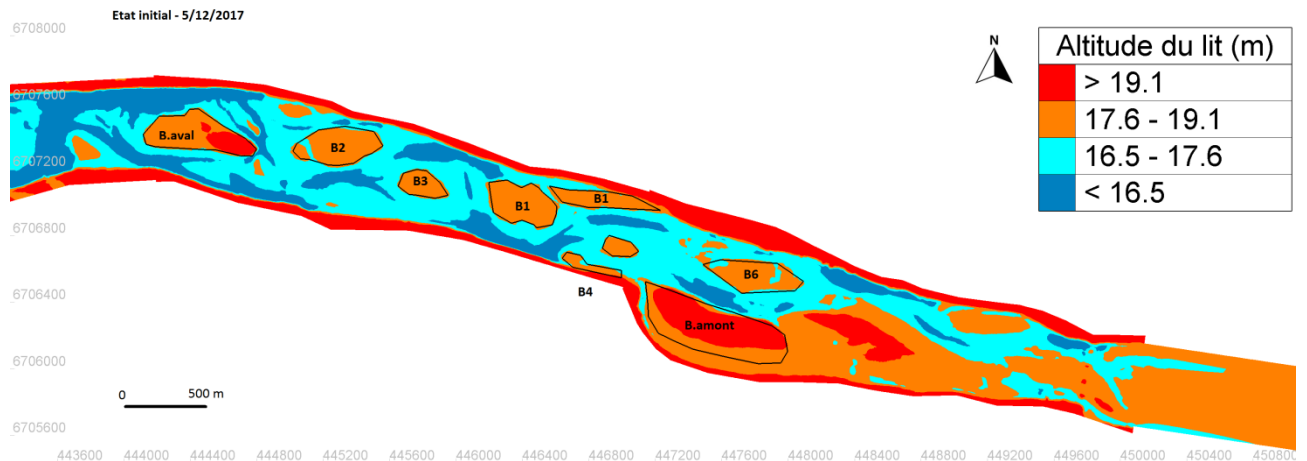


Figure 9: Etat initial de la cote altimétrique du lit de la Loire au niveau de Saint Mathurin sur Loire

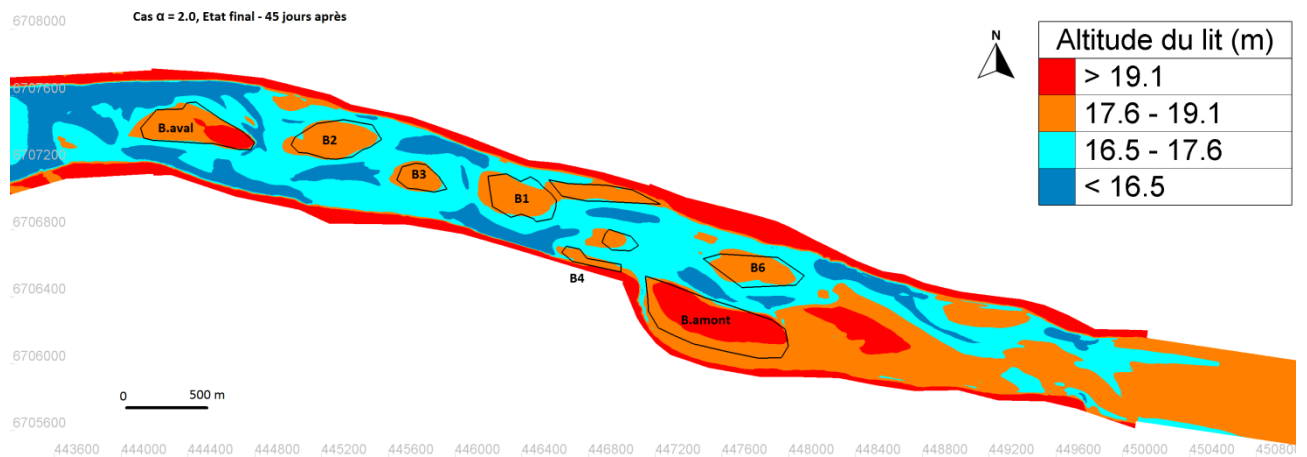


Figure 10: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas $\alpha = 2.0$)

