



HAL
open science

Création d'un modèle numérique hydrodynamique bidimensionnel d'un tronçon du Galabre (04)

Jacques Montariol

► **To cite this version:**

Jacques Montariol. Création d'un modèle numérique hydrodynamique bidimensionnel d'un tronçon du Galabre (04). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03604947

HAL Id: dumas-03604947

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03604947v1>

Submitted on 10 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Création d'un modèle numérique hydrodynamique bidimensionnel d'un tronçon du Galabre (04)

LABORATOIRE
D'HYDRAULIQUE



SAINT-VENANT



École des Ponts
ParisTech



Réalisé par Jacques MONTARIOL (ENGEES)

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur de l'ENGEES (Promotion 2018/2021)

Encadrants :

- Hanna HADDAD (LHSV/LNHE/IGE)
- Magali JODEAU (LNHE/LHSV)
- Cédric LEGOUT (IGE)
- Germain ANTOINE (LNHE/LHSV)

Tuteur école :

- Guilhem DELLINGER (ENGEES/ICUBE)



Résumé

Création d'un modèle numérique hydrodynamique bidimensionnel d'un tronçon du Galabre (04)

Ce stage de fin d'étude a été réalisé au sein du Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant localisé au centre R&D d'EDF à Chatou. Il a pour objectif la création et le calage d'un modèle hydrodynamique 2D à même de répondre aux attentes de la thèse de Hanna Haddad en termes de simulation des écoulements liquides dans un tronçon du Galabre dans les Alpes-de-Haute-Provence. L'importance des flux en sédiments fins dans cette région couplée à leurs effets sur la biologie des cours d'eau exige une étude poussée de la morphodynamique locale jusqu'ici mal comprise. Le modèle est complémentaire aux mesures d'érodibilité effectuées lors de la thèse de M. Haddad et doit permettre de mieux comprendre la dynamique hydrosédimentaire du cours d'eau.

Abstract

Creation of a two-dimensional numerical hydrodynamic model of a section of the Galabre (04)

This end-of-study internship was carried out at the Saint-Venant Hydraulics Laboratory located at the EDF R&D centre in Chatou. The objective was to create and calibrate a 2D hydrodynamic model to meet the requirements of Hanna Haddad's thesis in terms of simulating liquid flows in a section of the Galabre River in the Alpes-de-Haute-Provence. The importance of fine sediment flows in this region, coupled with their effects on the biology of the watercourses, requires an in-depth study of the local morphodynamics, which have been poorly understood until now. The model is complementary to the erodibility measurements carried out during Mr. Haddad's thesis and will allow a better understanding of the hydrosedimentary dynamics of the river.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des effectifs du site EDF R&D et de ses laboratoires pour leur accueil et leur bienveillance.

Je remercie mes tuteurs de stage, Hanna Haddad, Magali Jodeau, Germain Antoine et Cédric Legout pour l'opportunité qu'ils m'ont offert de travailler au sein du LHSV ainsi que pour leur supervision rigoureuse malgré le contexte sanitaire.

Enfin, je remercie l'ensemble des stagiaires et doctorants que j'ai eu le plaisir de croiser sur site, notamment Elisabeth Justin et Teddy Chataignier avec qui j'ai eu le plaisir de partager les locaux et qui ont su m'aider à passer certaines difficultés.

Table des matières

Résumé	3
Abstract.....	3
Remerciements.....	3
1. Introduction	7
2. Matériel et Méthodes.....	9
2.1. Présentation du site d'étude	9
2.1.1. Localisation du Galabre.....	9
2.1.2. Caractéristiques du BV.....	10
2.1.3. Régime hydrologique & sédimentaire	10
2.2. Données	11
2.2.1. Données des stations de mesures : chroniques de débit (et MES).....	11
2.2.2. Données topographiques Lidar et vols drone	12
2.2.2. Données de l'instrumentation sur site.....	13
2.2.3. Données granulométriques	18
3. Construction du modèle hydrodynamique 2D.....	25
3.1. Construction du MNT	25
3.2. Modélisation numérique hydraulique 2D	29
3.2.1. Telemac2D.....	29
3.2.2. Construction du maillage et choix des paramètres numériques	29
3.2.3. Conditions aux limites amont et aval	32
4. Modélisations hydrodynamiques 2D du Galabre	34
4.1. Convergence en maillage	34
4.1.1 Comparaison des lignes d'eau	34
4.1.2 Etude des vitesses	35
4.1.3 Comparaison des hauteurs d'eau et vitesses	35
4.2. Calibration du frottement.....	37
4.2.1. Comparaison des lignes d'eau à l'étiage	37
4.2.2. Vérification du frottement en crue.....	40
5. Conclusions et perspectives.....	44
Bibliographie	45
Annexes.....	46

Table des figures :

Figure 1 : Localisation du site d'étude du Galabre sur un plan IGN	9
Figure 2 : Schéma structurel du bassin versant du Galabre et de la localisation des stations de mesures (source 6)	10
Figure 3 : Dépôts sédimentaires observés dans le lit du Galabre en étiage	11
Figure 4 : Présentation des campagnes dGPS exploitables sur la chronique des débits traversant le site en 2019	12
Figure 5 : Comparaison visuelle des deux rasters de données topographiques disponibles (LIDAR & Drone).....	13
Figure 6 : Localisation de la station de mesure RIPLE à l'aval du tronçon d'étude	14
Figure 7 : Présentation des séquences LSPIV disponibles sur la chronique des débits RIPLE 2019 ..	14
Figure 8 : Localisation des sites de photographies TimeLapse et des repères topographiques marqués correspondants	15
Figure 9 : Présentation des dates d'étude des photographies TimeLapse sur la chronique des débits traversant le site en 2019	16
Figure 10 : Exemple de site TimeLapse et du choix de photographies associées lors d'une crue (26 avril 2019)	17
Figure 11 : Cartographie des points de photo/prélèvement sélectionnés pour les analyses granulométriques Fehr/Basegrain	18
Figure 12 : Comparaison visuelle de plusieurs photographies Basegrain à granulométrie variable	19
Figure 13 : Comparaison explicative de la méthode de comptage pour l'analyse de la méthode de Fehr (source 10).....	19
Figure 14 : Exemple de traitement automatisé de photographie sur Basegrain pour le site A, sur-échantillonnage des particules	20
Figure 15 : Démonstration de l'effet de l'amélioration manuelle du traitement Basegrain par utilisation de l'outil jointure pour détecter les grains	21
Figure 16 : Exemple de courbe granulométrique obtenue par analyse Basegrain	21
Figure 17 : Exemple de classification granulométrique réalisée sur le site Z3 selon la méthode de Fehr	22
Figure 18 : Exemple de courbe granulométrique obtenue par la méthode de Fehr pour le site Z1	22
Figure 19 : Diagramme comparatif des résultats granulométriques sur les sites communs aux méthodes Fehr/Basegrain	23
Figure 20 : Exemples d'anomalies de mesure obtenues par l'analyse photo sur Basegrain	24
Figure 21 : Comparaison locale entre orthophotographie IGN et raster Drone-LIDAR filtré (diff > 0.2 m)	25
Figure 22 : Zonations des parties divergentes/erronées du tronçon d'étude.....	26
Figure 23 : Mise en évidence des erreurs de relevés topographiques par vol drone aux abords de la rypisylve (pente >60 %).....	27
Figure 24 : Cartographie des transects de comparaison Drone/LIDAR/dGPS	28
Figure 25 : Exemple de tracé comparatif de la topographie pour les différents jeux de données.....	28

Figure 26 : Présentation des profils fictifs et de l'extension créés à l'amont du modèle d'étude	30
Figure 27 : Maillage obtenu par application de la bathymétrie sur Blue Kenue (maillage 1m)	31
Figure 28 : Etude de l'influence de la hauteur d'eau fixée en aval sur la surface libre du modèle	33
Figure 29 : Comparaison qualitative des vitesses de surfaces selon le maillage ($Q = 0.742 \text{ m}^3/\text{s}$)	35
Figure 30 : Répartition des transects de comparaison en Heau et Vitesse des maillages	36
Figure 31 : Comparaison des différences moyennes de Heau et Vitesse entre les 3 maillages	36
Figure 32 : Graphique de l'évolution de la RMSE entre simulation et campagne selon le K_s (en $\text{m}^{1/3}/\text{s}$) considéré (Strickler)	38
Figure 33 : Graphique de l'évolution de la RMSE entre simulation et campagne selon le K (en m) considéré (Nikuradse)	39
Figure 34 : Exemple de comparaison des lignes de courant entre la LSPIV et les simulations (25/05/2019, 14h20, $Q = 1.43\text{m}^3/\text{s}$)	40
Figure 35 : Tracé comparatif des vitesses scalaires obtenues pour les différents K Nikuradse (en m) avec les points LSPIV (25/05/2019, 14:20, $Q=1.43\text{m}^3/\text{s}$)	41
Tableau 1 : Débits correspondants aux séquences LSPIV analysées	15
Tableau 2 : Données de D90 obtenues par analyse Basegrain et K_s correspondant	24
Tableau 3 : RMSE sur les cotes de surface libre obtenues selon le maillage et la campagne considérés	34
Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs de RMSE obtenues selon la campagne et le K_s considérés (Strickler)	38
Tableau 5 : Récapitulatif des valeurs de RMSE obtenues selon la campagne et le K considérés (Nikuradse)	39
Tableau 6 : Moyennes des RMSE entre simulations et LSPIV en fonction du coefficient de rugosité....	42
Tableau 7 : Moyennes des RMSE entre simulations et points de calage TimeLapse en fonction du coefficient de rugosité	42

1. Introduction

La compréhension de la dynamique de transport des sédiments fins revêt des enjeux opérationnels majeurs, notamment dans le cadre de rivières aménagées avec des ouvrages hydrauliques en rivière ou dans les régions agricoles et forestières, où elle entraîne des dégâts, notamment par la dégradation et l'affaissement des sols et donc de la végétation riparienne [1,2].

Le changement des modes d'usages des sols dans l'agriculture et les industries modernes a entraîné ces dernières années un flux accru en sédiments fins [2,3]. Ces derniers, du fait de leur diamètre de l'ordre du micromètre et leurs propriétés physico-chimiques ont un comportement qui les distingue des sables. Si les concentrations sont très marquées par exemple lors des crues naturelles ou lors d'opérations sur les barrages, ils peuvent en effet créer un milieu turbide très opaque à la lumière tandis que leur agrégation en dépôts homogènes peut colmater le lit des cours d'eau [1,3]. Les exploitants hydroélectriques respectent les contraintes qui leur sont imposées pour limiter l'impact des barrages sur le milieu.

Pour mieux comprendre la dynamique des sédiments fins, il est utile d'investiguer les propriétés d'érosion/dépôt des sédiments fins. Le nombre d'études sur le sujet est important, du fait de l'enjeu capital que représente l'appréciation des caractéristiques d'érosion de ces sédiments. Ces dernières portent principalement sur le milieu estuarien. Malgré cela, et même si les principales causes d'érosion de ces sédiments sont attribuées à la pente et aux précipitations [1,4], les conditions érosives optimales sont encore mal évaluées [5].

C'est dans ce contexte général que s'inscrit la thèse menée par Hanna Haddad depuis 2019 au sein du LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique & Environnement, 78400 Chatou, France en collaboration avec l'IGE) intitulée « Dynamique des sédiments fins en rivière : suivi in-situ des propriétés d'érosion/dépôt pour les modèles numériques ». L'objectif majeur de ses travaux est ainsi d'étudier les caractéristiques mentionnées plus haut de manière approfondie à l'aide d'outils de mesure spécialisés, en s'intéressant entre autres à un site de prélèvements riches en sédiments fins : le Galabre. A l'approche de sa dernière année de thèse et ayant mené avec succès l'ensemble des campagnes de mesures envisagées, M. Haddad cherche désormais à confronter les données de terrain à des simulations hydro-sédimentaires.

Mon stage de fin d'études est réalisé pour le LHSV (Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant, 78400 Chatou, France), un laboratoire de recherche codirigé par le CEREMA, l'Ecole des Ponts ParisTech ainsi que EDF R&D et situé au sein du site de ce dernier. Les doctorants et chargés de recherche qui le composent focalisent leurs modèles mathématiques et essais en laboratoire ou sur le terrain autour de 3 thèmes principaux, l'un d'entre eux étant justement la dynamique sédimentaire.

De fait, mon travail vise en premier lieu à produire un modèle numérique de terrain (MNT) satisfaisant du site d'étude sur lequel baser les simulations hydrodynamiques. Dans un second temps, les paramètres du modèle numérique 2D hydraulique TELEMAC2D sont calibrés sur la base d'un grand jeu de données.

Une première partie du rapport est consacrée à la présentation du site d'étude et de ces spécificités et est suivie d'un inventaire des données disponibles et de leur usage dans mes travaux. Nous abordons ensuite la création du modèle numérique en détails avant de présenter les travaux liés au calage du

frottement via différentes méthodes illustrées par des exemples. Enfin, nous concluons par une discussion sur les résultats obtenus et leur cohérence ainsi que sur les potentiels usages des travaux par la suite.

2. Matériel et Méthodes

Cette première partie vise à décrire le cadre des études menées aussi bien par Hanna Haddad lors de sa thèse que durant mon stage de modélisation, ainsi que les données utilisées pour cette étude hydraulique.

2.1. Présentation du site d'étude

2.1.1. Localisation du Galabre

Le Galabre est une rivière située dans les Alpes du Sud, plus précisément dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (04) et dont le tronçon d'étude est situé à proximité de Digne-les-Bains (04070), chef-lieu du département (cf Figure 1).

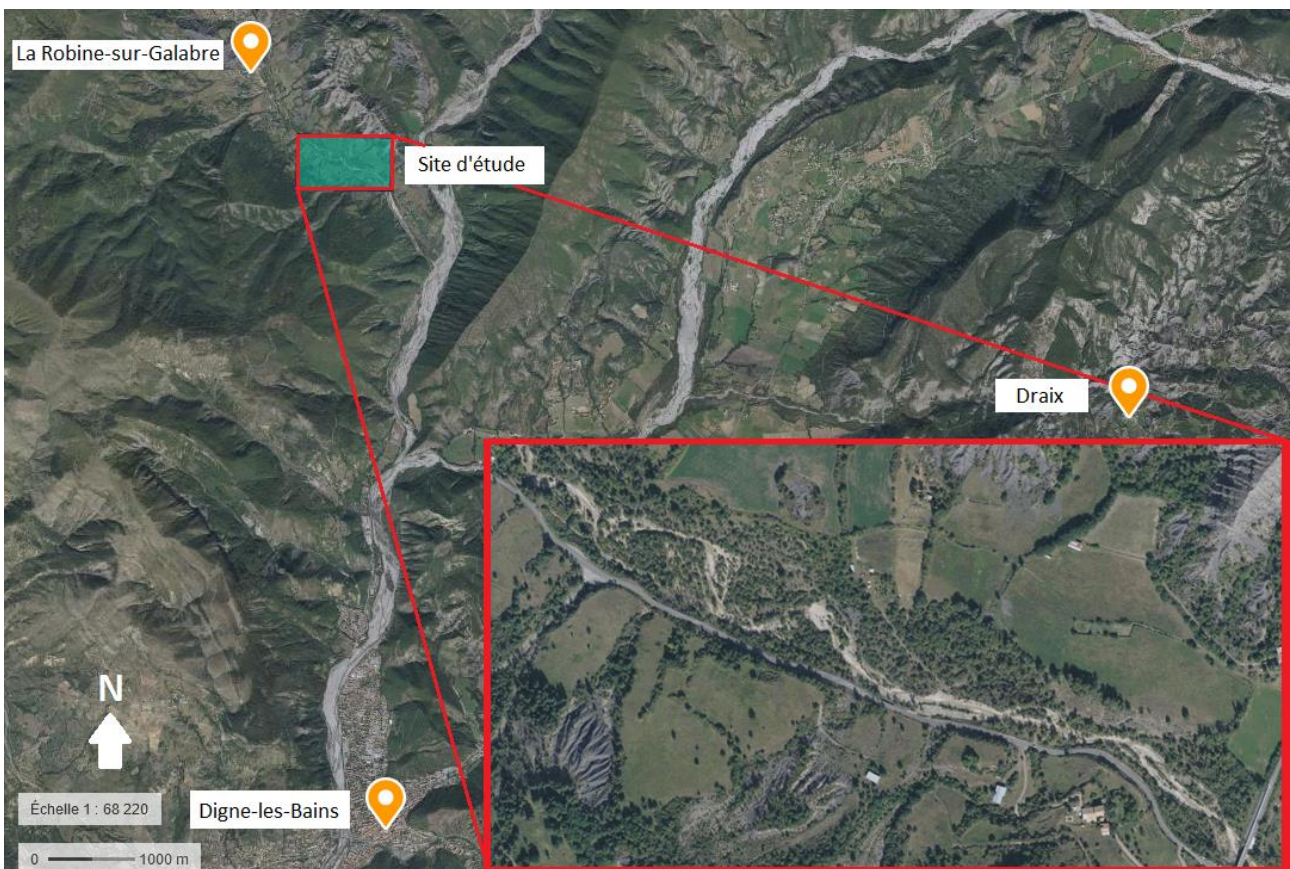


Figure 1 : Localisation du site d'étude du Galabre sur un plan IGN

Le tronçon d'intérêt s'étend sur environ 1 km de long pour une pente moyenne de 2% et possède un lit composé de graviers à granulométrie très variable (allant du mm au m de diamètre) dont la largeur oscille entre 5 et 30 m environ.

2.1.2. Caractéristiques du BV

Le Galabre fait partie intégrante du bassin versant de la Bléone (cf Figure 2) et son altitude est comprise entre 735 et 1909 m au-dessus du niveau de la mer [6]. La lithologie du bassin est essentiellement d'origine sédimentaire, le sol étant principalement composé de roches calcaires, de marnes et de molasses.

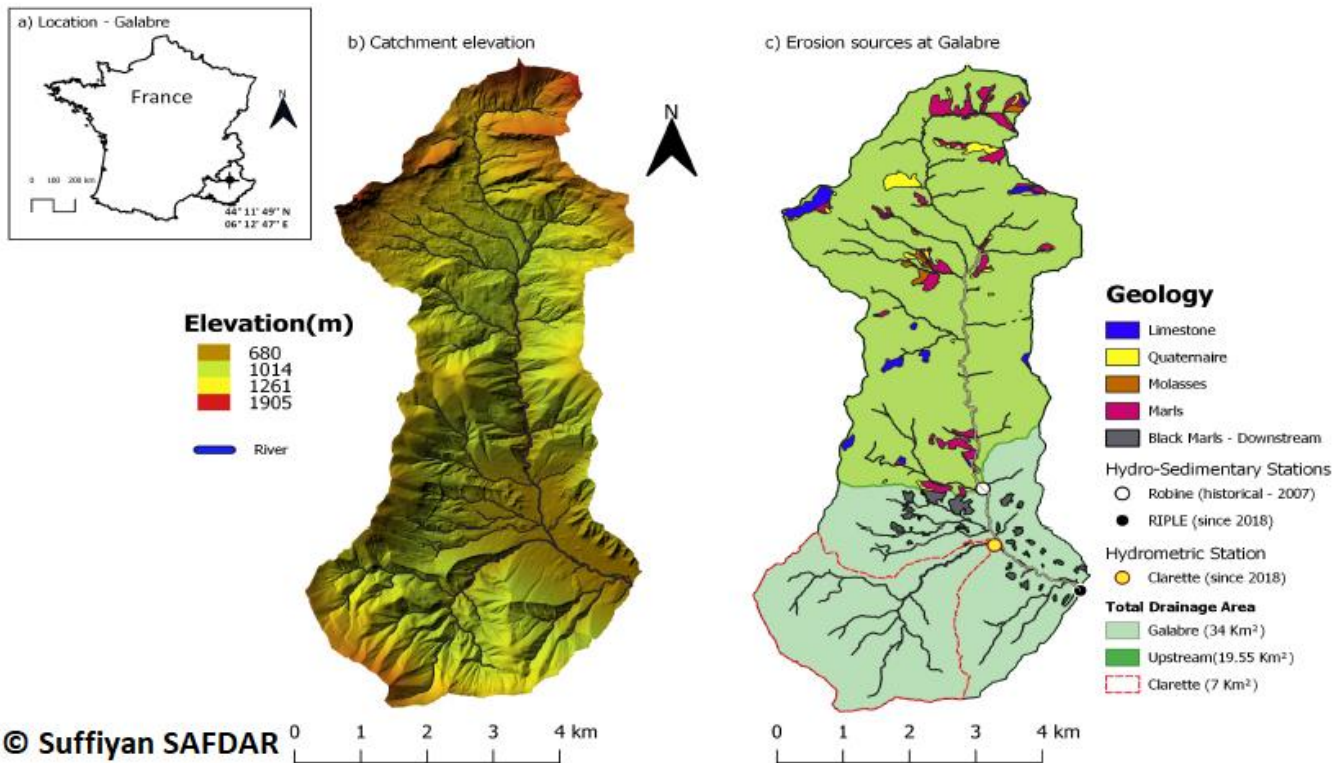


Figure 2 : Schéma structurel du bassin versant du Galabre et de la localisation des stations de mesures (source 6)

Le bassin est intégré au réseau français OZCAR d'observation de la zone critique, qui inclut les éléments de proches surfaces tels que les lits de rivières. De fait, il est muni de nombreuses instrumentations à même de mesurer aussi bien l'hydrologie, la météorologie, mais aussi les flux de matières en suspension et leur fraction dissoute.

