UCLouvain

epl

École polytechnique de Louvain

Étude de la connexion hydrologique entre le Blanc-Ry et l'étang de Warlongroux

Auteurs: **Robin Leterme, Antoine Williot**
Promoteur: **Sandra Soares Frazao**
Lecteurs: **Didier Bousmar, Simon Ridley, Thibaut Thyrion**
Année académique 2021–2022
Master [120] : ingénieur civil mécanicien - Master [120] : ingénieur civil des constructions

Résumé

Les cours d'eau et les milieux naturels associés offrent une variété de services aux populations riveraines. Au delà de l'intérêt économique qu'ils représentent, ces milieux offrent un cadre de vie propice à l'épanouissement de la biodiversité, mais sont fragiles et tout projet d'aménagement est susceptible de porter atteinte à leur équilibre. L'étang de Warlongroux, dans le bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve en Belgique, est l'un de ces milieux naturels humides.

Sa gestion est aujourd'hui remise en cause car un projet de renaturalisation est à l'étude. En effet, la gestion d'un étang tel que celui-ci nécessite une mise en assec décennale qui crée une rupture écologique. Dans le cadre de ce projet est donc considérée l'idée de connecter le Blanc-Ry à l'étang dans le but d'établir une connexion hydrologique et piscicole les reliant et de mettre fin aux vidanges régulières de l'étang.

Ce mémoire a pour objectif d'étudier les phénomènes hydromorphologiques et sédimentologiques prenant place dans l'étang. Différents paramètres et aménagements seront étudiés pour offrir une vision plus claire des possibilités et limites que pose ce projet.

Afin d'exposer au mieux la situation, les enjeux et notre rôle dans le projet, notre propos s'organise comme suit. Une fois le site situé, l'historique du site est brossé, dans un second temps les caractéristiques physiques du milieu sont déterminées, ce qui permet ensuite de simuler l'écoulement dans l'étang. Enfin, grâce aux résultats obtenus, un ensemble de recommandations quant aux aménagements en vue d'une renaturalisation efficace est proposé.

Les paramètres sédimentologiques et le débit de la source qui alimente déjà l'étang ont été mesurés sur le terrain. La bathymétrie de l'étang a été modélisée grâce au déploiement d'un drone ainsi qu'à l'utilisation d'un logiciel de photogrammétrie. Ensuite différents paramètres ont été sélectionnés : débit, point d'injection, variation du débit d'entrée en cas de crue et ajout d'épis émergés. Des simulations ont permis de tester l'influence des ces quatre paramètres.

Sans aménagement et hors épisode de crue, la position d'injection n'influence pas significativement l'emport de sédiments qui ont tendance à s'accumuler à l'entrée. Le débit prélevé quant à lui, augmente légèrement l'intensité des recirculations. Lors du pic de débit d'un épisode de crue annuelle, la zone d'emport des sédiments s'étend jusqu'au tiers de l'étang. L'augmentation brusque de débit conséquente aux crues entraîne une élévation du niveau d'eau dans l'étang. Un état métastable s'installe entre les pluies successives

Ainsi il semble judicieux de maintenir provisoirement la gestion de l'étang dans son état actuel le temps d'étudier la mise en place d'un protocole d'aménagement réfléchi de manière systémique.

Abstract

Waterways and associated natural environments offer a variety of services to the riparian populations. Beyond the economic interest they represent, these environments offer a living environment suitable to the development of biodiversity, but they are fragile and any development project is likely to affect their balance. The Warlongroux pond, in the Lauzelle forest in Louvain-la-Neuve, Belgium, is one of these natural wetlands.

Its management is now being questioned because a renaturalization project is under study. Indeed, the management of a pond such as this one requires a decennial draining which creates an ecological rupture. As part of this project, the idea of connecting the Blanc-Ry to the pond is considered in order to establish a hydrological and piscicultural connection between them and to put an end to the regular emptying of the pond.

The objective of this thesis is to study the hydromorphological and sedimentological phenomenons taking place in the pond. Different parameters and arrangements will be studied to offer a clearer vision of the possibilities and limits of this project.

In order to better explain the situation, the stakes and our role in the project, this presentation will be organized as follows. Once the site is located, the history of the site will be outlined, then the physical characteristics of the environment will be determined, which will allow us to simulate the flow in the pond. Finally, thanks to the results obtained, a set of recommendations for the development of an efficient renaturalization will be proposed.

The sedimentological parameters and the flow rate of the source that already flows in the pond were measured on the field. The bathymetry of the pond was modeled by deploying a drone and using photogrammetry software. Then different parameters were selected: flow rate, point of injection, variation of the inlet flow in case of flooding and addition of emergent groynes. Simulations were used to test the influence of these four parameters.

Without any arrangement and outside a flood event, the position of injection does not significantivly impact the transpot of sediments which tend to accumulate at the inlet. The collected discharge, increase the recirculations slightly. During the peak flow of an annual flood event, the area of sediments transport extends to a third of the pond. The consquent sudden increase of discharge bring an elevation of the water level in the pond. A metastable stable state settles between the successive flood.

Thus it seems judicious to maintain temporarily the pond in its current state to let the time to study the installation of a thoughtful protocol of development in a systemic way.

Table des matières

1 Introduction **13**
- 1.1 Situation géographique . . . 13
- 1.2 Statut et intérêt du site . . . 15
- 1.3 Historique et évolution du site . . . 20
- 1.4 Objet de l'étude . . . 24

2 Caractérisation du site étudié **27**
- 2.1 Analyse sédimentologique . . . 27
  - 2.1.1 Poids propre . . . 28
  - 2.1.2 Porosité . . . 28
  - 2.1.3 Granulométrie . . . 28
  - 2.1.4 Détermination de la proportion de matière organique . . . 33
- 2.2 Données hydrologiques . . . 35
- 2.3 Mesures de débit . . . 37
  - 2.3.1 Étalonnage de l'appareil . . . 38
  - 2.3.2 Mesures in situ . . . 39
- 2.4 Analyse bathymétrique par drone . . . 42
  - 2.4.1 Le drone . . . 42
  - 2.4.2 Détermination du nombre de balises . . . 42
  - 2.4.3 Plan de vol . . . 43
  - 2.4.4 Traitement des photos . . . 46
  - 2.4.5 Limitations du traitement d'image . . . 52

3 Modélisation et simulation **54**
- 3.1 Fondements théoriques de SVE2D . . . 54
- 3.2 Construction du maillage . . . 55
  - 3.2.1 Méthodologie . . . 56
  - 3.2.2 Hypothèses . . . 58
  - 3.2.3 Les différents maillages . . . 59
- 3.3 Adaptation du code au cas d'étude . . . 62
  - 3.3.1 SVE2D - Loi de transport . . . 62
  - 3.3.2 SVE2D - Autres améliorations . . . 64
  - 3.3.3 Matlab - Affichage des résultats . . . 64
- 3.4 Les paramètres étudiés . . . 64
  - 3.4.1 Variation du débit prélevé . . . 64
  - 3.4.2 Variation de la position d'entrée . . . 65
  - 3.4.3 Variation du débit en cas de crue . . . 65
- 3.5 Données d'entrée . . . 66

3.6 Simulations . . . 68
3.6.1 Hypothèses . . . 68
3.6.2 Durée de stabilisation . . . 69
3.6.3 Simulations réalisées . . . 70
3.7 Limitations des simulations . . . 76

4 Analyse critique des résultats 79
4.1 Influence du débit prélevé . . . 79
4.1.1 Contrainte de cisaillement . . . 79
4.1.2 Distribution de l'écoulement . . . 81
4.2 Influence de la position du segment d'injection . . . 83
4.2.1 Contrainte de cisaillement . . . 83
4.2.2 Distribution de l'écoulement . . . 85
4.3 Impacts des crues . . . 88
4.3.1 Suivi du débit de sortie . . . 89
4.3.2 Impact du débit prélevé en cas de crue . . . 90
4.3.3 Impacts des crues sur la contrainte de cisaillement . . . 91
4.3.4 Impact de crue sur la distribution de l'écoulement . . . 93
4.4 Estimation de la distribution des sédiments . . . 96
4.5 Impacts des épis . . . 99
4.5.1 Discussion du positionnement des épis . . . 99
4.5.2 Influence d'une crue sur les épis . . . 100
4.6 Conclusion . . . 101

5 Scénarios envisagés 103
5.1 Scénario 1 : Maintien de l'étang sans connexion avec le Blanc-Ry . . . 103
5.2 Scénario 2 : Tentative de maintien de l'étang actuel et connexion avec le Blanc-Ry. . . . 104
5.3 Scénario 3 : Retour progressif vers une zone marécageuse avec installation d'épis . . . 105

Conclusion 107

Remerciements 110

Bibliographie 110

A Conservation du volume 115

B Contacts 118

C Calcul d'erreur entre les différents DEM 119
C.1 Balises GCP . . . 119
C.2 Calcul des erreurs quadratiques moyennes . . . 119

D Rapport de photogrammétrie - MetaShape 123

Table des figures

1.1 La Belgique en Europe centrale 14
1.2 Le Brabant Wallon en Belgique 14
1.3 Ottignies-Louvain-la-Neuve dans le Brabant Wallon 14
1.4 Situation du bois de Lauzelle 14
1.5 Castor d'europe [21] 15
1.6 Martin pêcheur d'Europe [3] 16
1.7 Anodonte des étangs [7] 16
1.8 Brochet à l'affût dans les branches d'un arbre mort[17] 16
1.9 Laîche Paniculée[40] 17
1.10 Laîche des Marais[14] 17
1.11 Aulne Glutineux[10] 17
1.12 Saule Cendré[5] 18
1.13 Épilobe à tige carrée[6] 19
1.14 Épilobe à grandes fleurs[26] 19
1.15 Massette à feuilles étroites[29] 19
1.16 Menthe Sylvestre[25] 20
1.17 Carte de 1777 annotée [36] 20
1.18 Carte de 1850 annotée [37] 21
1.19 Carte de 1865 annotée [35] 21
1.20 Carte de 1971 annotée [38] 21
1.21 Carte actuelle annotée [39] 22
1.22 Vue sur la palissade 22
1.23 Vue aérienne de l'étang et emplacement de la palissade (en rouge) . 22
1.24 Tranchée creusée par les castors à l'aval de l'étang 24
1.25 Illustration de la rupture écologique - Nombreuses anodontes mortes 24
1.26 Carte de situation du site 25

2.1 Carte des prélèvements 27
2.2 Distribution granulométrique cumulée 30
2.3 Évolution du diamètre médian au cours du Blanc-Ry 31
2.4 Machine de mesure laser de particules *Coulter LS100Q* 32
2.5 Distribution granulométrique des fines *Prelev_1, Prelev_2* et *Prelev_3* 33
2.6 Évolution du diamètre médian des fines au cours du Blanc-Ry . . . 33
2.7 Évolution de la concentration en matière organique au cours du Blanc-Ry 35
2.8 FDC 1999-2002 - Données brutes 36
2.9 FDC 2011-2015 - Données brutes 36
2.10 Courbe des débits classés 36

2.11 Section de contrôle . . . 37
2.12 Étalonnage du moulinet et comparaison avec les formules d'origines 39
2.13 Principe de mesure [28] . . . 40
2.14 Profils de vitesse et vitesse moyenne au droit des 4 verticales . . . 41
2.15 Répartition des balises GCP . . . 42
2.16 Capture d'écran DH Mobile - Zone à photographier . . . 44
2.17 Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 1 : recouvrement 60 % . . 44
2.18 Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 2 : recouvrement 70 % . . 45
2.19 Capture d'écran DH Mobile - Zone des macrophytes à photographier 45
2.20 Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 3 : recouvrement 70 % . . 46
2.21 Capture d'écran *MetaShape* - Alignement des images . . . 46
2.22 Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense brut avec balises - Vue du dessus . . . 47
2.23 Capture d'écran *MetaShape* annotée - Zoom nuage dense : détail 1 . 47
2.24 Comparaison d'un capture d'écran *MetaShape* annotée (Zoom nuage dense : détail 2) et d'une prise de vue par drone . . . 48
2.25 Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense de points bruts . . . 49
2.26 Capture d'écran MetaShape - DEM obtenu à partir du nuage dense de points non traités . . . 49
2.27 Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense de points traités . . . 50
2.28 Capture d'écran MetaShape - DEM obtenu à partir du nuage dense de points traités . . . 50
2.29 Capture d'écran MetaShape - Manque de data dans nuage dense de points (trou) et interpolation du DEM au niveau de l'île . . . 51
2.30 Capture d'écran MetaShape - Manque de data dans nuage dense de points (trou) et interpolation DEM dans un coin de l'étang . . . 51
2.31 Orthophoto obtenue avec *MetaShape* . . . 52

3.1 Illustration des flux dans les équations de Exner . . . 55
3.2 Visualisation de la DEM avec *QGIS* et tracé du contour de la zone étudiée. . . . 56
3.3 Carte des zones physiques . . . 57
3.4 Zone 1 . . . 57
3.5 Visuel QGIS - Maillage 1 . . . 59
3.6 Visuel QGIS - Maillage 2 . . . 59
3.7 Visuel QGIS - Orthophoto de la zone 4 . . . 60
3.8 Visuel QGIS - DEM de la zone 4 . . . 60
3.9 Visuel QGIS - Maillage 3 . . . 60
3.10 Visuel QGIS - Maillage 4 . . . 61
3.11 Visuel QGIS - Maillage 5 . . . 61
3.12 Visuel QGIS - Maillage 6 . . . 61
3.13 Visuel QGIS - Maillage 7 . . . 62
3.14 Visuel QGIS - Maillage 89 . . . 62
3.15 Comparaison entre MPM (bleu) et Camenen (jaune) . . . 63
3.16 Contrainte critique en fonction du diamètre adimensionnel . . . 63
3.17 Identification des chenaux - Maillage 3 . . . 65
3.18 Hydrogramme de crue pour un débit de prélèvement dans le Blanc-Ry de 70% . . . 66

3.19 Débit de sortie en fonction du temps hors épisode de crue avec 50% (gauche) et 70% (droite) de prélèvement 69
3.20 Débit de sortie en fonction du temps pour un épisode de crue avec 70% de prélèvement 70
3.21 Distribution de la vitesse pour la simulation C_Milieu70 71
3.22 Distribution de la vitesse pour la simulation M_Milieu70 71
3.23 Distribution du débit pour les simulations WM_ BR50 et BR70 . . 72
3.24 Distribution du débit pour les simulations A_Milieu70 et A_Milieu50 73
3.25 Distribution de débit au pic de la crue et à la fin de la simulation A_Milieu70_crue 73
3.26 Distribution du débit pour les simulations L_ BR50 et BR70 . . . 74
3.27 Distribution du débit pour la simulation B_Milieu50 74
3.28 Distribution du débit pour la simulation B_Source50 74
3.29 Distribution du débit pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70 75
3.30 Distribution du débit pour la simulation E2_Source70 75
3.31 Distribution du débit pour les simulations E3_Source70 76
3.32 Zone représentant les noeuds avec altitude approximées 77
3.33 Comparaison des jeux de données hydrologiques 78

4.1 Distribution de τ^* - WM_Milieu50 et Milieu70 79
4.2 Distribution de τ^* - L_Milieu50 et Milieu70 80
4.3 Distribution de τ^* - B_Milieu50 et Milieu70 80
4.4 Distribution de τ^* - A_Milieu50 et Milieu70 80
4.5 Distribution et orientation de V - WM_Milieu70 81
4.6 Distribution et orientation de V - WM_Milieu50 81
4.7 Distribution et orientation de V - L_Milieu70 81
4.8 Distribution et orientation de V - L_Milieu50 82
4.9 Distribution et orientation de V - B_Milieu70 82
4.10 Distribution et orientation de V - B_Milieu50 82
4.11 Distribution et orientation de V - A_Milieu70 82
4.12 Distribution et orientation de V - A_Milieu50 83
4.13 Distribution de τ^* pour les simulations WM_ BR70, Milieu70 et Source70 84
4.14 Distribution de τ^* pour les simulations L_ BR70, Milieu70 et Source70 84
4.15 Distribution de τ^* pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70 84
4.16 Distribution de τ^* pour les simulations A_ BR70, Milieu70 et Source70 84
4.17 Distribution de V pour les simulations WM_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour WM_ BR70 85
4.18 Distribution de V pour les simulations L_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour L_ BR70 86
4.19 Distribution de V pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour B_ BR70 87
4.20 Distribution de V pour les simulations A_BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour A_BR70 88
4.21 Pics de débit lors d'une crue - prélèvement 50% (gauche) et prélèvement 70% (droite) 89
4.22 Évolution des débits à la sortie et au déversoir en fonction du temps 90

4.23 Comparaison de la distribution de contrainte τ^*au pic de la crue - B_Milieu50_crue & B_Milieu70_crue 90
4.24 Comparaison de la distribution de la vitesse V au pic de la crue - B_Milieu50_crue & B_Milieu70_crue 91
4.25 Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue (t = 4500, t = 16 000 et t = 75 000) - L_Milieu70_crue 91
4.26 Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) - B_Milieu70_crue 92
4.27 Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue A_Milieu70_crue 92
4.28 Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500, t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - L_Milieu70_crue 93
4.29 Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - B_Milieu70_crue 94
4.30 Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - A_Milieu70_crue 95
4.31 Exemple de résultats numériques du transport de sédiments - A_Milieu70_sedim 96
4.32 Exemple de résultats numériques du transport de sédiments - E3_Milieu70_sedim à 50 000 et 100 000 secondes 96
4.33 Vitesse d'avancée du front de sédiments à la source $[m/h]$ en fonction du temps pour différentes simulations 97
4.34 Vitesse d'avancée du front de sédiments au milieu $[m/h]$ en fonction du temps pour différentes simulations 97
4.35 Comparaison de la vitesse d'avancée du front de sédiments à la source $[m/h]$ en fonction du temps pour 50% et 70% de prélèvement 98
4.36 Comparaison de la vitesse d'avancée du front de sédiments au milieu $[m/h]$ en fonction du temps pour 50% et 70% de prélèvement 98
4.37 Comparaison de la distribution de la contrainte dans les simulations A_Milieu70, E2_Milieu70 et E3_Milieu70 99
4.38 Comparaison de la distribution de la vitesse dans les simulations A_Milieu70, E2_Milieu70 et E3_Milieu70 100
4.39 Comparaison de la distribution de contrainte τ^* au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue 100
4.40 Comparaison de la distribution de vitesse V au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue 100
4.41 Comparaison de l'orientation de vitesse V au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue 101

A.1 Comparaison des débits d'entrée et de sortie hors épiosde de crue (gauche) et avec (droite) 116
A.2 Hauteur d'eau en fonction du temps pour un épisode de crue - Maillage 4 117

C.1 Emplacement des différentes mesures GPS dans le bois de Lauzelle . 122

Liste des tableaux

2.1 Données mesures de MO 34
2.2 Données mesures de débit 40
2.3 Vitesse de frottement par sous-sections 41
2.4 Débits des sous-sections 41
2.5 RMSE des différents Modèles Numériques de Terrain (MNT) 53

3.1 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 1 . . 70
3.2 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 2 . . 71
3.3 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage . . . 72
3.4 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 4 . . 72
3.5 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 5 . . 73
3.6 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 6 . . 74
3.7 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage . . . 75
3.8 Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 8 . . 75

Notations

Notations mathématiques

t	$[s]$	Temps
x	$[m]$	Distance Est-Ouest
u	$[m/s]$	Vitesse dans la direction x
y	$[m]$	Distance Nord-Sud
v	$[m/s]$	Vitesse dans la direction y
V	$[m/s]$	Résultante de vitesse
z	$[m]$	Altitude
g	$[m/s^2]$	Accélération de la pesanteur
ρ	$[N/m^3]$	Masse volumique de l'eau
ρ_s	$[N/m^3]$	Masse volumique des sédiments
γ	$[N/m^3]$	Poids propre de l'eau
γ_s	$[N/m^3]$	Poids propre des sédiments
$s = \frac{\gamma_s}{\gamma}$	$[/]$	Densité des sédiments
n	$\left[s/m^{\frac{1}{3}}\right]$	Coefficient de Manning dû aux grains
Φ	$[/]$	Porosité du lit
d_i	$[m]$	majorant des diamètres de i% de la masse des sédiments
d^*	$[/]$	Diamètre adimensionnel
τ	$[N/m^2]$	Contrainte de cisaillement sur le lit (ou contrainte de charriage)
τ_c	$[/]$	Contrainte critique (ou seuil) de charriage
τ^*	$[/]$	Contrainte de charriage adimensionnelle
q_s^*	$[/]$	Débit solide adimensionnel
q_s	$[(m^3/s)/m]$	Débit solide par unité de largeur
S_0	$[/]$	Pente de fond
S_f	$[/]$	Pente de la ligne d'énergie
L	$[m]$	Largeur de section de contrôle
$Q_{crue,d}$	$[m^3/s]$	Débit crue décennale
$Q_{crue,a}$	$[m^3/s]$	Débit crue annuelle
Q_{DCC}	$[m^3/s]$	Débit maximum
Q_{DC1}	$[m^3/s]$	Décile supérieur des débits classés
Q_{DCM}	$[m^3/s]$	Débit médian
Q_{Moy}	$[m^3/s]$	Débit moyen
Q_{DC9}	$[m^3/s]$	Décile inférieur des débits classés
Q_{DCE}	$[m^3/s]$	Débit minimum
b_i	$[m]$	Distance entre les verticales
$n_{i,j,k}$	$[tour/s]$	k-ième mesure du nombre de tour par seconde d'hélice sur la verticale i, à la profondeur j

Lexique

FDC	Flow Duration Curve
DEM	Digital Elevation Model
MNT	Modélisation numérique de terrain
GCP	Ground Control Point
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
GPS	Global Positioning System
LIDAR	Light Detection and Ranging
RMSE	Root Mean Square Error

Chapitre 1

Introduction

Les cours d'eau et les milieux naturels associés sont des milieux vivants et en constante évolution. Lorsqu'ils sont en bon état et gérés de manière durable, ils offrent des services aux populations riveraines. Au delà de l'utilisation de l'eau comme ressource, tous ces milieux offrent un cadre de vie attrayant autorisant une multitude de loisirs. Pour ce faire, le milieu doit fonctionner de manière naturelle (crues, cycle des sédiments...) offrant ainsi un cadre de vie propice et accueillant pour la biodiversité dans son ensemble. Ces milieux sont fragiles et tout projet d'aménagement est susceptible de porter atteinte à leur équilibre. L'étang de Warlongroux est l'un de ces milieux naturels humides mais sa gestion est aujourd'hui remise en cause et un plan de renaturalisation est à l'étude.
Dans le cadre de cette étude, notre cap sera donc de tout mettre en oeuvre afin de réduire l'impact des aménagements proposés à court terme et, à long terme, que ces aménagements permettent au milieu naturel de s'épanouir tout en limitant la nécessité d'intervention humaine.
Afin d'exposer au mieux la situation, les enjeux et notre rôle dans le projet de connexion entre le Blanc-Ry et l'étang de Warlongroux, notre propos s'organise comme suit.
Une fois le site situé, l'historique du site est brossé, dans un second temps les caractéristiques physiques du milieu sont déterminées, ce qui permet ensuite de simuler l'écoulement dans l'étang. Enfin, grâce aux résultats obtenus, un ensemble de recommandations quant aux aménagements en vue d'une renaturalisation efficace est proposé.

1.1 Situation géographique

L'étang de Warlongroux, se situe dans le bois de Lauzelle, forêt jouxtant la ville de Louvain-la-Neuve dans la province du Brabant Wallon en Belgique. Les cartes successives ci-dessous permettent de situer la zone d'intérêt (en rouge sur les figures 1.1, 1.2 et 1.3) et l'étang de Warlongroux (Figure 1.4).



FIGURE 1.1 – La Belgique en Europe centrale



FIGURE 1.2 – Le Brabant Wallon en Belgique



FIGURE 1.3 – Ottignies-Louvain-la-Neuve dans le Brabant Wallon

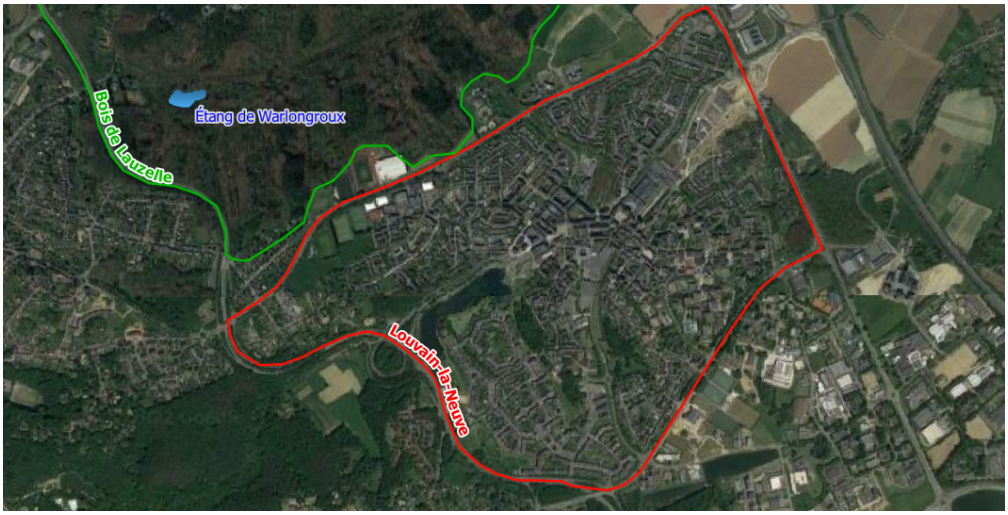


FIGURE 1.4 – Situation du bois de Lauzelle

1.2 Statut et intérêt du site

Le site fait partie des espaces extérieurs gérés par l'UCLouvain. On peut lire sur le site internet de l'université [33] : "Ce site exceptionnel, classé en 1994, est aujourd'hui intégré dans le réseau Natura2000. [...] Le Bois de Lauzelle est une forêt privée intégrant différents objectifs :

- exploitation forestière
- étude scientifique
- conservation de la nature
- accueil du public et éducation

Biodiversité

La biodiversité sur le site est riche et doit être considérée dans le cadre de cette étude. Notamment la présence d'une cellule familiale de castors influence le réseau hydrologique et ses impacts potentiels doivent être étudiés. Voici une liste non exhaustive des espèces recensées dans et autour de la zone humide de l'étang :

- **Castor :**

Classe : Mammalia
Ordre : Rodentia
Famille : Castoridae
Espèce : Castor Fiber



FIGURE 1.5 – Castor d'europe [21]

- **Martin-pêcheur d'Europe :**

Classe : Aves
Ordre : Coraciiformes
Famille : Alcedinidae
Espèce : Alcedo Athis



FIGURE 1.6 – Martin pêcheur d'Europe [3]

- **Anodonte des étangs :**

Classe : Bivalvia
Ordre : Unionoida
Famille : Unionidae
Espèce : Anodonta cygnea



FIGURE 1.7 – Anodonte des étangs [7]

- **Brochet :**

Classe : Actinopterygii
Ordre : Esociformes
Famille : Esocidae
Espèce : Esox lucius



FIGURE 1.8 – Brochet à l'affût dans les branches d'un arbre mort[17]

De nombreuses plantes typiques des milieux humides sont également présentes. En voici un bref aperçu.