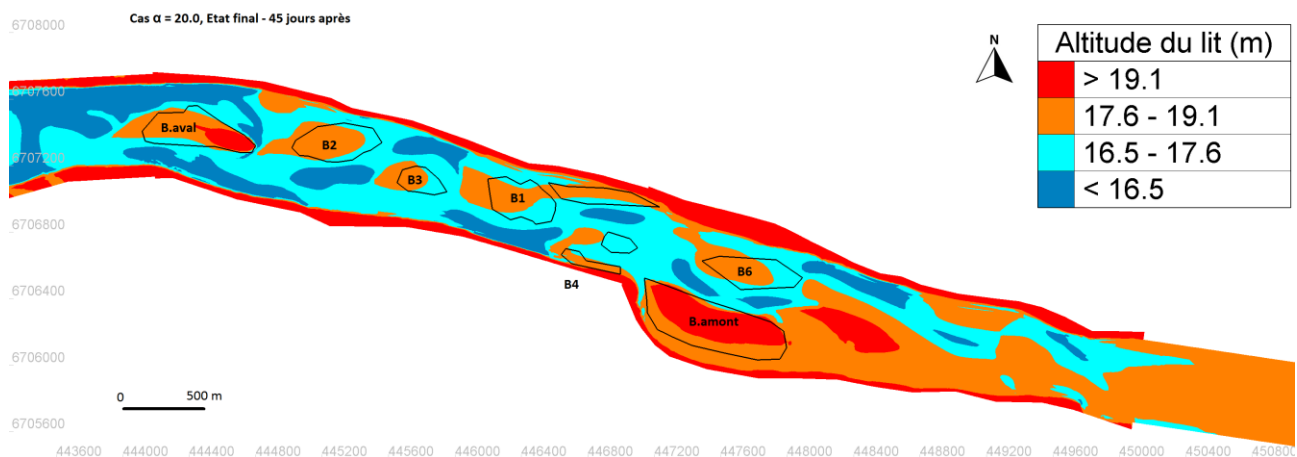


Figure 11: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas $\alpha = 20.0$)

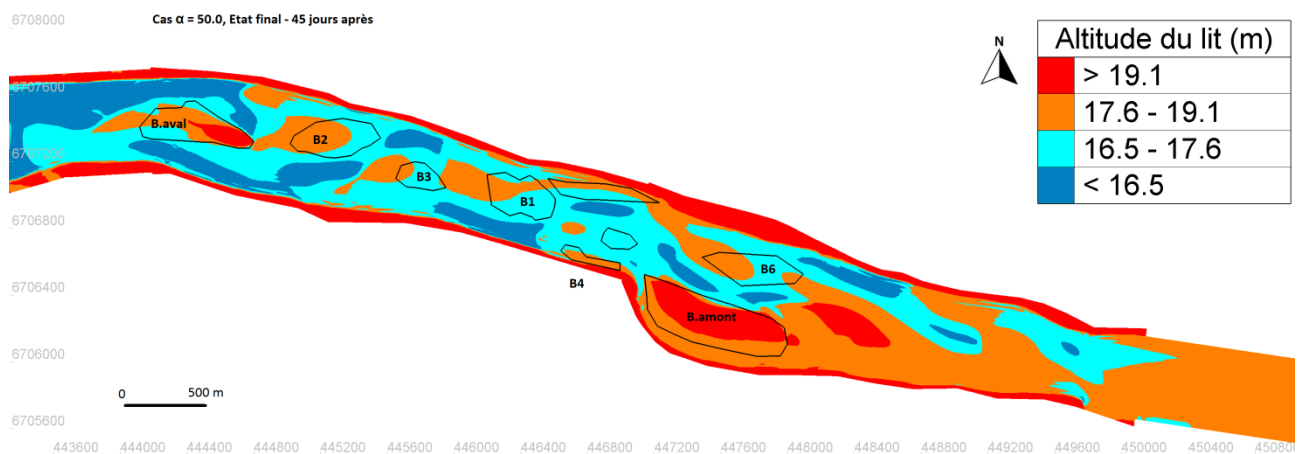


Figure 12: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas $\alpha = 50.0$)

B. Cas géométrie du 19/01/2018

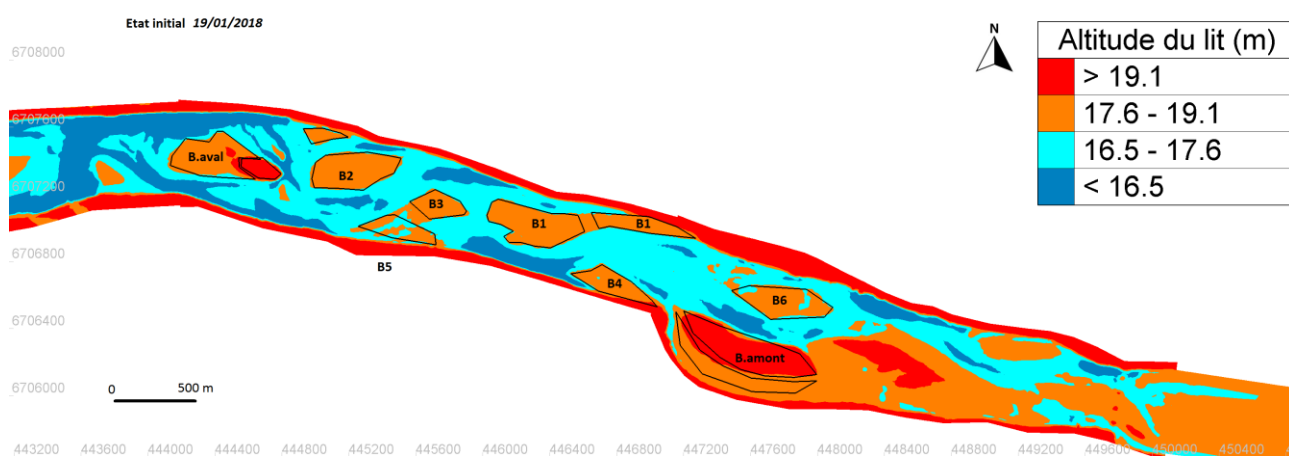


Figure 13: Etat initial de la cote altimétrique du lit de la Loire au niveau de Saint Mathurin sur Loire