2.1.3. Régime hydrologique & sédimentaire

Le climat qui caractérise le Galabre est en partie montagnard et méditerranéen, et ainsi le site d'étude est caractérisé par une météorologie variable, alternant des étés très chauds à période de crues intenses avec des hivers gelant. L'étude du site est ainsi particulièrement intéressante du fait de son régime hydrologique particulier, alternant de longues périodes d'étiages avec de rares et brèves périodes de crues intenses.

Le Galabre se jetant dans la Bléone qui est elle-même un affluent de la Durance, qui représente à elle-seule 18 % des flux en sédiments rejetés par le Rhône dans la Méditerranée [7], il contribue en partie aux apports sédimentaires importants dans les Alpes du Sud.

On observe ainsi les dépôts sédimentaires sur le tronçon d'étude (cf Figure 3), et plus spécifiquement des marnes et de la molasse, deux types de sédiments fins, cohésifs ou non.



Figure 3 : Dépôts sédimentaires observés dans le lit du Galabre en étiage

2.2. Données

2.2.1. Données des stations de mesures : chroniques de débit (et MES)

Le modèle que l'on vise à créer numériquement doit se baser sur la réalité du terrain, pour le modèle numérique de terrain (MNT) comme pour les simulations hydrodynamiques. Il doit également servir de complément aux études déjà menées par Hanna Haddad liées à la morphodynamique du cours d'eau, et doit donc cibler la même période.

La période d'intérêt principale est ainsi fixée au 28 et 29 août 2019, dates auxquelles une grande campagne de mesures d'érodibilité du lit a été effectuée. Le travail de création et de calibrage du modèle hydrodynamique sera ainsi réalisé sur ces dates.

Les chroniques de débit sur lesquelles seront paramétrées les simulations sont mesurées en continu au sein des deux stations en amont du tronçon sur les deux branches contribuant à l'apport en eau et sédiments : La station de Clarette et de la Robine-sur-Galabre (cf Figure 2). La station RIPLE à l'aval du site d'étude permet quant à elle de mesurer la vélocimétrie des écoulements et leur concentration en MES (cf Figure 4)

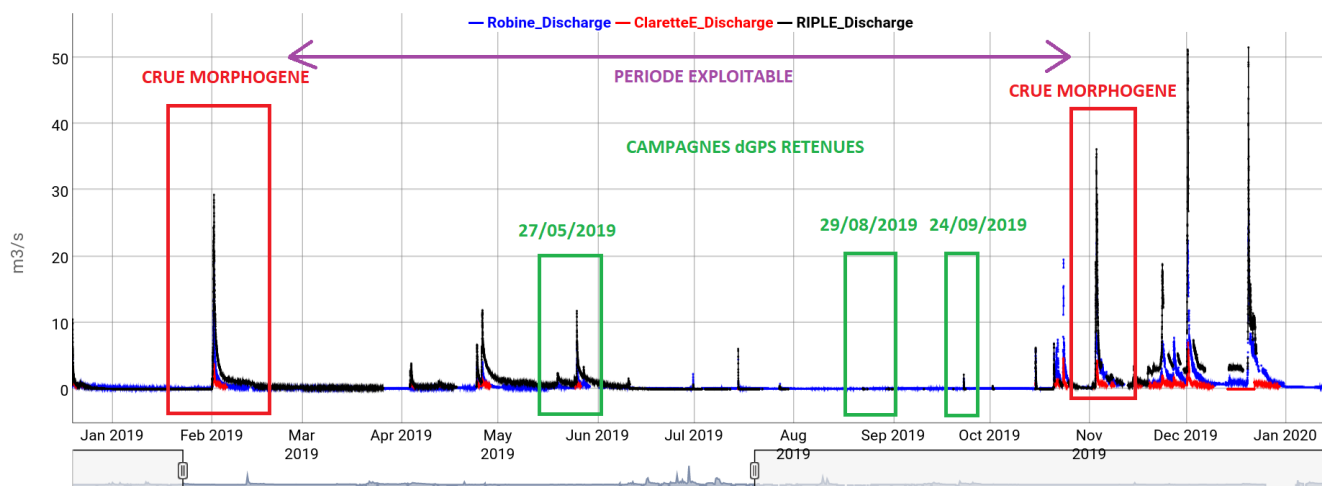


Figure 4 : Présentation des campagnes dGPS exploitables sur la chronique des débits traversant le site en 2019

Ces campagnes seront essentiellement utilisées pour évaluer la topographie dans la construction du MNT, ainsi que pour les données de ligne d'eau (surface libre) qui serviront de référence lors des comparaisons en post-traitement des premières simulations.

2.2.2. Données topographiques Lidar et vols drone

Comme on peut le constater sur la Figure 4, les 28 et 29 août 2019 sont précédés en février et suivis en novembre de la même année par des crues très intenses morphogènes et donc à même de changer la topographie du cours significativement (cf Figure 4).

Les jeux de données topographiques dGPS disponibles sur l'année 2019 correspondent à 5 campagnes de terrain effectuées respectivement le 14/02/2019, 27/05/2019, 29/08/2019, 24/09/2019 et le 19/11/2019, mais seules les campagnes de mai à septembre seront donc réellement utilisées, les campagnes de février et de novembre étant situées en période morphogène.

Trois campagnes de mesures aéroportées de la topographie du Galabre sont à disposition : un LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) [8] datant du 25 octobre 2018 ainsi que deux vols drone (acquisition de la topographie du cours d'eau par photogramétrie) réalisés respectivement le 5 mars 2019 et en 6 septembre 2019.

Données LIDAR (25/10/2018) :

- Les mesures Lidar ont une résolution de l'ordre du mètre donc relativement faible, mais leur précision est constante sur l'ensemble du site, à l'exception d'une zone d'incertitude à l'amont du tronçon où les appareils de mesure semblent avoir rencontré des difficultés d'acquisition et la zone est donc construite par interpolation des seuls points disponibles (cf Figure 5).
- Il est à noter que ces données sont plus anciennes (antérieures à février 2019) que celles du drone et reflètent donc moins l'état du cours d'eau au moment de la réalisation des campagnes de terrain.

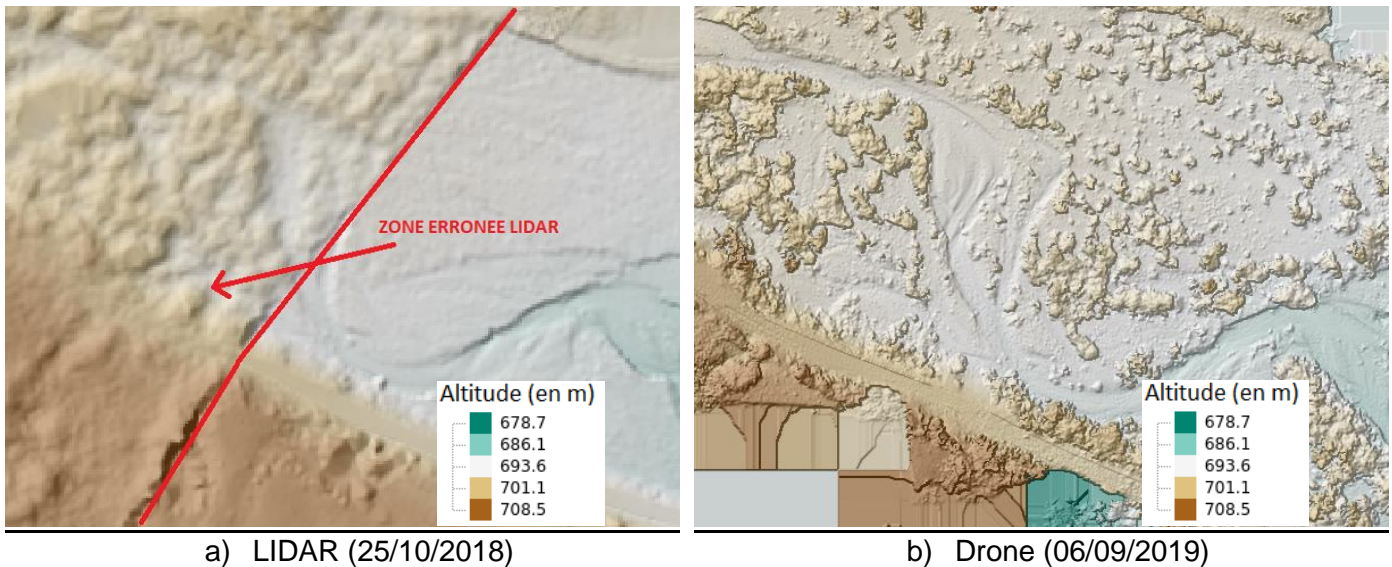


Figure 5 : Comparaison visuelle des deux rasters de données topographiques disponibles (LIDAR & Drone)

Données vols drone (05/03/2019-06/09/2019) :

- Les mesures topographiques par photogramétrie drone ont une résolution bien supérieure, fixée à 4 cm, cependant, la détection par drone présente des difficultés dans l'appréciation des altitudes à proximité d'objets surélevés créant des zones d'ombres tels que les arbres autour du lit.
- Vient s'ajouter à cela une RMSE (erreur quadratique moyenne) par rapport aux mesures dGPS très élevée pour les résultats de la campagne de mars, la rendant moins fiable en précision que les autres données topographiques et nous obligeant à l'abandonner.

2.2.2. Données de l'instrumentation sur site

2.2.2.1. LSPIV

A l'aval du tronçon d'étude se situe un pont au niveau duquel se trouve la station RIPLE (cf Figure 6). La caméra de cette dernière s'active lorsque les débits et donc la hauteur d'eau au niveau du pont atteignent un certain seuil prédéfini, son positionnement judicieux permettant alors la capture de vidéos de l'écoulement à intervalle de 30 minutes sur une durée de 10 sec qui sont ensuite analysées par méthode LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) [9].



Figure 6 : Localisation de la station de mesure RIPLE à l'aval du tronçon d'étude

Cette méthode de mesure permet l'obtention des champs de vitesses instantanés et moyens en surface de l'écoulement dans la zone de capture juste en aval du pont.

La plupart des séquences LSPIV traitées [6] et chronologiquement exploitables se situent en mai 2019, avec une exception le 15 octobre 2019 (cf Figure 7).

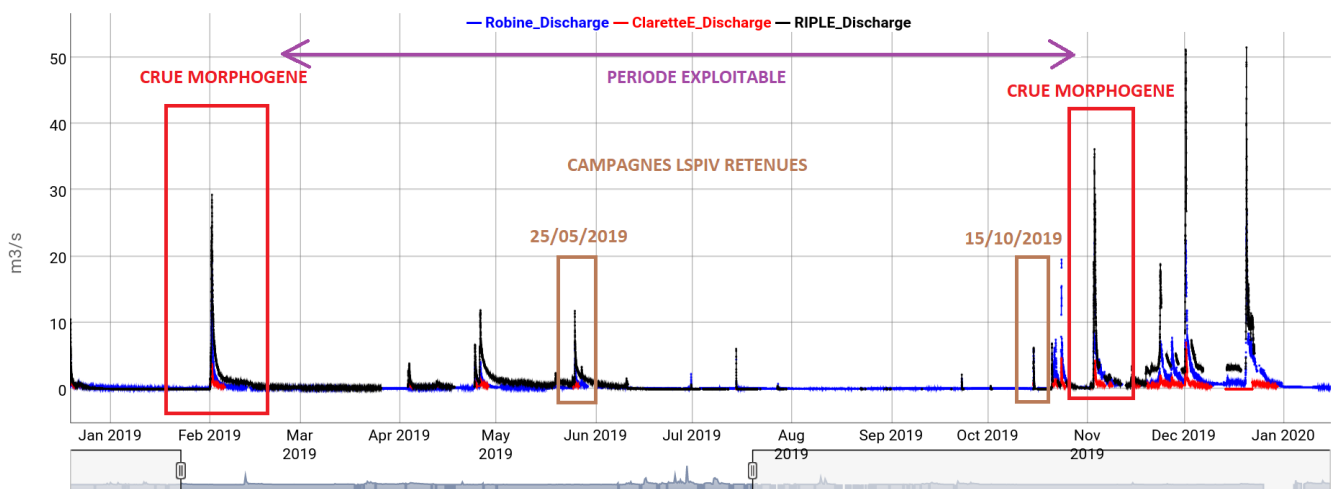


Figure 7 : Présentation des séquences LSPIV disponibles sur la chronique des débits RIPLE 2019

Après interpolation de certaines données de débit manquantes à la station de Clarette ou de Robine, on récupère les débits qui correspondent à nos heures de mesures LSPIV, sachant qu'il existe un délai évalué à 30 minutes entre les relevés aux stations et l'arrivée à RIPLE (cf Tableau 1).

Tableau 1 : Débits correspondants aux séquences LSPIV analysées

FICHIER	Qrobine (m3/s)	Qclarette (m3/s)	DEBIT (m3/s)	DATE	HEURE	HEURE MESURE Q (T-30 min)
85(b)	0,951	0,48	1,431	25/05/2019	14:18	13:50
86(b)	6,68	0,67	7,35	25/05/2019	14:48	14:20
87(b)	5,35	0,88	6,23	25/05/2019	15:18	14:50
89(b)	3,585	0,82	4,405	25/05/2019	16:18	15:50
90(b)	3,353	1	4,353	25/05/2019	16:48	16:20
91(b)	3,228	0,87	4,098	25/05/2019	17:18	16:50
92(b)	3,103	0,95	4,053	25/05/2019	17:48	17:20
1027(b)	0,819	0,45	1,269	15/10/2019	12:21	11:50

2.2.2.2. Exploitation des photos timelapse

Enfin nous disposons de séries de photographies prises en continu toutes les 30 minutes (Time Lapse) à plusieurs endroits du tronçon par 3 appareils photo fixés aux arbres environnants (cf Figure 8).

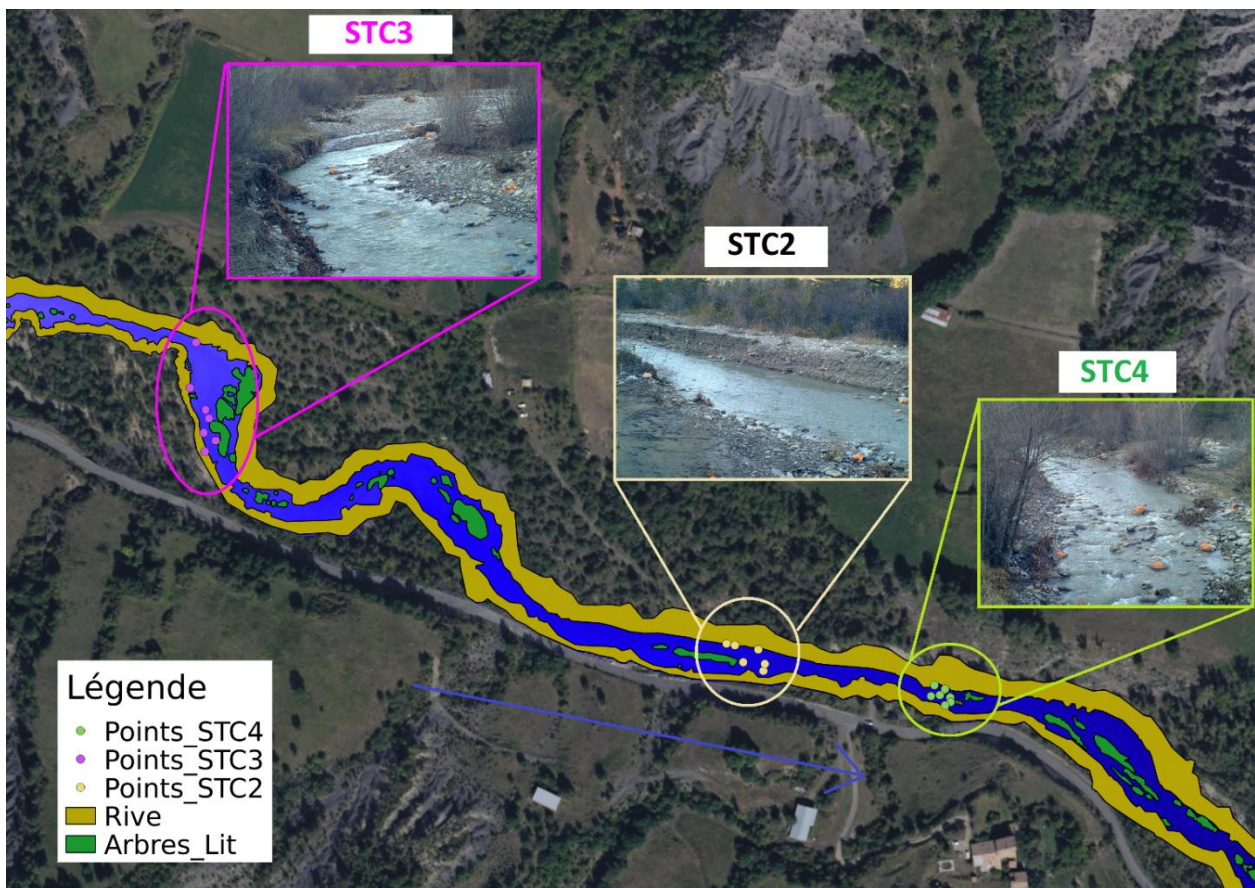


Figure 8 : Localisation des sites de photographies TimeLapse et des repères topographiques marqués correspondants

Tout comme pour les autres données, les photographies exploitables sont limitées aux crues notables situées dans la période d'étude (24 au 28 avril, 19-20 et 24 au 28 mai, 15 et 20 au 23 octobre 2019) (cf Figure 9).

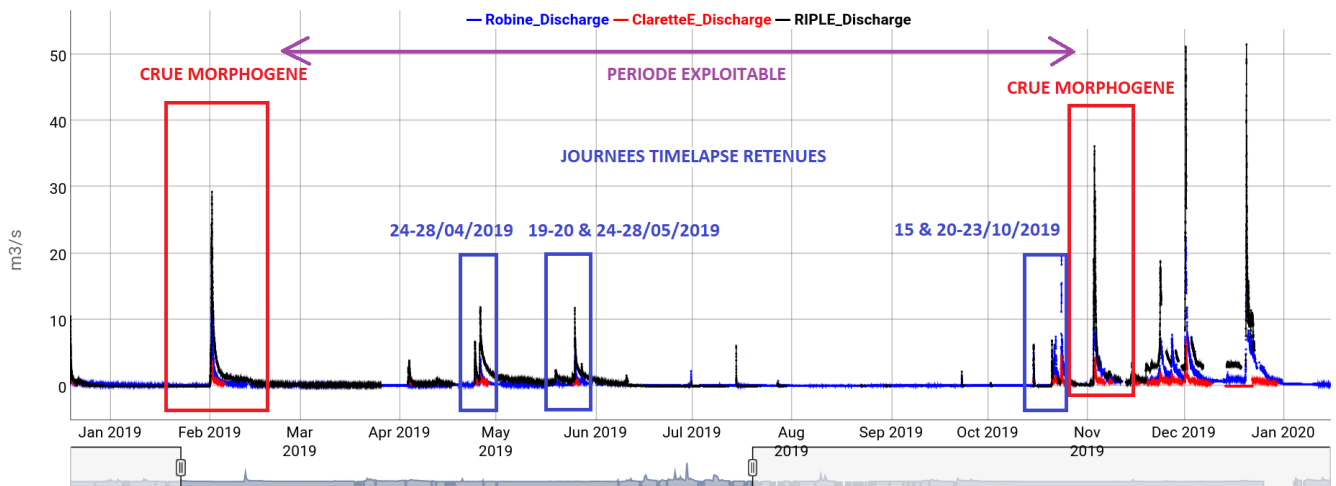


Figure 9 : Présentation des dates d'étude des photographies TimeLapse sur la chronique des débits traversant le site en 2019

Au-delà d'une comparaison qualitative visuelle des zones immergées, la présence de points marqués et dont les coordonnées x,y et z ont été mesurées au dGPS permettent une comparaison avec les hauteurs d'eau simulées lorsque ces points se retrouvent à la surface de l'eau.

Par analyse visuelle des photographies, il est en effet possible d'identifier à quelle date/heure chaque caillou marqué coïncide avec la surface de l'eau (cf Figure 10). Des couples de points débit-coordonnées de la surface de l'eau sont donc ainsi obtenus pour évaluer la capacité du modèle hydrodynamique à reproduire correctement les surfaces libres de l'eau.



a) Exemple de la disposition des marqueurs avec le site de l'appareil photo timelapse n°3



Marqueur STC3E visible

b) Exemple de photo précédant une image exploitable



Marqueur STC3E à peine visible = Photo exploitable

c) Exemple de photo exploitable

Figure 10 : Exemple de site TimeLapse et du choix de photographies associées lors d'une crue (26 avril 2019)

2.2.3. Données granulométriques

2.2.3.1. Campagne de mesure

Lors de la période de stage a été organisée une campagne de mesure sur le site d'étude à laquelle j'ai pu participer. Cette dernière visait à caractériser la granulométrie du lit du tronçon du Galabre étudié, afin de comparer ces granulométries aux gammes de frottements utilisées dans le modèle.