- **Laîche Paniculée :**

Classe : Liliopsida
Ordre : Poales
Famille : Cyperaceae
Espèce : Carex paniculata



FIGURE 1.9 – Laîche Paniculée[40]

- **Laîche des Marais :**

Classe : Liliopsida
Ordre : Poales
Famille : Cyperaceae
Espèce : Carex acutiformis



FIGURE 1.10 – Laîche des Marais[14]

- **Aulne Glutineux :**

Classe : Rosidées
Ordre : Fagales
Famille : Betulaceae
Espèce : Alnus glutinosa



FIGURE 1.11 – Aulne Glutineux[10]

- **Saule Cendré :**

Classe : Magnoliopsida
Ordre : Salicales
Famille : Salicaceae
Espèce : Salix cinerea



FIGURE 1.12 – Saule Cendré[5]

- **Épilobe à tige carrée :**

Classe : Equisetopsida
Ordre : Myrtales
Famille : Onagraceae
Espèce : Epilobium tetragonum



FIGURE 1.13 – Épilobe à tige carrée[6]

- **Épilobe à grandes fleurs :**

Classe : Equisetopsida
Ordre : Myrtales
Famille : Onagraceae
Espèce : Epilobium hirsutum



FIGURE 1.14 – Épilobe à grandes fleurs[26]

- **Massette à feuilles étroites :**

Classe : Liliopsida
Ordre : Typhales
Famille : Typhaceae
Espèce : Typha angustifolia



FIGURE 1.15 – Massette à feuilles étroites[29]

- **Menthe des champs et Menthe Sylvestre :**

Classe : Magnoliopsida
Ordre : Lamiales
Famille : Lamiaceae
Espèce : Mentha arvensis
et Mentha longifolia



FIGURE 1.16 – Menthe Sylvestre[25]

1.3 Historique et évolution du site

L'étang de Warlongroux est une construction humaine et la zone a connu différentes affectations au cours du temps. Historiquement, le bois de Lauzelle est une bois depuis longtemps. En effet, il est déjà présent sur des cartes datant de 1777. Cependant, à cette époque l'étang n'existait pas encore. A son emplacement actuel se trouvait un marais qui fut asséché durant le dix-huitième siècle pour en faire un espace de maraîchage. C'est en 1936 que des travaux furent entrepris afin de dévier le cours du Blanc-Ry, de construire des berges et d'aménager un étang. Ce fut la naissance de l'étang de Warlongroux.



FIGURE 1.17 – Carte de 1777 annotée [36]

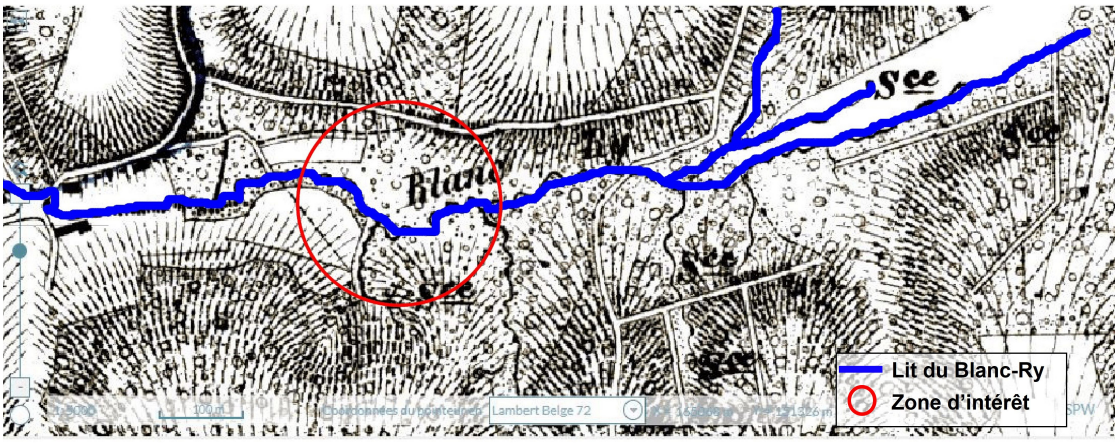


FIGURE 1.18 – Carte de 1850 annotée [37]

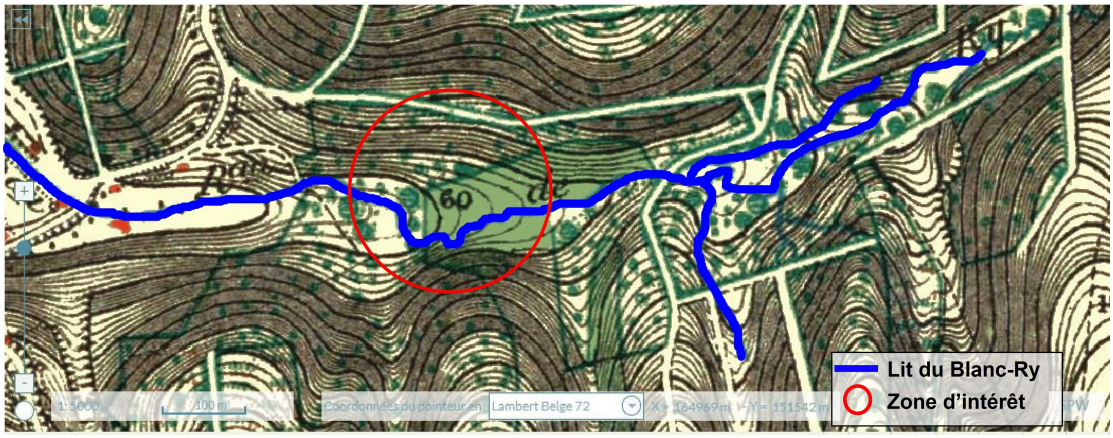


FIGURE 1.19 – Carte de 1865 annotée [35]

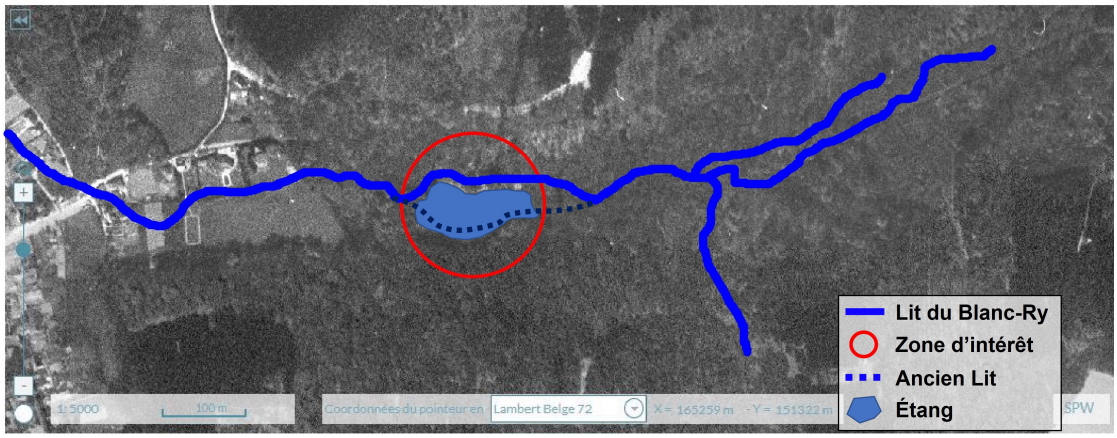


FIGURE 1.20 – Carte de 1971 annotée [38]

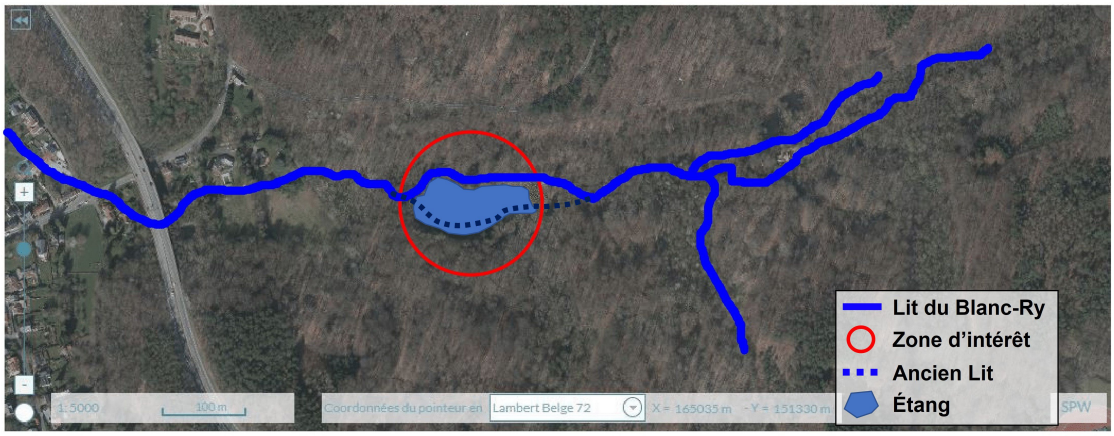


FIGURE 1.21 – Carte actuelle annotée [39]

Dès cette époque, l'étang est équipé d'un moine permettant sa vidange. La gestion de l'étang a évolué au cours des décennies. Initialement, l'étang fut aménagé en étang d'agrément (pas de gestion marquée, peut-être quelques curages mais pas d'information disponible à ce sujet). Dans les années 1970-80, l'UCLouvain rachète le bois de Lauzelle et prend en charge la gestion de l'étang. En théorie des vidanges ont été réalisées tous les dix ans (encore une fois, il y a un manque d'information disponible à ce sujet). Des factures et photographies, retrouvées dans les archives, permettent de situer précisément une vidange avant celle réalisée cette année, en 2007. Lors de laquelle l'étang fut curé à l'aide d'une grue. Des tressages remplis avec une partie de la vase curée ont été réalisés le long des berges. Le reste de vase avait alors été évacué. Les vidanges précédentes ne peuvent être situées dans le passé car aucune archive plus ancienne n'a pu être retrouvée à ce sujet.
Une palissade fut également construite par l'ancien garde forestier dans le but de retenir les sédiments du côté amont de l'étang. Cette palissade, est visible sur les figures 1.22 et 1.23. Ne sont visibles que les poteaux la soutenant, les planches sont encore en place mais sont enfouies sous les sédiments.

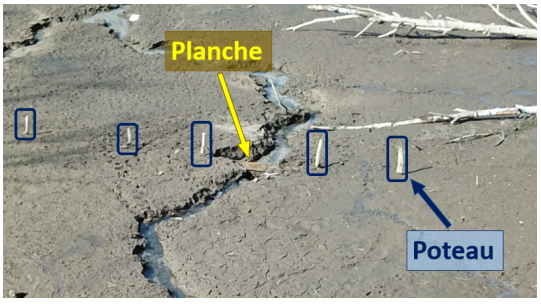


FIGURE 1.22 – Vue sur la palissade

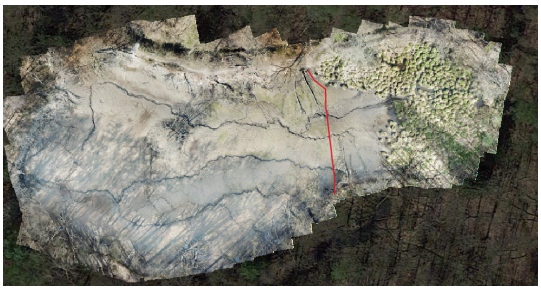


FIGURE 1.23 – Vue aérienne de l'étang et emplacement de la palissade (en rouge)

Aussi, cet ancien garde-forestier laissait la végétation pousser lors des vidanges pour encourager le processus de minéralisation de la vase et il remettait l'étang sous eau avec les plantes entières et vivantes dans le fond de l'étang. Cette pratique

est aujourd'hui controversée puisqu'elle pourrait favoriser le processus d'eutrophisation du milieu aquatique. Par ailleurs, depuis la prise en charge de la gestion de l'étang par l'UCLouvain, il était courant d'introduire dans l'étang les poissons de pisciculturesexpérimentales lorsque celles-ci étaient terminées. On y trouvait donc beaucoup de spécimens et beaucoup d'espèces différentes. Cette pratique n'est plus en vigueur aujourd'hui.
Aujourd'hui le garde forestier Thibaut Thyrion [1], qui est notamment en charge de la gestion de l'étang, a une vision différente. Par exemple, suite à cette vidange, il envisage sérieusement de faucher et ramasser la végétation qui aura poussé cette saison sur le lit de l'étang avant de remettre ce dernier sous eau. La mise en assec, nos échanges et des rencontres avec plusieurs spécialistes (chercheurs, agents du Département de la Nature et des Forêts (DNF [2]), experts...) l'ont amené à engager un processus de réflexion plus approfondi à propos de la future gestion de l'étang. Plusieurs questions se posent : l'étang est-il l'écosystème dont l'intérêt en terme de biodiversité est maximal ? Ne serait-il pas possible de faire évoluer l'étang actuel vers une zone marécageuse avec les méandres d'un ruisseau qui alimenteraient une succession de mares ? Quel serait l'impact pour les espèces de poisson (plutôt des espèces d'étang) d'un tel changement morphologique ?
Ces questions en font émerger d'autres sur un plan plus sociologique et philosophique : quelle est notre relation à l'étang actuel ? Sommes-nous attachés à sa forme actuelle et serions-nous prêts à accepter l'idée de sa transformation ? La question principale, qui, selon lui, guide Thibaut Thyrion aujourd'hui est : "Qu'est-ce qui va apporter plus de diversité que cette lame d'eau ?" En effet le système hydrologique du Blanc-Ry est tel qu'aujourd'hui la vie piscicole y est très faible. L'étang, lui, constitue un écosystème propice à la vie et à la reproduction de la faune aquatique.
Enfin, un dernier paramètre, et pas des moindres, est à prendre en compte. En effet, depuis plusieurs décennies une cellule familiale de castors (4 à 6 individus) s'est installée dans le Blanc-Ry et son activité s'est accrue autour de l'étang ces dernières années. Leur présence modifie l'hydrologie du Blanc-Ry de plusieurs manières. En amont de l'étang, on retrouve une succession de barrages créant une large zone inondée à l'écoulement très lent. Là où le Blanc-Ry quitte sa trajectoire historique pour s'écouler dans son lit aménagé en 1936 se trouve également un barrage qui détourne une partie du débit de la rivière dans l'étang.
À l'aval de l'étang, les castors ont également bâti un barrage et, afin d'augmenter le débit qui alimente le bassin ainsi formé, ils sont en train de creuser un nouvel exutoire. Il est amusant de noter que les aménagements des castors coïncident assez fidèlement avec l'emplacement de l'ancien lit du Blanc-Ry.

1. https ://uclouvain.be/fr/repertoires/thibaut.thyrion
2. https ://www.wallonie.be/fr/acteurs-et-institutions/wallonie/spw-agriculture-ressources-naturelles-et-environnement/departement-de-la-nature-et-des-forets



FIGURE 1.24 – Tranchée creusée par les castors à l'aval de l'étang

1.4 Objet de l'étude

Cette étude a pour objectif principal d'étudier la faisabilité de la connexion du Blanc-Ry à l'étang via des passes à poissons dans une volonté de le renaturaliser. En effet, depuis sa création en 1936, il n'existe pas de connexion hydrologique qui permette le passage des espèces piscicoles entre l'étang et le Blanc-Ry. De plus, au fil des années, les sédiments apportés par les sources qui alimentent l'étang, cumulés à l'importante quantité de matières organiques s'y déposant (arbres morts, feuilles mortes, etc...) constituent rapidement une épaisse couche de vase au fond de l'étang. Pour éviter le colmatage de l'étang, ce dernier est régulièrement mis à sec depuis sa création (environ tous les dix ans) créant une rupture écologique dans l'écosystème mais permettant la minéralisation de la vase et, de ce fait de contrôler son accumulation.



FIGURE 1.25 – Illustration de la rupture écologique - Nombreuses anodontes mortes



FIGURE 1.26 – Carte de situation du site

Ainsi l'étude propose de modéliser l'évolution morphologique de l'étang ce qui pourrait permettre de proposer différents aménagements dans le but de favoriser l'émergence d'habitats propices à l'épanouissement de la faune et de la flore présentes (Section *1.2 Biodiversité*). Comme mentionné précédemment à la section *1.3 Historique et évolution du site*, un environnement marécageux aurait probablement un intérêt supérieur en terme de diversité mais on reste attaché à l'étang dans sa forme actuelle. Cette étude se limite à des analyses du comportement hydrologique et sédimentologique mais des études complémentaires (écologie/biodiversité, sociologie/tourisme, architecture/paysage, résilience et diminution des interventions anthropiques, etc...) seront nécessaires pour prendre des décisions éclairées et fondées sur une vision systémique de l'étang de Warlongroux.
L'étude se basera donc sur la modélisation des écoulements et du transport des sédiments afin de proposer des aménagements permettant de remplir les objectifs suivants :

- Maintien de l'intérêt touristique et social du site
- Arrêt de la mise en assec décennale
- Établissement d'une continuité du réseau hydrologique entre l'étang et le Blanc-Ry permettant la migration des espèces aquatiques (en particulier les poissons)

Pour résumer, l'idée est donc d'**étudier la possibilité de rompre la barrière écologique** qui sépare l'étang et le Blanc-Ry afin de favoriser la biodiversité. Plusieurs modélisations permettront d'envisager différents scénarios en fonction des aménagements proposés.

La réalisation de cette étude nécessite la mise en place d'un ensemble de techniques permettant la collecte de données de terrain nécessaires à la construction

d'un modèle le plus fidèle possible.
Ainsi les techniques suivantes ont été appréhendées et déployées :

- Pilotage d'un drone
- Utilisation et calibrage d'un micro-moulinet
- Détermination de granulométrie par tamisage
- Détermination du taux de matière organique par calcination
- Utilisation du logiciel de photogrammétrie *MetaShape* [2]
- Utilisation et adaptation du code de modélisation d'écoulement *SVE2D*
- Programmation sur *Code : :Blocks* [32], plateforme sur laquelle est édité et compilé *SVE2D*.
- Utilisation du logiciel de cartographie *QGIS* [1]
- Utilisation du logiciel *Matlab* pour le traitement des données obtenues par traitement d'images et pour le traitement des résultats
- Utilisation du logiciel *GMSH* [19], un logiciel permettant de générer des maillages d'éléments finis.

La mise en place et l'utilisation de ces dispositifs permettent, parallèlement à l'étude de faisabilité, de proposer un retour d'expérience.

Chapitre 2

Caractérisation du site étudié

2.1 Analyse sédimentologique

Afin de pouvoir modéliser au mieux le comportement des sédiments et leur interaction avec l'écoulement, il est nécessaire de déterminer un certain nombre de grandeurs physiques propres aux dits sédiments. Ainsi le poids volumique, la distribution granulométrique et la concentration en matière organique ont été mesurés.
Afin de mieux comprendre le comportement des sédiments ainsi que les fonctions que remplissent les zones amonts de l'étang (Barrages de castor, delta à travers les macrophytes, etc...), des échantillons ont été prélevés à trois emplacements différents (*Prelev_1, Prelev_2* et *Prelev_3* sur la figure 2.1). Un premier (*Prelev_1*) là où l'écoulement quitte la zone des macrophytes et rejoint l'étendue d'eau proprement dite, un second (*Prelev_2*) là où les barrages de castors détournent une partie du débit du Blanc-Ry dans l'étang et un troisième (*Prelev_3*) au niveau du cône de déjection là où commence la zone inondée par les castors.



FIGURE 2.1 – Carte des prélèvements

2.1.1 Poids propre

Afin de déterminer la densité s des sédiments, voici la méthodologie suivie :

1. Prélèvement de 150 g de sédiments humides
2. Séchage à l'étuve : 24 heures à 105°C
3. Pesée de 100g (m_{sand}) de sable sec
4. Rajout d'eau (V_{water}) jusqu'à atteindre le niveau du sable et mesure du volume total V_{tot}
5. Calcul du poids volumique $\gamma_s = \frac{m_{sand}}{V_{tot} - V_{water}} = 2295$ [kg/m^3]

$$\boxed{\Rightarrow s = 2,295}$$

2.1.2 Porosité

Pour déterminer la porosité, la méthodologie employée est la suivante :

1. Prélèvement de 150 g de sédiments humides
2. Séchage à l'étuve : 24 heures à 105°C
3. Remplissage de 200 ml (V_{tot}) de sédiments dans une fiole jaugée
4. Tarage sur balance de précision
5. Rajout d'eau jusqu'à atteindre le niveau du sable et déduction du volume d'eau (V_{water}) ajouté grâce au poids affiché sur la balance

$$\boxed{\Phi = \frac{V_{water}}{V_{tot}} = 0,3}$$

2.1.3 Granulométrie

Granulométrie par tamisage

Afin d'obtenir des résultats précis, la littérature a été consultée quant à la détermination de la granulométrie de sédiments de rivières. C'est pourquoi la méthodologie suivante s'appuie en grande majorité sur le document *Analyses granulométriques, principes et méthodes* (*Fournier J. et al., 2012 [15]*).

1. Prélèvement :

A l'étang, sous la direction et le conseil de Thibaut Thyrion, différentes épaisseurs composant la couche de dépôt sont prélevées afin d'inclure tous les sédiments, et pas uniquement les derniers déposés.



2. Rinçage :

   L'échantillon analysé est placé dans un récipient contenant de l'eau. Les matières organiques flottantes sont enlevées. Enfin le tout est laissé en sédimentation pendant 72h puis l'excès d'eau est enlevé.



3. Séchage :

   Les sédiments recueillis sont laissés 4 heures dans l'étuve à 180°C.

4. Tamisage :

   Les sédiments passent au travers de 14 tamis, avec des mailles respectives, de la plus petite à la plus grande : 40 μm, 50 μm, 63 μm, 80 μm, 100 μm, 160 μm, 200 μm, 250 μm, 315 μm, 400 μm, 500 μm, 630 μm, 800 μm, et 2,5 mm. Le tamisage se réalise en deux fois puisque la colonne de tamisage vibrante a une capacité maximale de 7 tamis. Pour chaque passage l'appareil vibre 10 minutes avec "à-coup" (arrêt-redémarrage des vibrations) toutes les 40 secondes afin d'accélérer la dislocation des rares agrégats.



5. Pesées :

Chaque refus de tamis est pesé.



6. Traitement des résultats :

Les résultats des tamisages permettent d'extraire les données suivantes :

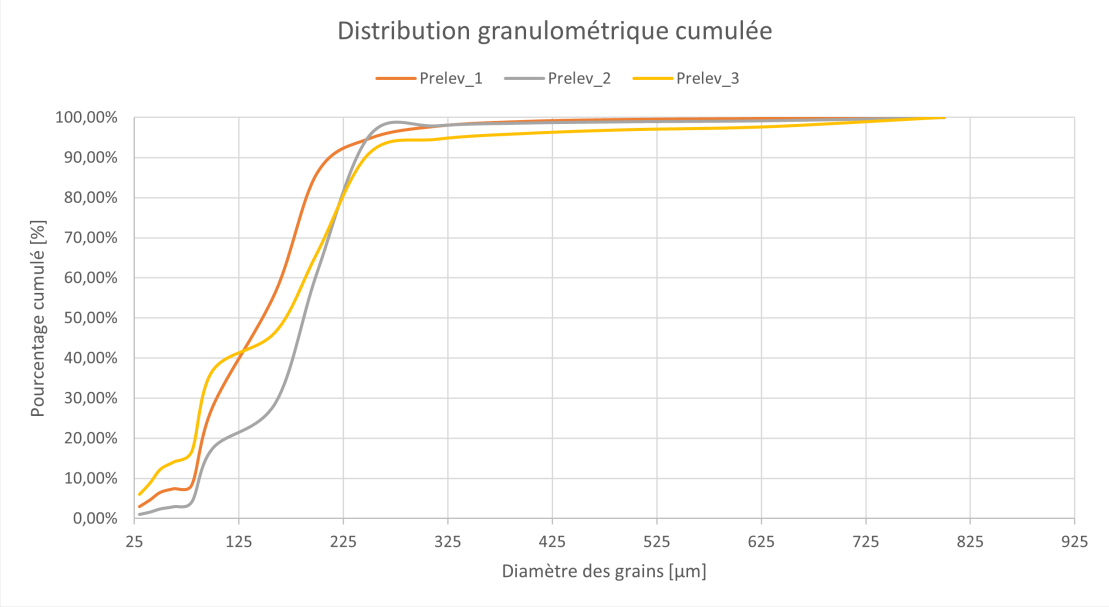


FIGURE 2.2 – Distribution granulométrique cumulée

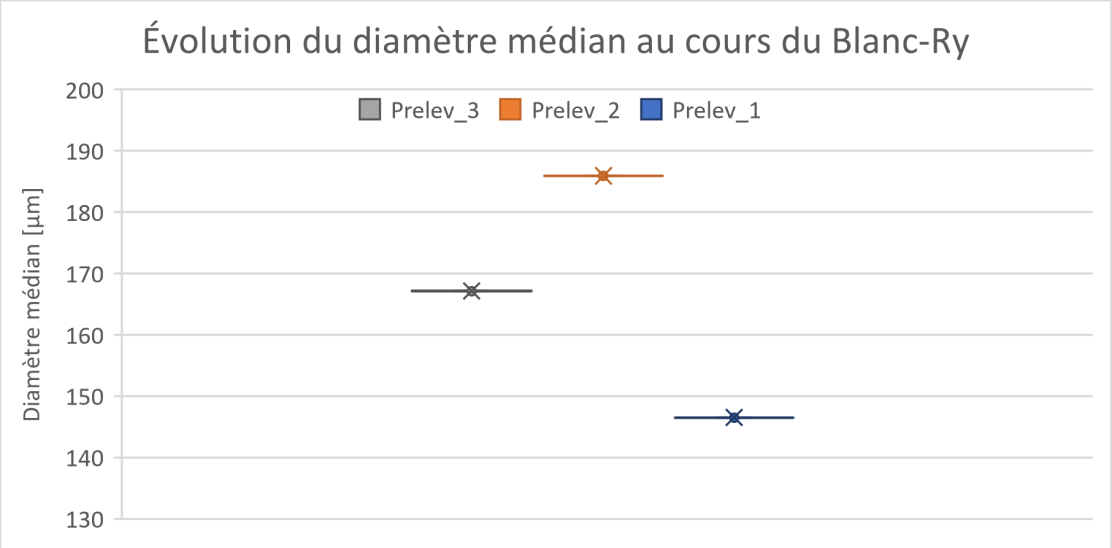


FIGURE 2.3 – Évolution du diamètre médian au cours du Blanc-Ry

$$d_{10} = 63[\mu m] \quad d_{50} = 165[\mu m] \quad d_{65} = 187[\mu m] \quad d_{90} = 250[\mu m]$$

Deux formules permettent, sur base de ces résultats, d'estimer la valeur du coefficient de Manning dû aux grains, n :

$$n = \frac{\sqrt[6]{d_{65}}}{21} = 0,011387 \ [s/m^{1/3}] \ \& \ n = \frac{\sqrt[6]{d_{90}}}{26} = 0,0097 \ [s/m^{1/3}]$$

La coefficient de Manning considéré sera donc $n = 0,01 \ [s/m^{1/3}]$

Complément de granulométrie : mesure des fines (<30µm)

Pour déterminer la distribution granulométrique des fines particules, des mesures laser furent réalisées sur les particules ayant traversé l'entièreté de la colonne de tamisage, c'est à dire celles dont le diamètre est inférieur à 30 μm, pour chacun des trois échantillons (*Prelev_1, Prelev_2* et *Prelev_3* sur la figure 2.1). Ces mesures furent réalisées par le laboratoire LACaMi [1] de l'institut IMMC de l'UClouvain grâce à la machine de mesure laser de particules *Coulter LS100Q* (Figure 2.4).