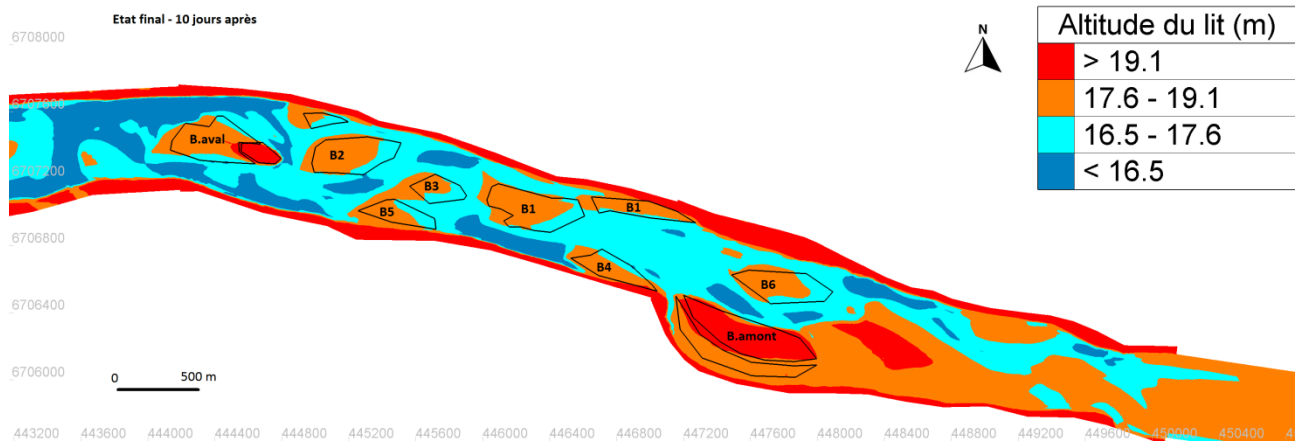


Figure 14: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas test 1)

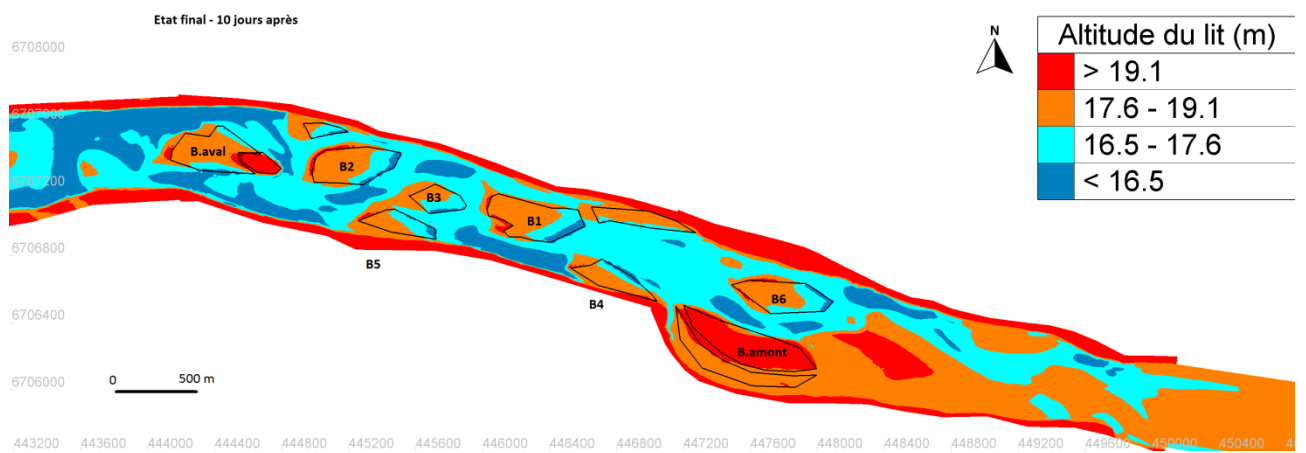


Figure 15: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas test 2)

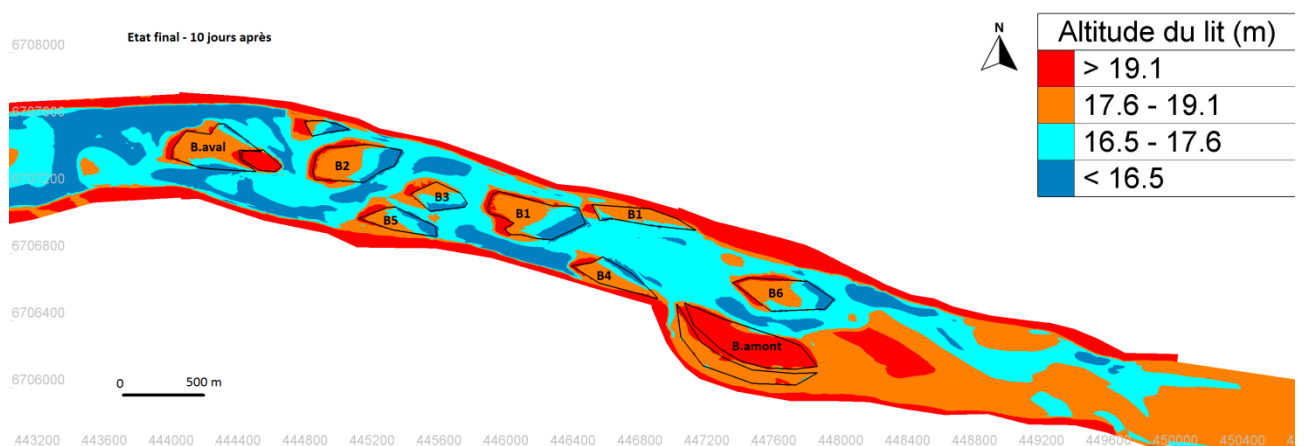


Figure 16: Altitude du lit à la fin de la simulation (cas test 3)

VII. Discussion

A partir des différents résultats obtenus, il semblerait que la rugosité influence le transport sédimentaire de la zone. Dans les deux cas, par une approche visuelle, plus la rugosité du domaine augmente, plus l'évolution du lit est importante.