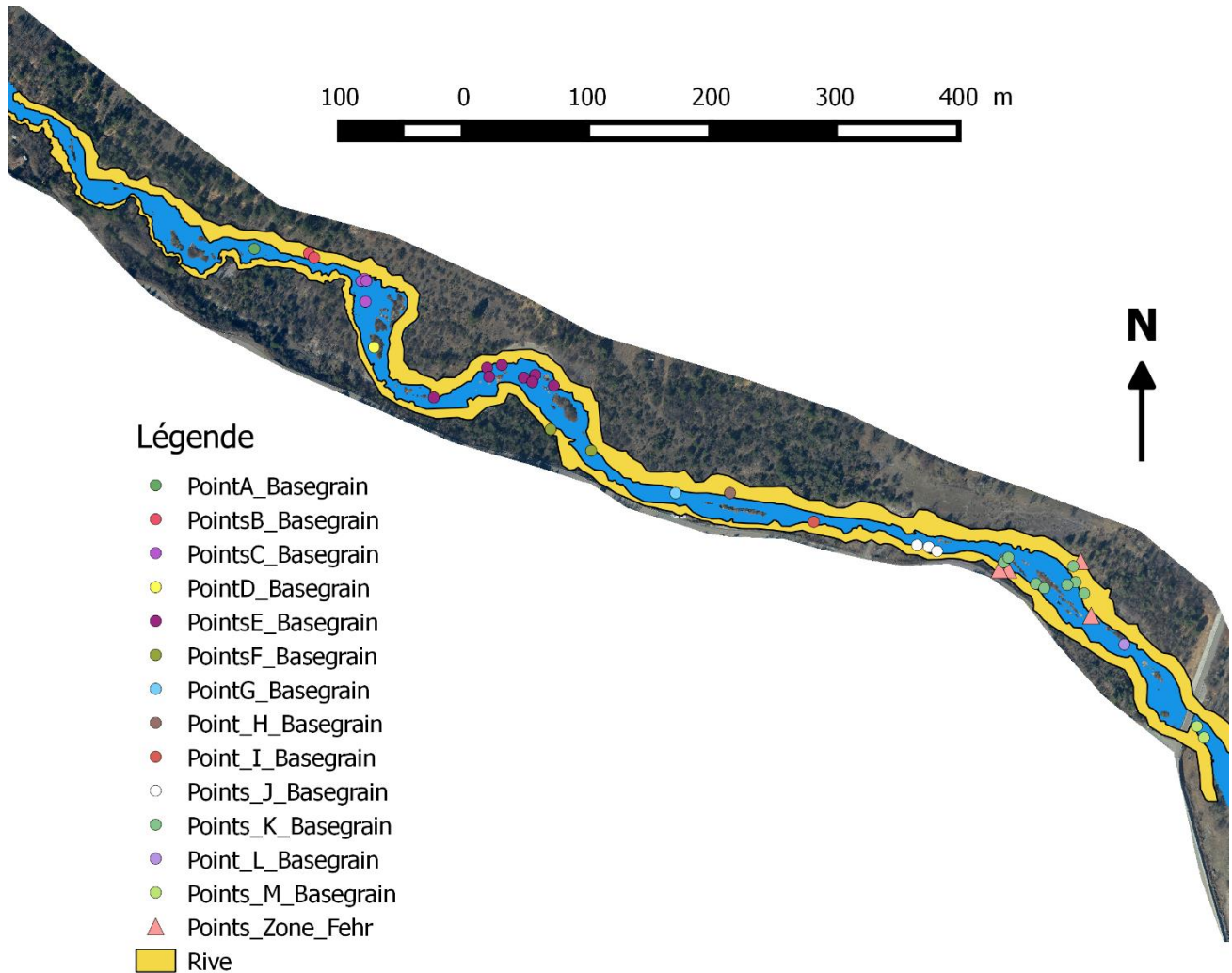


Figure 11 : Cartographie des points de photo/prélèvement sélectionnés pour les analyses granulométriques Fehr/Basegrain

Deux méthodes de mesures granulométriques ont été utilisées, l'une basée sur du traitement automatisé de photographies, l'autre sur du comptage et des mesures manuelles.

La taille des grains au sein du lit étant très variable, les sites de prélèvement ont quant à eux été choisis afin de refléter cette hétérogénéité au maximum et permettre une analyse complète et rigoureuse (cf Figure 11).

La première méthode de mesure consiste à photographier la zone à étudier avec une échelle dans le champ, puis à faire une analyse ultérieure assistée par ordinateur via le logiciel OpenSource BASEGRAIN [10].

Les photographies doivent être aussi verticales que possible pour éviter les effets de perspective, d'où la nécessité d'utiliser une perche de 2-3m de hauteur, tandis que le sol ne doit pas être surexposé au soleil afin d'éviter de trop grands ombrages (cf Figure 12).



a) Photo du site A (granulo à D élevé)



b) Photo du site B (granulo à D variable)



c) Photo du site C (granulo à D faible)



d) Photo du site D (granulo à D élevé)

Figure 12 : Comparaison visuelle de plusieurs photographies Basegrain à granulométrie variable

La seconde méthode dite de Fehr [10] repose sur la mesure manuelle des différents grains situés directement en-dessous d'une ligne formée dans notre cas par un décimètre (cf Figure 13).



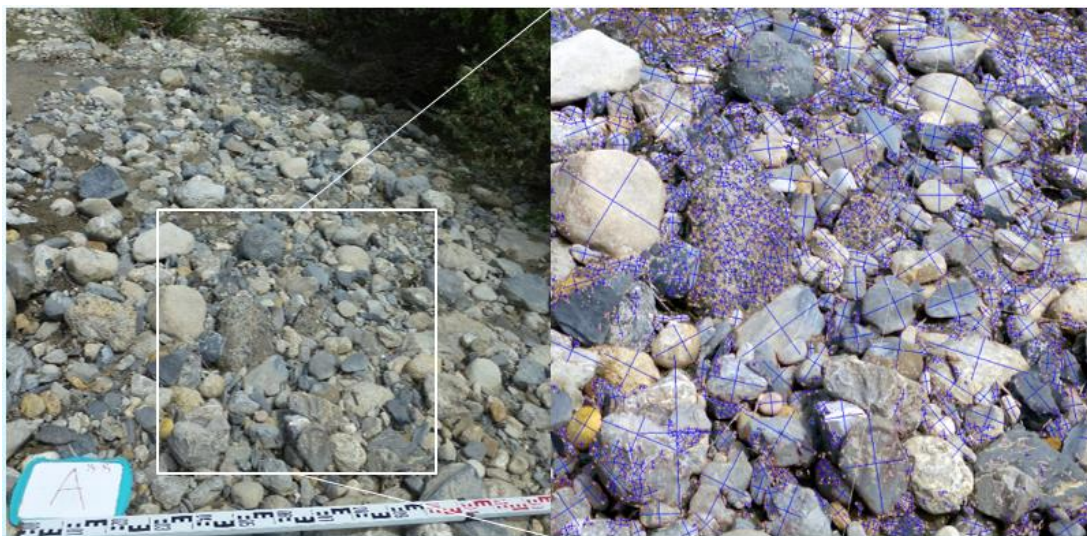
Figure 13 : Comparaison explicative de la méthode de comptage pour l'analyse de la méthode de Fehr (source 10)

Les grains sont comptabilisés dans différentes classes granulométriques prédéfinies par la méthode selon leur diamètre, défini ici par la longueur de leur axe b (cf Annexe 1)

La campagne a permis l'acquisition de 36 photos exploitables sur BASEGRAIN réparties sur 12 emplacements différents (cf Figure 11), ainsi que 6 tables statistiques pour la méthode de Fehr, ces dernières étant beaucoup plus longues à obtenir du fait du comptage manuel associé.

2.2.3.2. Analyse Basegrain

La méthode d'analyse par traitement assisté par BASEGRAIN de détection automatique de la taille des grains permet une analyse sur un nombre important de photos de façon beaucoup plus rapide (cf Figure 14). En revanche, la méthode de détection automatique des contours de particules présente de nombreuses incertitudes liées aux difficultés rencontrées dans l'appréciation des formes dans les zones d'ombres ou à couleurs variables [10].



a) Photo Basegrain du Site A

b) Portion de la photo traitée sur Basegrain

Figure 14 : Exemple de traitement automatisé de photographie sur Basegrain pour le site A, sur-échantillonnage des particules

Le résultat automatique peut être amélioré une fois une première détection opérée, notamment via les outils de jointure ou séparation des particules initialement détectées, ainsi qu'en jouant sur les paramètres de la sensibilité de détection à chaque étape dans une moindre mesure (cf Figure 15).

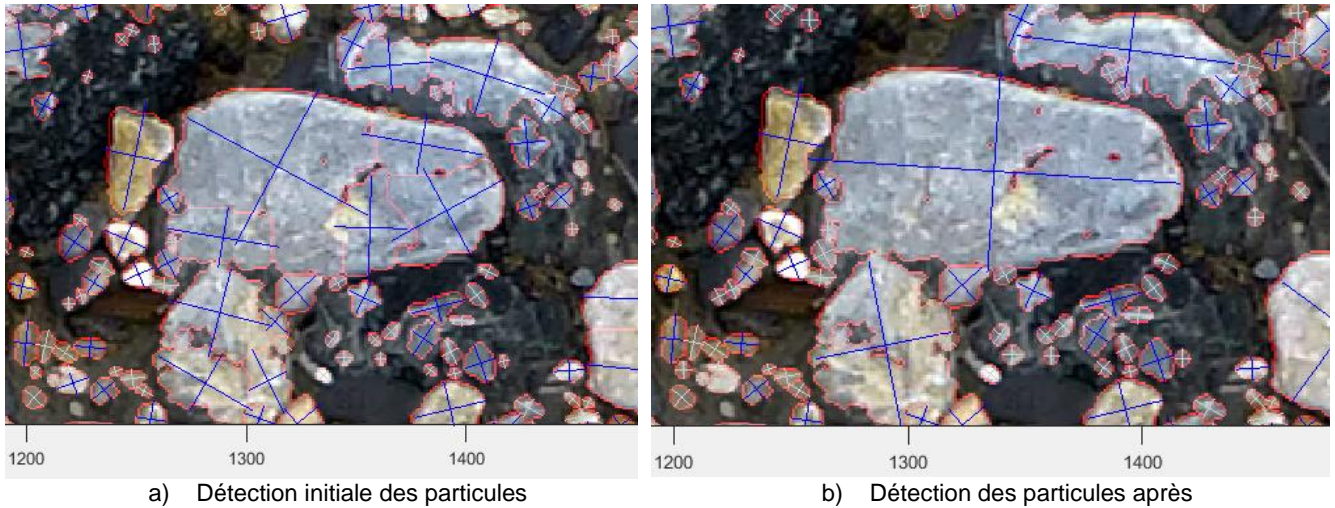


Figure 15 : Démonstration de l'effet de l'amélioration manuelle du traitement Basegrain par utilisation de l'outil jointure pour détecter les grains

Les résultats exploitables obtenus par la méthode BASEGRAIN sont ensuite convertis de manière similaire en courbe granulométrique (cf Figure 16). De façon identique à la méthode de Fehr, on obtient la courbe granulométrique en bleu, corrigée aux diamètres les plus fins par une courbe de Füller en vert [10].

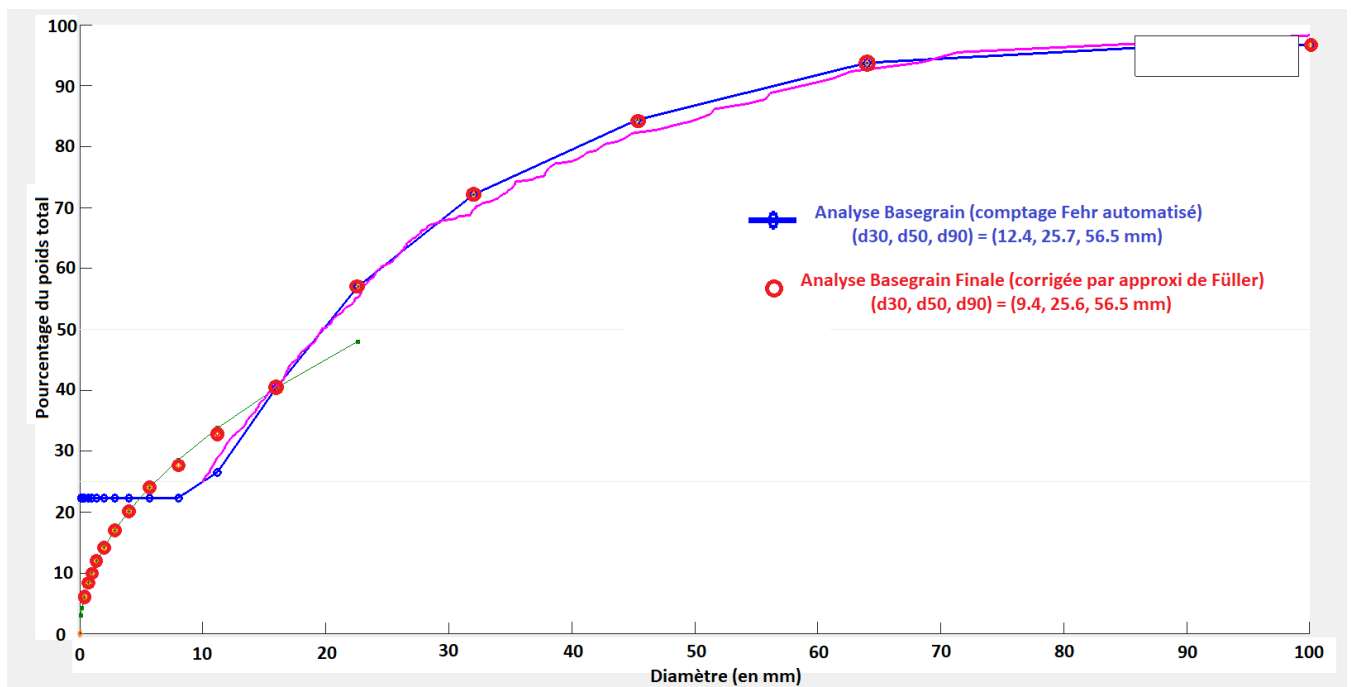


Figure 16 : Exemple de courbe granulométrique obtenue par analyse Basegrain

2.2.3.3. Analyse Fehr

La nature de la méthode de Fehr fait que les résultats ne sont soumis qu'à l'imprécision de mesure manuelle, et la méthode exige au moins 120 grains dont au moins 30 dans la classe dominante, ce qui permet de compenser le faible nombre de grains par un poids statistique satisfaisant (cf Figure 17).



Figure 17 : Exemple de classification granulométrique réalisée sur le site Z3 selon la méthode de Fehr

Les résultats obtenus sont ensuite convertis en courbes granulométriques corrigées par un ajustement de Fuller [10] sur les grains les plus fins qui sont mal pris en compte via cette méthode (cf Figure 18).

Courbe granulométrique Z1

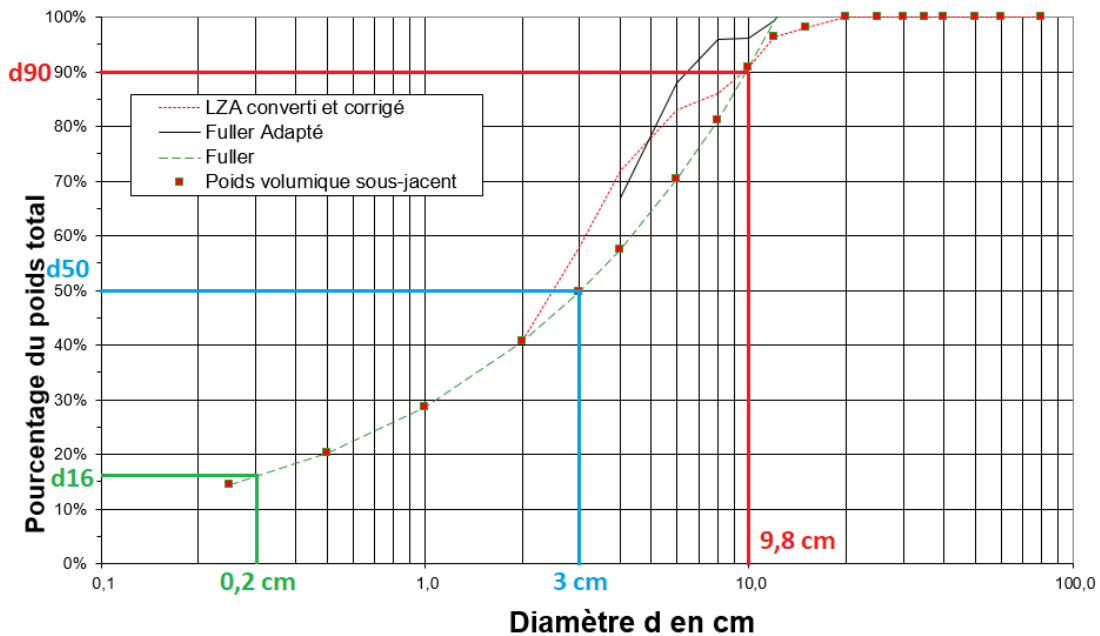


Figure 18 : Exemple de courbe granulométrique obtenue par la méthode de Fehr pour le site Z1

On obtient également les valeurs associées à la construction de la courbe des diamètres cumulés tels que les diamètres d_{16} , d_{50} , d_{84} et d_{90} (cf Figure 18) qui nous permettent notamment de retrouver un coefficient de Strickler (K_s) correspondant qui pourra servir au calage de la loi dans nos simulations selon la formule suivante :

$$K_s = \frac{26}{(d_{90})^{1/6}}$$

2.2.3.4. Comparaison des résultats

La comparaison des résultats obtenus avec les deux méthodes montre des similarités sur 4 des 5 zones de comparaison disponibles, suggérant que les deux méthodes sont cohérentes, cependant des écarts existent parfois dans les valeurs de diamètre observées (cf Figure 19).

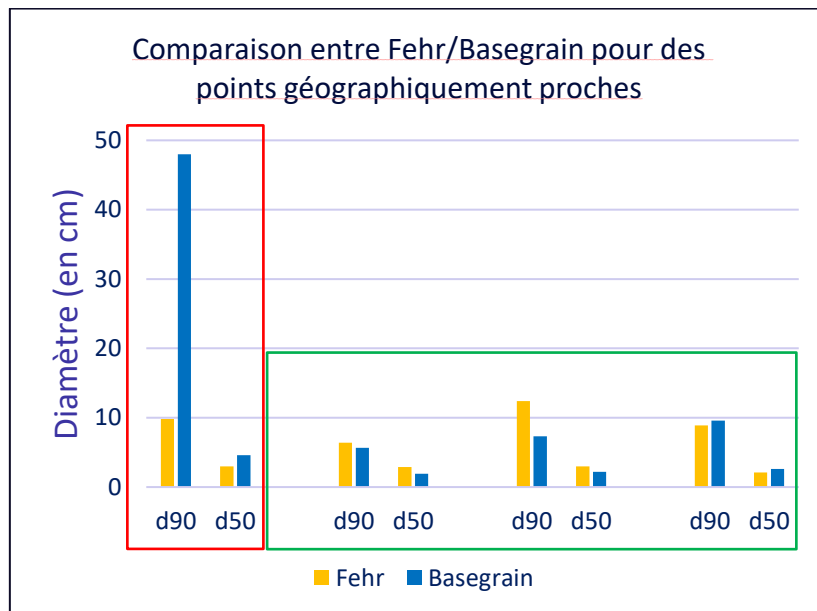


Figure 19 : Diagramme comparatif des résultats granulométriques sur les sites communs aux méthodes Fehr/Basegrain

De plus, une seconde analyse qualitative des résultats obtenus après traitement d'images a également révélé que certains d'entre eux, si individuellement cohérents, ne reflétaient pas la réalité des photos ayant permis leur obtention. En effet, des d_{90} bien inférieurs sont parfois associés à des photos à la granulométrie indiscutablement plus grossière (cf Figure 20). Le d_{90} obtenu en Figure 20a est trop élevé du fait de la trop grande variété de couleur à détecter ce qui entraîne la création de blocs unis grossiers. A l'inverse, le d_{90} de la Figure 20b est trop faible à cause des nombreuses zones d'ombre qui entraîne des divisions trop fréquentes.



a) D_{90} obtenu pour photo C : 93,9 cm



b) D_{90} obtenu pour photo K₈ : 4,7 cm

Figure 20 : Exemples d'anomalies de mesure obtenues par l'analyse photo sur Basegrain

Au final, sur les 36 prises de vue, 13 ont pu être analysées. Les valeurs de D_{90} ainsi que les coefficients de frottement sont consignés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Données de D_{90} obtenues par analyse Basegrain et K_s correspondant

Photo	A	B2	C	D	E6	F1	G	I	K1	K2	K4	K7	K8
D_{90} (cm)	90	4,5	93,9	4,8	9,6	9,3	8,3	94	7,3	5,7	48	5.7	4.7
K_s ($m^{1/3}/s$)	27	44	26	43	38	26	39	26	40	42	29	41	43

Cette analyse montre à l'exception de quelques valeurs que le d_{90} sur le site d'étude semble se situer dans la gamme des 5 à 10 cm.