FIGURE 2.4 – Machine de mesure laser de particules *Coulter LS100Q*

Ces mesures permettent d'une part de mieux caractériser la distribution granulométrique des particules de taille inférieure à 30 μm et d'autre part d'étudier l'évolution de cette dernière au fil de la zone inondée en amont de l'étang.

1. https ://uclouvain.be/en/research-institutes/immc/lacami

Les résultats obtenus sont les suivants :

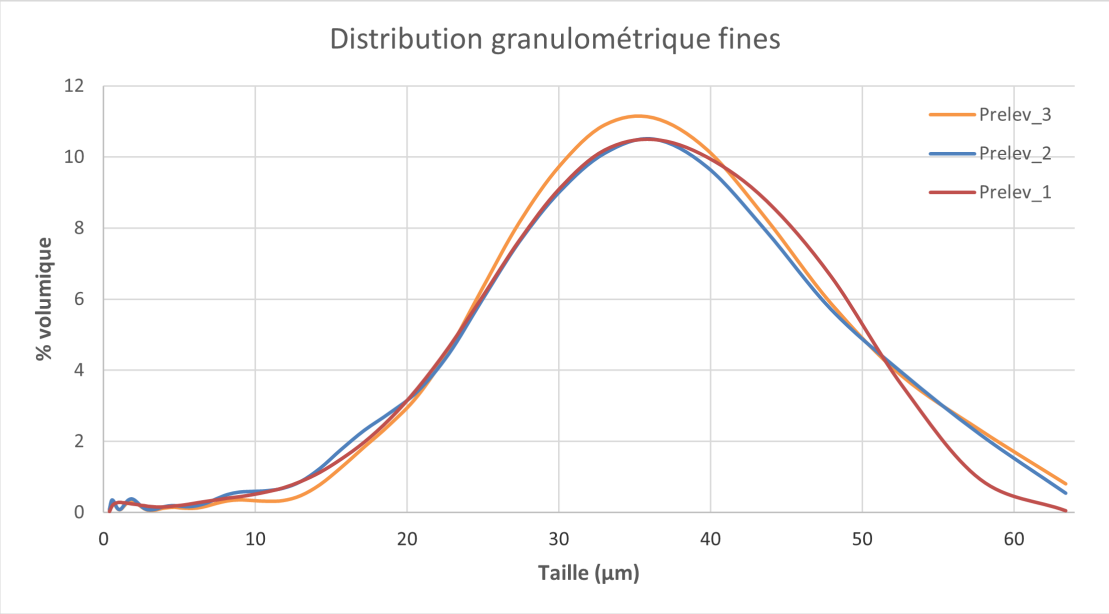


FIGURE 2.5 – Distribution granulométrique des fines *Prelev_1, Prelev_2* et *Prelev_3*

Une légère diminution du diamètre médian des fines est observée au cours du Blanc-Ry. Cette diminution, bien que très faible, s'explique par la présence de zones amonts à l'écoulement lent (zones inondées par la présence des barrages de castor) au cours desquelles les particules les plus lourdes ont le temps d'atterrir. L'évolution du diamètre médian n'est cependant pas significative.

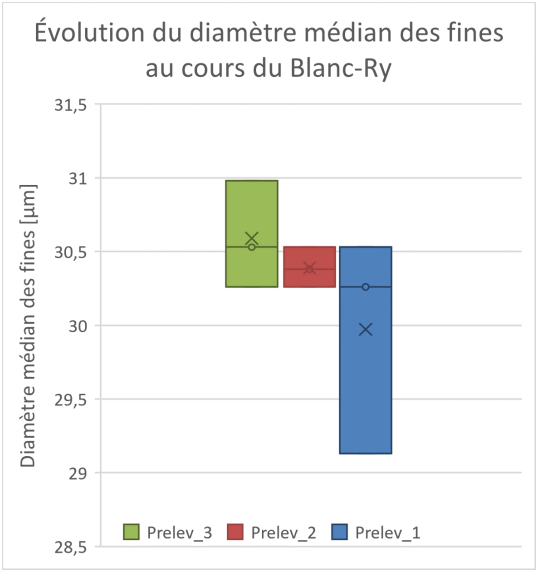


FIGURE 2.6 – Évolution du diamètre médian des fines au cours du Blanc-Ry

2.1.4 Détermination de la proportion de matière organique

L'évolution de la proportion de matière organique au cours du Blanc-Ry à l'amont de l'étang a également été réalisée. Dans ce cadre, 3 échantillons ont été

prélevés (voir *Prelev_1, Prelev_2* et *Prelev_3* sur la Figure 2.1).

Le protocole mis en place afin de déterminer la proportion de matière organique dans chaque échantillon par calcination est le suivant :

1. Déshydratation des 3 échantillons à l'étuve à 105°C pendant 24h
2. Brûlage à 600°C de 9 creusets pour éliminer les impuretés
3. Refroidissement des creusets au dessiccateur
4. Pesée à vide des creusets
5. Remplissage de 3 creusets avec chaque échantillon
6. Pesée des creusets pleins
7. Calcination à 550°C pour 2h
8. Refroidissement au dessiccateur
9. Pesée de chaque creuset

La différence de masse mesurée avant et après calcination permet de déterminer directement la proportion de matière organique (MO) dans les échantillons puisque cette dernière représente plus de 99% de la matière volatile. Les résultats obtenus sont les suivants et sont résumés dans le tableau 2.1

Prélev	Creuset n°	Masse à vide $[g]$	Masse à plein $[g]$	Masse finale $[g]$	% MO	Moyenne	écart type
1	1	23,0042	46,4407	46,2675	0,74	0,76%	0,03%
	2	20,8402	46,022	45,8355	0,74		
	3	20,831	51,0672	50,8293	0,79		
2	4	24,1474	49,0739	48,7619	1,25	1,47%	0,19%
	5	23,0715	47,7853	47,4027	1,55		
	6	22,7265	46,6186	46,2362	1,60		
3	7	25,8639	67,1604	66,2194	2,28	2,36%	0,22%
	8	25,2062	56,104	55,2972	2,61		
	9	26,4377	65,435	64,5836	2,18		

TABLE 2.1 – Données mesures de MO

Une diminution notable de la teneur en matière organique est observée au cours du Blanc-Ry. Cette diminution, de près de 68%, s'explique par la présence de zones amonts où l'écoulement est ralenti (zones inondées par la présence des barrages de castor) au cours desquelles la matière organique atterrit ou est directement piégée par les barrages.

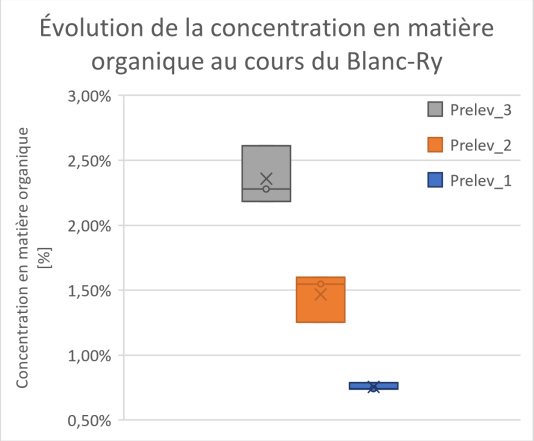


FIGURE 2.7 – Évolution de la concentration en matière organique au cours du Blanc-Ry

2.2 Données hydrologiques

Plusieurs campagnes de mesure du débit du Blanc-Ry ont été réalisées ces dernières décennies. Les deux plus récentes sont les seules rapidement exploitables puisque disponibles sous format numérique. Les données plus anciennes sont stockées sous format papier ce qui rend extrêmement fastidieux leur exploitation.

Le premier jeu de données fut récolté de 1999 à 2002, dans le cadre d'une thèse de doctorat (*Peou Hang, 2002* [20]), le second le fut de 2011 à 2015, grâce au travail de Violaine Cappellen dans le cadre de son mémoire de fin de master (*Violaine Cappellen, 2015* [9]).

En pratique : *"afin de mesurer la quantité d'eau qui sort du bassin versant par l'exutoire, nous avons utilisé un dispositif mis en place depuis le début des années 1990. Il s'agit d'un chenal qui canalise l'eau. Celui-ci a été équipé d'un limnimètre qui mesure via un flotteur la hauteur de la lame d'eau dans le chenal et enregistre automatiquement la donnée. Une calibration de l'appareil a été nécessaire afin de connaître la relation entre la valeur brute enregistrée et la hauteur d'eau réelle. [...] Les mesures ont été effectuées toutes les 15 minutes [...]. Elles ont ensuite été transformées en estimations de débits via une courbe de tarage qui exprime la relation entre la hauteur et le débit"*(*Violaine Cappellen, 2015* [9]).

Une courbe des débits classés (Flow Duration Curve, FDC) peut être extraite de chaque jeu de données (Figure 2.8 et 2.9) :

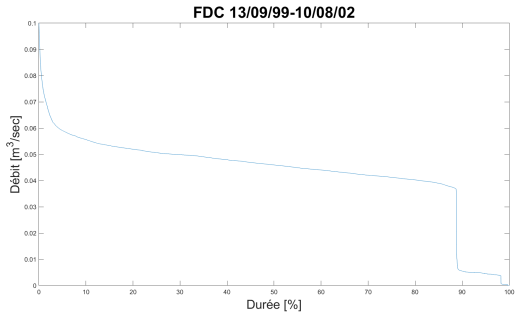


FIGURE 2.8 – FDC 1999-2002 - Données brutes

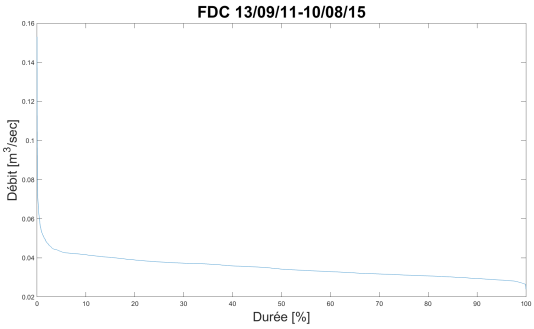


FIGURE 2.9 – FDC 2011-2015 - Données brutes

Une anomalie est repérable pour les débits les plus faibles du premier jeu de données (1999-2002) avec un saut anormal dans la courbe des débits classés. L'origine de cette anomalie est probablement due à une perturbation de l'outil de mesure (branche, dysfonctionnement, etc...) ; ces données sont donc écartées. La combinaison des 2 jeux de données produit une courbe globale des débits classés qui sera utilisée pour les simulations (Figure 2.10) :

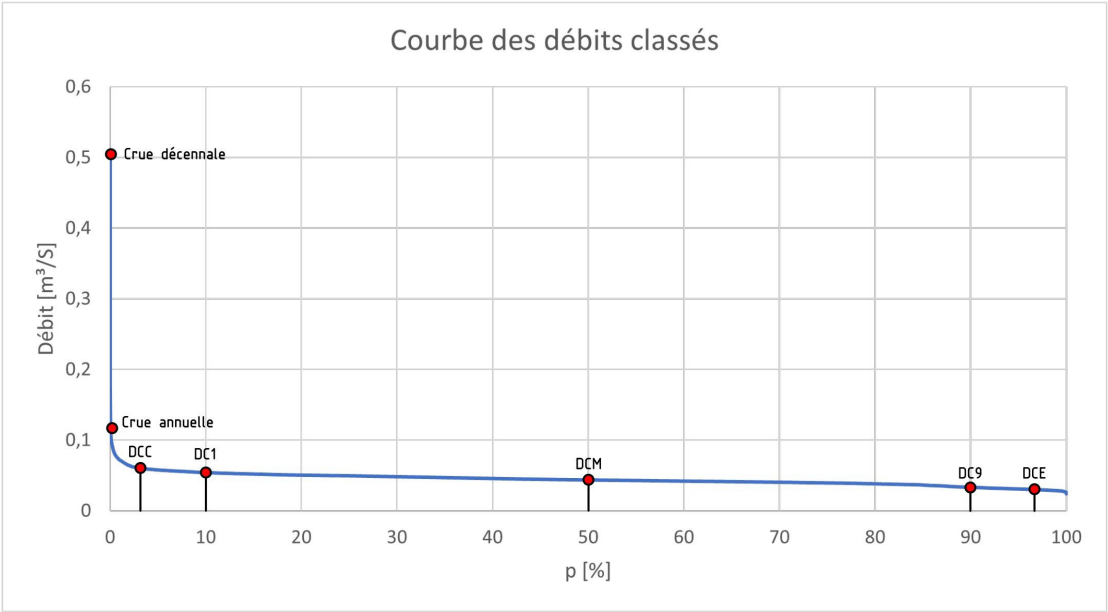


FIGURE 2.10 – Courbe des débits classés

Les débits caractéristiques suivants peuvent être extraits de ces données :

$$\begin{cases} Q_{crue,d} = 0,5 & [m^3/s] & \text{Débit crue décennale} & p = 0\% \\ Q_{crue,a} = 0,12 & [m^3/s] & \text{Débit crue annuelle} & p = 0,04\% \\ Q_{DCC} = 0,061 & [m^3/s] & \text{Débit maximum} & p = 2,7\% \\ Q_{DC1} = 0,054 & [m^3/s] & \text{Premier décile} & p = 10\% \\ Q_{DCM} = 0,043 & [m^3/s] & \text{Débit médian} & p = 50\% \\ Q_{Moy} = 0,044 & [m^3/s] & \text{Débit moyen} & N/A \\ Q_{DC9} = 0,033 & [m^3/s] & \text{Neuvième décile} & p = 90\% \\ Q_{DCE} = 0,029 & [m^3/s] & \text{Débit minimum} & p = 97,3\% \end{cases}$$

Où p représente la proportion du temps pendant laquelle le débit du Blanc-Ry est supérieur ou égal à une certaine valeur.

2.3 Mesures de débit

Les données hydrologiques (1999-2002 & 2011-2015), présentées dans la section *2.2 (Données hydrologiques)* fournissent les débits du Blanc-Ry. Or, l'étang est également alimenté par d'autres sources dont une principale. Afin que le modèle soit réaliste, il faut donc également caractériser le débit de cette dernière. Pour ce faire, les vitesses d'écoulement ont été mesurées ponctuellement (spatialement et temporellement) afin d'avoir un ordre de grandeur du débit à injecter lors de la simulation au droit de cette source. L'utilisation de ce débit dans la simulation est une hypothèse simplificatrice mais qui parait raisonnable ; en effet, d'après le garde forestier Thibaut Thyrion, le débit de cette source est relativement constant au cours de l'année. De plus, les informations collectées, notamment auprès de Simon Ridley [2], indiquent que les variations de débit de la source sont probablement corrélées avec les variations de hauteur de la nappe du plateau de Lauzelle dont le cycle ne concorde pas avec les saisons. Le modèle considérera donc, faute d'informations plus précises, un débit constant au droit de cette source.

En pratique cette mesure a été réalisée grâce à un moulinet *SEBA D-8950*. Ce dispositif permet de mesurer la vitesse d'écoulement en différents points d'une section de contrôle. Un débit peut être déduit de ces mesures grâce à un relevé géométrique de la section.

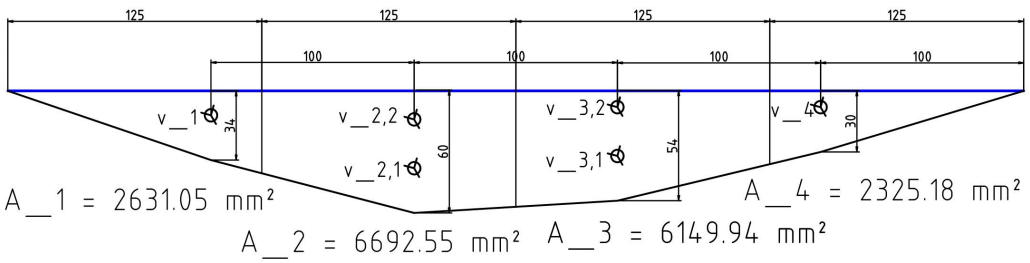


FIGURE 2.11 – Section de contrôle

2. https ://uclouvain.be/fr/repertoires/simon.ridley

2.3.1 Étalonnage de l'appareil

Le micro-moulinet est un dispositif assez simple puisqu'il s'agit en réalité d'un compte tour. Ce matériel est fourni avec un jeu de 4 hélices ; pour chacune d'entre elles un jeu d'équation est renseigné afin de pouvoir calculer la vitesse en fonction du nombre de tour par seconde n de l'hélice. Ce sont des équations du type :

$$\begin{cases} \text{Si } n & \leq & a_1 & \text{Alors } v = & k_1 n + \Delta_1 \\ \text{Si } n & \in & [a_1; a_2[& \text{Alors } v = & k_2 n + \Delta_2 \\ \text{Si } n & \geq & a_2 & \text{Alors } v = & k_3 n + \Delta_3 \end{cases}$$

a_1 et a_2 étant des paramètres fixés pour chaque type d'hélice.
Le processus d'étalonnage consiste à mesurer les vitesses dans un environnement contrôlé (canal de laboratoire) afin de pouvoir déterminer les valeurs des paramètres k_i et Δ_i. Une première visite de terrain a permis de sélectionner l'hélice la plus appropriée ; assez petite au vu du faible tirant d'eau mais assez sensible pour se mettre en rotation. Il s'agit de l'hélice de 30 $[mm]$ de diamètre avec un pas de 50 $[mm]$. Voici la méthodologie employée pour l'étalonnage :

1. Variation du débit dans le canal, à chaque débit on laisse l'écoulement uniforme s'installer
2. Mesure de n, pour chaque débit et pour chacun des trois domaines de définition de la fonction $v(n)$, sur un intervalle de temps de 100 secondes. Chaque mesure est triplée et moyennée afin d'améliorer la fiabilité de l'étalonnage.
3. Les données récoltées permettent de placer les mesures sur un diagramme v en fonction de n
4. Enfin, une interpolation linéaire permet de déterminer les paramètres k_i et Δ_i (Figure 2.12)

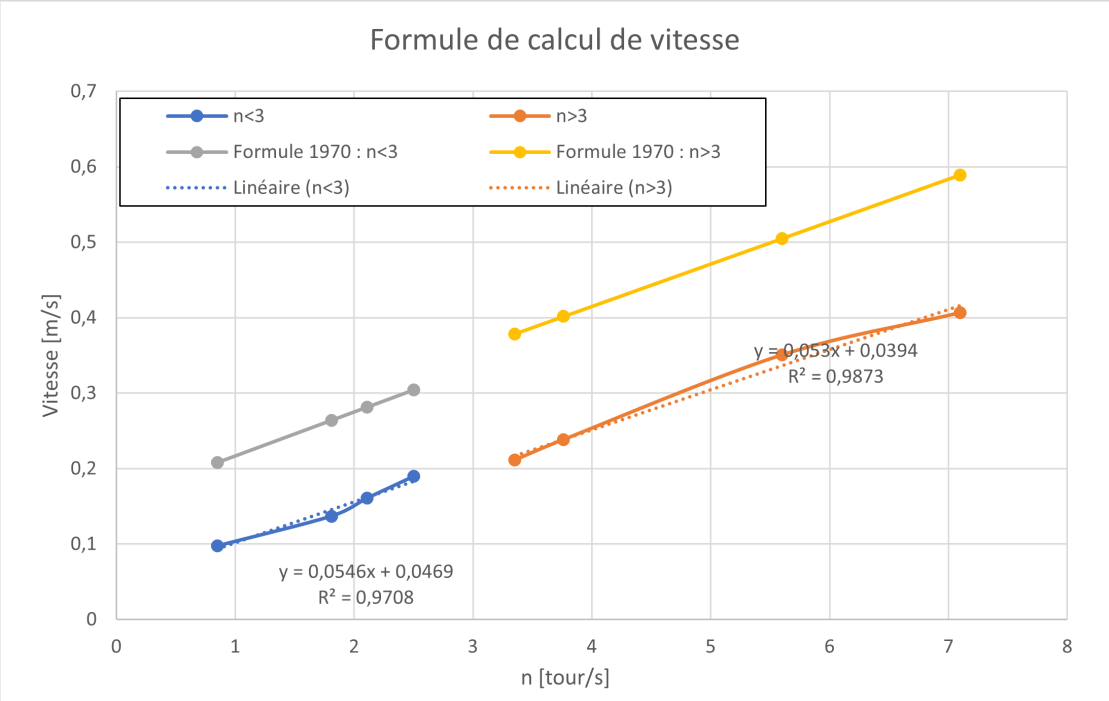


FIGURE 2.12 – Étalonnage du moulinet et comparaison avec les formules d'origines

Les paramètres suivants sont obtenus :

	k_i	Δ_i
n $<$ 3	0,0546	0,0469
n $>$ 3	0,053	0,0394

2.3.2 Mesures in situ

Le document de référence *Les jaugeages des débits des cours d'eau au moulinet hydrométrique par la méthode d'intégration (M.-A. Diconne, 1972)*[11] décrit deux méthodes de prise de mesure : par point et par intégration. La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes indiquent que *"l'on peut en conclure que les deux méthodes aboutissent à des résultats absolument identiques"*[11]. Puisque le cours d'eau jaugé est vraiment de faible profondeur (voir le relevé de section à la Figure 2.11), c'est la méthode par point qui sera utilisée ; la vitesse sera mesurée le long de 4 verticales réparties uniformément sur la largeur et à 2 profondeurs sur chaque verticale lorsque cela est possible (c'est à dire pour les deux verticales centrales).

Le nombre de tour d'hélice sur 100 secondes, $n_{i,j,k}$, est mesuré à chaque profondeur j, avec k le nombre de mesures effectuées pour i et j fixés, ici $k = 3$, ce qui permet de réduire l'incertitude de mesure. La moyenne est calculée sur k : $\bar{n}_{i,j} = \dfrac{\sum_{k=1}^{3} n_{i,j,k}}{3}$ Ensuite, le calcul de l'écart type est réalisé afin de vérifier la cohérence des mesures. Finalement il est possible de déduire les profils de vitesse (voir 2.14).



FIGURE 2.13 – Principe de mesure [28]

Les données obtenues sont les suivantes :

i	A_i [m^2]	$n_{i,j}$ [tour/s]			Moy. $\bar{n}_{i,j}$ [tour/s]	Écart-type $\sigma_{i,j}$ [m/s]	Vitesse $V_{i,j}$ [m/s]
1	0,00263	114	123	123	$\bar{n}_1 = 120$	$\sigma_1 = 5{,}20$	0,112
	0,00669	259	261	257	$\bar{n_{2,1}} = 259$	$\sigma_{2,1}$= 2,00	0,188
2	0,00669	293	288	291	$\bar{n}_{2,2} = 290,7$	$\sigma_{2,2}$ =2,52	0,206
	0,00614	367	365	361	$\bar{n}_{3,1} = 364,3$	$\sigma_{3,1}$= 3,10	0,232
3	0,00614	385	388	390	$\bar{n}_{3,2} = 387,7$	$\sigma_{3,2}$ = 2,52	0,245
4	0,00232	140	140	141	$\bar{n}_4 = 140,3$	$\sigma_4 = 0{,}58$	0,124

TABLE 2.2 – Données mesures de débit

Détermination du profil de vitesse

Pour déterminer le profil de vitesse l'hypothèse d'un écoulement turbulent lisse est formulée. Plusieurs raisons orientent ce choix :

- le diamètre des sédiments est très petit :

$$d_* = d_{50}\left(\frac{g(s-1)}{\nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} = 3,73 \tag{2.1}$$

- le calcul à posteriori du nombre de Reynolds sédimentologique montre que l'écoulement est turbulent lisse :

$$Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu} = 1,3 << 11,6 \tag{2.2}$$

où la vitesse de frottement $\bar{u}_* = 0,010$ $[m/s]$, $d_{50} = 165 \cdot 10^{-6}$ $[m]$ et $\nu = 1,31.10^{-6}[m^2/s]$ la viscosité cinématique de l'eau.