A. Cas géométrie du 05/12/2017

Une quantification des vitesses de déplacement de chaque barre sédimentaire a été effectuée (Tab II, Fig 17):

Tableau II: Vitesse de déplacement estimée pour chaque barre sédimentaire lors de l'ajustement du paramètre de rugosité α

Coefficient α	Vitesse de déplacement (m/j)					
	B1	B2	B3	B4	B6	B.aval
2	1.5	0.7	0.7	2.2	0	1.5
20	3.7	3.7	3	4.4	0.7	3.7
50	6.7	5.2	5.2	5.2	1.5	5.9

La figure suivante met en évidence une augmentation des vitesses de déplacement des barres sédimentaires avec l'augmentation de la rugosité du domaine (Fig 17). Néanmoins, les vitesses ne sont pas équivalentes pour toutes les barres sédimentaires. La barre la plus en amont du domaine (B6) montre les vitesses les plus faibles tandis que les barres B4 et B1 semblent être les plus dynamiques (Fig 17).

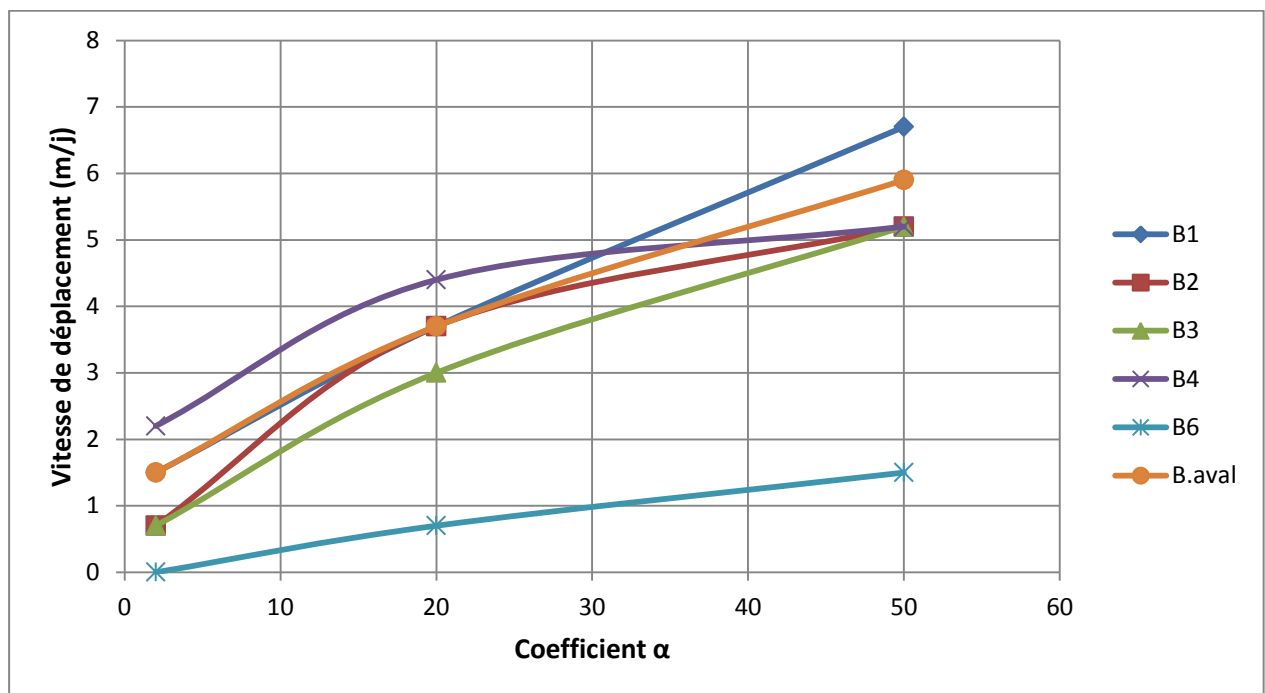


Figure 17: Vitesse de déplacement de chaque barre sédimentaire selon le coefficient d'ajustement α

B. Cas géométrie du 19/01/2018

L'adaptation locale de la rugosité est la plus représentative. Des dunes apparaissent dans le domaine de simulation uniquement lors de la submersion des barres sédimentaires. Ainsi, la rugosité sera temporairement et localement augmentée durant les épisodes de crue.

Une quantification des vitesses de déplacement de chaque barre sédimentaire a été effectuée. Contrairement à la partie précédente, les variations de rugosité n'engendrent pas d'augmentation des vitesses de déplacement (Tab III). Il est à noter que les variations du coefficient de rugosité sont très faibles en comparaison avec celles du paramètre d'ajustement α .