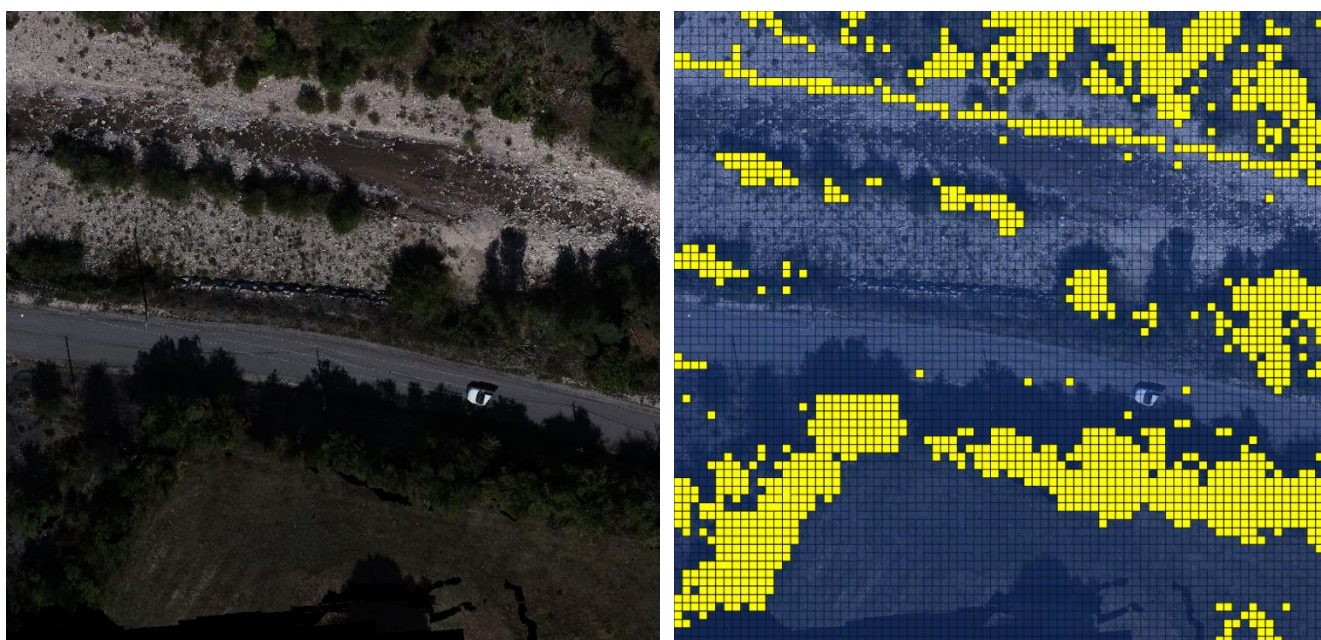
3. Construction du modèle hydrodynamique 2D

Cette partie se concentre sur l'exploitation des données topographiques pour la création du MNT puis de leur conversion en maillage ainsi que l'utilisation de ce dernier pour former notre modèle de simulations hydrodynamiques.

3.1. Construction du MNT

Le zonage des données fournies est réalisé à l'aide du logiciel de traitement de SIG (Système d'Information Géographique) QGIS où sont importées les données drone de septembre 2019 et celles du LIDAR d'octobre 2018 sous forme de rasters.

Afin d'identifier d'éventuels écarts de topographie, on calcule la différence entre les deux rasters, la couche résultante possède ainsi pour valeurs les écarts d'altitude entre les deux points drone/lidar les plus proches localement, puis par filtration de la table attributaire, il est ainsi possible de coloriser les points présentant un écart jugé significatif fixé manuellement à 0,2 mètre.



a) Orthophotographie IGN d'une partie du tronçon d'étude
b) Raster de la diff Drone-LIDAR (filtré en jaune les points où la diff > 0,20 m)
Figure 21 : Comparaison locale entre orthophotographie IGN et raster Drone-LIDAR filtré (diff > 0.2 m)

Cette analyse a rapidement mis en lumière des écarts de topographie conséquents entre les deux jeux de données (cf Figure 21), et plus spécifiquement en des zones précises du tronçon. Ces écarts se trouvent presque exclusivement au niveau des zones d'arbres (>90% des points pour 0.20m et +), en témoignent les différences les plus notables tout au long des berges très végétalisées du cours (cf Figure 22).

Les différences au sein du lit étant presque toutes liées à la présence ponctuelle d'arbres dans le cours d'eau, il est aisé de conclure que les erreurs viennent du drone incapable de mesurer correctement la hauteur du sol en milieu boisé, mais cela n'explique pas les écarts observés dans les zones du lit à découvert.

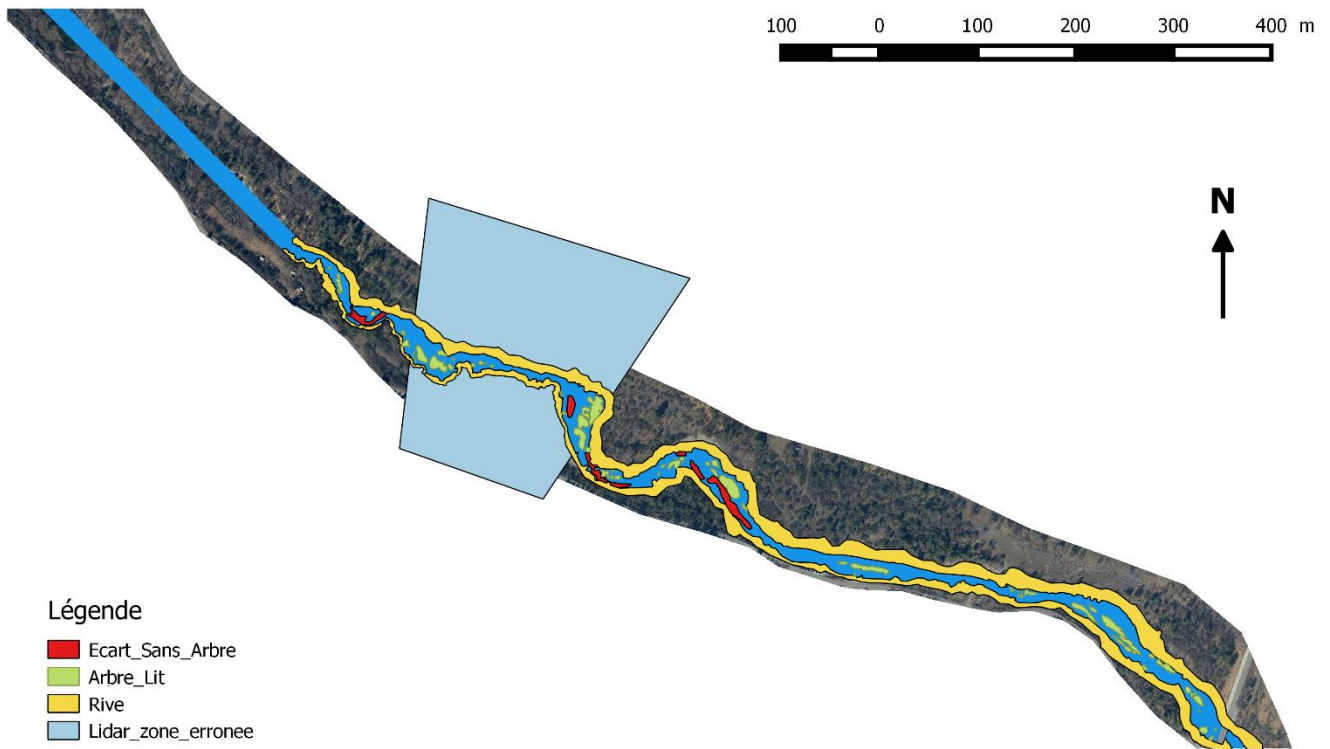


Figure 22 : Zonations des parties divergentes/erronées du tronçon d'étude

Afin de s'assurer que l'erreur dans les régions arboricoles provenait bien des difficultés du drone à mesurer ces parties du MNT, et non pas du LIDAR, un calcul de pente locale est effectué sur le raster du drone.

Même en filtrant le résultat pour des valeurs de pente réalistiquement trop élevées (>60%), les contours exacts des arbres sont toujours mis en évidence par le filtrage (cf Figure 23).



Figure 23 : Mise en évidence des erreurs de relevés topographiques par vol drone aux abords de la rypisylve (pente >60 %)

De ce fait, il devenait évident que les données du drone ne pouvaient être utilisées en zone couverte, cela ne permettait cependant pas d'affirmer que le LIDAR soit approprié pour remplacer le drone dans ces zones, ni à quoi était dû les différences observées dans le lit sans arbres à proximité.

Les données topographiques ont été comparées à des mesures du fond du lit effectuées au dGPS (ou GPS différentiel) sur le terrain le 29 août 2019, soit seulement 7 jours avant le vol drone, période durant laquelle aucune crue morphogène n'a eu lieu (cf Figure 4). Les mesures de cette campagne ont été effectuées de sorte à pouvoir être comparées sous la forme de transects réguliers le long du cours (cf Figure 24).

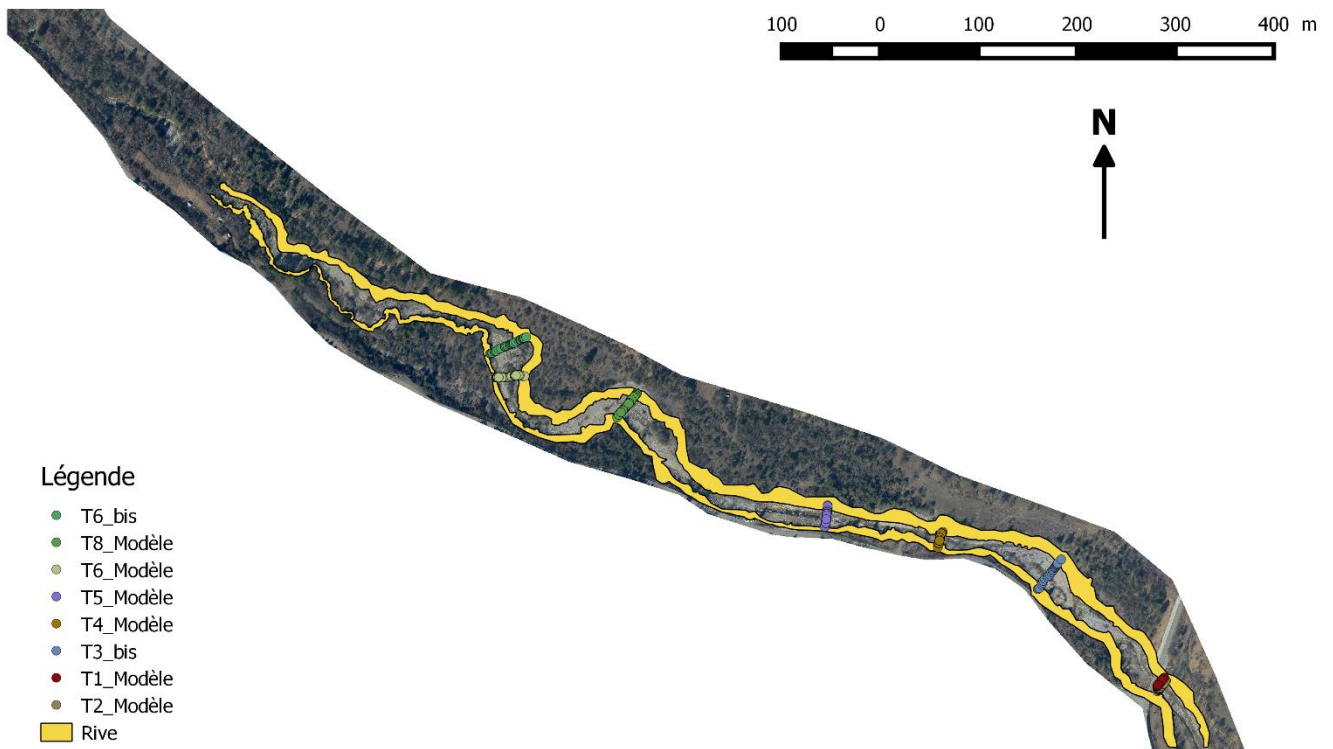


Figure 24 : Cartographie des transects de comparaison Drone/LIDAR/dGPS

La superposition des 3 jeux de données révèle rapidement que si le drone et le dGPS suivent rigoureusement la même évolution le long des transects à un léger écart de valeur prêt (+20 cm pour le drone en moyenne) (cf Annexe 2). Les valeurs du Lidar sont en revanche non seulement très différentes mais présentent une tendance incohérente face à celle des deux autres jeux (cf Figure 25).

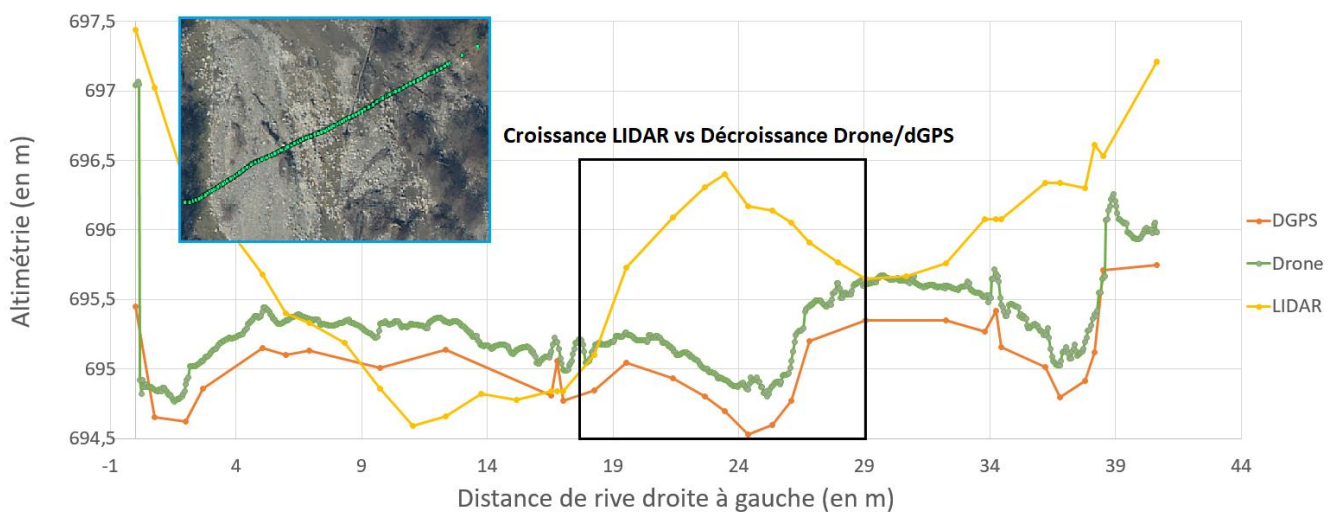


Figure 25 : Exemple de tracé comparatif de la topographie pour les différents jeux de données

Cette différence notable peut être attribuée à l'écart temporel entre le LIDAR et les autres données mentionnées précédemment. Un deuxième facteur explicatif également évoqué pourrait être la zone d'incertitude dans la mesure LIDAR, cependant cette dernière n'expliquerait une telle différence que pour certains des transects.

Il a finalement été décidé de constituer le MNT de la manière suivante :

- Le lit du Galabre se base sur les données du drone de septembre 2019 hors zones identifiées comme non fiables
- Les zones d'incertitudes sont reconstruites par interpolation des données proches
- Les berges du modèle sont basées sur le LIDAR

3.2. Modélisation numérique hydraulique 2D

3.2.1. Telemac2D

Les simulations hydrauliques 2D sont effectuées avec le logiciel Open Source Telemac-Mascaret développé au sein d'EDF R&D et par un consortium d'acteurs [11]. Les calculs hydrauliques sont basés sur les équations de Barré de Saint-Venant (cf Annexe 3) et de fait, Telemac2D est adapté aux écoulements en rivière peu profonde typiques du Galabre [11].

Chaque simulation nécessite l'usage de plusieurs fichiers :

- Steering file → Il s'agit du fichier texte renseignant l'ensemble des paramètres spécifiques à la simulation ainsi que les autres fichiers à lire pour cette dernière
- Geometry file → C'est le fichier Selafin du maillage à prendre comme géométrie du modèle 2D lors du calcul (le fichier résultat obtenu est également un fichier Selafin)
- Boundary Conditions file → Il indique quelles sont les conditions aux limites du modèle (ici à l'amont et à l'aval du tronçon) fichier cli + fichier texte renseignant les débits et hauteurs

Les calculs Telemac sont ainsi lancés via un terminal linux, en indiquant la puissance (nombre de cœurs de calcul à mobiliser) et le temps de calcul requis (fixé pour arrêter le calcul passé la durée indiquée).

La plupart des calculs seront effectués en parallèle sur plusieurs processeurs (maillage 1m, 0.5m et 0.25m respectivement à 1, 6 et 10 noeuds) sur des serveurs EDF distants, afin de permettre de lancer des séries de calculs simultanés sans être limité par les capacités de l'ordinateur.

Les calculs sont post-traités avec les logiciels Blue Kenue, QGIS (plugin post telemac) ou en code Python (Notebook d'exemples de post traitement à disposition).

3.2.2. Construction du maillage et choix des paramètres numériques

3.2.2.1. Domaine de calcul

Telemac nécessite un maillage au format Selafin et pour le créer à partir du MNT obtenu sur QGIS, il faut passer par un logiciel de construction de maillage. On a utilisé Blue Kenue [12].

Pour éviter une éventuelle influence des conditions aux limites sur le secteur d'intérêt, le modèle est étendu à l'amont et à l'aval de 700m.

Pour ce faire, nous avons dû créer 3 transects parallèles à l'amont et à l'aval, respectivement aux limites directes, à 200m et 700m de ces dernières en basant leur topographie sur la valeur moyenne de pente à 2%. Enfin, une routine python a permis d'interpoler entre ces transects un ensemble de points formant deux canaux rectilignes de 700m (cf Figure 26), les premiers 200m servant de zone de transition pour le calcul.

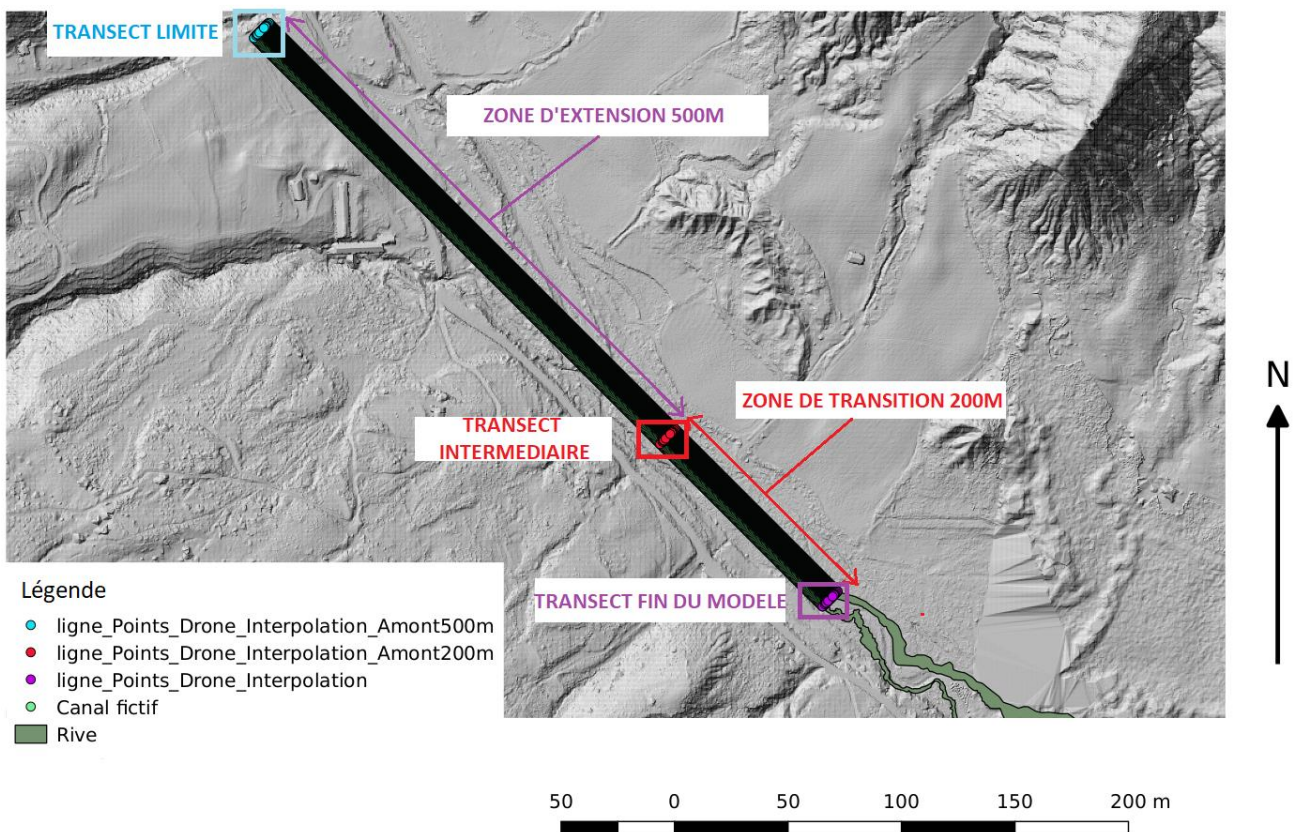


Figure 26 : Présentation des profils fictifs et de l'extension créés à l'amont du modèle d'étude

Blue Kenue permet d'utiliser notre combinaison de données drone/LIDAR pour créer un fichier décrivant les contours du maillage. A partir de ce dernier, il est possible de créer un maillage régulier non-structuré, c'est-à-dire dont la résolution est fixée mais dont la forme des mailles est variable (cf Figure 27).