L'équation qui décrit le profil de vitesse dans ce cas est :

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\frac{u_* \cdot z}{\nu} + 5,50 \tag{2.3}$$

Connaissant les vitesses à certaines profondeurs z_i (Table 2.2), il est possible de déduire une valeur de $u_{*,i}$ en procédant de manière itérative : $u_{*,i}$ est fixé, $u(z_i)$ en est déduit, on compare la valeur obtenue avec celle calculée avec le moulinet. Si elles sont égales, nous avons le bon couple de valeur, sinon un nouveau $u_{*,i}$ est pris et l'algorithme recommence (itération force brute) . Ainsi des valeurs de u_* sont calculées pour chaque verticale.

Verticale	$u_{*,i}$ [m^2/s]
1	0,0066
2	0,0104
3	0,0125
4	0,0072

TABLE 2.3 – Vitesse de frottement par sous-sections

Lorsque u_* est déterminé, les profils de vitesse au droit de chaque verticale sont déterminés sur la Figure 2.14. La vitesse moyenne est représentée par la barre verticale de couleur orange.

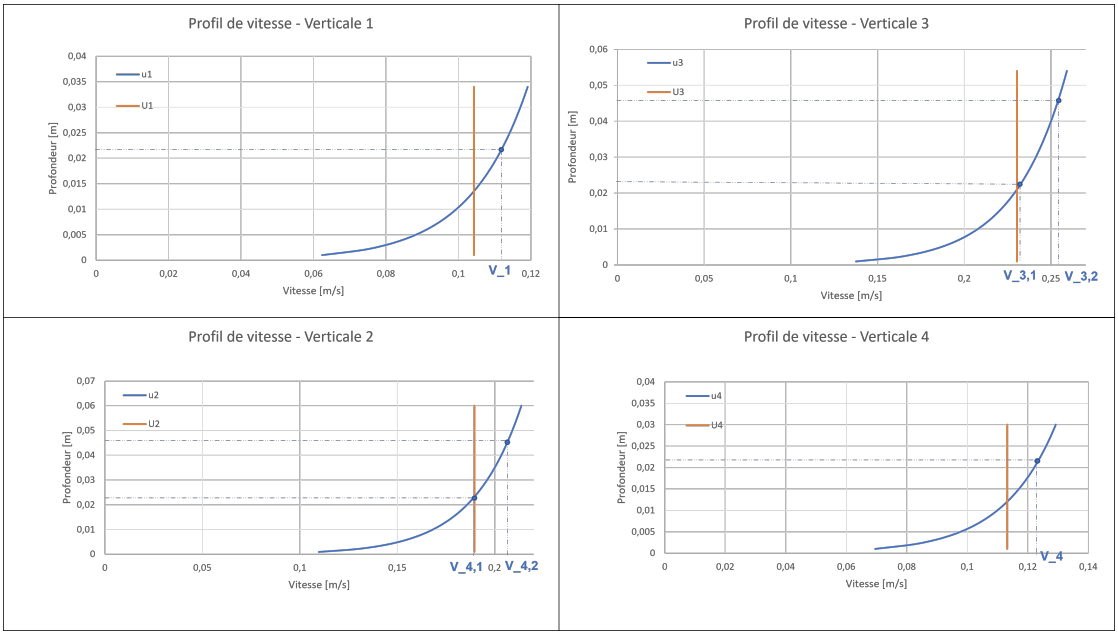


FIGURE 2.14 – Profils de vitesse et vitesse moyenne au droit des 4 verticales

Résultats

En intégrant ce profil, le débit par unité de largeur q_i correspondant à chaque verticale i est obtenu.

$$q_i = A_i U_i$$

i	q_i [L/s]
1	0,27
2	1,27
3	1,42
4	0,26

TABLE 2.4 – Débits des sous-sections

Enfin, un débit peut-être estimé :

$$\boxed{Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = 3,22 \text{ [L/s]}}$$

2.4 Analyse bathymétrique par drone

2.4.1 Le drone

Dans le cadre de ce travail, le drone utilisé est un DJI Mavic Pro [3] équipé d'une caméra intégrée dotée d'un capteur *1/2.3" CMOS* et d'une lentille *FOV 78.8° 26 mm (35 mm format equivalent) f/2.2 Shooting Range : 0.5 m to infinity*[12].

2.4.2 Détermination du nombre de balises

Il existe de nombreuses études publiées à propos de la photogrammétrie par UAV (Unmanned Aerial Vehicle) et notamment concernant le nombre de balises GCP (Ground Point Control) à utiliser ainsi que leur disposition. Les résultats varient en fonction des paramètres d'expérience (Hauteur de vol, surface étudiée, logiciel de traitement d'image employés, précision attendue...) mais sont cohérents : plus il y a de points de contrôle plus le modèle sera précis.
Une précision centimétrique est souhaitable, les vols seront effectués à 25 mètres d'altitude et la surface de l'étang est d'environ 7500 m². Ainsi, il parait raisonnable de prévoir 40 GCP (soit environ 1/200m²) (*Oniga et al., 2018 [27]*) et de les disposer en damier (*Awasthi et al., 2019 [4]*) ou sur un maillage triangulaire (*Sanz-Ablanedo et al., 2018[30]*) dans la mesure du possible. La présence d'une épaisse couche de vase ne permettant pas l'accès à l'entièreté de l'étang.

La carte de répartition des balises utilisées pour l'analyse photogrammétrique du fond de l'étang de Warlongroux est visible à la figure 2.15. Les positions GPS précises du centre de chaque balise ont été relevées avec un GPS différentiel Leica 1200 [18] dont la précision est de l'ordre du centimètre.

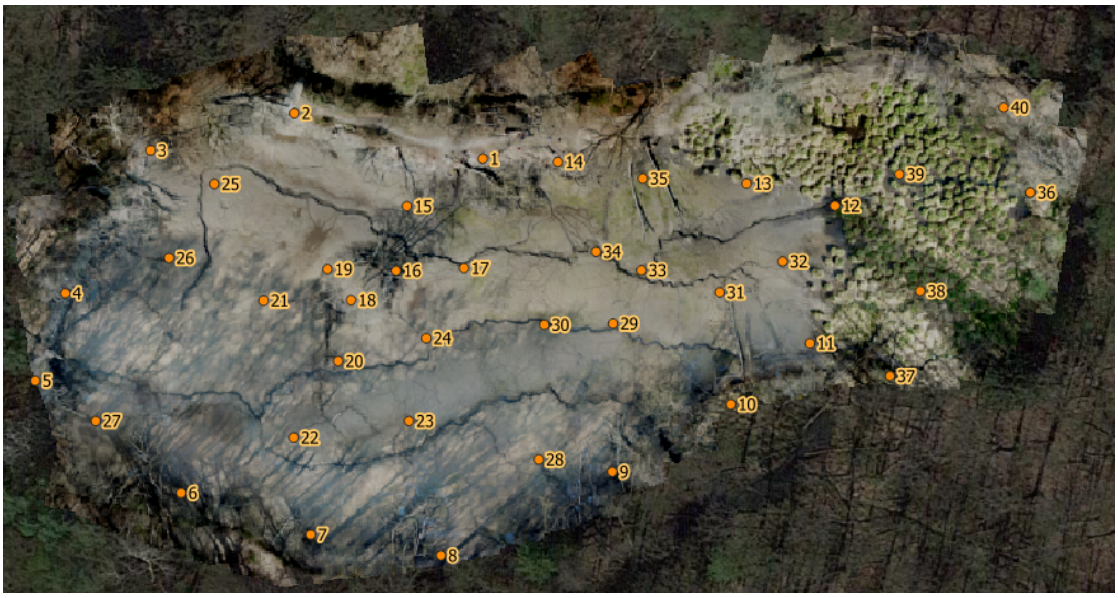


FIGURE 2.15 – Répartition des balises GCP

3. https ://www.dji.com/be/mavic-2/info

2.4.3 Plan de vol

En utilisant l'application pour smartphone *DH Mobile*[4] il est possible de définir une zone à photographier (Figure 2.16) puis de paramétrer un plan de vol que le drone effectuera alors de manière autonome. Avant le décollage l'application fournit une estimation du temps de vol. Limité par la capacité des batteries et par prudence un premier vol a été effectué avec les paramètres suivants (Figure 2.17) :

- **Nombre photos :** 55
- **Recouvrement latéral :** 60 %
- **Recouvrement longitudinal :** 60 %
- **Vitesse de vol :** 9,9 [km/h]
- **Arrêt pour prise d'image :** Oui

Ce premier vol s'étant déroulé correctement un second vol a été réalisé avec un recouvrement supérieur (Figure 2.18) afin d'améliorer la précision du modèle qui est construit à partir des photographies prises. Les paramètres de ce second vol sont les suivants :

- **Nombre photos :** 85
- **Recouvrement latéral :** 70 %
- **Recouvrement longitudinal :** 70 %
- **Vitesse de vol :** 9,9 [km/h]
- **Arrêt pour prise d'image :** Oui

Enfin deux vols complémentaires furent opérés : un vol en pilote automatique afin de prendre des images de la zone amont de l'étang avec les macrophytes (Figure 2.20) et un second en mode manuel afin de prendre des images supplémentaires des berges inaccessibles en pilote automatique à cause de la présence de nombreux arbres.

Des balises GCP supplémentaires furent placées sur les berges et dans la zone des macrophytes. Les paramètres de ce dernier vol en pilote automatique sont les suivants :

- **Nombre photos :** 27
- **Recouvrement latéral :** 70 %
- **Recouvrement longitudinal :** 70 %
- **Vitesse de vol :** 9,9 [km/h]
- **Arrêt pour prise d'image :** Oui

L'application calcule ensuite un plan de vol optimal avec ces configurations.

4. https ://droneharmony.com/the-most-powerful-mobile-flight-app-on-the-market/

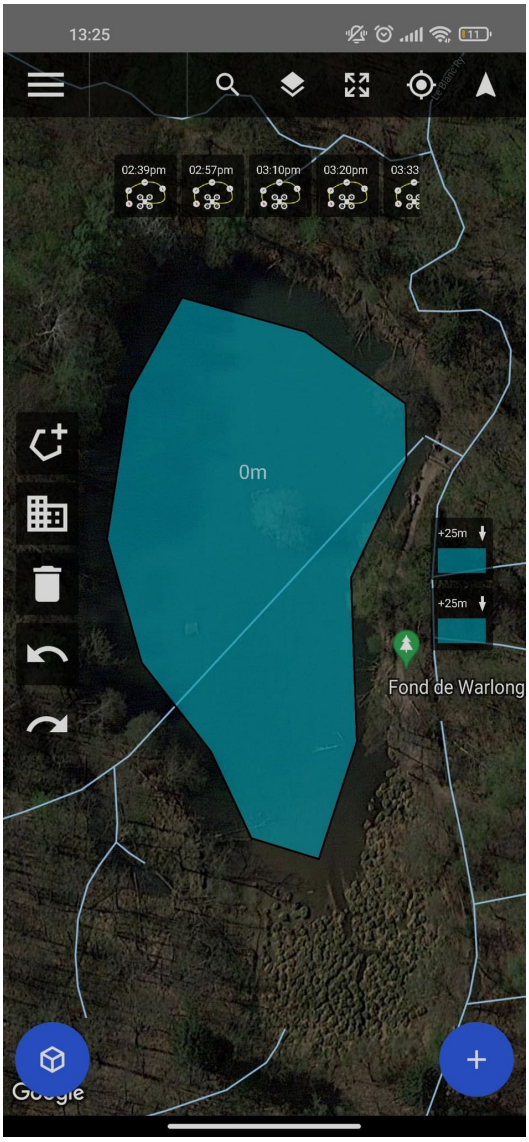


FIGURE 2.16 – Capture d'écran DH Mobile - Zone à photographier

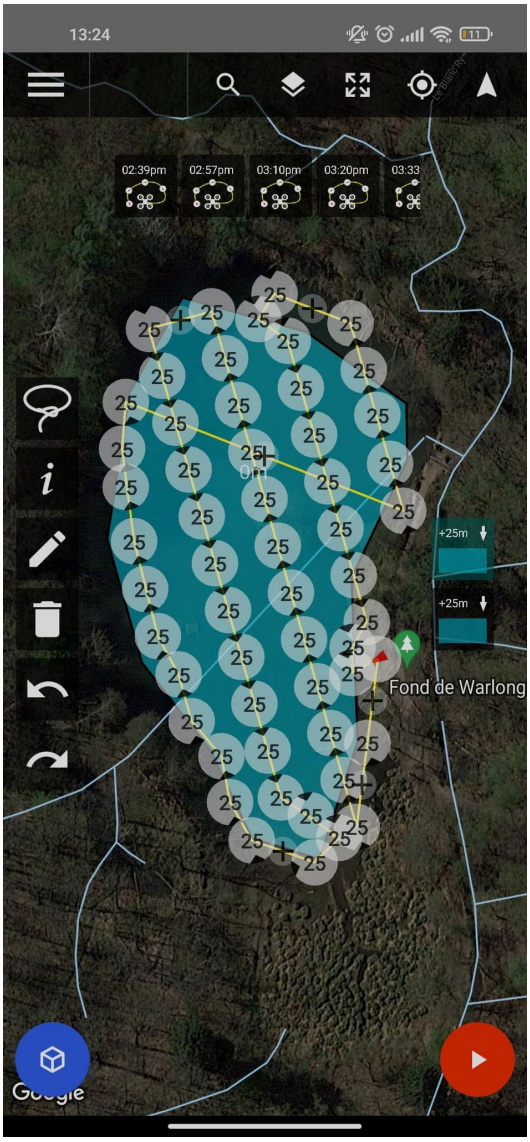


FIGURE 2.17 – Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 1 : recouvrement 60 %

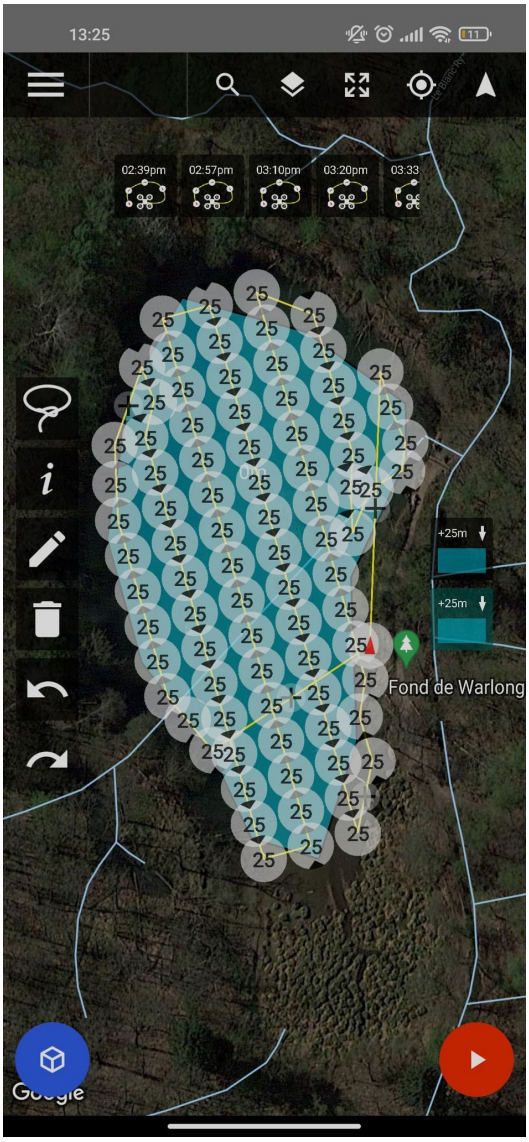


FIGURE 2.18 – Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 2 : recouvrement 70 %



FIGURE 2.19 – Capture d'écran DH Mobile - Zone des macrophytes à photographier

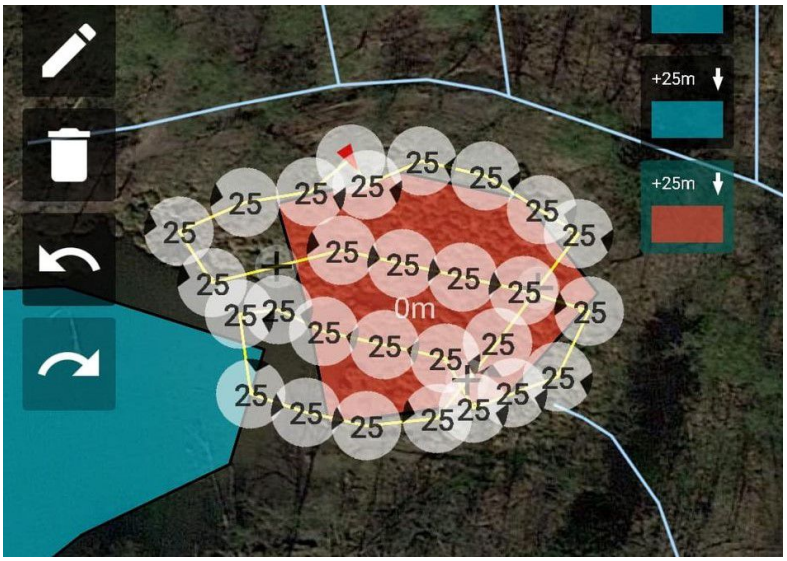


FIGURE 2.20 – Capture d'écran DH Mobile - Plan de vol 3 : recouvrement 70 %

2.4.4 Traitement des photos

Une fois les images collectées, ces dernières sont traitées avec le logiciel *Metashape* .

Il faut d'abord identifier manuellement sur chacune des photos les balises GCP visibles. Ensuite les photos sont alignées par le logiciel (Figure 2.21).

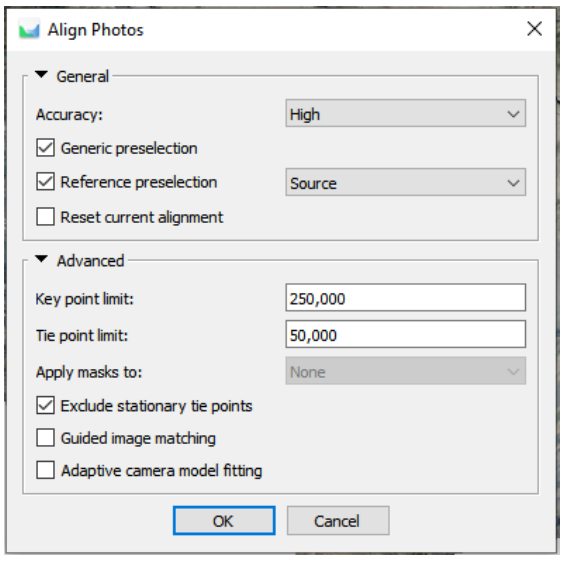


FIGURE 2.21 – Capture d'écran *MetaShape* - Alignement des images

Dans un second temps le logiciel calcule un *Dense cloud* c'est-à-dire un nuage de points en trois dimensions (x,y,z). Le résultat obtenu permet de se rendre compte de la précision du logiciel *Metashape*. En effet, on retrouve très nettement dans ce nuage de points des détails assez précis tels que les arbres morts, les buis-

sons de macrophytes, la malette du GPS et encore nos effets personnels sur la berge.

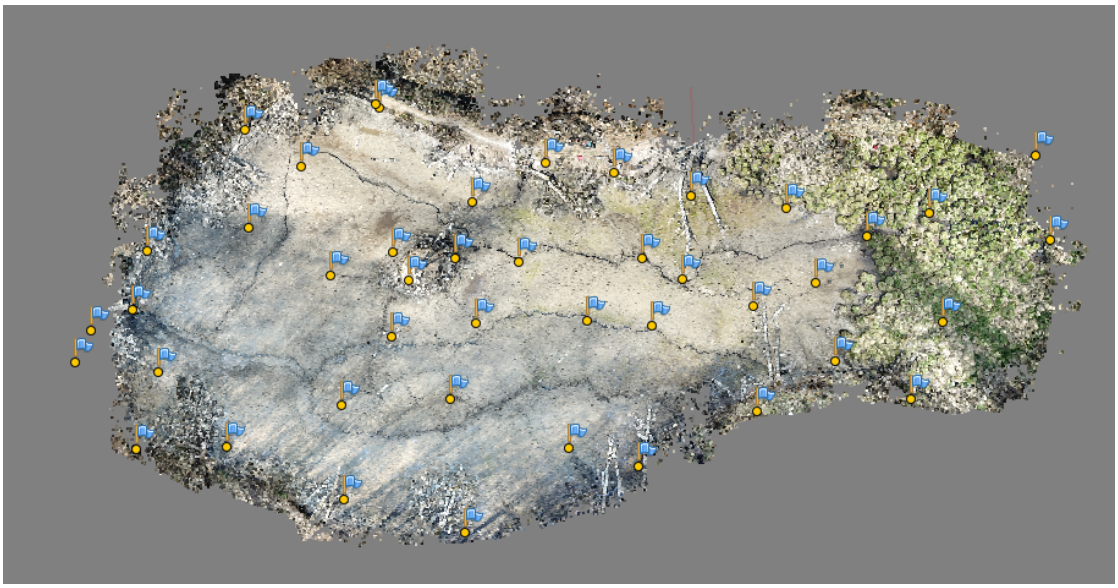


FIGURE 2.22 – Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense brut avec balises - Vue du dessus

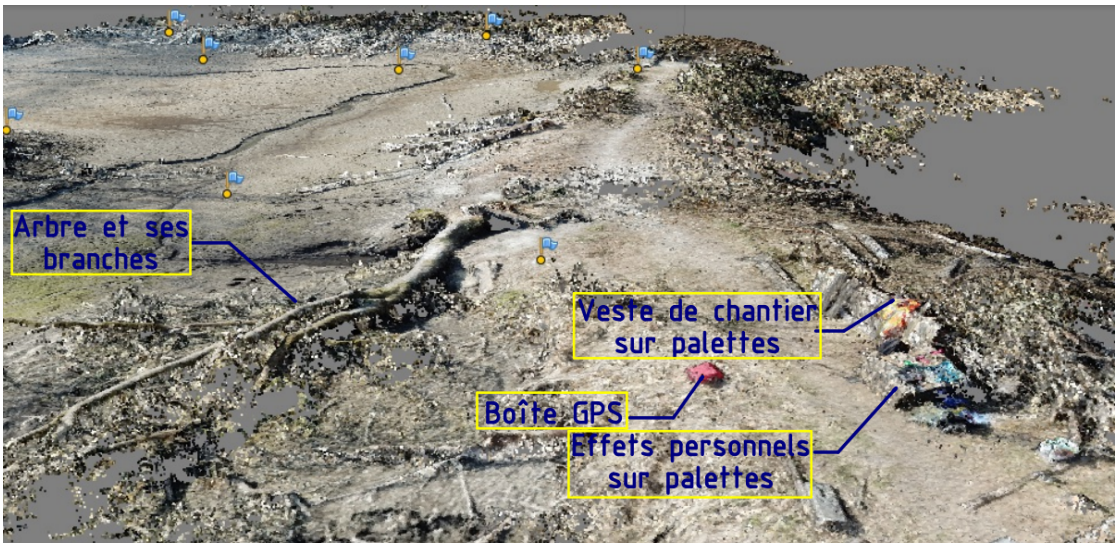


FIGURE 2.23 – Capture d'écran *MetaShape* annotée - Zoom nuage dense : détail 1



FIGURE 2.24 – Comparaison d'un capture d'écran *MetaShape* annotée (Zoom nuage dense : détail 2) et d'une prise de vue par drone

Grâce à ce nuage de points, *Metashape* permet de construire un modèle d'élévation digital (DEM). Le DEM sera ensuite exporté pour permettre son affichage dans *QGIS* ainsi que la construction d'un maillage tel que détaillé à la section *3.2 Construction du maillage*.
Un premier affichage du DEM permet de relever certains points d'attention. En effet, l'altitude varie de 60,5 à 70,2 mètres (Figure 2.26) alors que les relevés des positions GPS des balises placées sur les berges et au fond de l'étang indiquent des altitudes comprises entre 60,2 et 64,7 mètres. En regardant de près le nuage

dense de points (Figure 2.25), il apparaît qu'un certain nombre de points sont anormalement hauts ; cette pollution du nuage est due à la présence d'arbres. En excluant manuellement cet ensemble de points (Figure 2.27), le DEM obtenu épouse mieux les berges et les détails ressortent davantage (Figure 2.28).