Néanmoins, des barres sédimentaires se déplaçant à une même vitesse peuvent être identifiées. Ainsi, les barres sédimentaires B1, B3, B5 et celle en aval du domaine d'intérêt se déplacent à une vitesse de 6.7 m/j (Tab III). Les barres B2, B4 et B6 migrent plus lentement avec une vitesse estimée à 3.3 m/j.

Tableau III: Vitesse de déplacement estimée pour chaque barre sédimentaire lors de l'ajustement du coefficient de Strickler appliqué

TEST	Vitesse de déplacement (m/j)						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B.aval
1	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7
2	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7
3	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7	3.3	6.7

Outre les faibles écarts de vitesse de déplacement en fonction de la rugosité, une évolution significative des profils longitudinaux sont observables (Fig 18, 19, 20, et 21). Plus la rugosité du domaine augmente, plus les phénomènes érosifs en amont et les phénomènes de dépôt en aval des barres augmentent (Fig 19, 20 et 21). Contrairement au cas réalisé avec l'ajustement du paramètre α , la morphodynamique montre une évolution altimétrique plutôt que planimétrique. Ainsi, l'ampleur du déplacement longitudinal des barres sédimentaires est inchangée selon l'adaptation de la rugosité, mais des variations altimétriques significatives sont présentes.

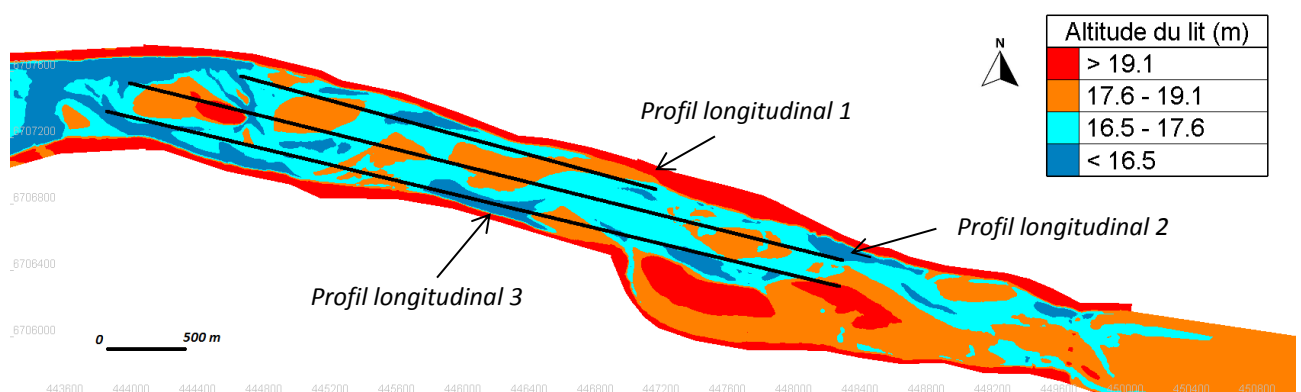


Figure 18 : Localisation des différents profils longitudinaux

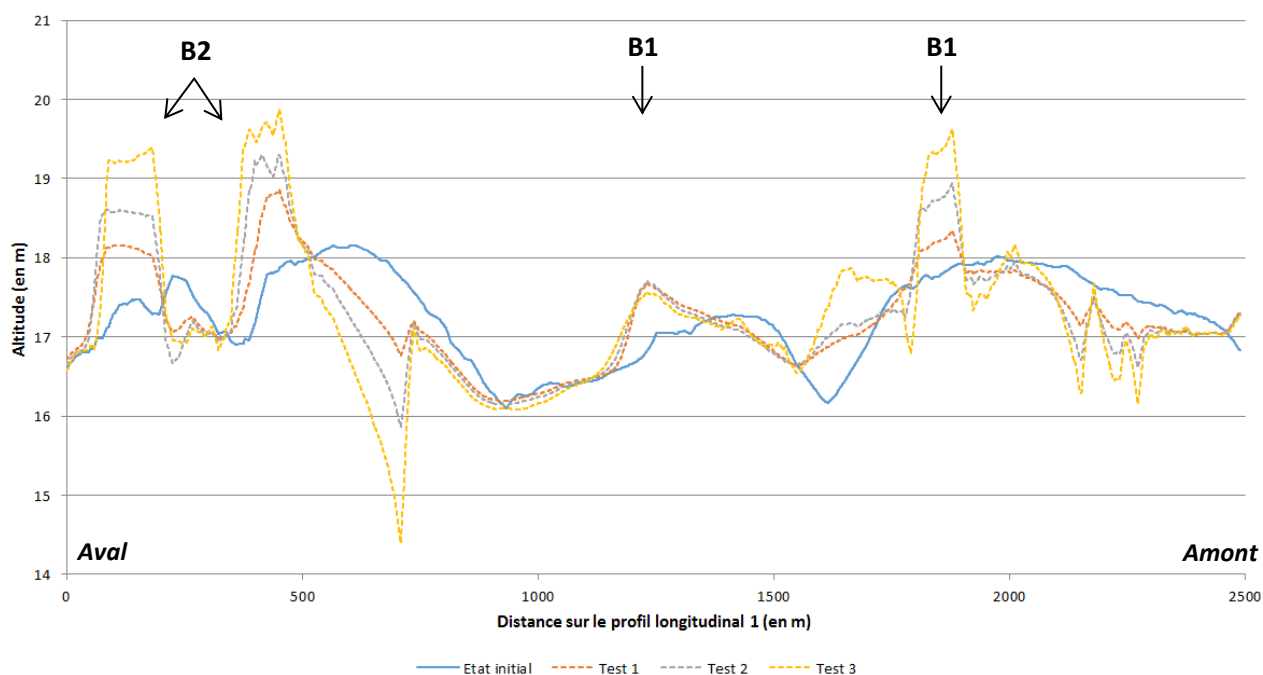


Figure 19: Evolution du profil longitudinal 1 en fonction de la rugosité du domaine