Afin d'évaluer la convergence en maillage, trois maillages aux résolutions respectives de 1m (139 297 nœuds), 0,5m (540 655 nœuds) et 0,25m (2 174 241 nœuds) ont été créés.

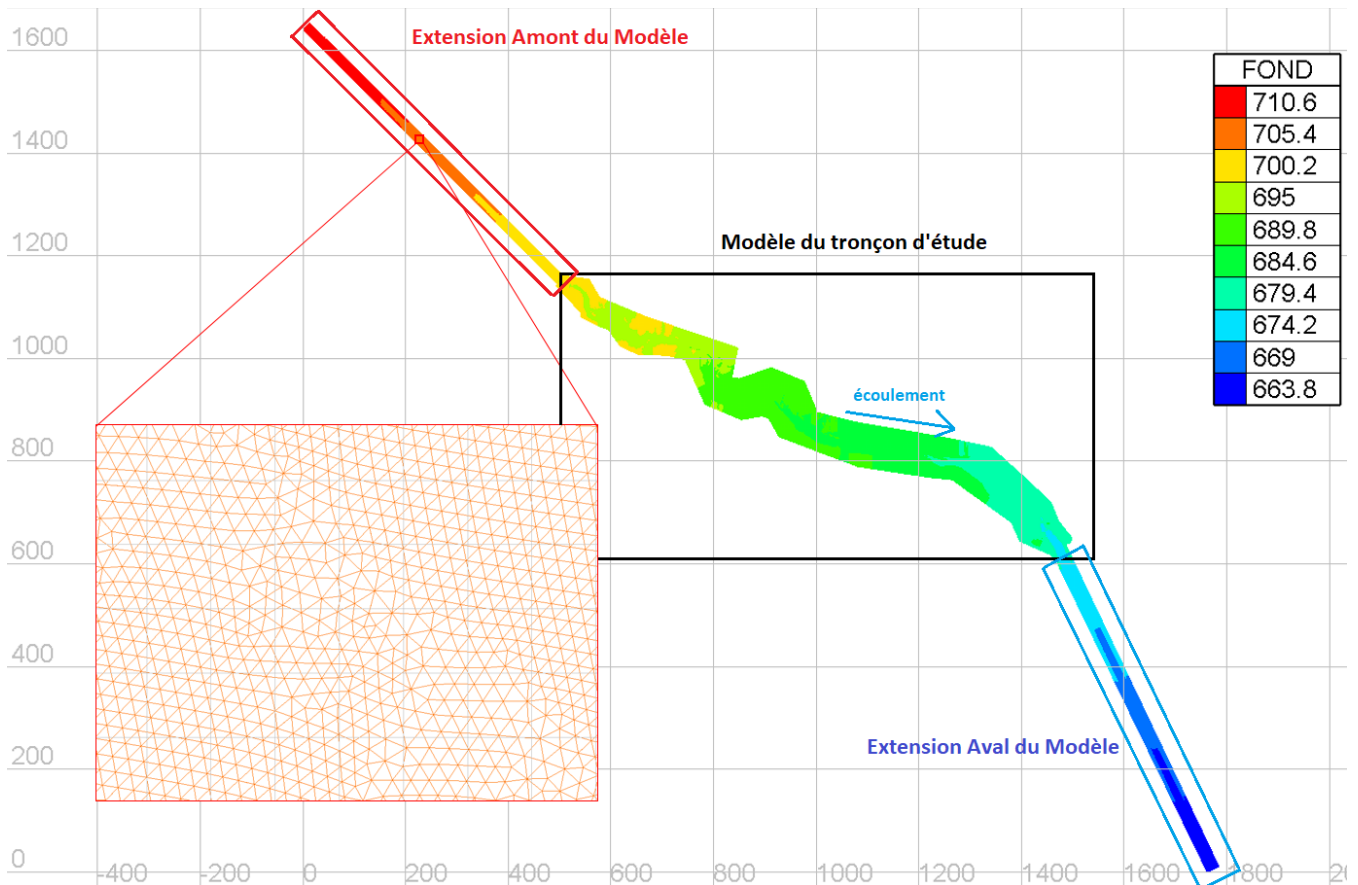


Figure 27 : Maillage obtenu par application de la bathymétrie sur Blue Kenue (maillage 1m)

3.2.2.2. Paramètres

Afin de lancer nos premières simulations hydrodynamiques, il est nécessaire de fixer des paramètres de calculs initiaux afin de pouvoir procéder aux différentes étapes de modélisation hydraulique.

Les premières simulations ont ainsi été basées sur les paramètres de steering file suivants (cf Annexe 4) :

- Le débit est fixé en régime permanent sur la valeur moyenne des chroniques de débit pour les jours correspondants aux campagnes de terrain des 10/05/2019, 27/05/2019 et 29/08/2019 afin de pouvoir effectuer des comparaisons pertinentes
- Afin de respecter la condition du nombre de courant (CFL, cf Annexe 5), le pas de temps a été fixé sur les trois maillages à 0.2s (1m), 0.1s (0.5m) et 0.05s (0.25m)
- La période de la simulation a été fixée à 1 heure minimum, cette durée étant suffisante aux 3 maillages pour atteindre un état convergé peu importe le débit d'étude

La loi de frottement utilisée est celle de Manning-Strickler avec un coefficient de frottement associé de $30\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui est une valeur commune pour les écoulements en rivière.

Les paramètres numériques (cf Annexe 4) ont été renseignés à partir de choix faits dans des études similaires.

3.2.3. Conditions aux limites amont et aval

Le modèle hydrodynamique se base sur les hypothèses suivantes :

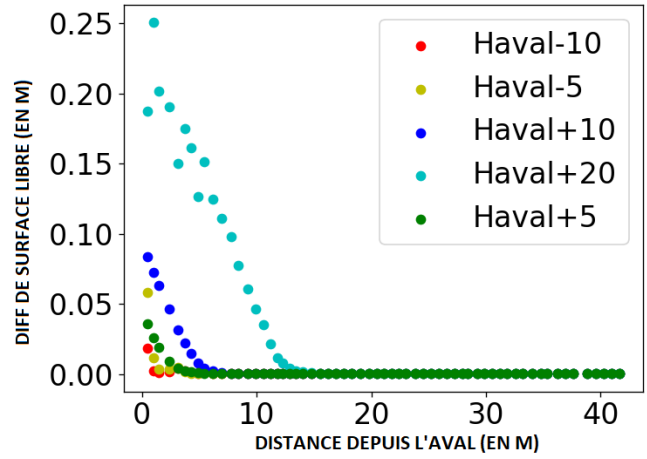
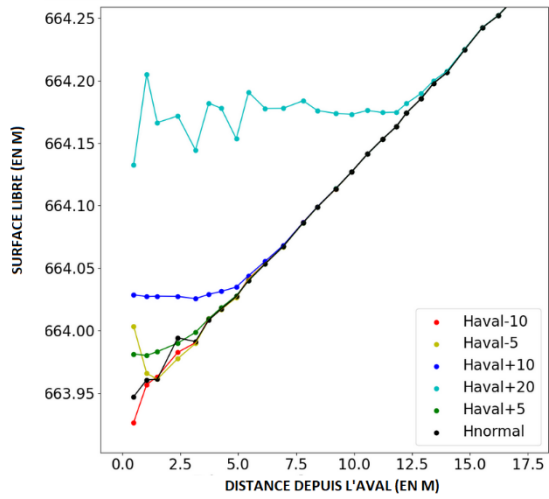
- Un débit est imposé à l'amont
- Une hauteur d'eau correspondante à aval peut être calculée via la formule de Manning-Strickler avec approximation d'un canal rectangulaire :

$$Heau = \left(\frac{Q}{l \times \left(i^{\frac{1}{2}}\right) \times Ks} \right)^{3/5}$$

- Heau la hauteur d'eau en m
 - Q le débit imposé à l'amont en m^3/s
 - L la largeur de l'extension en m
 - I la pente de l'écoulement en m/m
 - Ks le coefficient de Strickler en $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
- Les hauteurs d'eau imposées aux conditions limites n'ont pas d'influence sur le secteur d'intérêt

Cette dernière hypothèse nécessite cependant d'être vérifiée pour garantir la validité des calculs. Nous avons donc fait tourner plusieurs simulations à un débit constant de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ en faisant varier les hauteurs d'eau aux conditions limites amont et aval de $\pm 20 \text{ cm}$ par tranche de 5 cm .

La comparaison des résultats a permis de confirmer notre hypothèse avec une distance d'influence maximale de la condition limite aval de 20 m , ce qui reste largement en dehors du domaine d'intérêt (cf Figure 28).



a) Comparaison de la SL à l'aval selon la hauteur d'eau imposée

b) Calcul de la différence entre la SL attendue et les SL obtenues par variation de Heau

Figure 28 : Etude de l'influence de la hauteur d'eau fixée en aval sur la surface libre du modèle

4. Modélisations hydrodynamiques 2D du Galabre

Cette partie s'intéresse à l'ensemble des étapes ayant conduit à l'obtention du modèle hydraulique final. Le travail consiste tout d'abord à choisir judicieusement le maillage le plus adapté aux simulations, puis à effectuer un calage du frottement avec les différentes données hydrauliques à disposition.

4.1. Convergence en maillage

4.1.1 Comparaison des lignes d'eau

Afin de choisir quel maillage conserver parmi les 3 disponibles (1, 0.5 et 0.25 m) pour nos calculs hydrauliques, nous nous basons sur deux facteurs décisionnels : La précision des résultats et le temps de calcul associé.

En effet, si le choix de prendre le maillage le plus précis peut sembler le plus sensé, il est bon de rappeler que la multiplication du nombre de mailles entraîne une multiplication identique du temps de calcul, certains dépassant déjà l'ordre de l'heure pour simuler un débit permanent de 0.742 m³/s avec un maillage de 0.25m et 10 nœuds de calcul, soit 360 cœurs.

Des simulations pour des événements de crues à débit transitoire et le couplage avec le module GAIA [13] utilisé pour des modélisations sédimentaires ultérieures augmentent significativement le temps de calcul avec des équations de transport supplémentaires à résoudre à chaque pas de temps.

Un premier moyen de comparaison consiste à comparer les points de mesure des trois campagnes sélectionnées (10 mai, 27 mai et 29 août 2019) à la simulation associée en débit moyen (moyenne de la journée : 10 mai = 0.193m³/s, 27 mai = 0.742m³/s & 29 août = 0.083m³/s) pour chacun des 3 maillages.

Les valeurs de la cote de la surface libre d'eau au niveau des points concernés sont extraites de chaque simulation afin de les comparer graphiquement (cf Annexe 6), puis de calculer les RMSE (erreurs quadratiques moyennes) correspondantes entre les simulations et les données de campagne (cf Tableau 3).

Tableau 3 : RMSE sur les cotes de surface libre obtenues selon le maillage et la campagne considérés

RMSE Surface Libre simu – Surface Libre campagne	Maillage 1 m	Maillage 0,5 m	Maillage 0,25 m
10/05/2019 (Q=0.193m³/s)	0,186	0,191	0,214
27/05/2019 (Q=0.742m³/s)	0,172	0,173	0,216
29/08/2019 (Q=0.083m³/s)	0,202	0,204	0,179

Le Tableau 3 montre que les valeurs de RMSE ne permettent pas d'identifier clairement un maillage à choisir ou exclure, les RMSE étant très proches et aucune tendance claire ne pouvant en être tirée.

4.1.2 Etude des vitesses

Les vecteurs vitesse obtenus dans la zone située à 250 m de l'amont (cf Figure 29) tout comme ceux obtenus dans d'autres zones sélectionnées (cf Annexe 7) mettent bien en valeur la différence entre le maillage à 1 mètre et les 2 autres.

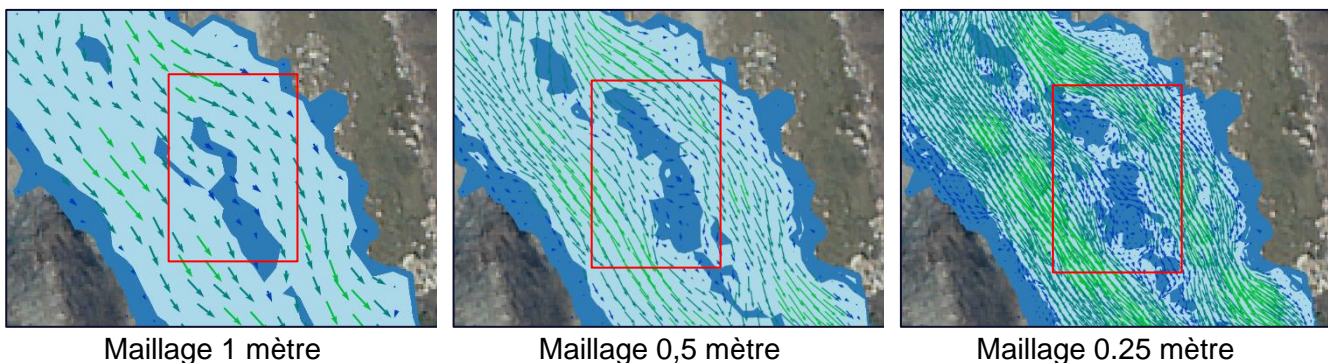


Figure 29 : Comparaison qualitative des vitesses de surface selon le maillage ($Q = 0.742 \text{ m}^3/\text{s}$)

Effectivement, si les ordres de grandeur des vitesses sont similaires, la direction des vecteurs vitesses dans le maillage le plus grossier est quasi-rectiligne, tandis que dès 0,5 mètre, on observe de nombreuses recirculations latérales.

Le modèle attendu doit être capable de représenter ces zones de recirculations locales. Cette étude nous a permis d'écarter le maillage de 1 mètre qui semblait trop imprécis au niveau du lit pour pouvoir plus tard reproduire les zones de dépôts des sédiments pouvant être très localisées.

4.1.3 Comparaison des hauteurs d'eau et vitesses

Pour faire le choix entre les deux derniers maillages plus précis, nous avons choisi de simuler la crue en date du 27 mai 2019 en débit moyen et maximum et ce avec les 3 maillages.

Les résultats des maillages sont comparés deux à deux sur 11 transects placés le long du tronçon d'étude dans des zones visuellement différentes d'une simulation à l'autre (cf Figure 30).

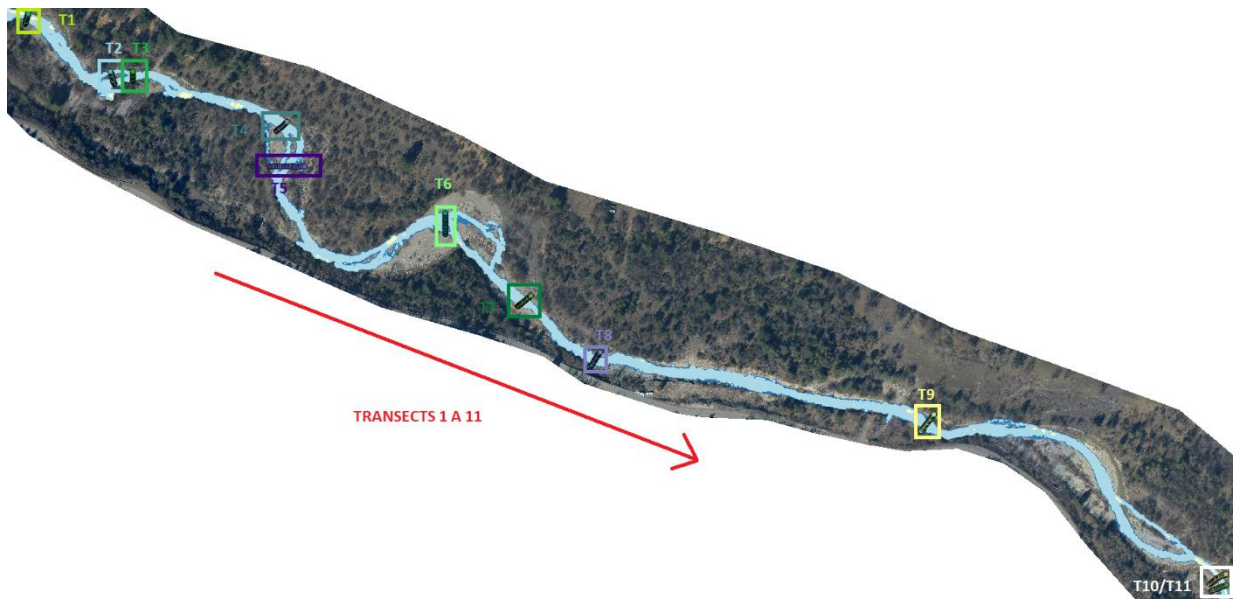


Figure 30 : Répartition des transects de comparaison en Heau et Vitesse des maillages

Une comparaison entre maillages des valeurs de différences moyennes obtenues pour les hauteurs d'eau et les composantes de vitesse (cf Annexe 8 & Annexe 9) a permis de démontrer que les écarts relatifs entre maillages suivent la logique suivante : écarts 1m/0,25m > écarts 1m/0,5m > écarts 0,5m/0,25m (cf Figure 31).

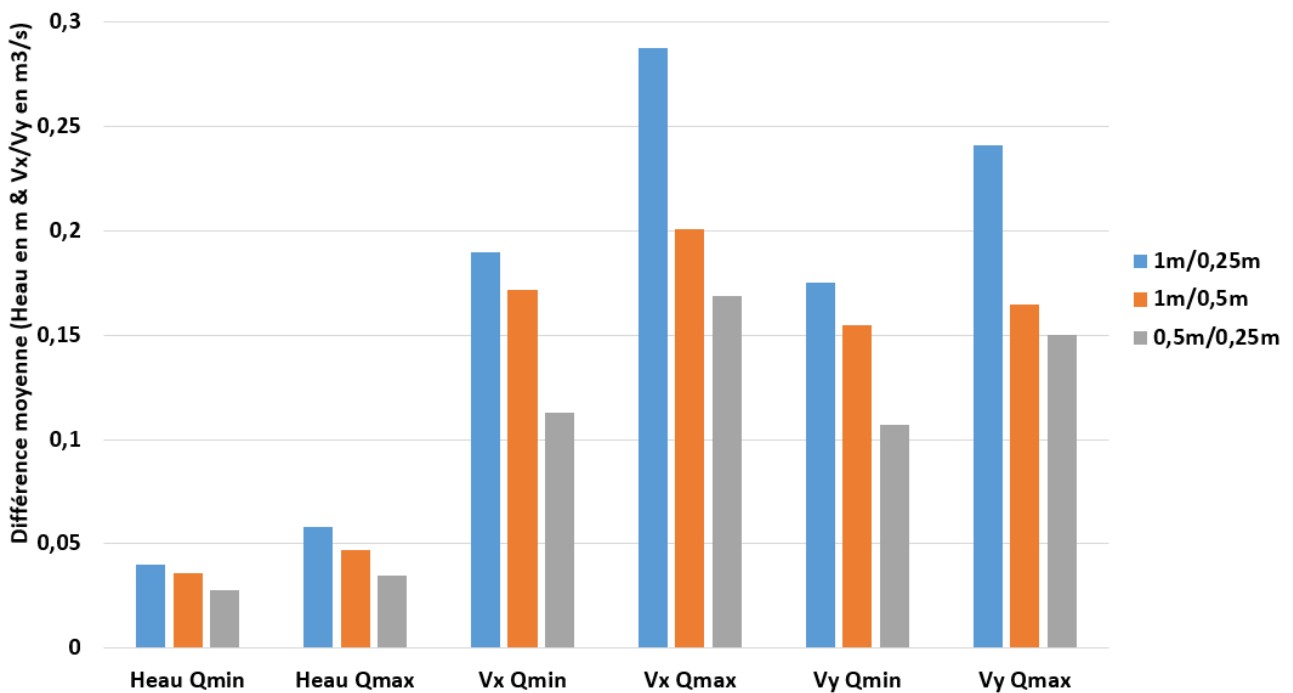


Figure 31 : Comparaison des différences moyennes de Heau et Vitesse entre les 3 maillages

Considérant le fait que les simulations sur le maillage de précision 0,25m sont 2 à 4 fois plus longues que ceux pour les mailles à 0,5m et que les écarts de valeurs entre les deux sont donc les plus faibles, il a finalement été décidé de retenir le maillage intermédiaire de 0,5 mètre pour les simulations finales.