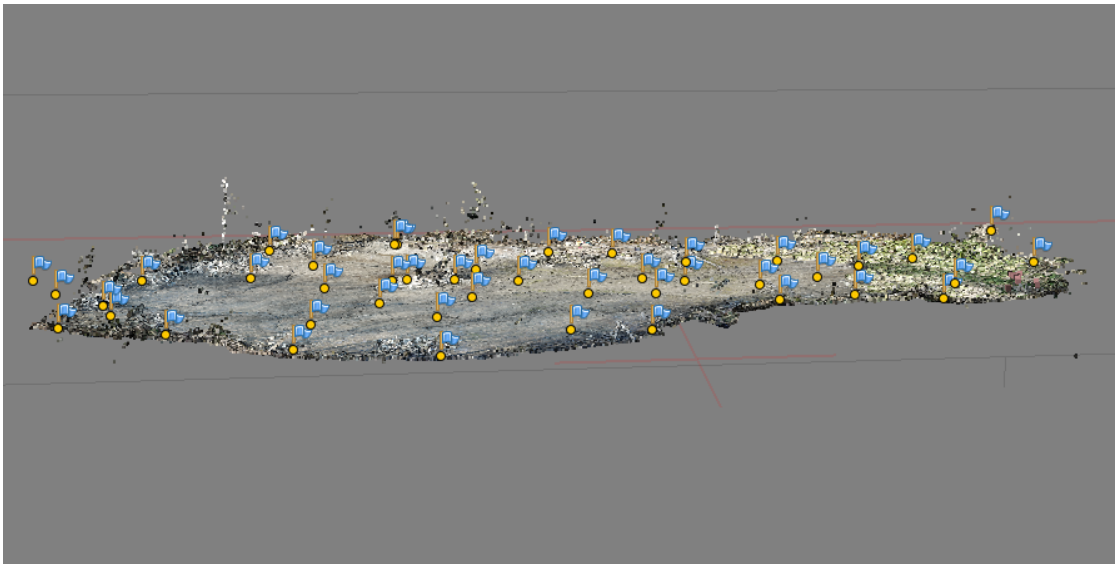


FIGURE 2.25 – Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense de points bruts

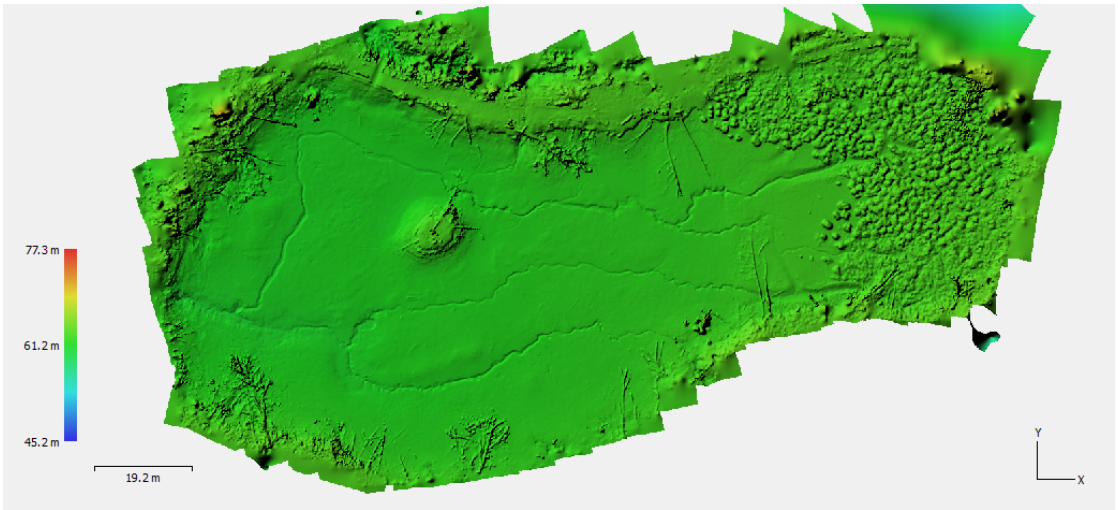


FIGURE 2.26 – Capture d'écran MetaShape - DEM obtenu à partir du nuage dense de points non traités

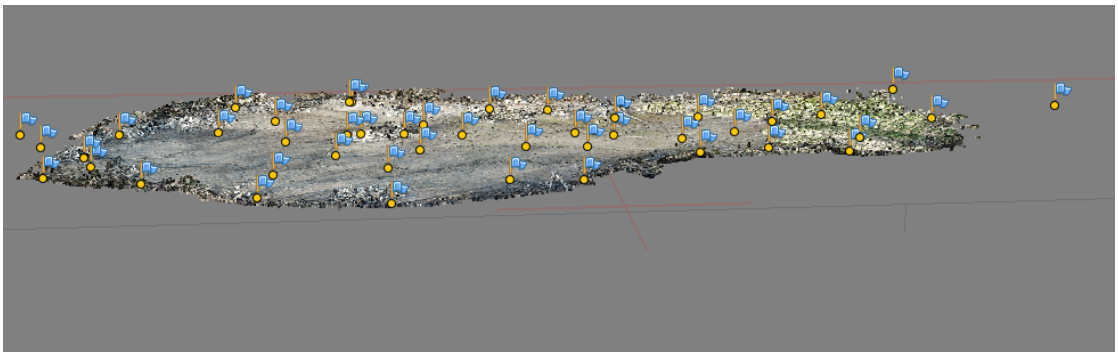


FIGURE 2.27 – Capture d'écran *MetaShape* - Nuage dense de points traités

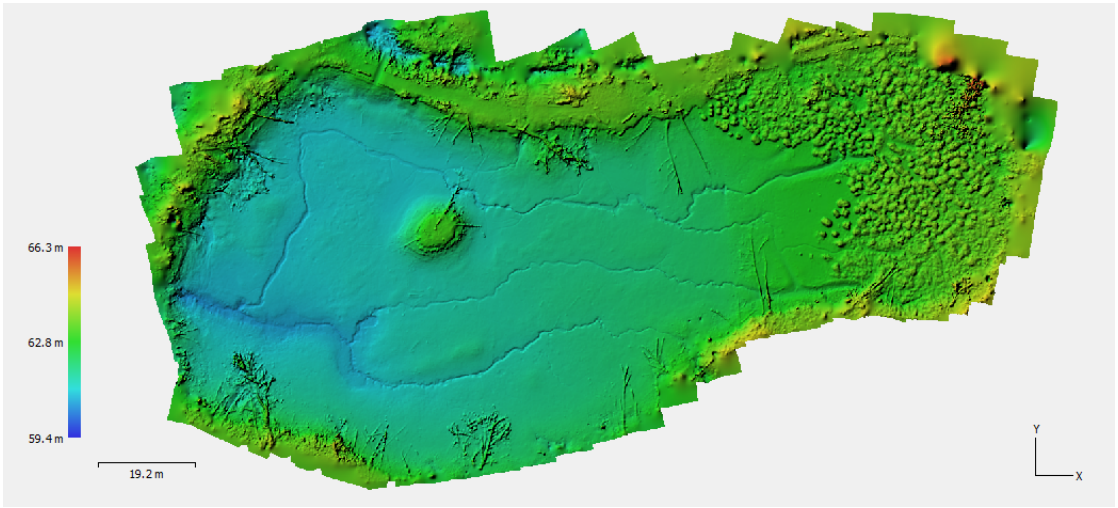


FIGURE 2.28 – Capture d'écran MetaShape - DEM obtenu à partir du nuage dense de points traités

En outre, on remarque aussi des zones où il manque de l'information (présence d'obstacles, nombres de photos ou recouvrement plus faible), *Metashape* va alors interpoler grâce aux données avoisinantes, comme présenté aux figures 2.29 et 2.30. Grâce aux vols de drone successifs, différents DEM ont pu être obtenus. C'est donc le dernier DEM produit qui sera utilisé pour construire le maillage. Et qui, à son tour, permettra de modéliser les écoulements.

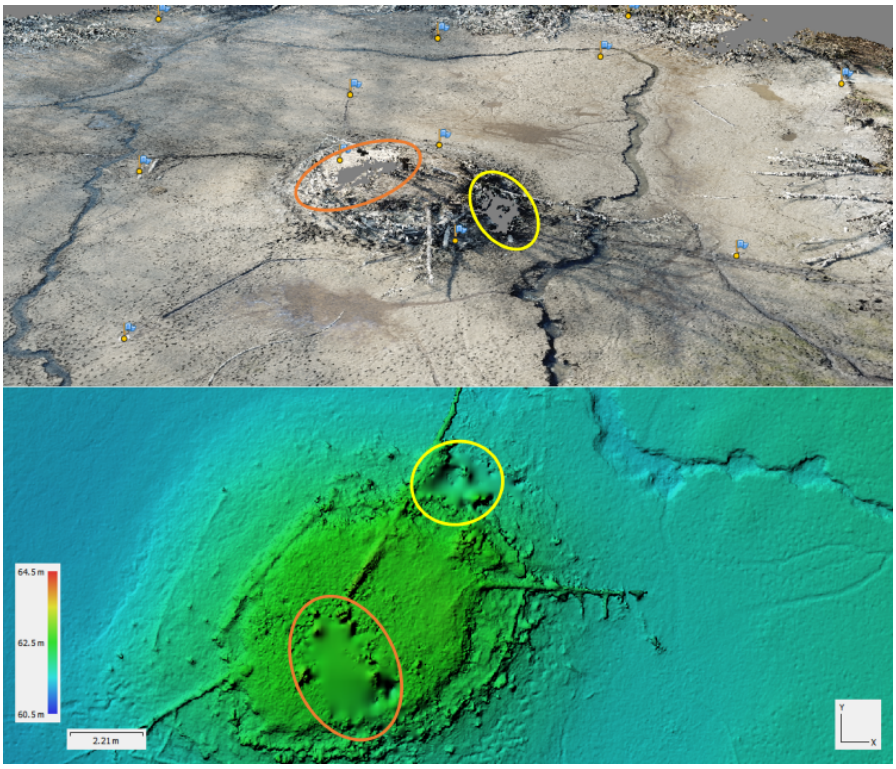


FIGURE 2.29 – Capture d'écran MetaShape - Manque de data dans nuage dense de points (trou) et interpolation du DEM au niveau de l'île

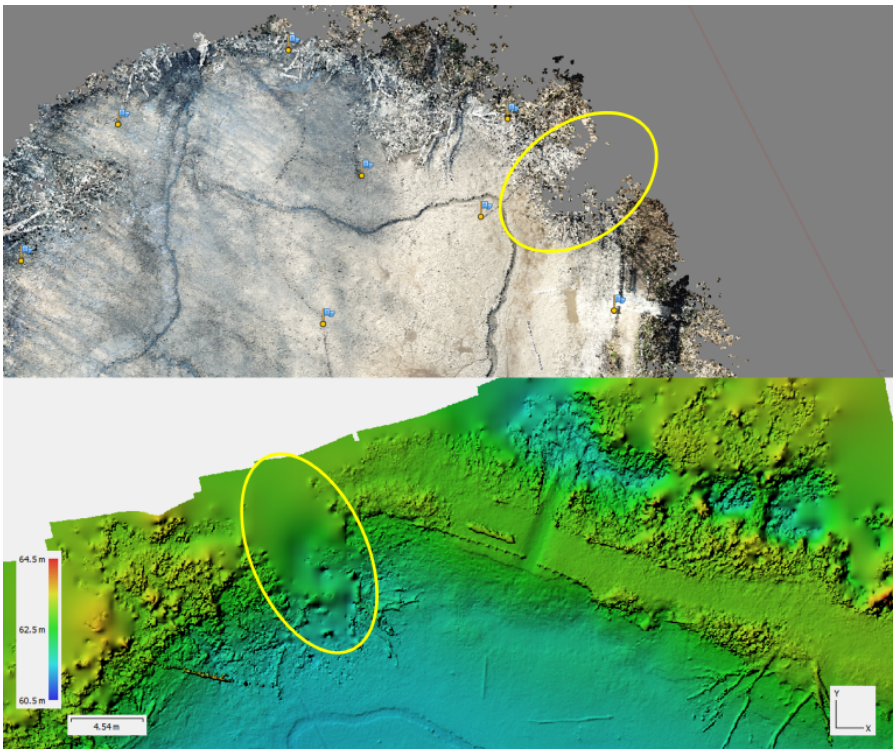


FIGURE 2.30 – Capture d'écran MetaShape - Manque de data dans nuage dense de points (trou) et interpolation DEM dans un coin de l'étang

Enfin, *MetaShape* permet d'exporter une orthophoto, c'est-à-dire un assemblage de l'ensemble des photographies aériennes alignées. Cette dernière permet, entre autres, de mieux identifier les écoulements entre les macrophytes et dans l'étang lui-même.

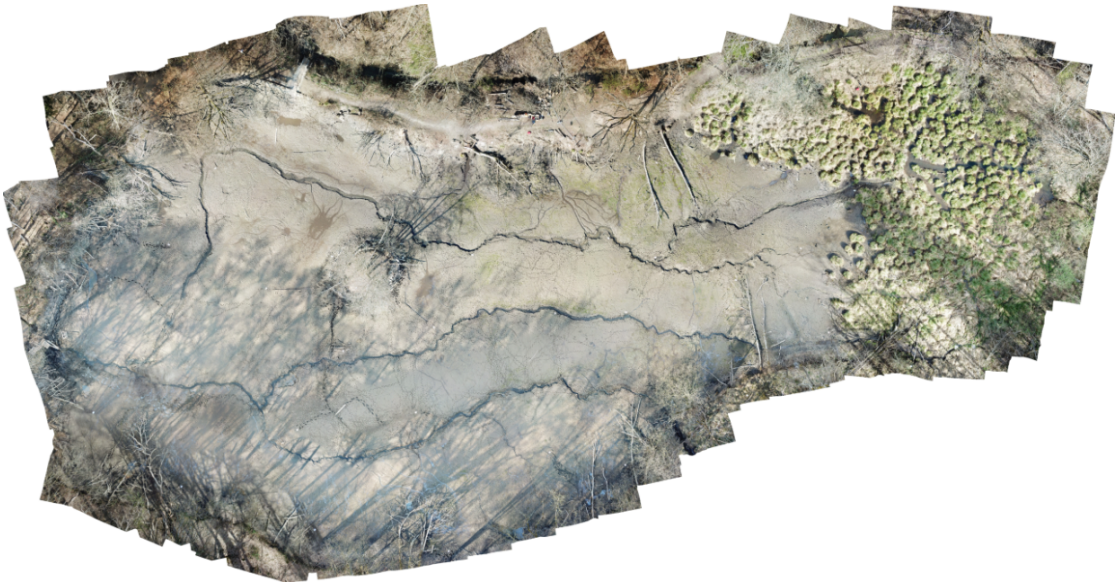


FIGURE 2.31 – Orthophoto obtenue avec *MetaShape*

2.4.5 Limitations du traitement d'image

Dans cette section seront mentionnées les limitations de la méthode utilisée pour obtenir le DEM.
Comme dit précédemment, certaines zones sont interpolées dû à un manque d'information à certains endroits sur l'étang.
Aussi, les arbres tombés ne peuvent pas facilement être retirés à la main du nuage de point. Ces arbres faussent donc la coordonnée d'altitude renvoyée par le DEM, le but ici, étant d'obtenir l'altitude du fond de l'étang et non des arbres qui y sont tombés.

Plusieurs DEM on été produits. Ici sera calculée l'erreur quadratique moyenne d'altitude de ces DEM, avec pour références les positions GPS des balises GCP.
Un DEM réalisé par LIDAR sera également utilisé à titre de comparaison. Par contre, il est supposé que le vol LIDAR a été fait avec l'étang rempli. Dès lors, seul les points habituellement hors de l'eau peuvent être comparés.
Sur la Figure 2.15, il est possible de voir le positionnement des balises et en *Annexe C* est détaillé le calcul de l'erreur.
Les balises habituellement hors de l'eau sont donc les balises sur les berges (1 à 10)), sur l'île (18) et enfin dans les macrophytes (37 à 40).
Un récapitulatif de l'erreur quadtratique moyenne calculée est disponible dans le tableau 2.5. Le DEM choisi est donc le troisième, son erreur quadratique moyenne étant la plus faible.

DEM	Erreur quadratique moyenne $[m]$
DEM LIDAR	1.3895
DEM 1	3.9022
DEM 2	0.3892
DEM 3	0.3747

TABLE 2.5 – RMSE des différents Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Finalement, pour parfaire le DEM, l'idéal serait de refaire un vol de drone lorsque les arbres tombés seront évacués. Aussi, celui-ci ne peut pas voler partout, surtout proche des berges, car les arbres représentent un obstacle. Il serait donc judicieux de réaliser des photos proches des berges à l'aide d'un autre outil, comme par exemple, une caméra GoPro [5] attachée à une longue perche.

5. https ://gopro.com/fr/fr/

Chapitre 3

Modélisation et simulation

Les données récoltées au chapitre précédent permettent de simuler l'écoulement et le transport de sédiments dans l'étang. Dans ce chapitre seront donc successivement présentés les calculs d'écoulement et de transport de sédiments, la construction du maillage, les données d'entrée de la simulation, les paramètres étudiés, les résultats obtenus et enfin les limites auxquelles se soumettent les simulations.

3.1 Fondements théoriques de SVE2D

Le logiciel SVE2D, développé notamment par Sandra Soares Frazão (*Soares-Frazão and Yves Zech, 2010 [41]*), repose calculatoirement sur les équations de Saint-Venant en deux dimensions couplées à l'équation d'Exner.

- Les équations de Saint-Venant :

  Ces équations sont dérivées des équations de Saint Venant unidimensionnelles grâce aux équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement ainsi qu'à l'estimation d'une profondeur moyenne sur le volume de contrôle (*Kamboh et al., 2015 [13]*). Elles se formulent ainsi :

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial zu}{\partial x} + \frac{\partial zv}{\partial y} = 0 \tag{3.1a}$$

$$\frac{\partial zu}{\partial t} + \frac{\partial zu^2 + gz^2/2}{\partial x} + \frac{\partial zuv}{\partial y} = gz(S_{0x} - S_{fx}) \tag{3.1b}$$

$$\frac{\partial zu}{\partial t} + \frac{\partial zv^2 + gz^2/2}{\partial y} + \frac{\partial zuv}{\partial x} = gz(S_{0y} - S_{fy}) \tag{3.1c}$$

  Où l'équation (3.1a) est l'équation de continuité, les équations (3.1b) et (3.1c) sont les équations de conservation de la quantité de mouvement en x et en y ; z $[m]$ est la profondeur, u $[m/s]$ et v $[m/s]$ sont, respectivement, les vitesses

dans les directions x et y ; g $[m/s^2]$ est l'accélération de la pesanteur ; S_{0x}, S_{fx} et S_{0y}, S_{fy} sont les pentes de surface d'eau (S_0) et d'énergie (S_f) respectivement dans les directions x et y, et t $[s]$ représente le temps.

- L'équation d'Exner :

Cette équation repose sur le principe de la conservation de la masse sédimentaire entre les différentes couches qui forment le lit de la rivière (Voir Figure 3.1). Ainsi, appliquer les équations de conservation de la masse pour l'eau et pour les sédiments dans les différentes couches puis utiliser une équation de continuité à l'interface entre lesdites couches, permet de formuler l'équation de continuité sédimentaire suivante :

$$(1-\Phi)\frac{\partial A_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(AC\hat{x}) + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \tag{3.2}$$

où :

— Φ est la porosité du lit sédimentaire

— $\dfrac{\partial A_0}{\partial t}$ représente la variation temporelle de hauteur (l'érosion) du lit (zone brune Figure 3.1)

— $\dfrac{\partial}{\partial t}(AC\hat{x})$ représente la variation temporelle de la quantité de sédiments stockés dans la colonne d'eau

— $\dfrac{\partial Q_s}{\partial x}$ représente le bilan de sédiment entrant/sortant du volume de contrôle

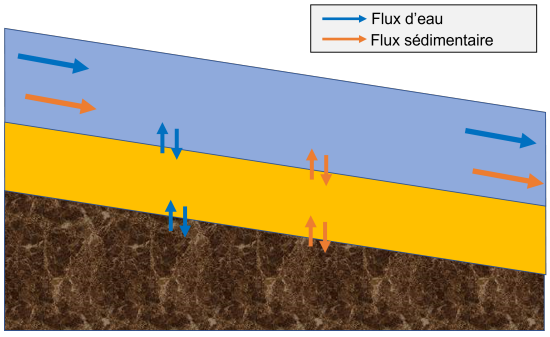


FIGURE 3.1 – Illustration des flux dans les équations de Exner

3.2 Construction du maillage

Une fois le DEM obtenu grâce à *MetaShape* validé, il peut enfin être exploité dans la modélisation.

3.2.1 Méthodologie

Premièrement le logiciel *QGIS* est utilisé pour visualiser ce DEM. Ensuite, grâce à cette visualisation, un contour de l'étang peut être tracé.

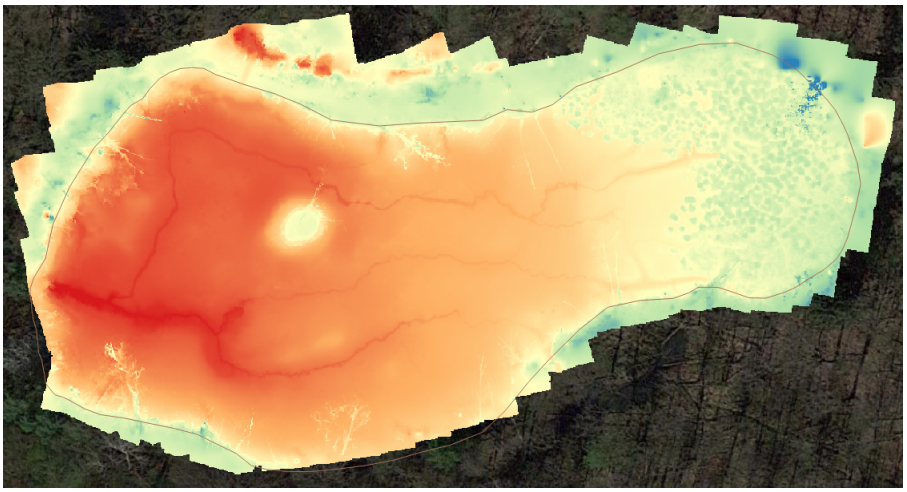


FIGURE 3.2 – Visualisation de la DEM avec *QGIS* et tracé du contour de la zone étudiée.

Grâce à une extension de *QGIS*, il est possible d'extraire les coordonnées GPS en x et y des points formant le contour [22]. Le fichier de points est ensuite lu par *GMSH*. Dans *GMSH*, il est possible de définir la précision du maillage autour de certains points. Il est, par exemple, intéressant de raffiner le maillage proche des différentes entrées et sorties de l'étang. Il est également possible de définir différentes zones physiques auxquelles de multiples paramètres peuvent être attribués.
Ensuite, *GMSH* va générer un maillage 2D, c'est-à-dire un recouvrement par des triangles sur toute la surface de l'étang. Le nombre de triangles, appelés cellules, impactera le temps de calcul de chaque simulation. Dès lors, un maillage plus grossier sera utilisé dans un premier temps pour ensuite s'orienter vers un maillage plus fin.

Les 4 zones définies sont présentées ici :

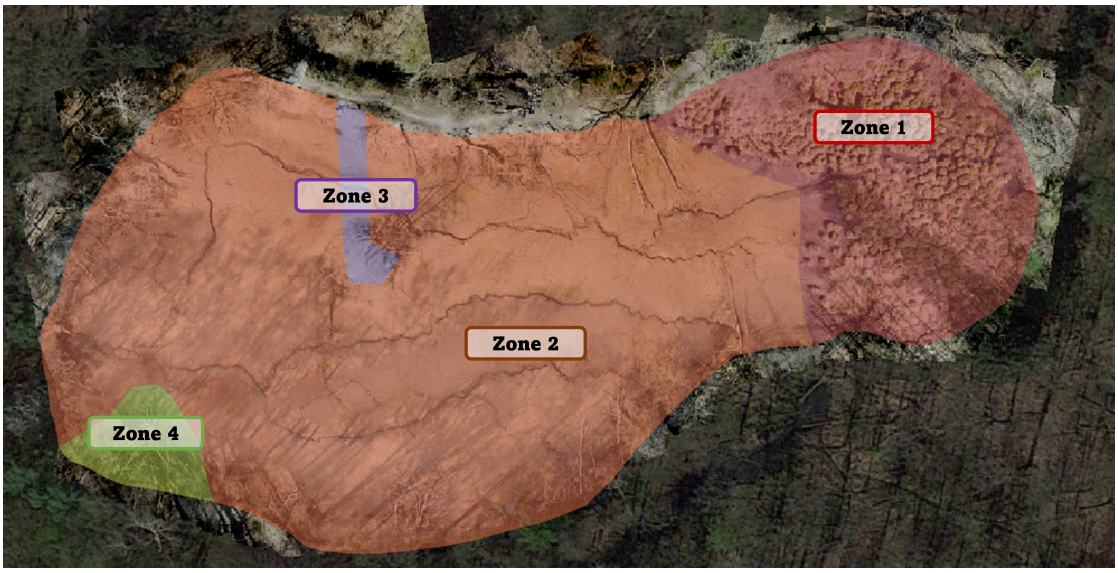


FIGURE 3.3 – Carte des zones physiques

- Zone 1 : Zone de végétation, très irrégulière en altitude

En effet, les entrées d'eau arrivent dans une zone emplie de végétation (macrophytes), l'altitude dans cette zone varie beaucoup. Cette zone sera donc traitée de manière à remplacer la topographie très irrégulière par une pente lisse et constante. Un coefficient de Manning plus élevé ($n_1 = 0,1\ [s/m^{1/3}]$) y est imposé pour représenter la rugosité importante due à la présence de macrophytes.



FIGURE 3.4 – Zone 1

Cette zone s'étend, selon l'axe des x, sur 67 $[m]$, entre les deux points les plus éloignés de la zone (Figure 3.4, points 1 et 2). La différence de hauteur est de 0.47 $[m]$, le point le plus bas étant le point 1 et le plus haut le point 2.

- Zone 2 : Zone d'eau principale de l'étang
  Dans cette zone les altitudes imposées aux noeuds du maillage sont fixées par le DEM. Cette altitude est récupérée dans la DEM avec *QGIS*[1] en utilisant l'outil "Point Sampling Tool".[8]
- Zone 3 : Zone fictive entourant l'île
  Permet de raffiner le maillage autour de l'île. Son altitude est récupérée de la même manière que pour la Zone 2.
- Zone 4 : Arbre gênant
  Lors des premières simulations, il s'est avéré qu'un arbre tombé près de la

nouvelle sortie envisagée faussait l'altitude et que cette anomalie modifiait de manière significative l'écoulement dans l'étang. L'altitude de cette zone a donc été fixée constante à l'altitude de la balise la plus proche (Balise 6 - Figure 2.15), lorsque l'altitude obtenue est supérieure à cette valeur. Si elle est inférieure, elle est gardée.

L'implémentation des caractéristiques des zones sus-décrites se fait via *Matlab* qui permet d'y définir le niveau de fond, les conditions initiales : la hauteur de sédiments et d'eau, les débits initiaux.
C'est également dans *Matlab* que seront définies les conditions frontières du maillage ; les berges, les segments d'entrée et de sortie et le comportement à ces segments.
En sortie de Matlab, on obtient 4 types de fichiers :

- Fichier .nod : Contenant les positions géographiques x, y et z des noeuds.
- Fichier .zbr : Contenant l'altitude de la roche-mère, par cellule.
- Ficher .cel : Contenant les positions x et y des cellules [m], les hauteurs du lit sédimentaire h_s [m], les hauteurs d'eau h [m], les débits en x et en y : q_x et q_y, $[m^2/s]$) et finalement les coefficients de Manning [/].
- Ficher .bc contenant les noeuds qui identifie les segments auxquels s'appliquent des conditions frontières particulières, c'est à dire autre qu'une simple frontière non transmissive. On peut y imposer un niveau d'eau, un hydrogramme, un débit constant (aux entrées) ou les rendre transmissives (aux sorties)

Un dernier fichier est utile, avec l'extension .int. Il reprend toutes les interfaces du maillage et leur attribue les conditions frontières décrites dans le fichier .bc.
Ces fichiers seront utilisés par la suite dans la simulation hydraulique basée sur les équations de Saint Venant et d'Exner (Section 3.1).