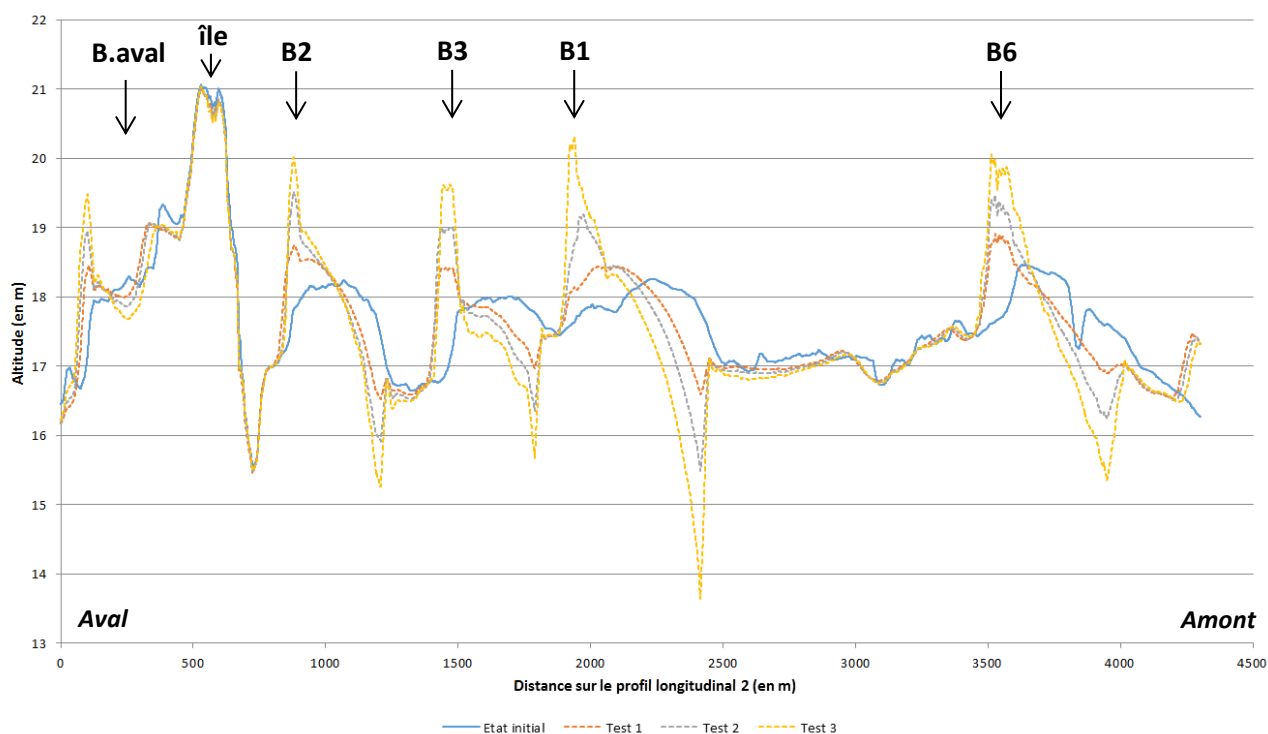


Figure 20: Evolution du profil longitudinal 2 en fonction de la rugosité du domaine