4.2. Calibration du frottement

4.2.1. Comparaison des lignes d'eau à l'étiage

L'un des principaux paramètres du modèle hydraulique à calibrer avant de passer aux simulations sédimentaires est la loi de frottement ainsi que le coefficient associé décrivant le mieux la rugosité relative au lit du Galabre dans la zone d'étude.

L'observation visuelle du tronçon montre une grande variabilité naturelle de la composition du lit du tronçon, influençant ainsi sa rugosité.

Pour des raisons de simplicité, on fait le choix d'un coefficient de frottement constant sur le domaine. Telemac permet cependant de paramétrer un frottement spatialement variable.

Il est primordial de passer par une étape de calage en comparant simulations et campagnes de mesure.

Les deux lois de frottement considérées pour ce calage sont les plus communes pour les écoulements à surface libre en rivière, à savoir la loi de Manning-Strickler (cf Annexe 10 & Annexe 11) et la loi de Nikuradse (cf Annexe 10 & Annexe 12), bien que cette dernière soit communément admise comme étant la plus adaptée pour les faibles régimes d'écoulement rencontrés sur le Galabre.

Dans les deux cas, le calage initial s'est fait à l'aide des lignes d'eau à l'étiage, toujours en prenant pour référence les 3 campagnes de mesures à notre disposition afin d'évaluer les écarts (cf Figure 32, Figure 33).

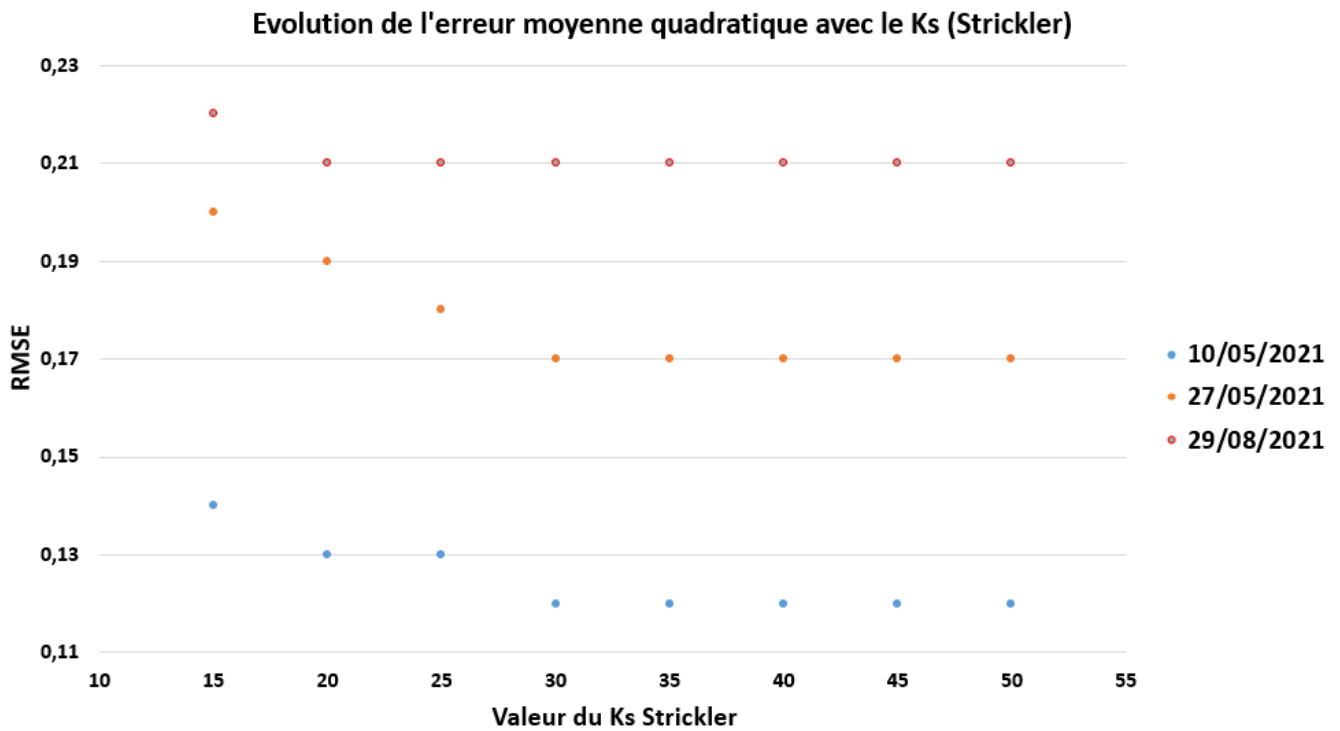


Figure 32 : Graphique de l'évolution de la RMSE entre simulation et campagne selon le Ks (en $m^{1/3}/s$) considéré (Strickler)

Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs de RMSE obtenues selon la campagne et le Ks considérés (Strickler)

Campagne	Ks15	Ks20	Ks25	Ks30	Ks35	Ks40	Ks45	Ks50
10/05/2021	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
27/05/2021	0,2	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
29/08/2021	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

Evolution de l'erreur moyenne quadratique avec le K (Nikuradse)

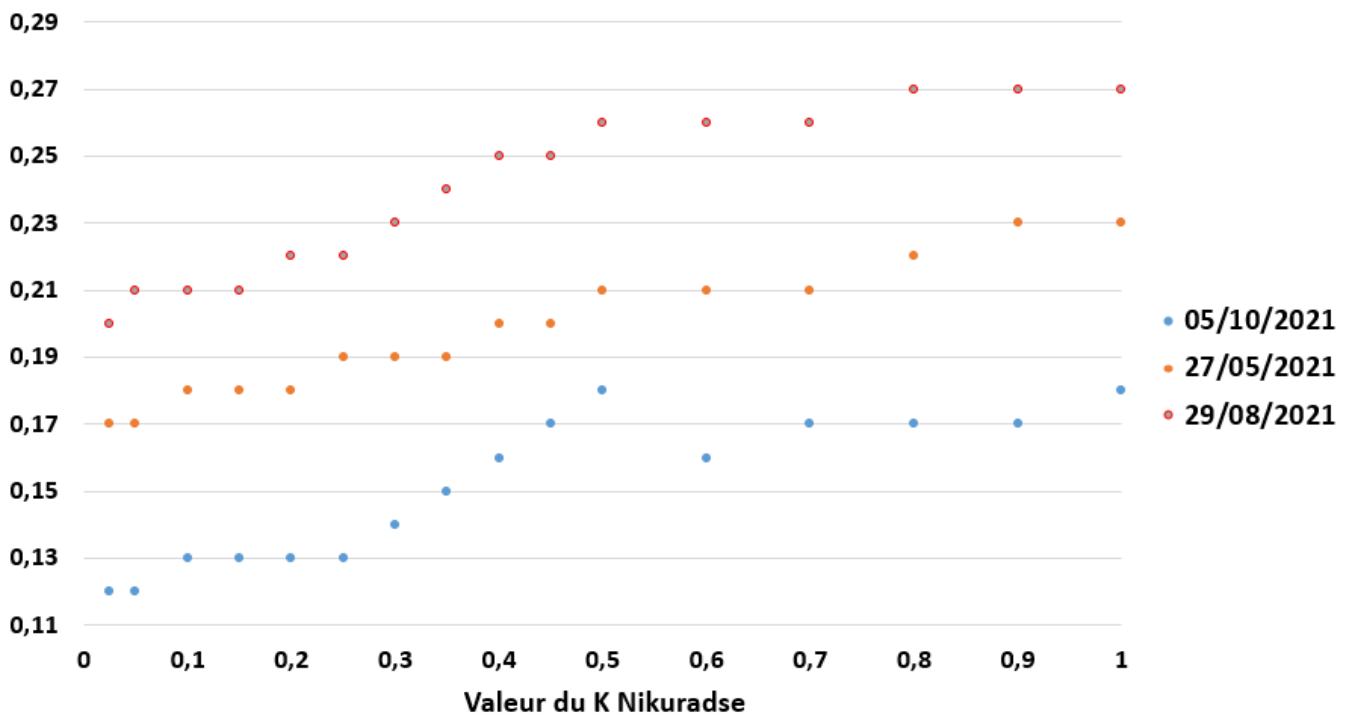


Figure 33 : Graphique de l'évolution de la RMSE entre simulation et campagne selon le K (en m) considéré (Nikuradse)

Tableau 5 : Récapitulatif des valeurs de RMSE obtenues selon la campagne et le K considérés (Nikuradse)

Campagne	K0,025	K0,05	K0,10	K0,15	K0,20	K0,25	K0,30	K0,35	K0,40	K0,45	K0,50	K0,60	K0,70	K0,80	K0,90	K1,00
10/05/2021	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,16	0,17	0,17	0,17	0,18
27/05/2021	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23
29/08/2021	0,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27

On constate que la RMSE de chaque campagne ne fait globalement que décroître avec l'augmentation du coefficient de Strickler même si le tableau montre bien que cette dernière atteint un plateau aux alentours d'un $K_s = 35-40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ce qui permet de remonter à une valeur attendue de d_{90} suivant la formule suivante :

$$K_s = 26/d_{90}^{1/6}$$

Ainsi on atteindrait une simulation satisfaisante aux alentours de 7,5 à 16,8 cm de d_{90} . Cette gamme semble s'accorder avec celle observée par analyse Basegrain/Fehr de 5 à 10 cm.

L'analyse des résultats suivant Nikuradse donne une tendance inverse, à savoir que plus le coefficient augmente plus l'écart s'intensifie, cependant il ne faut pas confondre les deux coefficients, puisque le coefficient de la loi de Nikuradse est une rugosité, avec une relation au diamètre des sédiments.

En d'autres termes, les deux graphiques obtenus permettent d'affirmer que le coefficient que l'on recherche est associé aux alentours de $K_{\text{Strickler}} = 35\text{-}40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ et $K_{\text{Nikuradse}} = 0.025\text{-}0.05\text{m}$, cependant cette analyse à l'étiage ne permet pas de suffisamment réduire l'intervalle de valeurs exact.

4.2.2. Vérification du frottement en crue

Les données obtenues par l'instrumentation sur site permettent de compléter le travail de calage du frottement avec des débits bien supérieurs ($>1\text{m}^3/\text{s}$).

4.2.2.1. Vérification du frottement avec les mesures LSPIV

Les mesures de champs de vitesses en surface de l'écoulement à la station RIPLE doivent permettre une évaluation du modèle sur son aptitude à reproduire correctement les champs de vitesses de l'écoulement.

Les mesures obtenues par LSPIV concernent la journée du 25 mai 2019, jour de fortes crues, chronologiquement très proche de l'une de nos campagnes de mesures.

Un algorithme python dédié (source Coraline Bel) nous permet d'afficher les résultats des vecteurs vitesses mais aussi les lignes de courant.

Ainsi, il est possible de comparer visuellement le modèle aux résultats LSPIV pour chaque valeur de frottement (cf Figure 34).

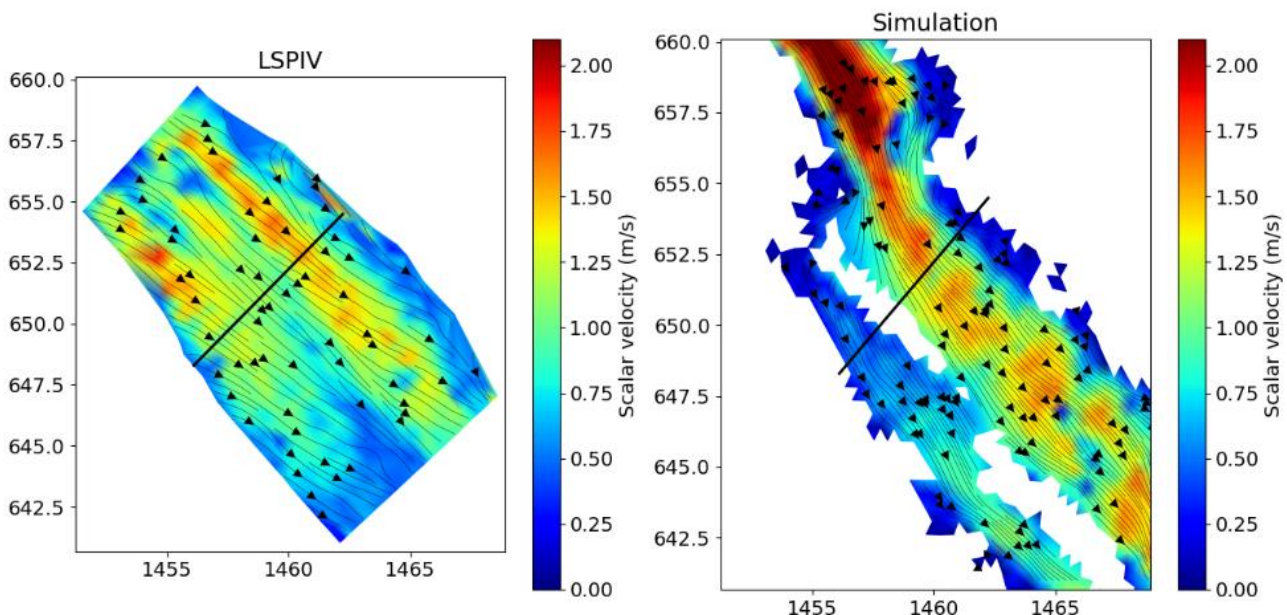


Figure 34 : Exemple de comparaison des lignes de courant entre la LSPIV et les simulations (25/05/2019, 14h20, $Q = 1.43\text{m}^3/\text{s}$)

En parallèle, nous sommes également en mesure d'extraire sur un transect prédéfini les valeurs de vitesse des deux jeux de données et faire une comparaison des écarts (RMSE) selon la loi et le coefficient de frottement choisis (cf Figure 35).

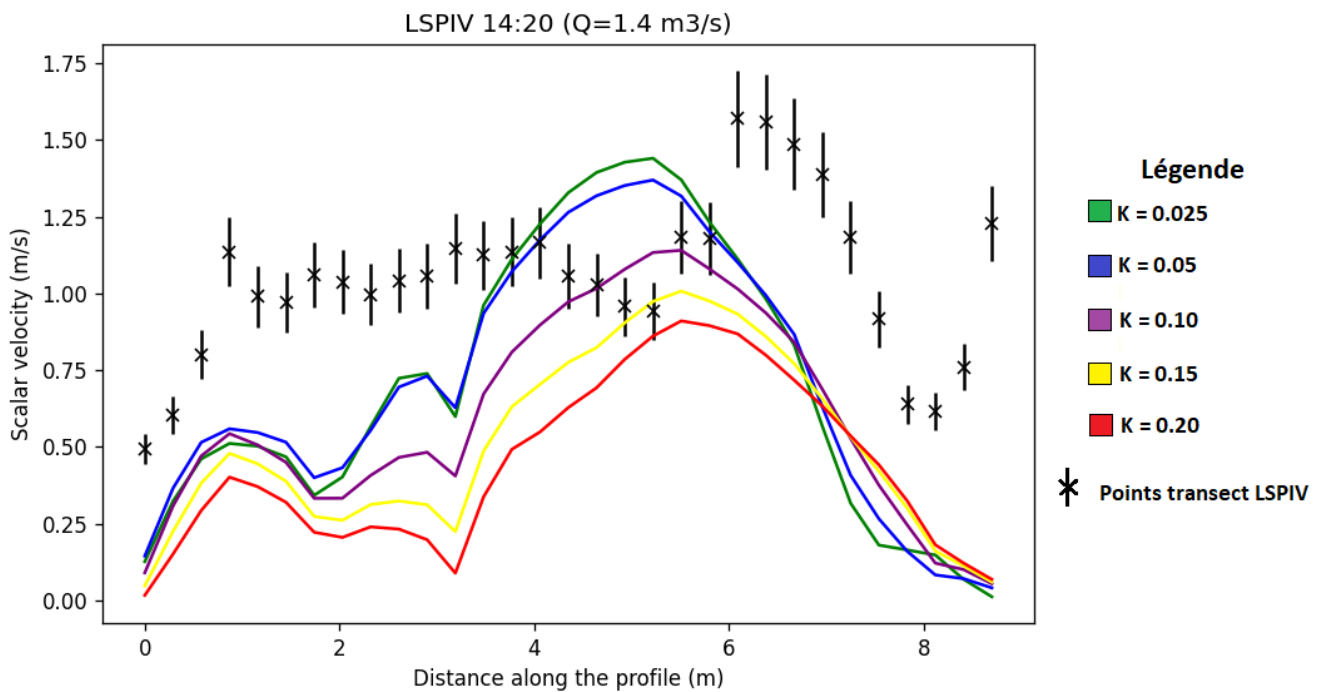


Figure 35 : Tracé comparatif des vitesses scalaires obtenues pour les différents K Nikuradse (en m) avec les points LSPIV (25/05/2019, 14:20, Q=1.43m³/s)

Ces comparaisons sont effectuées pour l'ensemble des campagnes, avec un Ks variant de 25 à 45 m^{1/3}/s et un K_{Nikuradse} de 0.025 à 0.20 m. Les points de calages LSPIV sont affichés graphiquement avec un écart-type fixé à +/- 10%.

La LSPIV mesure des vitesses de surface tandis que le modèle mesure une vitesse moyenne sur la verticale, il est donc nécessaire de multiplier ces vitesses de surface avant comparaison par un coefficient fixé ici à 0,85.

On calcule ensuite la RMSE des vitesses entre les points de simulation et LSPIV pour chaque valeur de coefficient de rugosité testé. Les résultats des comparaisons ainsi obtenus sont compilés dans le Tableau 6 :

Tableau 6 : Moyennes des RMSE entre simulations et LSPIV en fonction du coefficient de rugosité

		Sequence LSPIV									
		14h20	14h50	15h20	16h20	16h50	17h20	17h50	15/10/19	Moyenne Globale	
Coeff rugosité		Q=1,43m³/s	Q=7,35m³/s	Q=6,23m³/s	Q=4,41m³/s	Q=4,35m³/s	Q=4,1m³/s	Q=4,05m³/s	Q=1,27m³/s		
RMSE Strickler	Ks=25	0,6	0,97	1,28	1,49	1,45	1,09	1,12	0,34	Ks=25	1,04
	Ks=30	0,61	1,05	1,34	1,48	1,44	1,12	1,15	0,39	Ks=30	1,07
	Ks=35	0,62	1,06	1,31	1,55	1,46	1,11	1,15	0,44	Ks=35	1,09
	Ks=40	0,62	1,1	1,39	1,58	1,48	1,11	1,15	0,47	Ks=40	1,11
	Ks=45	0,64	1,1	1,44	1,58	1,48	1,16	1,18	0,49	Ks=45	1,13
RMSE Nikuradse	Kn=0,025	0,65	1,09	1,43	1,56	1,46	1,13	1,17	0,53	Kn=0,025	1,13
	Kn=0,05	0,62	1,07	1,26	1,51	1,45	1,12	1,17	0,48	Kn=0,05	1,09
	Kn=0,10	0,63	0,88	1,19	1,55	1,47	1,14	1,16	0,39	Kn=0,10	1,05
	Kn=0,15	0,67	0,88	1,23	1,6	1,5	1,18	1,2	0,37	Kn=0,15	1,08
	Kn=0,20	0,72	0,93	1,26	1,66	1,54	1,23	1,25	0,37	Kn=0,20	1,12

On constate que les RMSE tendent à être les plus faibles pour un coefficient de Nikuradse égal à 0.10m, en revanche, les calculs sous Strickler semblent indiquer que des coefficients de rugosité plus élevés entraîne une plus faible précision (cf Tableau 6).

Il est cependant bon de noter que les écarts de valeurs de RMSE pour chaque débit ne varient que peu selon le coefficient choisi.

4.2.2.2. Vérification du frottement par analyse de photos TimeLapse

Bien que plus localisé, l'analyse des photographies Time Lapse apporte également des informations quant à la validité des paramètres de frottements. En calculant la RMSE sur les points de calage aux dates et heures retenues, on obtient le Tableau 7 donnant son évolution sur les différents points (et débits correspondants) selon la valeur de nos coefficients :

Tableau 7 : Moyennes des RMSE entre simulations et points de calage TimeLapse en fonction du coefficient de rugosité

		Q TIMELAPE RETENUS						
		Q=1,4m³/s	Q=1,7m³/s	Q=2,26m³/s	Q=2,43m³/s	Q=2,7m³/s	Moyenne Globale	
Coeff rugosité		13 points	11 points	8 points	6 points	3 points		
RMSE Strickler	Ks=25	0,16	0,19	0,07	0,07	0,09	Ks=25	0,12
	Ks=30	0,16	0,17	0,06	0,06	0,1	Ks=30	0,11
	Ks=35	0,15	0,15	0,06	0,05	0,1	Ks=35	0,10
	Ks=40	0,14	0,14	0,05	0,06	0,1	Ks=40	0,10
	Ks=45	0,14	0,13	0,05	0,06	0,1	Ks=45	0,10
RMSE Nikuradse	Kn=0,025	0,14	0,13	0,05	0,06	0,1	Kn=0,025	0,10
	Kn=0,05	0,15	0,15	0,05	0,06	0,1	Kn=0,05	0,10
	Kn=0,10	0,15	0,16	0,06	0,07	0,1	Kn=0,10	0,11
	Kn=0,15	0,16	0,17	0,07	0,07	0,09	Kn=0,15	0,11
	Kn=0,20	0,16	0,18	0,07	0,08	0,09	Kn=0,20	0,12

Les résultats observés montrent une grande similarité avec les comparaisons de lignes d'eau, à savoir qu'un coefficient de Nikuradse plus faible est préférable (environ 0.05 ou 0.1 m), tandis que les coefficients de Strickler semblent plus précis pour des valeurs plus élevées (cf Tableau 7).