3.2.2 Hypothèses

Dans cette sous-section sont présentées les hypothèses propres à la création du maillage.

- Le déversoir actuel n'est pas modifié et est donc encore considéré comme transmissif avec une altitude de 62,8 $[m]$ en son point le plus bas.
- Certains points sont hors de la DEM sur le contour, dès lors, s'ils font partie de la berge, leur altitude est fixée à 63 $[m]$ d'altitude, sur base de mesures prises au GPS sur la berge. Les autres points sont fixés à 62,65 $[m]$, ce qui parait être une bonne approximation de l'altitude des points proches des berges là où le DEM permet de connaître l'altitude réelle.
- La hauteur de sortie est fixée empiriquement à 62,72 $[m]$
- Le débit de la source est injecté sur une largeur de 0,12 $[m]$, sur base des canaux visibles sur l'orthophoto et de la mesure de la section faite lors des mesures au moulinet du débit à la source.
- Le débit prélevé du Blanc-Ry est injecté sur une largeur de 0,45 $[m]$, sur base des canaux visibles sur l'orthophoto et de mesures faites sur place.
- L'altitude maximale de la zone 4 est fixée à 61,7874 $[m]$ sauf sur les berges, pour diminuer l'imprécision causée par la présence d'un arbre.

3.2.3 Les différents maillages

Les maillages présentés ci-dessous ont suivi un processus de développement progressif. En effet, les résultats obtenus au fur et à mesure ont soulevé des questionnements dont les réponses se sont concrétisées dans la création de nouveaux maillages successifs. Voici donc la liste des maillages utilisés pour les simulations présentées :

Maillage 1 :

Le premier maillage est composé uniquement des zones 1, 2 et 3. Il est le fruit d'un processus de construction par essai-erreur. Les simulations réalisées sur ce premier maillage ont permis d'orienter les modifications apportées sur les maillages suivants.

Zones	1, 2 et 3
Nombre de cellules	7384
Altitude zone 1	Lissée
Altitude zone 4	Corrigée

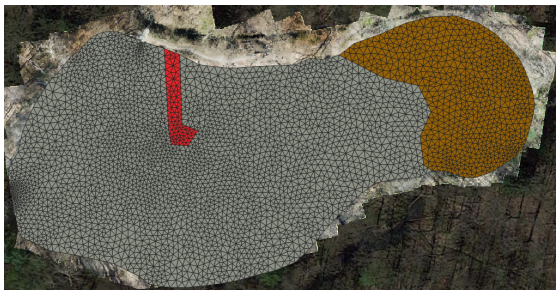


FIGURE 3.5 – Visuel QGIS - Maillage 1

Maillage 2 :

Ici, la zone 4 est ajoutée. Sur les figures 3.7 et 3.8, l'arbre faussant les résultats est bien visible. C'est cette zone qui est "lissée" pour corriger l'erreur d'altitude de la zone due à l'arbre. De plus, le maillage proche des zones des entrées et de la sortie a été plus raffiné.

Zones	1, 2, 3 et 4
Nombre de cellules	5144
Altitude zone 1	Lissée
Altitude zone 4	Corrigée

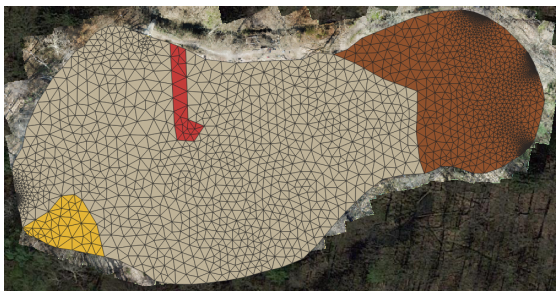


FIGURE 3.6 – Visuel QGIS - Maillage 2

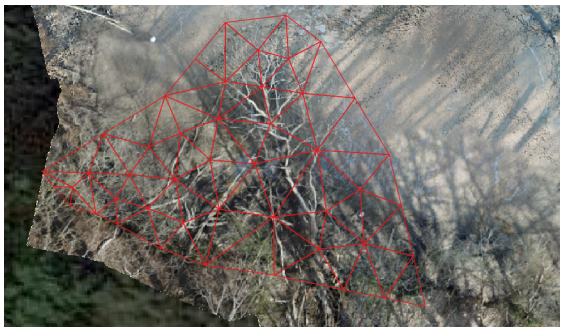


FIGURE 3.7 – Visuel QGIS - Orthophoto de la zone 4

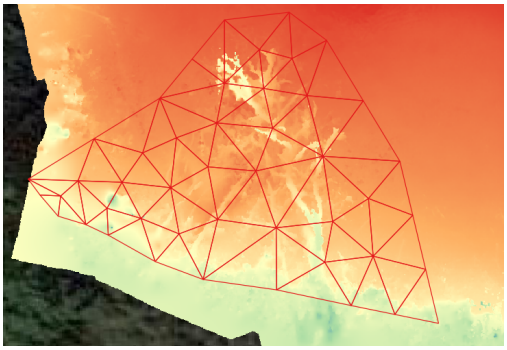


FIGURE 3.8 – Visuel QGIS - DEM de la zone 4

Maillage 3 :

Pour ce maillage, la zone 1 a été supprimée puisque les résultats de simulation d'écoulement dans cette zone ne sont pas exploitables. L'objectif premier qui était de remplacer la zone des macrophytes par une faible pente à plus haut coefficient de Manning n'était pas concluant. Le résultat attendu était la formation d'un delta, en ressemblance avec l'état actuel dans les macrophytes. Malheureusement les simulations n'ont pas donné les résultats attendus. Pire, cela dégrade l'étude des résultats dans les zones 2, 3 et 4. Afin de pouvoir tout de même étudier l'impact de la position d'entrée sur l'écoulement, des chenaux sinuants entre les macrophytes ont été identifiés sur l'orthophoto (Figure 3.17) :

Zones	2, 3 et 4
Nombre de cellule	2982
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée

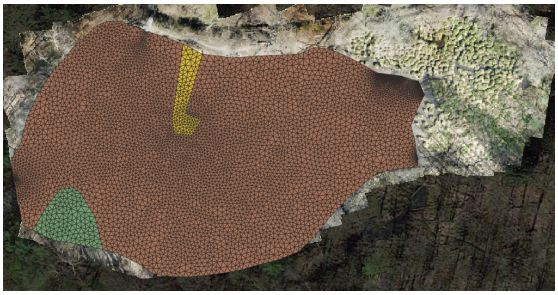


FIGURE 3.9 – Visuel QGIS - Maillage 3

Maillage 4 :

Les résultats des simulations effectuées avec le maillage 3 semblaient cohérents à première vue. Afin de confirmer la validité de ces résultats, un maillage très fin à été créé permettant de vérifier que le raffinement du maillage 3 est suffisant pour que les calculs d'écoulement soient corrects. En effet, il est courant d'observer pour des simulations de ce type que des cellules trop grandes ne permettent pas de rendre compte des phénomènes hydrauliques dans leur complexité.

Zones	2, 3 et 4
Nombre de cellule	28081
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée



FIGURE 3.10 – Visuel QGIS - Maillage 4

Maillage 5 :

Pour pouvoir exécuter les simulations plus rapidement, un maillage moins dense que le maillage 4 fut créé.

Zones	2, 3 et 4
Nombre de cellule	9310
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée

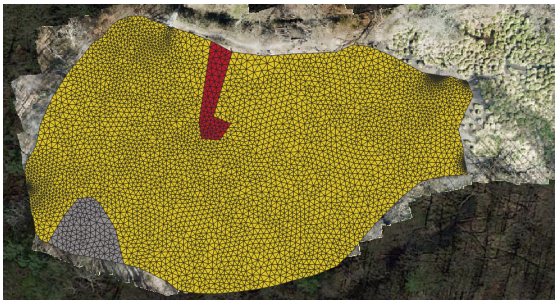


FIGURE 3.11 – Visuel QGIS - Maillage 5

Maillage 6

La distribution de l'écoulement du maillage 5 ne collait pas avec le maillage 4, ce maillage possède donc un raffinement intermédiaire au maillage 4 et 5.

Zones	2, 3 et 4
Nombre de cellule	16636
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée

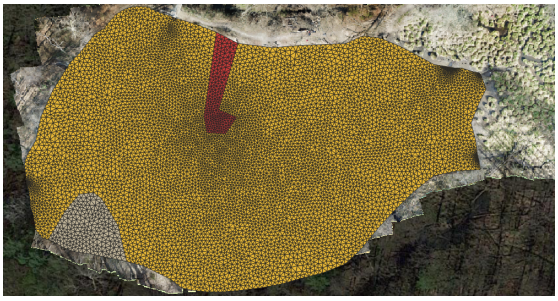


FIGURE 3.12 – Visuel QGIS - Maillage 6

Maillage 7

Ce maillage est créé avec certains aménagements. Dans ce cas-ci, il a été décidé d'ajouter des épis pour essayer de concentrer le flux dans une certaine zone de l'étang dans l'objectif de favoriser un chenal d'écoulement principal bordé de zones de recirculation et donc d'atterrissage des sédiments. La vitesse étant concentrée

dans le chenal ainsi créé, permettrait d'y augmenter la contrainte d'arrachement et d'y diminuer l'atterrissage de sédiments.

Zones	2, 3 et 4
Nombre de cellule	6377
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée

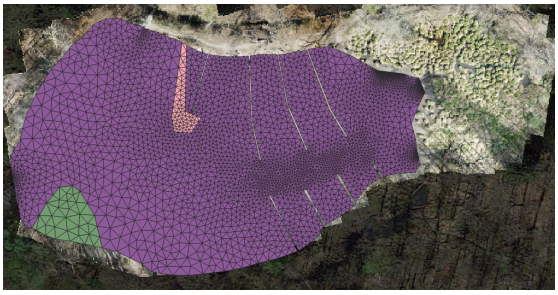


FIGURE 3.13 – Visuel QGIS - Maillage 7

Maillage 8

Pour continuer à étudier l'effet d'épis sur l'écoulement, un dernier maillage fut créé, comprenant davantage d'épis que le maillage 7.

Zones	2 et 4
Nombre de cellule	9381
Altitude zone 1	N/A
Altitude zone 4	Corrigée

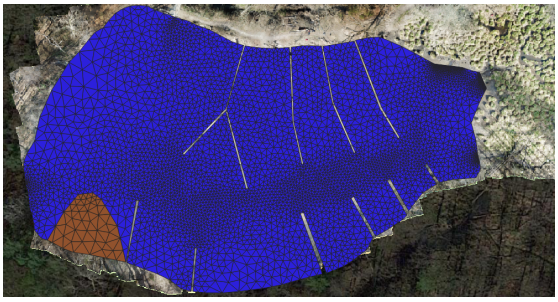


FIGURE 3.14 – Visuel QGIS - Maillage 89

3.3 Adaptation du code au cas d'étude

Une fois que le maillage est pré-traité par *Matlab*, qui va créer les fichiers mentionnés ci-dessus (Section *3.2.1 Méthodologie*) c'est la version Weakly Coupled, parallélisée du logiciel de calcul *SVE2D* [41] (*Meurice et Soares Frazao, 2020 [16]*) qui, à son tour, va pouvoir appliquer des méthodes de calcul hydraulique reposant sur du calcul par volumes finis et permettre d'obtenir les résultats numériques du comportement hydraulique de l'étang. Cette version de *SVE2D* est éditée et compilée sur Code : :Blocks.
Un code *Matlab* permet enfin de visualiser ces résultats. Les équations utilisées dans *SVE2D* ont déjà été présentées (Section *3.1 Fondements théoriques*). Ici vont donc être exposées les modifications apportées aux différents codes (*SVE2D, Matlab*) afin d'adapter la simulation au cas d'étude.

3.3.1 SVE2D - Loi de transport

La loi de transport initialement implémentée dans le code *SVE2D* est celle définie par Meyer-Peter et Müller (*Meyer-Peter et Müller, 1948 [24]*) (Équation

3.3). Cette loi donne des résulats valides pour un diamètre médian de sédiments se situant dans l'intervalle [0,4 ; 29] $[mm]$. Or, les sédiments qui forment le lit du Blanc-Ry ont un diamètre bien inférieur à cet intervalle.

$$q_s^* = 8(\tau^* - \tau_c)^{1,5} \tag{3.3}$$

Avec q_s^*, le transport solide adimensionnel, τ^* et τ_c, la contrainte et la contrainte critique adimensionnelles.
C'est la loi définie par Camenen et Larson (*Camenen et Larson, 2005 [23]*) (Équation 3.4) qui fut utilisée en lieu et place de celle de Meyer-Peter et Müller. En effet, la zone de validité de cette loi, plus large, se situe dans l'intervalle [0,08 ; 200] $[mm]$ de diamètre médian. Les sédiments étudiés ici ayant un diamètre médian de 0,165 $[mm]$ sont bien dans l'intervalle de validité. Sur la figure 3.15, il est possible d'observer les différents résultats donnés par les deux lois de transport.

$$q_s^* = 12{\tau^*}^{1,5} e^{-4,5\frac{\tau_c}{\tau^*}} \tag{3.4}$$

En utilisant le diagramme de Shields et Van Rijn (Figure 3.16) (*Shields & Van Rijn, 1884 [34]*), il est possible d'obtenir la contrainte critique. Or, le diamètre adimensionnel est obtenu par :

$$d_* = d_{50}\left[\frac{g(s-1)}{\nu^2}\right]^{1/3} = 3,7[/] \tag{3.5}$$

La contrainte critique est ensuite obtenue graphiquement : $\tau_c = 0,058$ (Figure *3.16*)

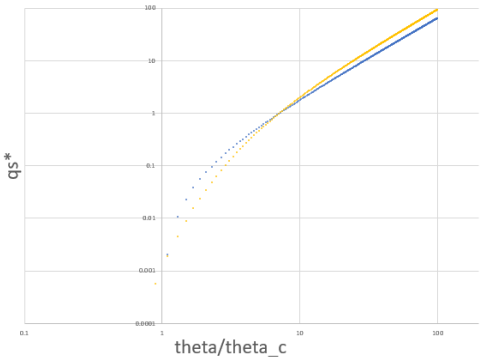


FIGURE 3.15 – Comparaison entre MPM (bleu) et Camenen (jaune)

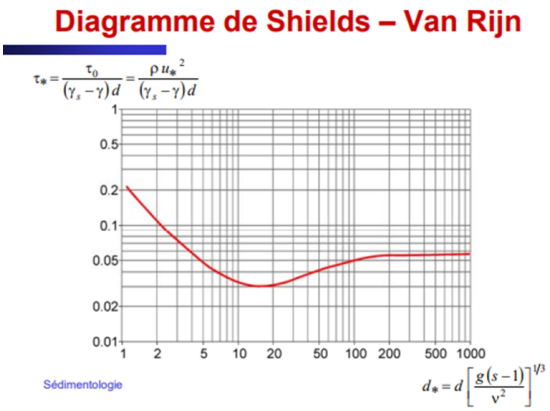


FIGURE 3.16 – Contrainte critique en fonction du diamètre adimensionnel

Ensuite, en s'appuyant sur Camenen et Larson, cette valeur fut comparée à celle obtenue par la formule de Soulsby (*Soulsby, 1997 [31]*) :

$$\tau_c = \frac{0,3}{1+1,2d_*} + 0,055(1 - e^{(-0,02d_*)}) = 0,0587 \tag{3.6}$$

Ce résultat confirme la valeur obtenue graphiquement.
Finalement, il a fallu calculer la dérive partielle en h, la hauteur d'eau de cette loi de transport.

$$q_s^*(h) = \frac{Ae^{Bh^{7/3}}}{h^{7/3}} \tag{3.7}$$

$$\frac{\delta q_s^*}{\delta h} = \frac{7Ae^{Bh^{7/3}}(Bh^{7/3}-1)}{3e^{h^{10/3}}}$$
$$A = \frac{12q^2n^2}{(s-1)d_{50}} \quad B = \frac{-4,5\tau_c(s-1)d_{50}}{q^2n^2}$$

Avec h, la hauteur d'eau, q, le débit en $[m^2/sec]$, n, le coefficient de Manning, s, la densité par rapport à l'eau et d_{50} le diamètre médian

3.3.2 SVE2D - Autres améliorations

D'autres améliorations mineures furent ajoutées dans le code :

- Débit solide en sortie : création d'une variable publique pour pouvoir écrire le débit solide dans les fichiers de résultats.
- *set_precision* : Les coordonnées de cellules dans les fichiers de sortie étaient affichés en nombre entier, lorsque l'on voulait afficher ces cellules sur *QGIS*, les arrondis étaient problématiques. Cette fonction permet simplement de fixer le nombre de chiffres après la virgule à afficher.
- Avec l'aide de Robin Meurice, plusieurs lignes de code furent modifiées, surtout dans le but de débugger le code avec certaines simulations et de faire fonctionner les capteurs. Ces capteurs sont fixés à une certaine position x et y, et retournent les valeurs de hauteur d'eau et de sédiments, et les composantes en x et y du débit. Ces capteurs sont fixés aux cellules près de la sortie et du déversoir. Cela permet de ne pas devoir rechercher la ligne correspondant à chaque cellule dans les résultats. Néanmoins, l'écriture du fichier résultant des capteurs est toujours un peu différée par rapport au temps de simulation. Généralement, il manque les 3000 dernières secondes de simulation dans ce fichier.

3.3.3 Matlab - Affichage des résultats

Dans le code Matlab fourni, il fut rajouté une fonction permettant d'afficher certains vecteurs vitesse (aléatoirement) dans les cellules, ce qui permet facilement d'observer s'il y a recirculation et comment se comporte le flux près des entrées et sorties, etc.

3.4 Les paramètres étudiés

Dans cette section seront présentés les différents paramètres étudiés.

3.4.1 Variation du débit prélevé

Le Blanc-Ry n'est pas dévié à 100%, le but est qu'il s'écoule encore en partie dans son lit actuel. Il est possible de prélever de 50% à 70% de son débit médian.

3.4.2 Variation de la position d'entrée

Trois positions d'injection du débit du Blanc-Ry sont étudiées. La première proche du Blanc-Ry lui même, là où à lieu un faible débordement dû aux castors, appelée position BR.
La deuxième, proche du débordement actuel du Blanc-Ry dans l'étang, creusé par les castors, appelée position Milieu.
Et la troisième, proche du point d'injection de la Source, au Sud-Est de l'étang, appelée Source. Sur la figure 3.17 sont identifiés les chenaux qui permettent de définir les points d'injection pour les maillages 3, 4 et 5.

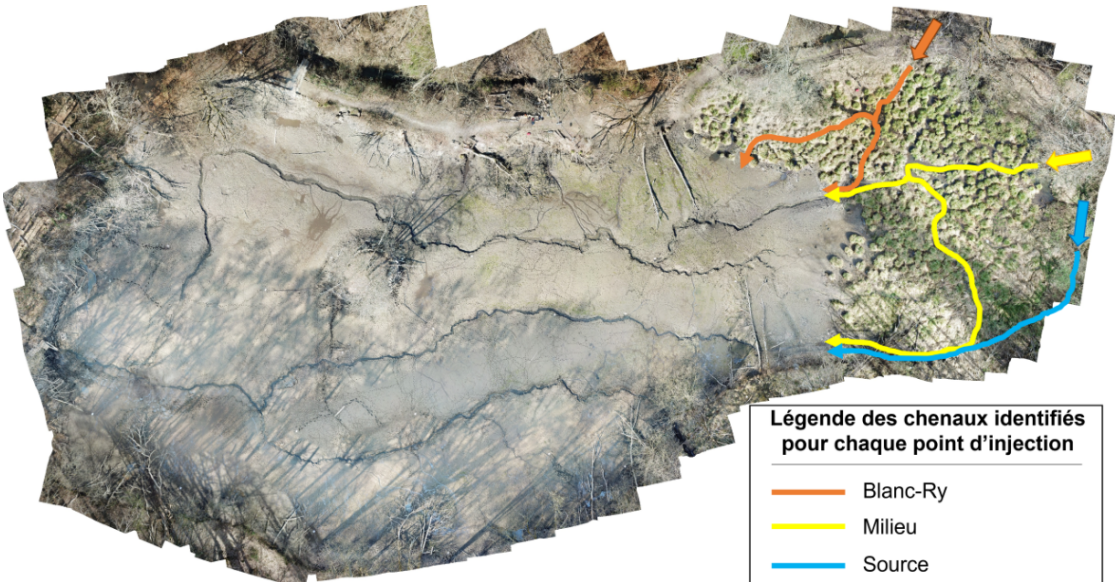


FIGURE 3.17 – Identification des chenaux - Maillage 3

3.4.3 Variation du débit en cas de crue

Un hydrogramme fut réalisé pour simuler une période de crue. En traçant les débits mesurés en fonction du temps, il est possible de repérer une période de crue et d'en retirer un hydrogramme typique du bassin versant. Ce dernier est ensuite mis à l'échelle afin que le pic de débit de la crue représentée par l'hydrogramme corresponde au débit d'une crue annuelle $Q_{crue,a}$ (Section *2.2 Données hydrologique*). L'hydrogramme de crue dans le Blanc-Ry est représenté à la figure 3.18. Pour les simulations, cet hydrogramme est pondéré en fonction du débit prélevé. Cet hydrogramme s'étend sur une durée de 200 000 secondes. ($\cong$ 2.5 jours)

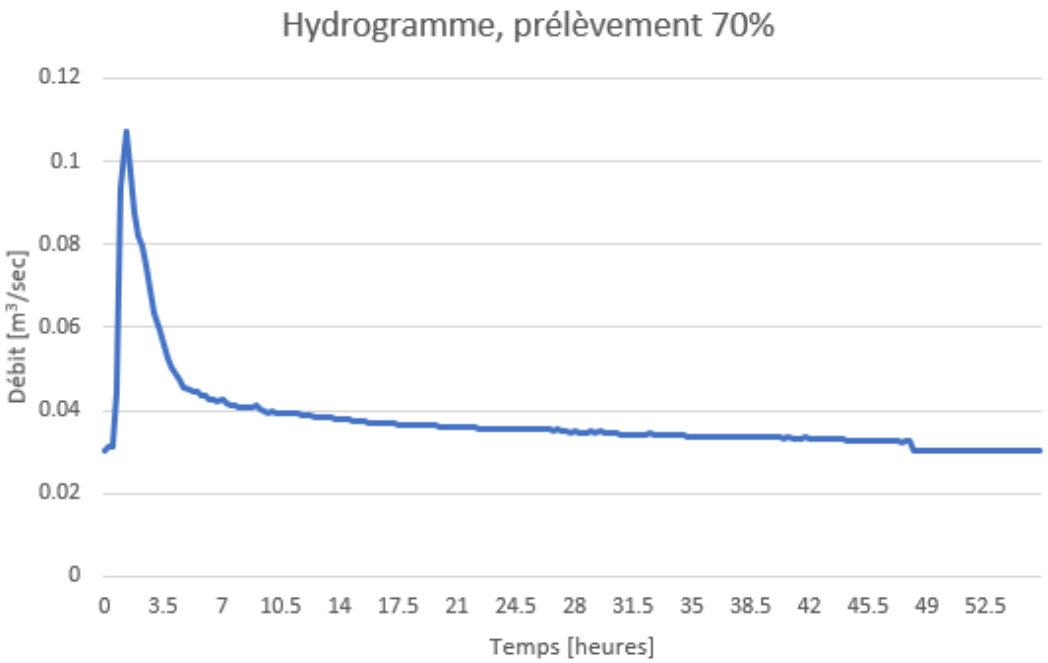


FIGURE 3.18 – Hydrogramme de crue pour un débit de prélèvement dans le Blanc-Ry de 70%

3.5 Données d'entrée

Dans cette section, les différentes grandeurs utiles à la résolution des équations du modèle sont citées. Certaines de ces données ont été mesurées sur le terrain, comme le débit de la source, d'autres viennent de données plus anciennes, comme le débit du Blanc-Ry. Pour la justification des valeurs suivantes, voir aux sections *2.1 Analyse sédimentologique* et *2.2 Données hydrologiques*.

1. Les fichiers .nod .zbr .int .cel obtenus par matlab. (Section *3.2.1 Méthodologie*)
2. Granulométrie : diamètre médian des sédiments 165 $[\mu m]$
3. La porosité Φ : 0,3 [/]
4. La densité des grains par rapport à l'eau s : 2,295 [/]
5. Le coefficient de Manning, n

$$n = 0,01[s/m^{1/3}] \tag{3.8}$$

6. Les débits liquides :
   - Débit médian dans le Blanc-Ry : 0,043 $[m^3/s]$
   - Débit prélevé du Blanc-Ry, ce paramètre est variable, de 50 à 70 %, soit entre 0,0215 et 0,0301 $[m^3/s]$, sur base du débit médian.

- Débit de la source se trouvant au Sud-Est de l'étang : 0,0032 $[m^3/s]$

7. Les débits solides :

En faisant les hypothèses suivantes, le débit solide d'entrée peut être estimé :

- Le calcul du transport solide est évalué dans les passes à poissons et à la source.
- La pente S_0 est estimée grâce à des relevés GPS sur terrain : $S_{0,passe} = \Delta h_{passe}/L_{passe} = 1,4/50 = 0,028$. Pour la source, la pente de fond est estimée à : $S_{0,source} = 3,5/50 = 0,070$. Cette donnée est soumise à une grande incertitude (mesures GPS imprécises, design des passes à poissons à préciser).
- La section considérée, pour les entrées BR, Milieu et Source, est une section rectangulaire de 45 cm de large. La section considérée pour la source est une section rectangulaire de 12 cm de large. Cette donnée est soumise à une grande incertitude (mesures GPS imprécises, design des passes à poissons à préciser).
- On considère un écoulement uniforme pour estimer la hauteur d'eau h et le rayon hydraulique R
- Le débit considéré dans la passe à poissons correspond à un prélèvement de 70 % du débit du Blanc-Ry soit 0,0301 $[m^3/s]$ ou de 50% soit 0,0215 $[m^3/s]$. Le débit de la source considéré est de 0,0032 $[m^3/s]$.