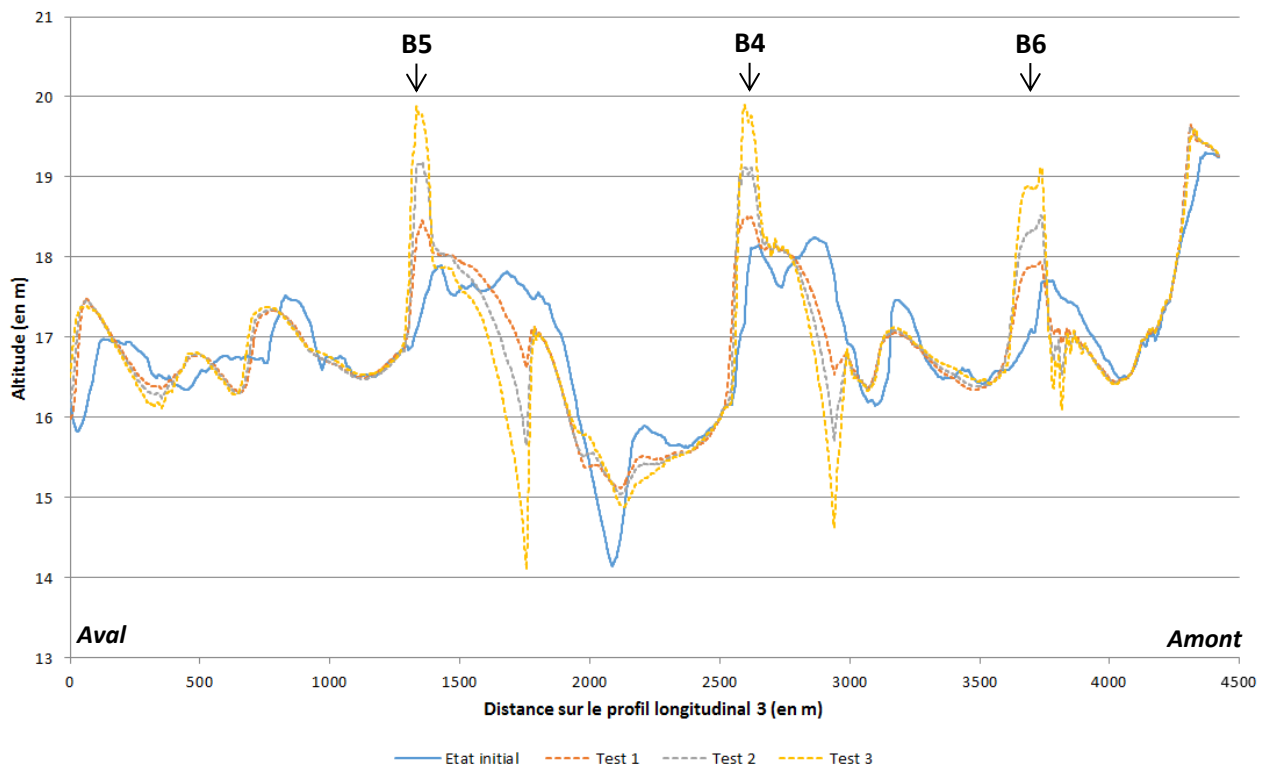


Figure 21: Evolution du profil longitudinal 3 en fonction de la rugosité du domaine

Limites de la méthodologie et des données obtenues :

La méthodologie utilisée permet de prendre en compte la présence de dunes surimposées aux barres sédimentaires en augmentant la rugosité totale du domaine. Néanmoins, l'ajustement de ce paramètre s'est fait par une augmentation de la rugosité de peau alors que les dunes sédimentaires impactent uniquement la rugosité de forme. Ainsi, la représentativité des résultats est impactée car ce type de forme de lit occasionne des « boucles » ou macro turbulences au niveau de la face d'abris. Ainsi, l'hydrodynamique et la morphodynamique ne sont pas correctement estimées.

Un autre aspect affectant la validité des résultats est que les différentes simulations ont été uniquement réalisées avec un débit liquide en amont du domaine. Aucun débit solide n'a été imposé en condition amont. La conséquence majeure serait une accentuation de processus érosif en amont du domaine en lien avec la réduction des possibles phénomènes de comblement par apport de charges solides.

Conclusion

Le présent rapport avait pour objectif de développer une méthodologie afin de prendre en compte la présence de dunes surimposées à des barres sédimentaires lors d'épisode de crue, sur un tronçon entre les villages de Saint-Mathurin-sur-Loire et de La Bohalle (département de Maine-et-Loire, France). La détermination de l'influence des dunes sur la migration de la structure hôte était également visée.

L'étude a fait appel à de la modélisation numérique hydrosédimentaire, réalisée avec les modules hydrodynamiques (TELEMAC 2D) et morphodynamique (SISYPHE) du système de modélisation TELEMAC-MASCARET. La présence de ces mésoformes impliquait de modifier la rugosité du domaine de simulation, dont cette dernière a été réalisée sous deux approches différentes : une modification générale et une modification locale. L'ajustement local de la rugosité du domaine était la plus représentative du fait que les dunes apparaissent uniquement sur les barres sédimentaires dans le tronçon d'analyse.

Des résultats différents ont été obtenus selon l'approche réalisée, avec des modifications principalement planimétriques lors de la variation générale, et principalement altimétriques lors de variations locales de la rugosité. Dans les deux cas, la rugosité influençait la morphodynamique.

Néanmoins, la méthodologie utilisée présentait des limites dont il est nécessaire de prendre en compte pour mieux appréhender la validité des résultats. Ainsi, l'absence de débit solide en condition amont et l'ajustement du paramètre de rugosité par une modification de la rugosité de peau sont des limites identifiées.

Dans une optique de comparaison entre les deux approches (générale et locale), il serait nécessaire de réaliser les simulations avec les mêmes conditions aux limites, sur une même géométrie, sur une même durée et en utilisant la même loi de frottement.

Pour conclure, concernant l'objectif initial de modélisation de ces mésoformes et de la détermination de leurs effets, la prise en compte est partielle en lien avec l'évolution de la rugosité totale par modification de la rugosité de peau.

Bibliographie

Ashworth, P. J., Best, J. L., & Bristow, C. S., 2000. *Morphological evolution and dynamics of a large , sand braid - bar , Jamuna River , Bangladesh.* *Sedimentology*, 47(MAY), 533–555. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00305.x>

Bridge, 2003. *Rivers and Floodplains, Forms, Processes, and Sedimentary Record.* Blackwell Publisuning, Oxford U.K. 600 pages

CITERES UMR 7324, 2016. *Détails projet R-TEMUS*, <http://citeres.univ-tours.fr/spip.php?article2476>

Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.-G., Tassi, P., and Jugé, P., 2014. *Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France.* *Water Resources Research*, 50(4):2850–2873.