De façon identique aux résultats de LSPIV, les comparaisons TimeLapse semblent avant tout montrer une faible variabilité des résultats face à un changement de coefficient de rugosité.

4.2.2.3. Comparaison avec les mesures granulométrique et discussion

Sur la base des résultats de l'analyse LSPIV, les simulations atteindraient une précision idéale pour un $K_{Nikuradse}$ égal à environ 0.1 m, or ce coefficient peut être associé rapidement à un d_{50} par l'approximation :

$$d_{50} = \frac{K_n}{3}$$

On aurait donc pour cette valeur de coefficient un d_{50} environ égal à 3.3 cm ce qui est conforme à ce qu'on pouvait observer lors des campagnes granulométriques sur la majorité des points de mesures (cf Figure 19), ce résultat est donc retenu pour les futures modélisations.

En revanche, les différentes données ne semblent pas s'accorder sur la valeur de $K_{Strickler}$, les comparaisons TimeLapse et de lignes d'eau soulignant des K_s autour de 35-40 $m^{1/3}/s$, tandis que la LSPIV tendrait vers des valeurs plus faibles.

En considérant les fortes valeurs des RMSE calculées pour l'analyse LSPIV et la faible variabilité des résultats face aux paramètres, on choisit finalement de retenir un coefficient de Strickler égal à 35 $m^{1/3}/s$, ce qui donne un d_{90} égal à 16.8 cm, très proche des valeurs observées lors des campagnes (cf Tableau 2).

5. Conclusions et perspectives

L'objectif du travail de stage consistait à construire un modèle hydrodynamique robuste du Galabre pour une meilleure compréhension de la dynamique hydrosédimentaire. Ce travail s'est appuyé sur un jeu de données de taille importante. Les données existantes (topographie, vitesses et hauteurs d'eau) ont été complétées par des mesures granulométriques réalisées dans le cadre de ce stage. Les données ont été exploitées et critiquées.

La construction du MNT permet de reproduire la topographie du tronçon d'étude fidèlement. L'ensemble des simulations présente un écoulement visuel conforme aux observations sur le site du Galabre et les extensions empêchent correctement aux conditions limites du modèle d'influencer les calculs.

Le modèle hydrodynamique Telemac2D donne de bons résultats en cohérence avec les nombreux jeux de données à disposition, notamment en termes de hauteurs d'eau et de vitesses. Le calage est réussi et les comparatifs ont permis de converger vers des coefficients de frottement proches tout en montrant la faible influence de ces derniers sur les calculs, soulignant la validité du modèle.

Une majeure partie des avancées du stage ont pu être présentée lors du GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) organisé à Draix (04420) les 5 et 6 juillet 2021 devant un ensemble de chercheurs dont le travail concerne des domaines similaires. Ces derniers ont pu alors donner leurs retours sur les méthodes et résultats obtenus.

Ce travail permettra la poursuite des recherches dans le cadre de la thèse de Hanna Haddad concernant les dynamiques d'érosion et de dépôts des sédiments fins par inclusion du module GAIA aux calculs sous Telemac. La convergence en maillage effectuée lors du stage permettra d'ajouter ces flux de matière en suspension dans les simulations sans entraîner de calculs trop longs.

Bibliographie

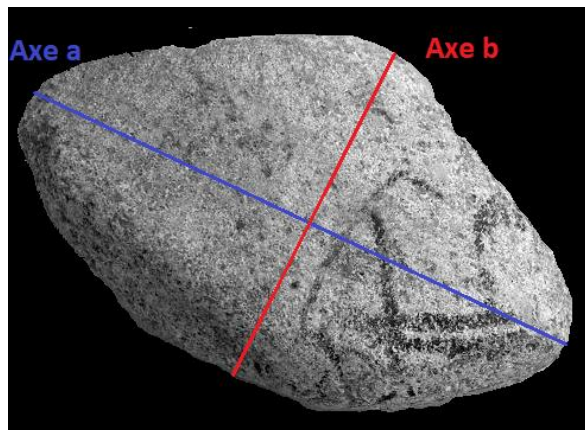
- 1 Nigussie Haregeweyn, Atsushi Tsunekawa, Jean Poesen, Mitsuru Tsubo, Derege Tsegaye Meshesha, Ayele Almaw Fenta, Jan Nyssen, Enyew Adgoe. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River; 95-108, *Science of The Total Environment* (2017)
- 2 Tomáš Cebecauer, Jaroslav Hofierkab. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia; 187-198, *Geomorphology* (2008)
- 3 Paul J. Wood, Patrick D. Armitage. Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment; 203-217, *Environmental Management* (1997)
- 4 Magdalena Uber. Suspended sediment production and transfer in mesoscale catchments: a new approach combining flux monitoring, fingerprinting and distributed numerical modeling; *Applied geology. Université Grenoble Alpes*, 2020
- 5 José M. García-Ruiz, Santiago Beguería, Estela Nadal-Romero, José C. González-Hidalgo, Noemí Lana-Renault, Yasmina Sanjuána. A meta-analysis of soil erosion rates across the world; 160-173, *Geomorphology* (2015)
- 6 Suffiyan Safdar, Guillaume Nord, Cédric Legout. Érosion et transfert de sédiments dans un bassin versant; *Institut des Géosciences de l'Environnement* (2021)
- 7 Legout C., Freche G., Biron R., Esteves M., Navratil O., Nord G., ... & Spadini L.. A critical zone observatory dedicated to suspended sediment transport: the meso-scale Galabre catchment (southern French Alps). (2021)
- 8 B. Camenen, G. Melun. Guide Technique pour la mesure et la modélisation du transport solide ; INRAE (2020)
- 9 A. Hauet, M. Jodeau, J. Le Coz, B. Marchand, A. Die Moran, et al.. Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière; *La HouilleBlanche - Revue internationale de l'eau*, 3, pp.16-22, EDP Sciences, (2014).
- 10 M. Detert & V. Weitbrecht. Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool; Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology VAW, ETH Zurich, Switzerland (2012)
- 11 Guide Telemac 2D ; (EDF 2020) :
 - telemac2d_validation_v8p2.pdf
 - telemac2d_user_v8p2.pdf
 - telemac2d_reference_v8p2.pdf
- 12 P. Maron. The Mesher in BlueKenue; EDF (2012)
- 13 Audouin Yoann, Benson, Thomas, Delinares Matthieu, Fontaine Jacques, Glander Boris, Huybrechts Nicolas, Kopmann Rebekka, Leroy Agnès, Pavan Sara, Pham Chi-Tuân, Taccone Florent, Tassi Pablo, Walther Regis. Introducing GAIA, the brand new sediment transport module of the TELEMAC-MASCARET system; TELEMAC-MASCARET User Conference, (2019).
- 14 Bohlin Caroline, Ligier Pierre-Louis, Söderström Anders, Lier Øyvind. Modelling complex vertical structures with TELEMAC-3D; TELEMAC-MASCARET User Conference, (2016).

Annexes

Annexe 1

Description des classes granulométriques de la méthode de Fehr

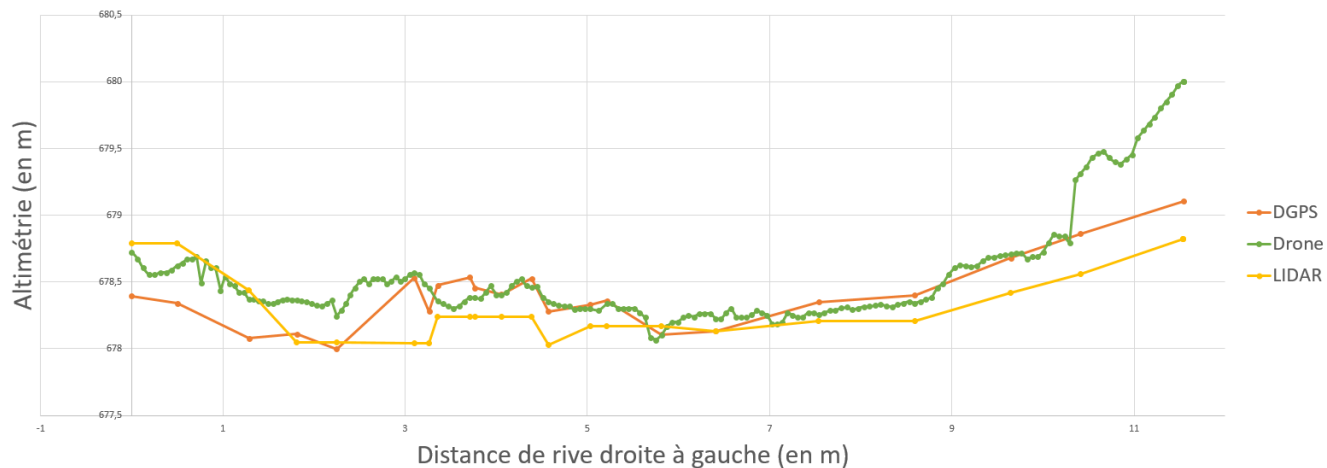
Classes granulométriques de la méthode de Fehr	
b<1cm	20cm<b<25cm
1cm<b<2cm	25cm<b<30cm
2cm<b<3cm	30cm<b<35cm
3cm<b<4cm	35cm<b<40cm
4cm<b<6cm	40cm<b<50cm
6cm<b<8cm	50cm<b<60cm
8cm<b<10cm	60cm<b<80cm
10cm<b<12cm	80cm<b<100cm
12cm<b<15cm	100cm<b<120cm
15cm<b<20cm	120cm<b