Dans un premier temps, la hauteur d'eau est calculée grâce à la formule itérative (Équation 3.9). L'itération commence avec $h_{u,0} = 1$ puis cette formule est appliquée jusqu'à ce que $h_{u,i+1} \approx h_{u,i}$

$$h_{u,i+1} = \left(\frac{Q\left(2h_{u,i}n^{\frac{3}{2}} + Ln^{\frac{3}{2}}\right)^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}L^{\frac{5}{3}}} \right)^{\frac{3}{5}} \tag{3.9}$$

On obtient $h_{u,passe,70\%} = 5$ $[cm]$, $h_{u,passe,50\%} = 3,8$ $[cm]$ et $h_{u,source} = 20,5$ $[cm]$ ce qui correspond respectivement à un rayon hydraulique $R_{passe,70\%} = 3,8$ $[cm]$, $R_{passe,50\%} = 3,2$ $[cm]$ et $R_{source} = 1,52$ $[cm]$.
La contrainte adimensionnelle est calculée :

$$\tau_0 = \rho S_0 R \tag{3.10}$$

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \tag{3.11}$$

Ensuite, grâce à l'équation de transport de Camenen et Larson (Equation 3.4), le débit solide adimensionnel est obtenu :

$$q_s^* = 12{\tau^*}^{1,5} e^{\frac{-4,5\tau_c^*}{\tau^*}} \tag{3.12}$$

où $\tau_c^* = 0,059$ est la contrainte critique calculée grâce à la formule de Soulsby (Équation 3.6)

Enfin un ordre de grandeur du débit par unité de largeur est calculé :

$$q_s = q_s^* \sqrt{g(s-1)d_{50}^3} \tag{3.13}$$

Ainsi les valeurs suivantes sont considérées :

$$\begin{aligned} q_{s,passe,70\%} &= 2,0610^{-5}[m^3/(m.s)] \\ q_{s,passe,50\%} &= 1,4210^{-5}[m^3/(m.s)] \\ q_{s,source} &= 1,9910^{-5}[m^3/(m.s)] \end{aligned}$$

3.6 Simulations

Dans cette section seront présentés les hypothèses et résultats principaux des simulations réalisées, qui seront ensuite analysés en profondeur dans le chapitre 4.

3.6.1 Hypothèses

Ici sont présentées les hypothèses communes à toutes les simulations présentées ci-après.

- Le débit du Blanc-Ry est considéré comme inchangé depuis les dernières mesures en 2011-2015.
- Le débit de la source donnant au Sud-Est est considéré comme constant dans le temps.
- La granulométrie des sédiments mesurée est considérée identique dans le Blanc-Ry et dans la source.
- Les simulations sont réalisées jusqu'à stabilisation sauf dans les cas de simulations avec sédiments.
- A partir du maillage 3, les positions d'entrées correspondent aux chenaux de la figure 3.17 et le débit nominal considéré est divisé à parts égales entre chaque bras lorsque le chenal se divise.
- Lors d'une crue l'hypothèse est faite que les chenaux vont déborder et se concentrer en position centrale. (Milieu)
- Les débits en sortie sont ceux calculés après stabilisation, et ne sont disponibles qu'a partir du maillage 4, dû à une adaptation du code qui n'était pas encore faite pour les maillages précédents.
- L'altitude initiale de la surface d'eau dans l'étang est fixée à 62,79 $[m]$ pour les simulations hors épisode de crues.
  Plusieurs simulations préliminaires, qui ne seront pas affichées ici car inexploitables, par erreur de manipulation des données lors du lancement, ou maillage incorrect, ont quand même permis d'obtenir une idée du niveau d'eau stable dans l'étang. Ce niveau se situe aux alentours de 62,795 $[m]$. Cette stabilisation est étudiée dans la prochaine sous-section 3.6.2.
- L'état initial de l'étang pour les simulations avec crues ou sédiments est l'état final des simulations hors épisode de crue comportant les mêmes conditions. (position d'entrée, débit)

3.6.2 Durée de stabilisation

Dans cette section, la durée de stabilisation à partir de la hauteur définie de 62,79 $[m]$ sera estimée.
Pour les simulations hors épisode de crue, la durée de stabilisation est de 30 000 secondes. En effet, sur la figure 3.19, le débit de sortie se stabilise. Pareillement, les différents paramètres observés (contrainte, distribution de débit,...) qui seront présentés dans la suite de ce chapitre, ne varient plus après 30 000 secondes de simulations.

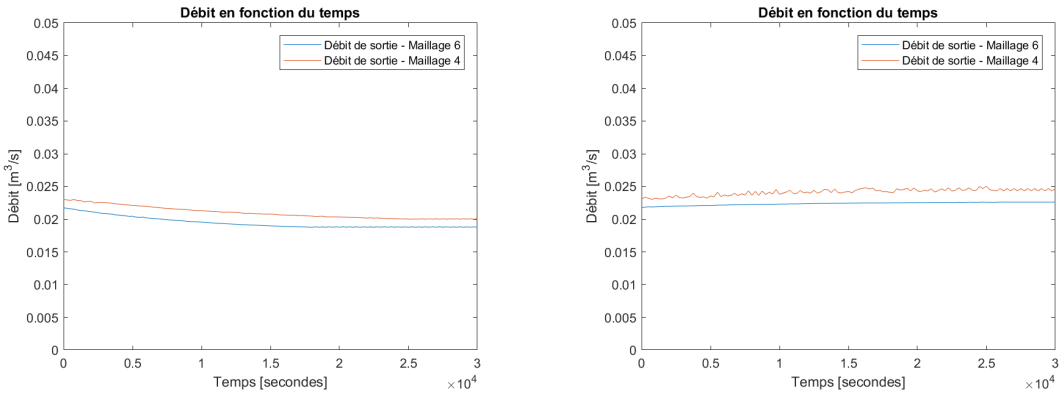


FIGURE 3.19 – Débit de sortie en fonction du temps hors épisode de crue avec 50% (gauche) et 70% (droite) de prélèvement

Dans le cas d'un épisode de crue, la stabilisation du débit de sortie s'effectue vers 110 000 secondes. Le pic de crue (en entrée) étant visible à 4500 secondes sur la figure 3.18. En ce qui concerne les paramètres étudiés, les variations ne sont déjà plus visibles à partir de 75 000 secondes.

Lorsque les débits d'entrée et de sortie sont comparés, ils ne coïncident pas. Cela indique qu'une partie du volume n'est pas conservée, ce qui n'est pas en accord avec la loi de conservation du volume. Plus de commentaires sur cette singularité sont disponibles en *Annexe A, Conservation du volume.*

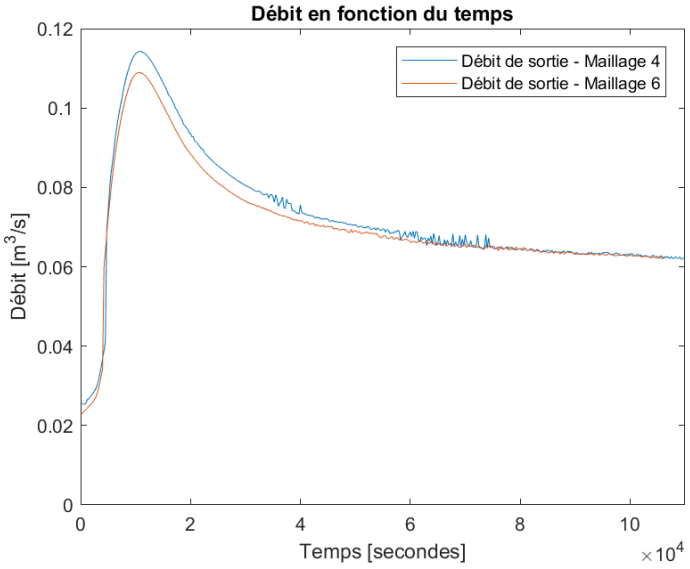


FIGURE 3.20 – Débit de sortie en fonction du temps pour un épisode de crue avec 70% de prélèvement

3.6.3 Simulations réalisées

Ici sont affichés les simulations réalisées et leur conditions. A titre illustratif quelques résultats de distribution du débit sont affichés (en m^2/s).
De plus, la distribution du débit permet de comprendre la méthodologie appliquée à la section *3.2 Construction du maillage* et la raison poussant à changer la forme ou le raffinement des maillages.

Concernant les dénominations (ou **ID**) des simulations de la forme **AA_PP11_BB** : **AA** correspond au code du maillage utilisé, **PP** à la position d'entrée, (BR, Milieu ou Source), **11** correspond au pourcentage de débit prélevé dans le Blanc-Ry. Enfin **BB** correspond soit à "sedim", soit à "crue", indiquant si la simulation est réalisée avec sédiments ou si elle correspond à un épisode de crue.
Le débit liquide indiqué ci-dessous dans les diverses simulations réalisées est celui prélevé dans le Blanc-Ry. Le débit de la source n'est pas indiqué car considéré comme constant et d'une valeur de 0,0032 $[m^3/s]$ comme indiqué auparavant.

Maillage 1

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
C_Milieu70	0,035	0

TABLE 3.1 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 1

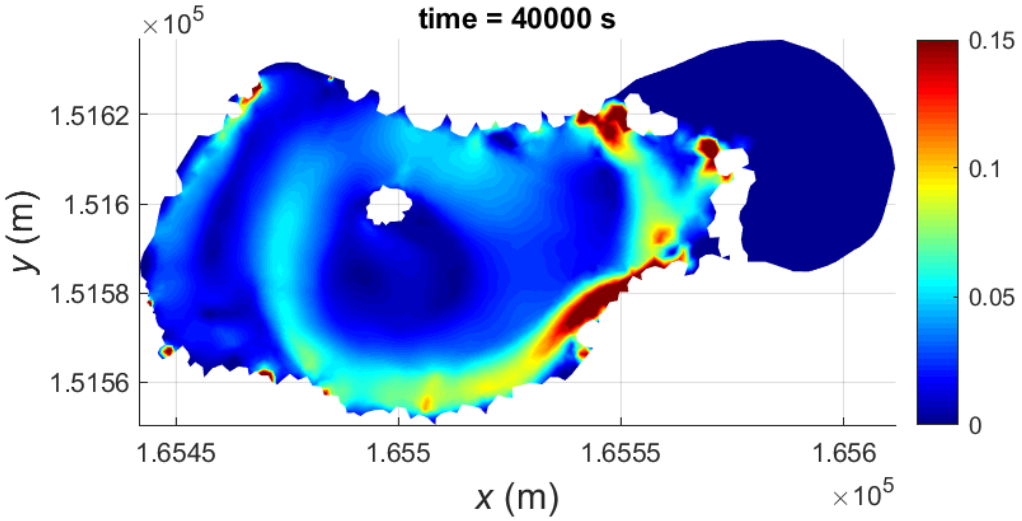


FIGURE 3.21 – Distribution de la vitesse pour la simulation C_Milieu70

Maillage 2

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
M_Milieu70	0,035	0

TABLE 3.2 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 2

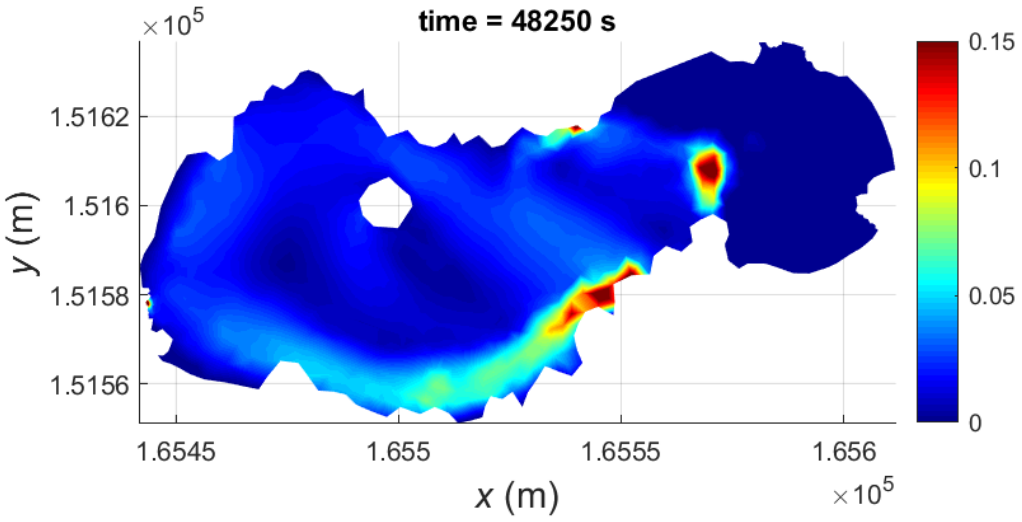


FIGURE 3.22 – Distribution de la vitesse pour la simulation M_Milieu70

Maillage 3

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
WM_BR50	0,025	0
WM_Milieu50	0,025	0
WM_Source50	0,025	0
WM_BR70	0,035	0
WM_Milieu70	0,035	0
WM_Source70	0,035	0
WM_Source70_sedim	0,035	1,554E-6 [1]

TABLE 3.3 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage

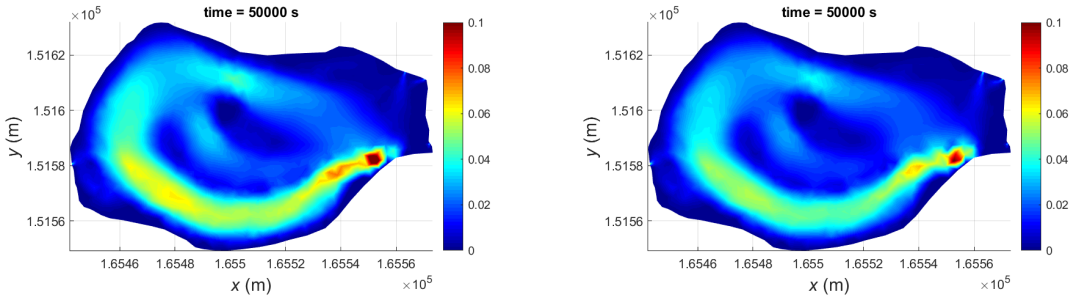


FIGURE 3.23 – Distribution du débit pour les simulations WM_ BR50 et BR70

Maillage 4

ID	Débit liquide en entrée m^3/s	Débit solide en entrée m^3/s
A_Milieu50	0,0215	0
A_BR70	0,0301	0
A_Milieu70	0,0301	0
A_Source70	0,0301	0
A_Milieu70_sedim	0,0301	1.743E-6 [2]
A_Milieu70_crue	Hydrogramme	0

TABLE 3.4 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 4

1. Hypothèse pour cette simulation seulement : seul le Blanc-Ry apporte des sédiments
2. 8,59E-7 par le Blanc-Ry et 8,81E-7 par la source

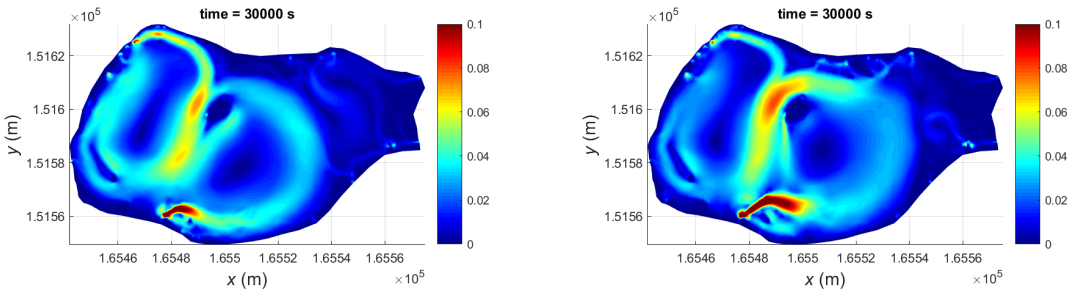


FIGURE 3.24 – Distribution du débit pour les simulations A_Milieu70 et A_Milieu50

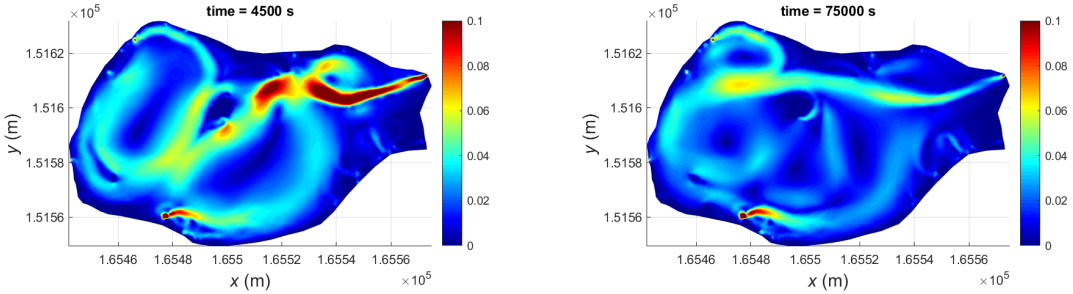


FIGURE 3.25 – Distribution de débit au pic de la crue et à la fin de la simulation A_Milieu70_crue

Maillage 5

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
L_BR50	0,0215	0
L_Milieu50	0,0215	0
L_Source50	0,0215	0
L_BR70	0,0301	0
L_Milieu70	0,0301	0
L_Source70	0,0301	0
L_Milieu70_sedim	0,0301	1,743E-6 [3]
L_Milieu70_crue	Hydrogramme	0

TABLE 3.5 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 5

3. 8,59E-7 par le Blanc-Ry et 8,81E-7 par la source

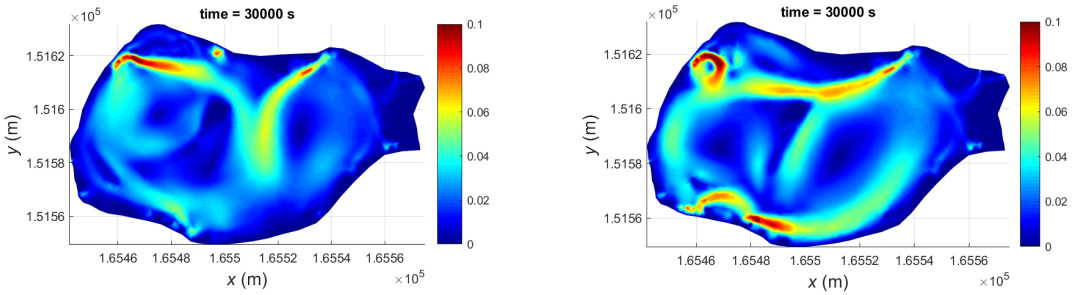


FIGURE 3.26 – Distribution du débit pour les simulations L_ BR50 et BR70

Maillage 6

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
B_Source50	0,0215	0
B_Milieu50	0,0215	0
B_BR70	0,0301	0
B_Milieu70	0,0301	0
B_Source70	0,0301	0
B_Milieu70_sedim	0,0301	1,743E-6 [4]
B_Milieu70_crue	Hydrogramme	0

TABLE 3.6 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 6

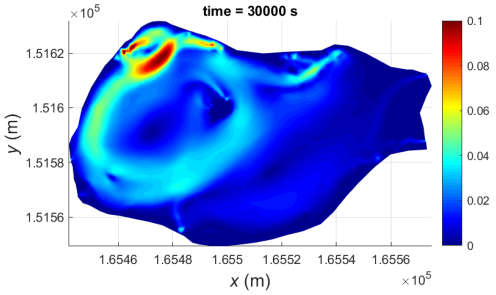


FIGURE 3.27 – Distribution du débit pour la simulation B_Milieu50

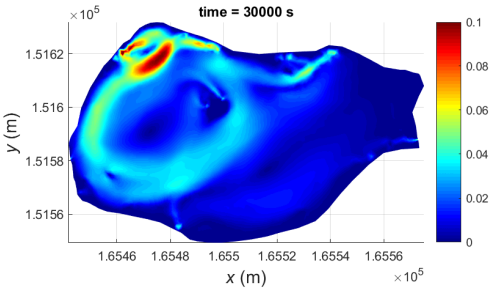


FIGURE 3.28 – Distribution du débit pour la simulation B_Source50

4. 8,59E-7 par le Blanc-Ry et 8,81E-7 par la source

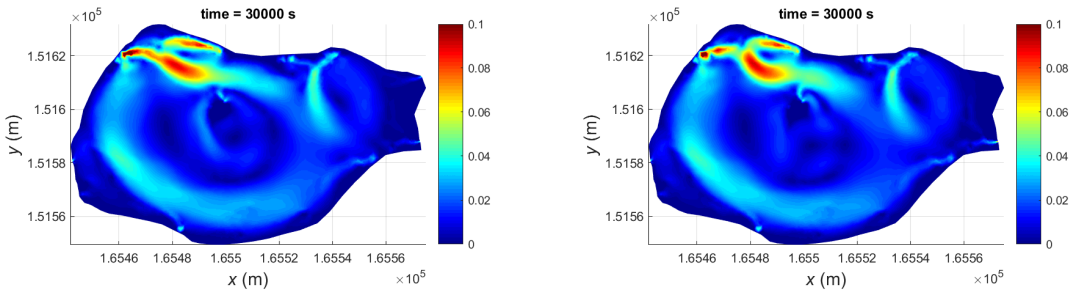


FIGURE 3.29 – Distribution du débit pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70

Maillage 7

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
E2_Milieu70	0,0301	0
E2_Source70	0,0301	0

TABLE 3.7 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage

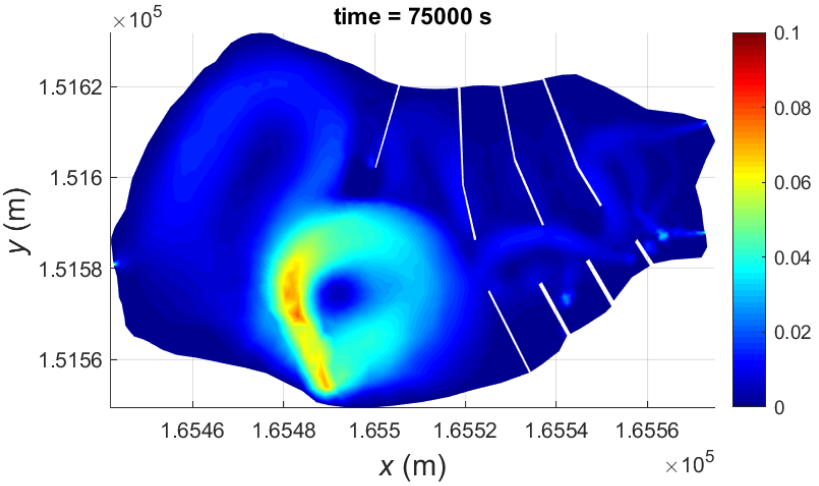


FIGURE 3.30 – Distribution du débit pour la simulation E2_Source70

Maillage 8

ID	Débit liquide m^3/s	Débit solide m^3/s
E3_Milieu70	0,0301	0
E3_Source70	0,0301	0
E3_Milieu70_sedim	0,0301	1,743E-6 [5]
E3_Milieu70_crue	/	0

TABLE 3.8 – Données et paramètres des simulations réalisées sur le maillage 8

5. 8,59E-7 par le Blanc-Ry et 8,81E-7 par la source

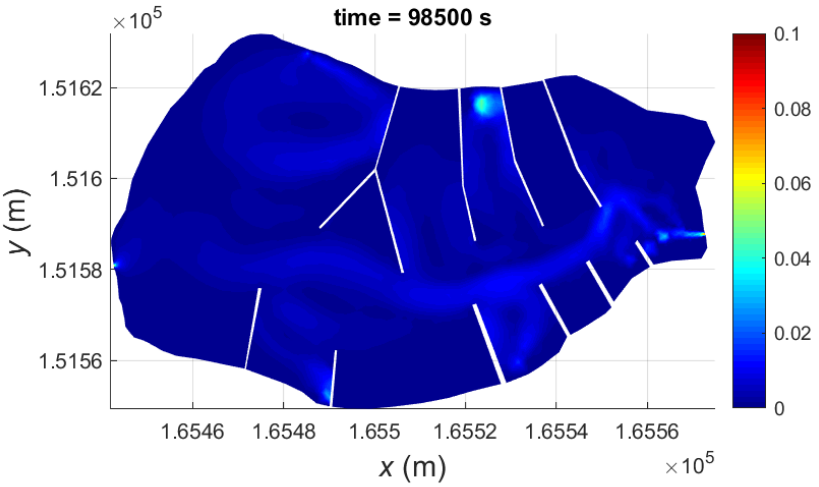


FIGURE 3.31 – Distribution du débit pour les simulations E3_Source70

3.7 Limitations des simulations

Tout modèle est soumis à un certain nombre de limites, les plus impactantes pour ce cas d'étude sont présentées ici.

- **Puissance de calcul**

  Pour avoir une simulation qui se rapproche autant que possible de la réalité le maillage doit être le plus fin possible, spécifiquement aux endroits influents comme les différentes entrées, la sortie, le déversoir et l'île. Néanmoins, au plus le maillage est fin au plus la puissance requise augmente. L'exemple le plus extrême rencontré ici est le maillage 4 composé de 28081 cellules, soit une cellule pour 0,27 $[m^2]$. Cet ordre de grandeur reste beaucoup plus grand que les dimensions usuellement employées dans le cadre de simulations hydrauliques. Enfin un test fut effectué sur un maillage composé de 31242 cellules mais le temps de calcul nécessaire équivalait à 15 fois l'intervalle de temps simulé ; ce maillage-là ne fut donc pas retenu.
  Pour contrer cette première limite de puissance de calcul, les moyens de calcul du Consortium des Équipements de Calcul Intensif (CÉCI) furent utilisés. Cela a permis de lancer plusieurs simulations en même temps.
  Lorsqu'un flux de sédiments est injecté, le temps de calcul est rallongé également. Dès lors, l'analyse sédimentologique est complétée par l'analyse de la contrainte car le débit de sédiments est relativement faible. Pour pouvoir voir un effet notoire sur la morphologie, il faudrait simuler sur des longues périodes, plusieurs semaines voir même plusieurs mois.