EDF R&D, 2014. *Sisyphe v6.3 User's Manual - NATIONAL HYDRAULICS AND ENVIRONMENT LABORATORY NUMERICAL AND PHYSICAL MODELLING IN RIVER AND COASTAL HYDRODYNAMICS*, 76 pages

EDF R&D, 2010. *Hydrodynamique bidimensionnelle, Logiciel TELEMAR-2D - Version 6.0 MANUEL DE L'UTILISATEUR*, 124 pages

Ferret, Y., 2011. *Morphodynamique des dunes sous-marines en contexte de plate-forme mégatidale (Manche orientale). Approche multi-échelles sapo-temporelles.* Rouen.

Florian Cordier, 2018. *MORPHODYNAMIQUE DES BANCS DANS DES RIVIÈRES AMÉNAGÉES À GRANULOMÉTRIE ÉTENDUE.* Thèse de l'Université de Paris-Est. 354 pages

Jackson, 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced By shearing flow, (51104), 1523–1533. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2)

Koch, F. and Flokstra, C., 1980. *Bed Level Computations for Curved Alluvial Channels: Prepared for the 19th IAHR Congress, New Delhi, India, February 1981.* Waterloopkundig Laboratorium.

Matthieu De Linares, 2007. *Modélisation numérique bidimensionnelle du transport solide et de la dynamique fluviale. Validation sur deux sites en Loire et sur l'Arc.* Thèse dans le cadre de l'Ecole Doctorale Terre Univers Environnement Grenoble. 160 pages <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00193119/document>

Paul Carling, 1999, *Subaqueous Gravel Dunes in* *Journal of Sedimentary Research* 69(3)

Reesink, A., & Bridge, J., 2011. *Evidence of bedform superimposition and flow unsteadines in unit bar deposits, South Saskatchewan River, Canada .* *Journal os sedimentary research*

Reesink, A. J. H., & Bridge, J. S., 2009. *Influence of bedform superimposition and flow unsteadiness on the formation of cross strata in dunes and unit bars - Part 2, further experiments.* *Sedimentary Geology*, 222(3–4), 274–300. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.09.014>

Ricardo Pizarro, 2018. *A two-dimensional numerical study of the hydrodynamics, sediment transport and morphodynamics in the middle Loire river*, 40 pages

Rodrigues, S., 2014. *Habilitation à diriger des recherches - Dynamique hydrosédimentaires des cours d'eau à charge sablo-graveleuse: processus & archivage.*

Seminara, G. et Tubino, M. 1989. *Alternate bars and meandering: free, forced and mixed interactions. In: River meandering (Eds Ikeda, S. et Parker, G.), American Geophysical Union - Water Resources Monographs 12, Washington. 267-320p.*

Scorpio, V., Zen, S., Bertoldi, W., Surian, N., Mastronunzio, M., Dai Prá, E., Zolezzi, G., and Comiti, F., 2018. *Channelization of a large Alpine river: what is left of its original morphodynamics ?* *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(5): 1044–1062.

Villard, P. V., & Church, M. , 2005. *Bar and dune development during a freshet: Fraser River Estuary, British Columbia, Canada. Sedimentology*, 52(4), 737–756. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2005.00721.x>

Directeur de recherche :

Jules Le Guern

Médéric JOLY
PFE/DAE5

2019-2020

Titre : Modélisation numérique (TELEMAC 2D) de l'impact des dunes sur la migration des barres sédimentaires à Saint-Mathurin-sur-Loire

Résumé :

Le présent document conclut le projet de fin d'études (P.F.E) de dernière année de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours. Le sujet s'inscrivait dans le cadre d'un projet nommé R-TEMUS pour Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'USages en Basse Loire. Ainsi, les enjeux étaient de mieux appréhender les flux hydrosédimentaires sur un tronçon entre les villages de Saint-Mathurin-sur-Loire et de La Bohalle (département de Maine-et-Loire, France). Ce tronçon se caractérisait par la présence de barres sédimentaires sur lesquelles des dunes se superposaient lors d'épisode de crue. L'objectif principal était de trouver une méthodologie afin d'intégrer les dunes dans un modèle numérique hydrosédimentaire existant, et de déterminer l'effet de ces dernières sur la migration de la structure hôte.

Les outils utilisés dans cette étude étaient rattachés au système de modélisation TELEMAC-MASCARET. Ainsi, un couplage interne entre un module hydrodynamique (TELEMAC 2D) et un module morphodynamique (SISYPHE) a été effectué. La prise en compte de ces corps sédimentaires imposait de modifier la rugosité du domaine. Deux cas principaux ont été analysés : modification générale de la rugosité sur le domaine de simulation d'une part, et modification locale de la rugosité au niveau des barres sédimentaires d'autre part.

Les différents résultats ont montré que la variation de la rugosité influence la morphodynamique du tronçon d'étude. Néanmoins, les résultats sont différents selon le type de modification effectuée. La variation générale a occasionné un impact sur l'évolution planimétrique, tandis que la variation locale a engendré un impact sur l'évolution altimétrique des barres sédimentaires.

Mots Clés : *barres sédimentaires, dunes, transport solide, hydrodynamique, morphodynamique, modélisation numérique hydrosédimentaire*