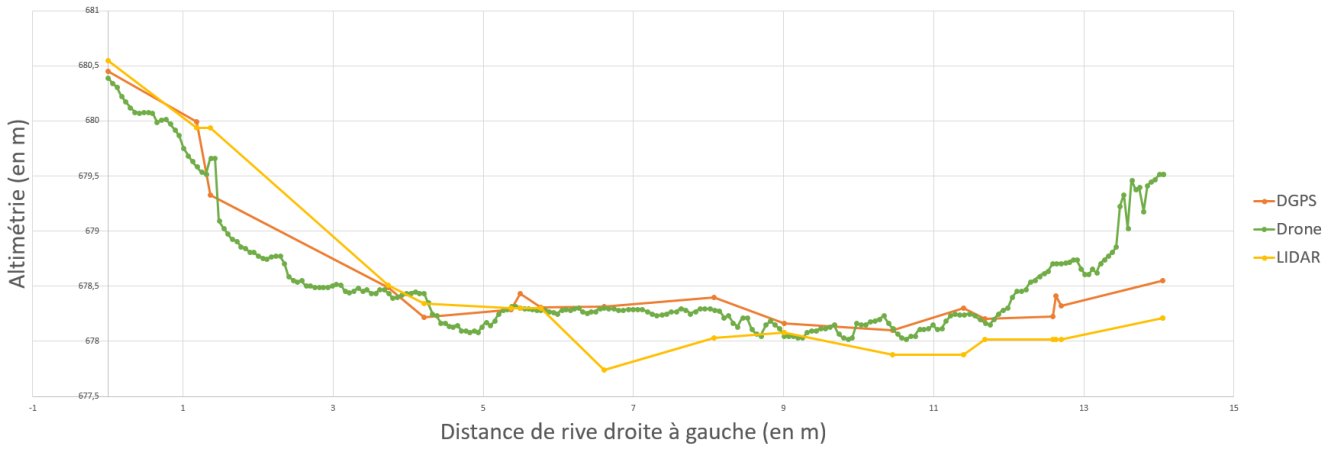
Annexe 2

Comparaison des données Drone/LIDAR/dGPS sur les autres transects disponibles

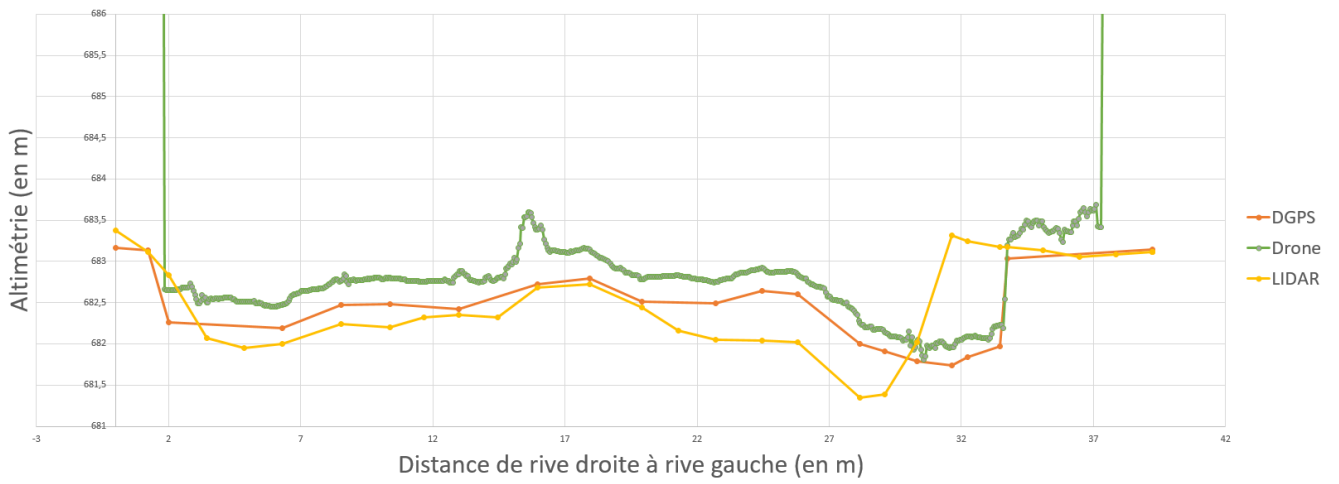
Transect n°1



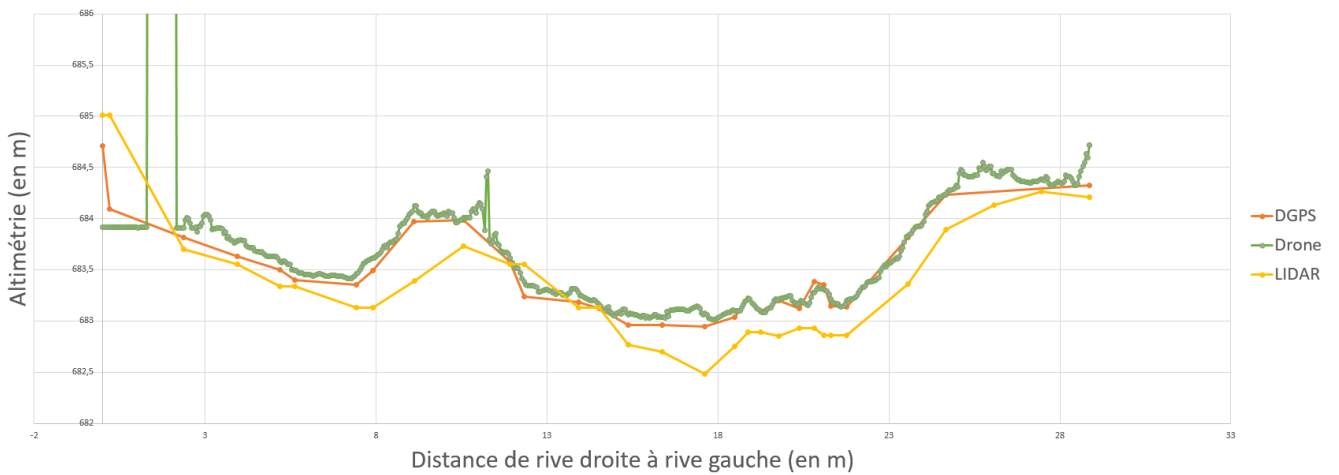
Transect n°2



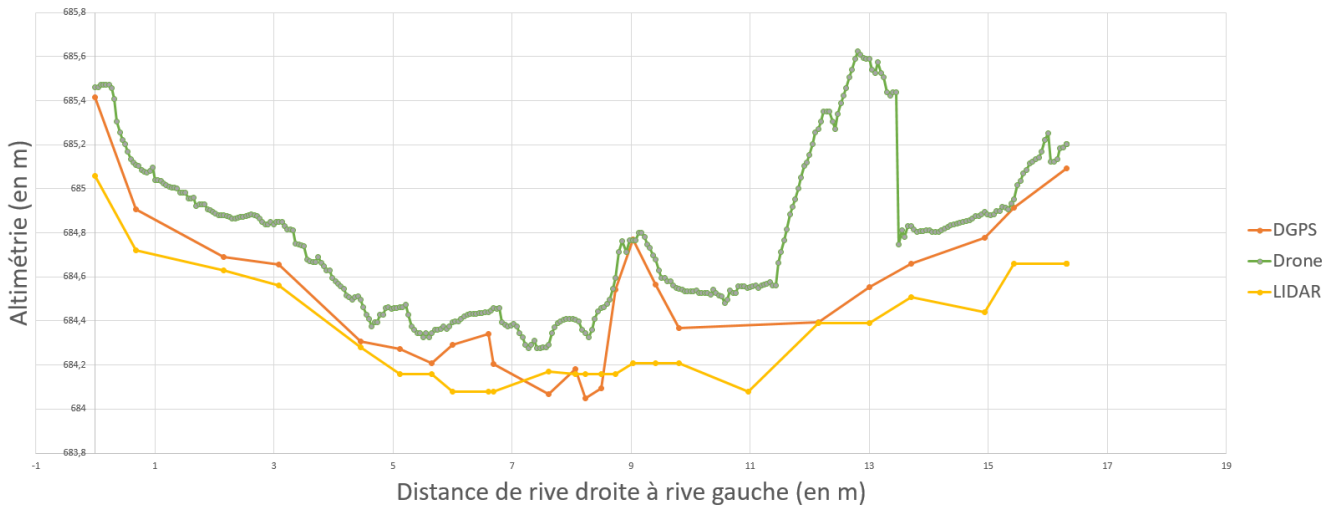
Transect n°3 bis



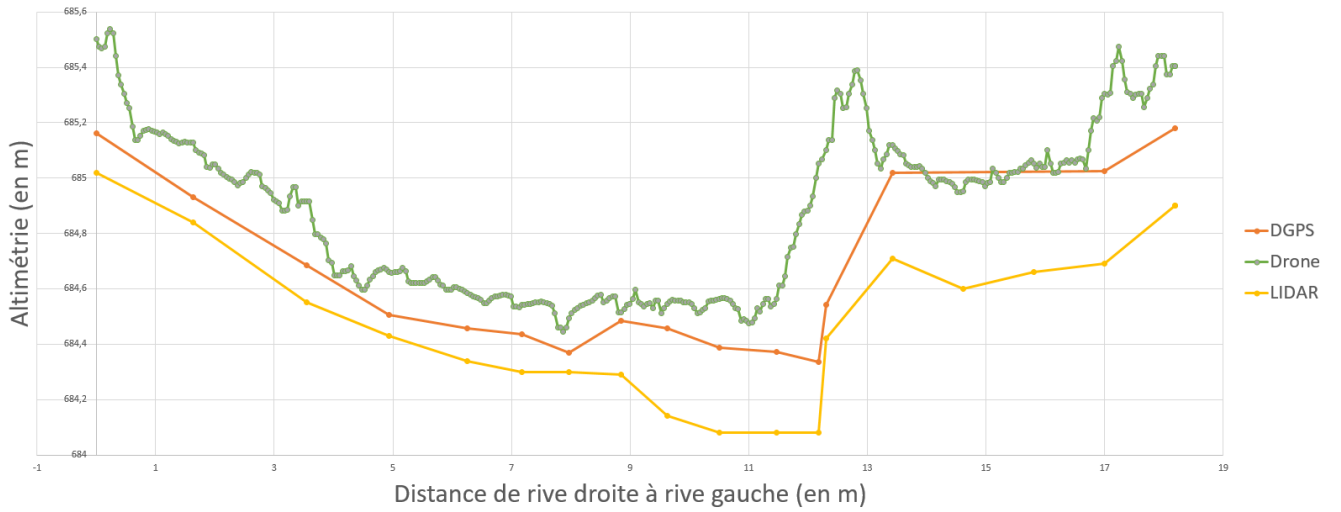
Transect n°3 ter



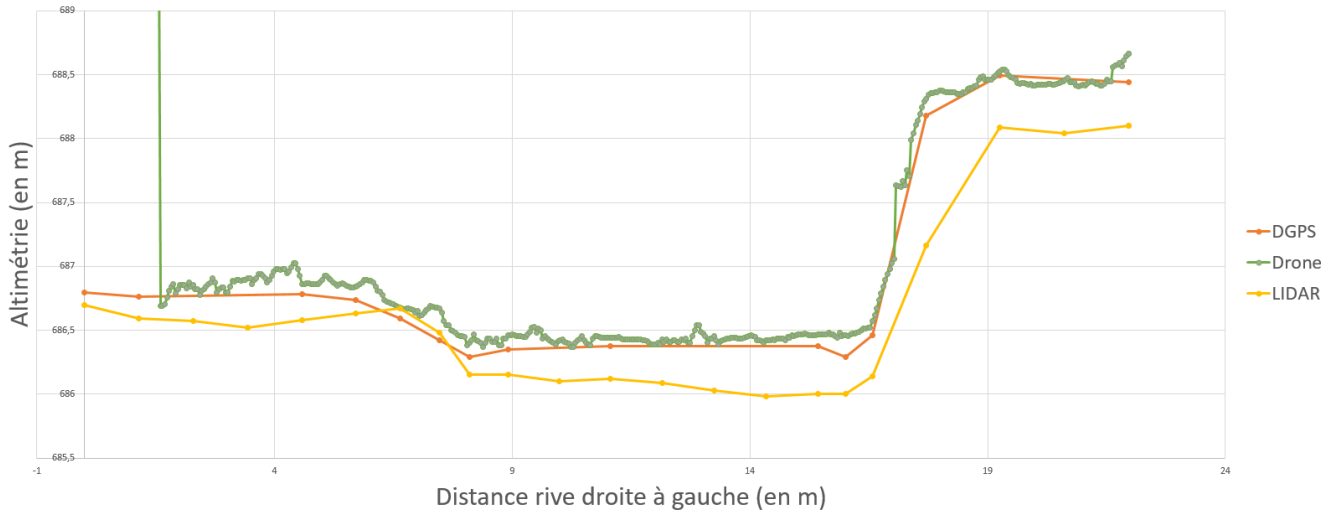
Transect n°4



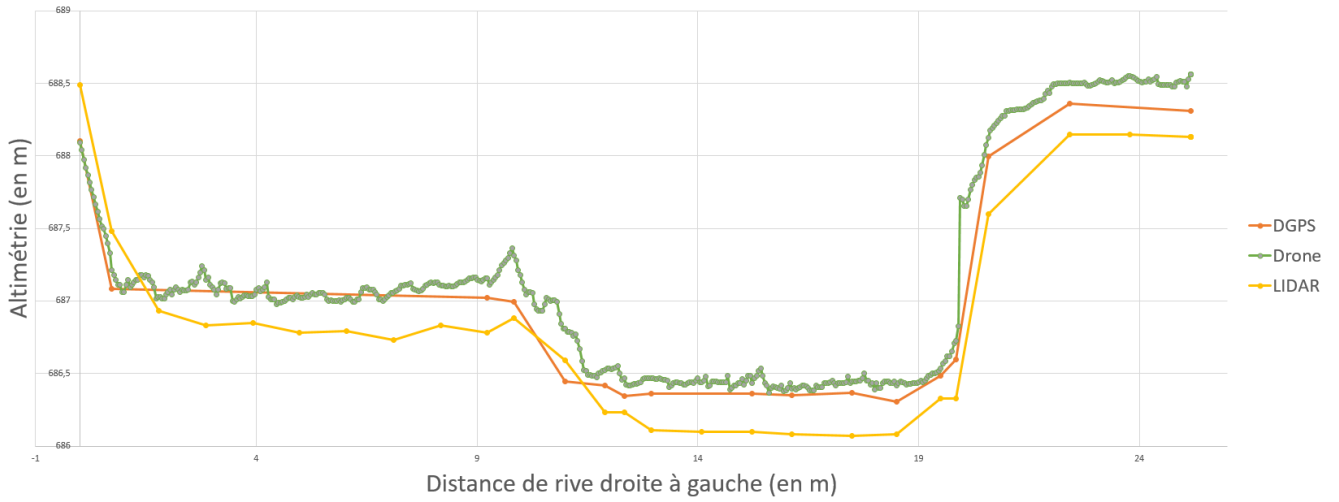
Transect n°4 bis



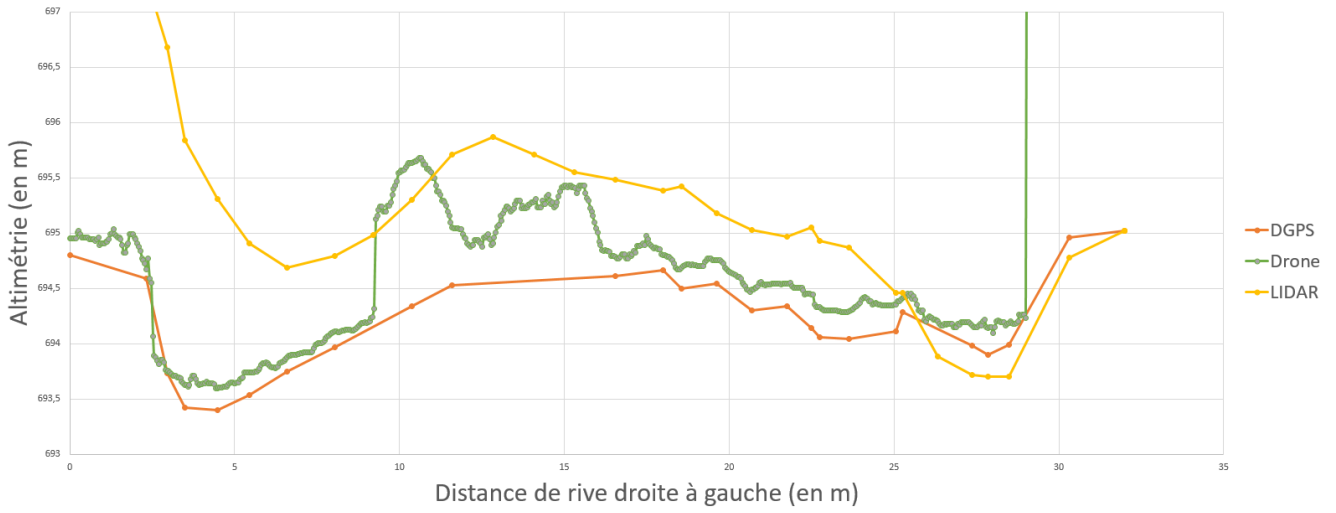
Transect n°5



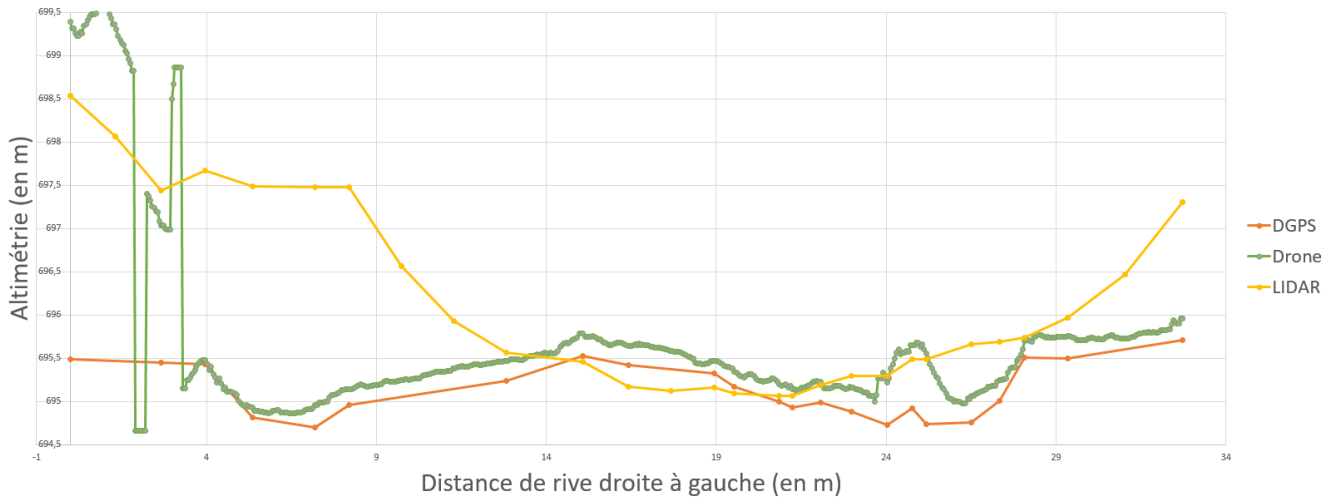
Transect n°5 bis



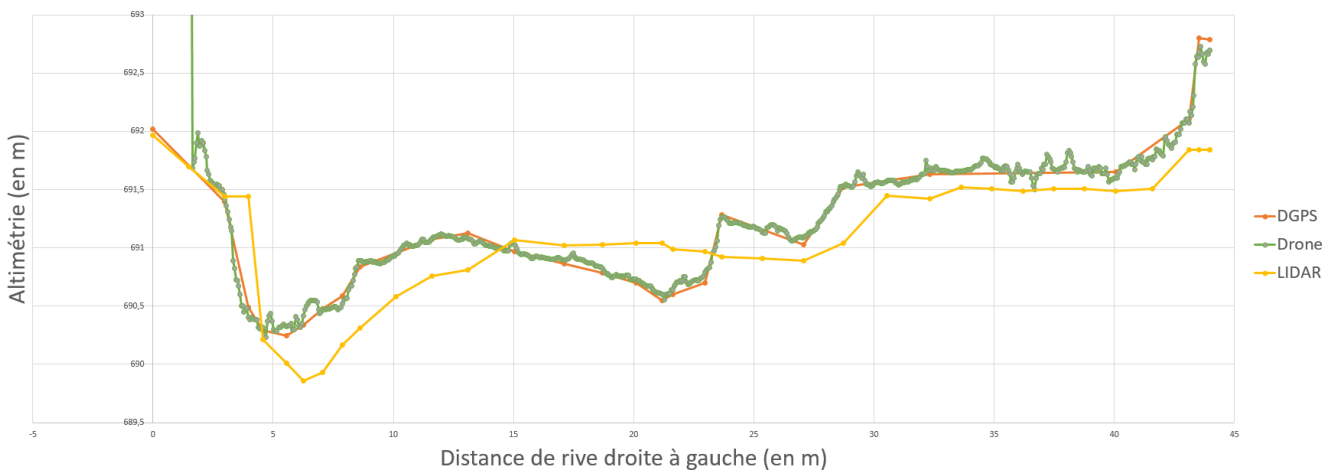
Transect n°6



Transect n°6 ter



Transect n°8



Annexe 3

Equations de Barré de Saint-Venant en écoulement bidimensionnel

$$\partial_t h + \mathbf{u} \cdot \mathbf{grad}(h) + h \cdot \mathit{div}(\mathbf{u}) = 0$$

$$\partial_t u + \mathbf{u} \cdot \mathbf{grad}(u) = -g \cdot \partial_x z_s + f_x + \frac{1}{h} \cdot \mathit{div}(h \cdot v_t \cdot \mathbf{grad}(u))$$

$$\partial_t v + \mathbf{u} \cdot \mathbf{grad}(v) = -g \cdot \partial_y z_s + f_y + \frac{1}{h} \cdot \mathit{div}(h \cdot v_t \cdot \mathbf{grad}(v))$$

- $h(x, y, t)$ la hauteur d'eau (en m)
- $u(x, y, t)/v(x, y, t)$ les composantes horizontales de la vitesse (en m/s)

Annexe 4

Premier steering file renseigné pour les simulations Telemac2D

```

/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----
GEOMETRY FILE           ='Galabre_geo_Finalemod.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='Bc_Galabre.cli'
/LIQUID BOUNDARIES FILE  ='liquid_boundaries_file_Qres_3m3.qsl'
RESULTS FILE            ='res_init_galabre2.slf'
PREVIOUS COMPUTATION FILE ='Galabre_geo_Finalemod.slf'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
LISTING PRINTOUT PERIOD      = 1000
INFORMATION ABOUT SOLVER     = YES
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD      = 1000
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS ='U,V,H,B,W,L,F,S,US,M'
/-----
/ SIMULATION PARAMETERS
/-----
CHECKING THE MESH = YES
/DEBUGGER=1
TIME STEP                 = 0.2
NUMBER OF TIME STEPS      = 120000
/-----
/ INITIAL CONDITIONS
/-----
COMPUTATION CONTINUED      =no
INITIAL TIME SET TO ZERO   =YES
/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----
PRESCRIBED FLOWRATES       =0;0.071
PRESCRIBED ELEVATIONS      =663.817; 714.72
VELOCITY PROFILES          =4;4
OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =2;1
/-----
/ EQUATIONS
/-----
LAW OF BOTTOM FRICTION     =3
FRICTION COEFFICIENT       =30
LAW OF FRICTION ON LATERAL BOUNDARIES =3
ROUGHNESS COEFFICIENT OF BOUNDARIES =30
/-----
```

Ensemble des fichiers de calcul

Paramètres de sortie graphique

Nb d'étapes et Temps de calcul

Loi & Coefficient de frottement

Annexe 5

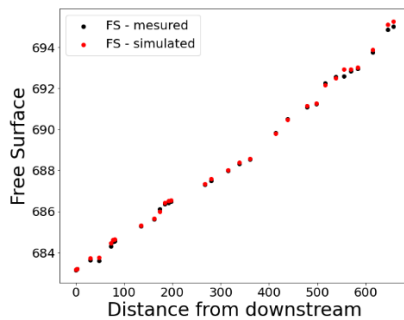
Equation du nombre de courant (CFL) pour des modélisations numériques

$$CFL = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

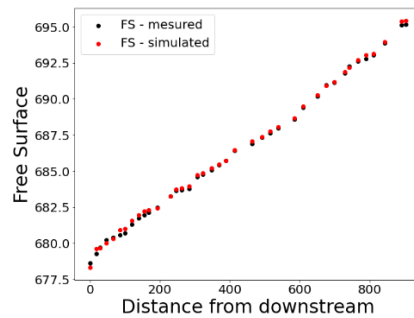
- v la vitesse dans la direction d'écoulement (en m/s)
- Δt l'intervalle temporel déterminé par la valeur du time step (en s)
- Δx l'intervalle dimensionnel déterminé par le maillage (en m)

Annexe 6

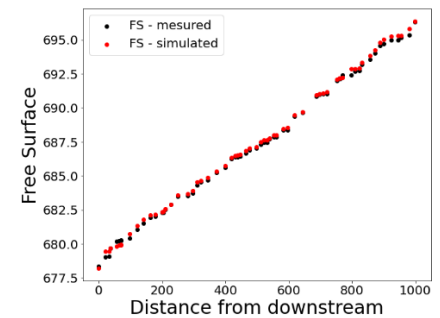
Exemples de graphiques de comparaison en surface libre obtenus via notebooks python



Comparaison de SL (10/05/19)



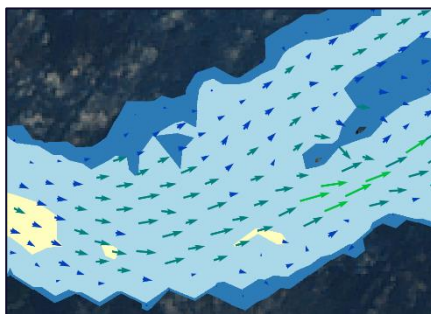
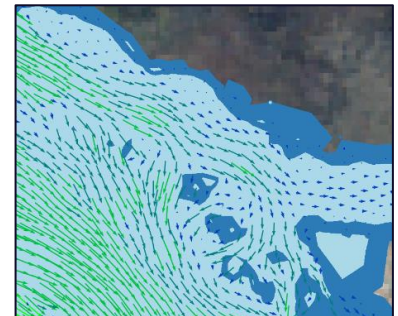
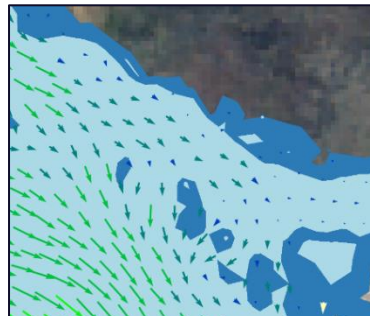
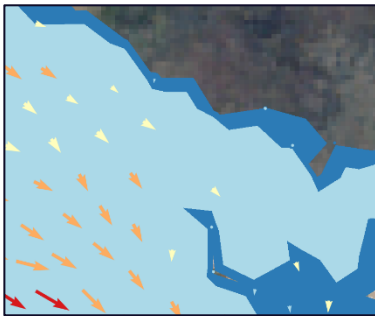
Comparaison de SL (27/05/19)



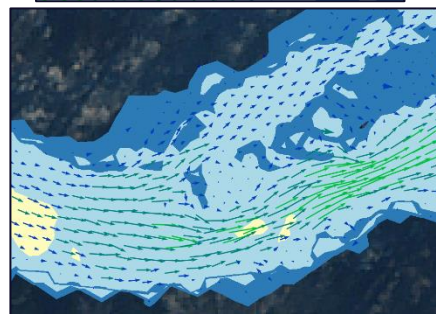
Comparaison de SL (29/08/19)

Annexe 7

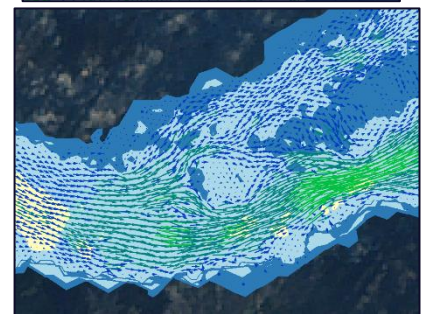
Comparaison Qualitative de la précision des simulations en terme d'écoulements en fonction du maillage



Maillage de 1 mètre



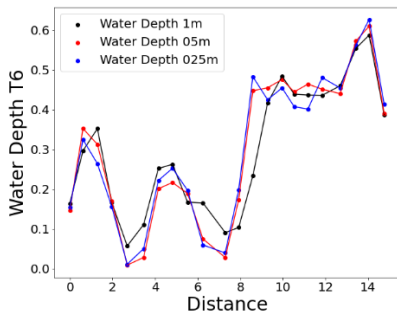
Maillage de 0,5 mètre



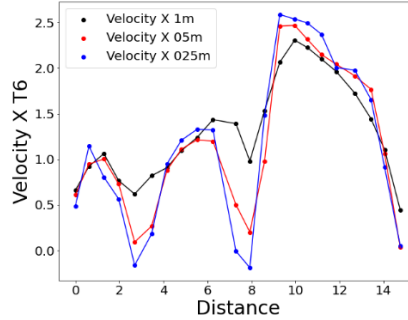
Maillage de 0.25 mètre

Annexe 8

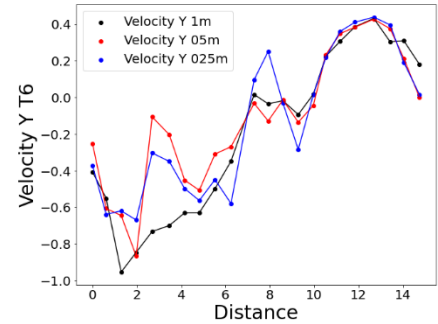
Exemple de comparaison graphique entre les 3 maillages pour la hauteur d'eau et les composantes en x et y de la vitesse



Comparaison graphique de la Heau



Comparaison graphique de la Vx



Comparaison graphique de la Vy

Annexe 9

Tableaux récapitulatif de la moyenne des écarts entre maillages en Hauteur d'eau et en Vitesse

Diff Vx moyenne globale	1m/0,25m	1m/0,5m	0,5m/0,25m
Q = 0,742m ³ /s	0,19	0,172	0,113
Q = 6,679m ³ /s	0,288	0,201	0,169
Diff Vy moyenne globale	1m/0,25m	1m/0,5m	0,5m/0,25m
Q = 0,742m ³ /s	0,175	0,155	0,107
Q = 6,679m ³ /s	0,241	0,165	0,15
Diff Heau moyenne globale	1m/0,25m	1m/0,5m	0,5m/0,25m
Q = 0,742m ³ /s	0,04	0,036	0,028
Q = 6,679m ³ /s	0,058	0,047	0,035

Annexe 10

Formule de calcul des termes de frottement Telemac2D (source 14)

$$f_x, f_y = g \cdot \frac{u \cdot |u|}{h \cdot C^2}$$

- f_x, f_y les termes du frottement en x et y (en m/s²)
- g l'accélération de la pesanteur (en m/s²)
- u (x, y, t) la vitesse d'écoulement (en m/s)
- h la hauteur d'eau (en m)
- C coefficient de Chézy (en m^{1/2}/s)

Annexe 11

Loi de Manning-Strickler pour la fermeture du frottement (source 14)

$$C = 8.2 \frac{\sqrt{g}}{K_s^{1/6}} \times h^{1/6}$$

- C coefficient de Chézy (en m^{1/2}/s)
- g l'accélération de la pesanteur (en m/s²)
- K_s le coefficient de Strickler (en m^{1/3}/s)
- h la hauteur d'eau (en m)

Annexe 12

Loi de Nikuradse pour la fermeture du frottement (source 14)

$$C = \frac{\sqrt{g}}{k} \ln \left(\frac{12h}{K_s} \right)$$

- C coefficient de Chézy (en m^{1/2}/s)
- g l'accélération de la pesanteur (en m/s²)
- k la constante de Von Karman (sans unité)
- h la hauteur d'eau (en m)
- K_s le coefficient de Nikuradse (en m)