- **Approximation de la berge**

Les seules données disponibles sur cette zone de berge (Figure 3.32) sont les mesures GPS et celle fournies par LIDAR (Sous-section *2.4.5 Limitations du traitement d'images*). Or, l'erreur quadratique moyenne en hauteur du LIDAR vaut 1,3895 $[m]$.
L'approximation des berges, mentionnée en section *3.2.2 Hypothèses*, est donc basée sur les mesures GPS effectuées. Puisque la berge n'est pas totalement horizontale, fixer son altitude à 63,0 $[m]$ reste une approximation raisonnable.
Peu de points du maillage sont à corriger et sont proches de la nouvelle sortie. Ils se trouvent soit sur la berge, et donc fixés comme "murs" que l'eau ne peut franchir dans le code *SVE2D*, peu importe leur altitude, soit à la sortie elle-même. Leur altitude doit alors être baissée à une altitude plus basse que celle du déversoir, pour que l'eau puisse s'y écouler.

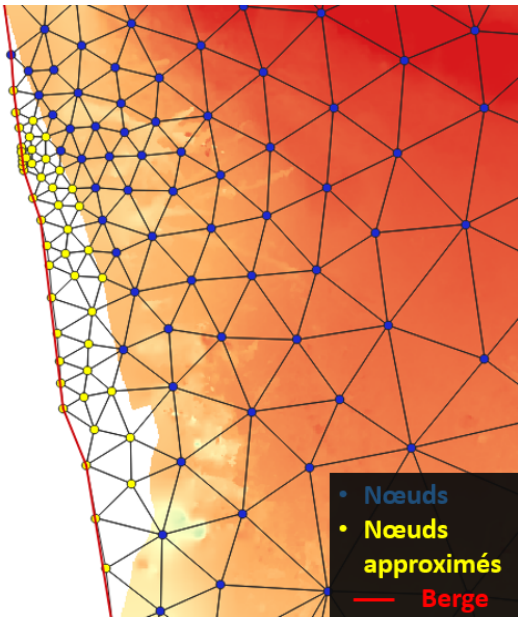


FIGURE 3.32 – Zone représentant les noeuds avec altitude approximées

- **Débit nominal prélevé dans le Blanc-Ry**

Le débit nominal du Blanc-Ry utilisé dans les simulations sur les maillages 1, 2 et 3 est de 0,05 $[m^3/s]$. Or, il s'avère que le débit médian vaut 0,043 $[m^3/s]$. Cela s'explique par le fait qu'en comparant les 2 jeux de données hydrologiques disponibles, desquels ne sont pas encore retirées les erreurs de mesures (Figure 3.33), en prenant la valeur médiane, l'approximation de la valeur entre les deux courbes, indique un débit approximatif de 0,05 $[m^3/s]$. Les résultats furent tout de même conservés car cette faible différence de débit nominal influe finalement peu le comportement hydraulique de l'étang (Section *4.1 Influence du débit prélevé*).

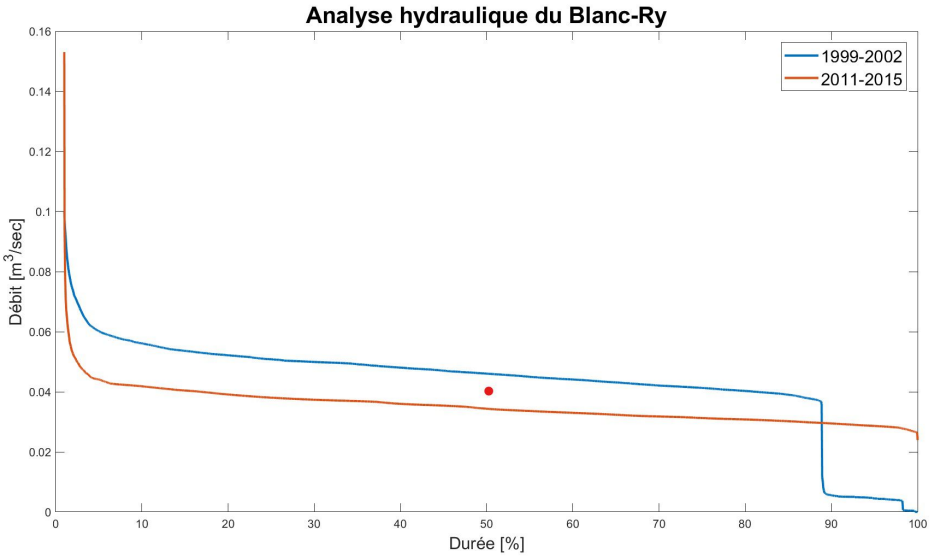


FIGURE 3.33 – Comparaison des jeux de données hydrologiques

Chapitre 4

Analyse critique des résultats

Les résultats bruts présentés dans le chapitre précédent vont être comparés et analysés ici afin d'identifier des tendances et comportements hydrauliques permettant de tirer des conclusions à propos de l'influence des paramètres étudiés. Ainsi les résultats obtenus sont comparés pour un maillage donné en fonction des différents paramètres, mais également pour un paramètre d'étude donné en fonction des différents maillages. Les simulations réalisées sur les maillages 1 et 2 ont uniquement permis d'améliorer le processus de construction du maillage ; leurs résultats ne sont donc pas analysés ici. Les résultats obtenus sur les maillages suivants sont présentés successivement du maillage le plus grossier au maillage le plus fin.

4.1 Influence du débit prélevé

Plusieurs valeurs du débit de prélèvement ont été considérées. Pour évaluer son influence, la contrainte sur le lit et la distribution de vitesse sont analysées.

4.1.1 Contrainte de cisaillement

Pour rendre compte de la distribution de la contrainte adimensionnelle τ_* les résultats ont été affichés avec une échelle allant de 0 à $\tau_c = 0,058$ (Section *3.5 Données d'entrée*).

- **Maillage 3** :

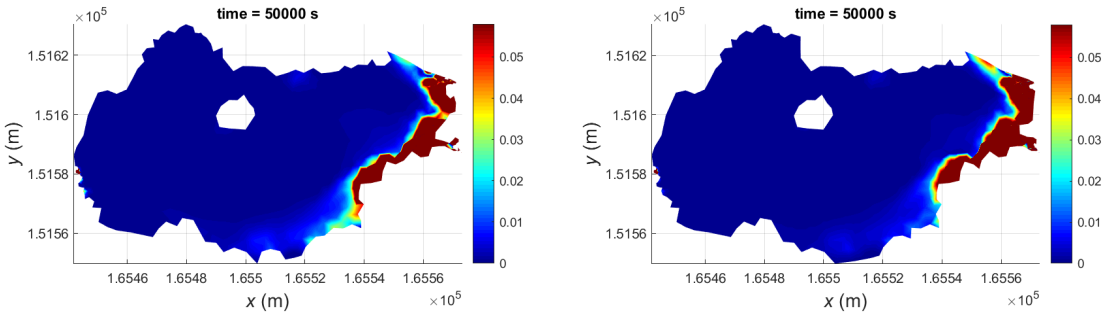


FIGURE 4.1 – Distribution de τ^* - WM_Milieu50 et Milieu70

- **Maillage 5** :

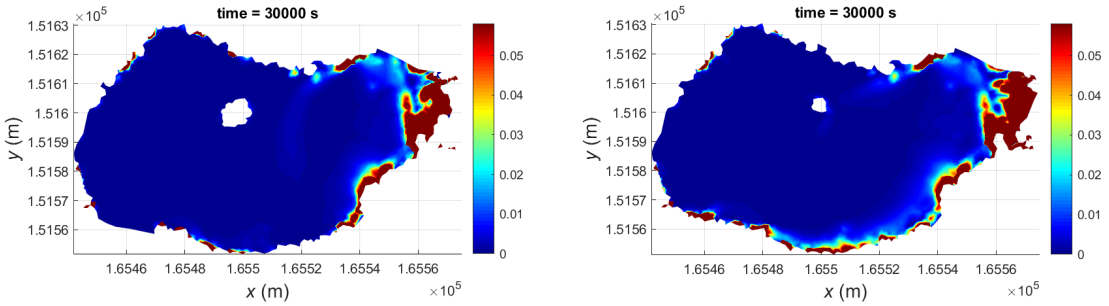


FIGURE 4.2 – Distribution de τ^* - L_Milieu50 et Milieu70

- **Maillage 6** :

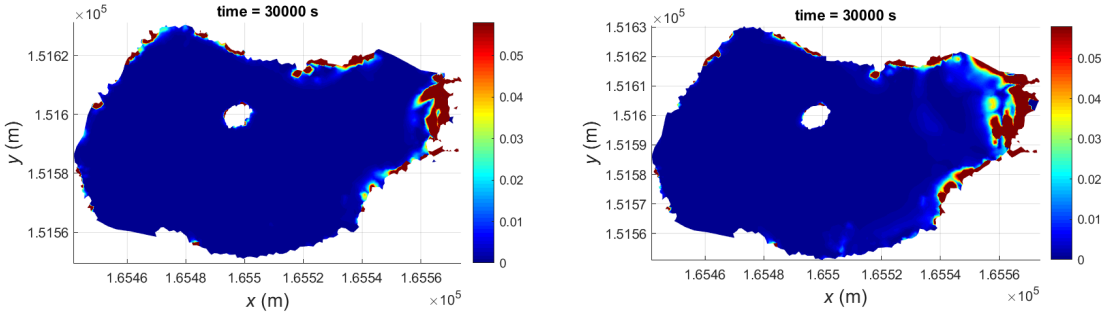


FIGURE 4.3 – Distribution de τ^* - B_Milieu50 et Milieu70

- **Maillage 4** :

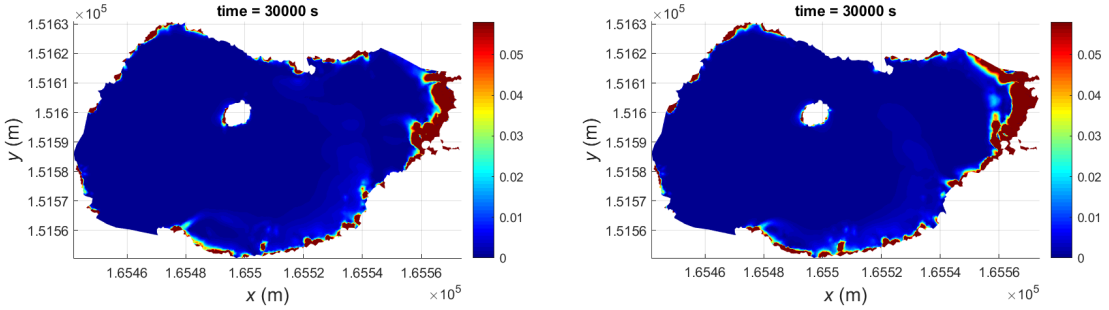


FIGURE 4.4 – Distribution de τ^* - A_Milieu50 et Milieu70

Les résultats obtenus concernant ce paramètre sont unanimes. Un zone d'emport se révèle clairement au niveau de la zone amont. Sa forme varie légèrement selon le raffinement du maillage. Le débit prélevé ne semble avoir qu'une incidence minime qui se révèle principalement sur les deux maillages les plus raffinés au niveau de la berge nord (haut de l'image). De plus, dans certaines cellules le long des berges, la simulation indique une contrainte de cisaillement supérieure à la contrainte critique τ_c. Cela est dû à de faibles épaisseurs de lames d'eau. En réalité, la végétation et le bois mort sur les berges présentent une résistance à l'écoulement bien supérieure à celle employée dans les simulations.

On peut globalement retenir que **le débit prélevé n'a pas ou peu d'influence** sur la présence d'une zone d'emport des sédiments à l'amont de l'étang et que l'emplacement et l'envergure de cette zone sont constants.

4.1.2 Distribution de l'écoulement

Pour rendre compte de la distribution de l'écoulement, les résultats affichés sont les cartes de distribution et d'orientation de la vitesse V. Les vitesses absolues (cartes en couleurs) ont été affichées avec une échelle allant de 0 à $0,15[m/s]$, cette limite étant fixée empiriquement. Afin de visualiser l'orientation de la vitesse est représentée sur les cartes par des flèches.

- **Maillage 3** :

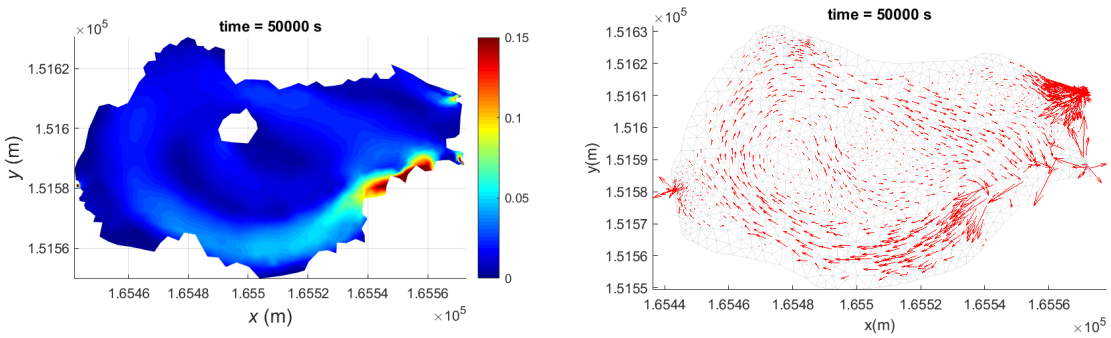


FIGURE 4.5 – Distribution et orientation de V - WM_Milieu70

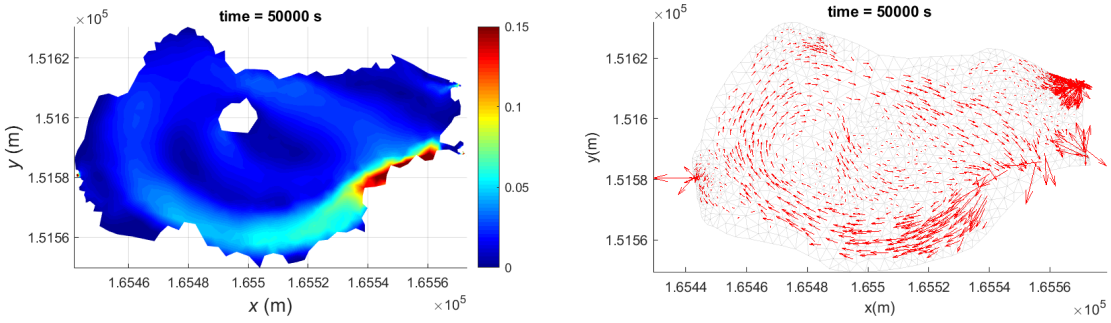


FIGURE 4.6 – Distribution et orientation de V - WM_Milieu50

- **Maillage 5** :

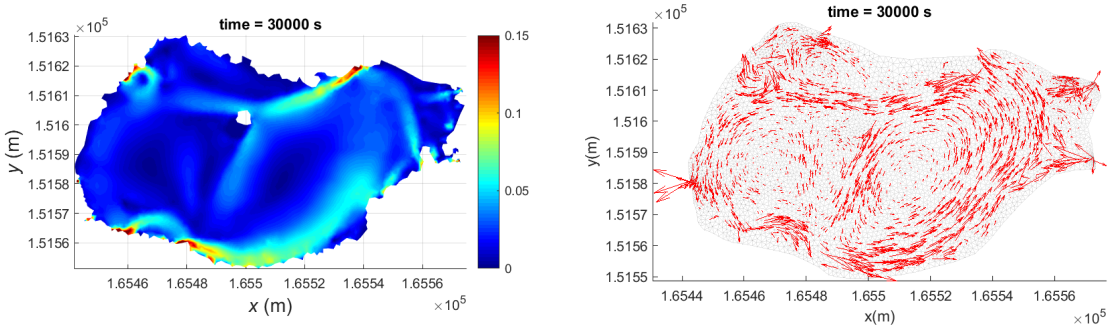


FIGURE 4.7 – Distribution et orientation de V - L_Milieu70

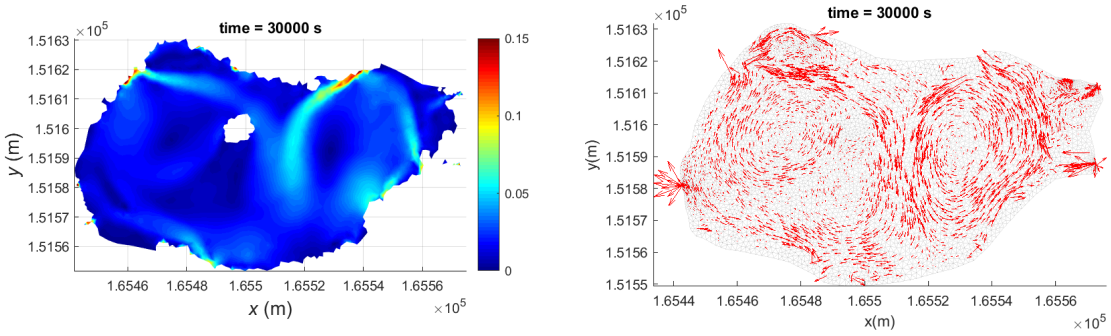


FIGURE 4.8 – Distribution et orientation de V - L_Milieu50

- **Maillage 6** :

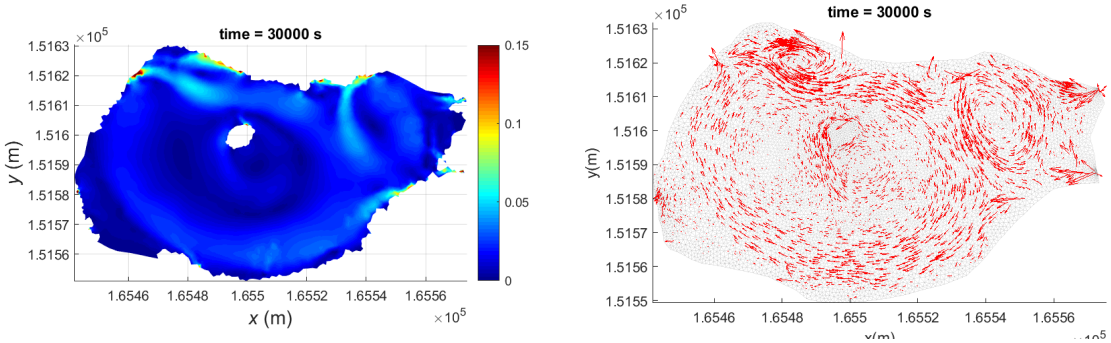


FIGURE 4.9 – Distribution et orientation de V - B_Milieu70

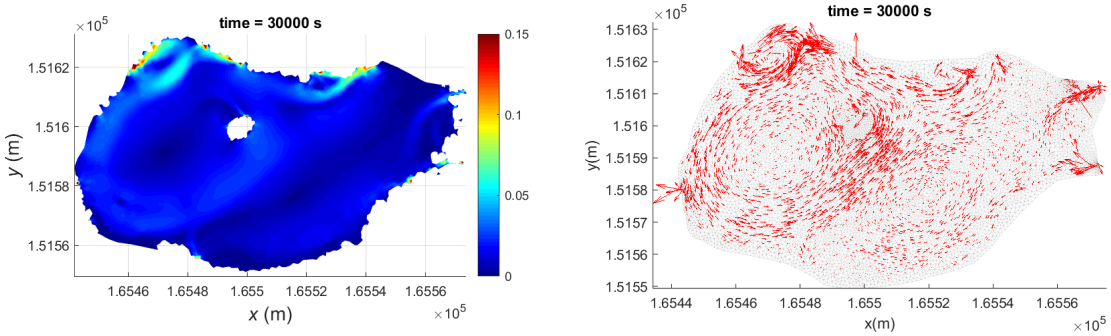


FIGURE 4.10 – Distribution et orientation de V - B_Milieu50

- **Maillage 4** :

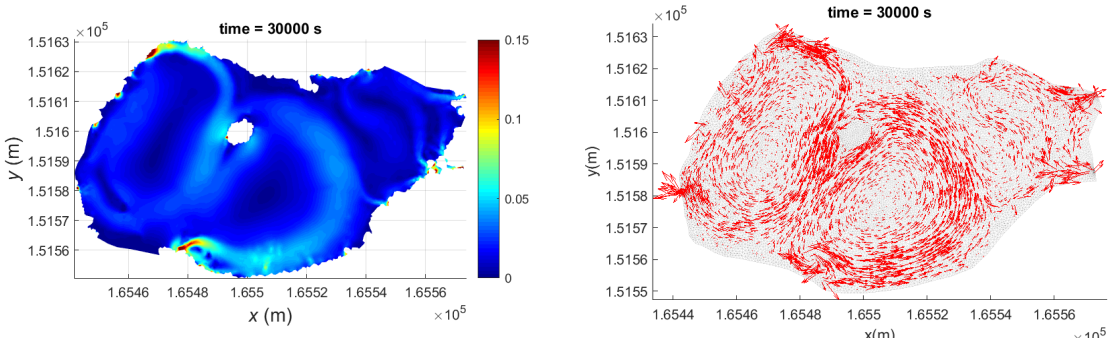


FIGURE 4.11 – Distribution et orientation de V - A_Milieu70

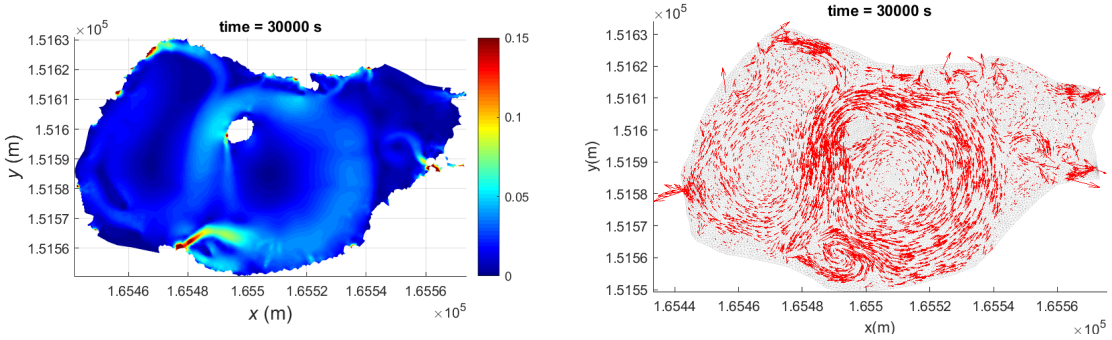


FIGURE 4.12 – Distribution et orientation de V - A_Milieu50

L'observation de ces résultats rend la conclusion moins évidente. En effet, la distribution de l'écoulement diffère en fonction du maillage. Les résultats obtenus sur les maillages 3 et 4 concordent. Il est observable, malgré la différence de la distribution et l'orientation des vitesses observées, que la différence de débit prélevé ne semble impliquer aucun changement significatif de l'organisation de l'écoulement. À l'inverse, les résultats obtenus sur les maillages 5 et 6 montrent un changement significatif de l'organisation de l'écoulement lorsque le débit prélevé est modifié. La conclusion est donc mitigée. Le maillage 4 étant le plus fin, les résultats obtenus sur ce dernier sont considérés comme les plus fiables. Enfin, un résultat semble être partagé par l'ensemble des simulations : l'intensité des recirculations est légèrement accrue lorsque le débit prélevé augmente.
On peut globalement retenir que **le débit prélevé n'a pas d'influence significative sur la distribution de l'écoulement** dans l'étang mais qu'**il permet de légèrement moduler l'intensité des recirculations**.

4.2 Influence de la position du segment d'injection

Comme expliqué à la section *3.4.2 Variation de la position d'entrée*, trois points d'injections ont été considérés. La répartition de l'écoulement dans la zone des macrophytes (Zone 1, Section *3.2.1 Méthodologie*) est simplifiée grâce aux images aériennes (Section *3.2.3 Les différents maillage - Maillage 3*). Puisque l'analyse de l'influence du débit d'injection semble indiquer que ce dernier n'a pas ou peu d'influence sur la distribution de la contrainte τ^*, le débit considéré ici correspondra à un prélèvement de 70% du débit du Blanc-Ry soit $0,0301$ $[m^3/s]$. Il est supposé que ce débit permettra d'offrir un tirant d'eau suffisant au passage des poissons dans les passes envisagées.

4.2.1 Contrainte de cisaillement

Pour rendre compte de la distribution de la contrainte adimensionnelle τ^* les résultats ont été affichés avec une échelle allant de 0 à $\tau_c = 0,058$ (Section *3.5 Données d'entrée*).

- **Maillage 3** :

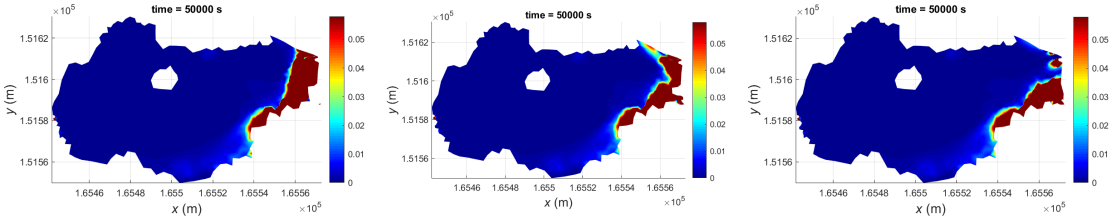


FIGURE 4.13 – Distribution de τ^* pour les simulations WM_ BR70, Milieu70 et Source70

- **Maillage 5** :

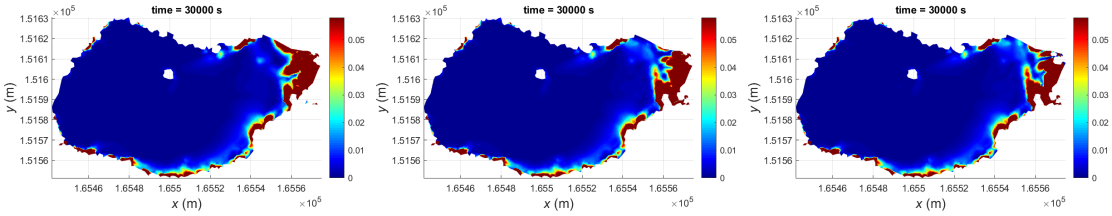


FIGURE 4.14 – Distribution de τ^* pour les simulations L_ BR70, Milieu70 et Source70

- **Maillage 6** :

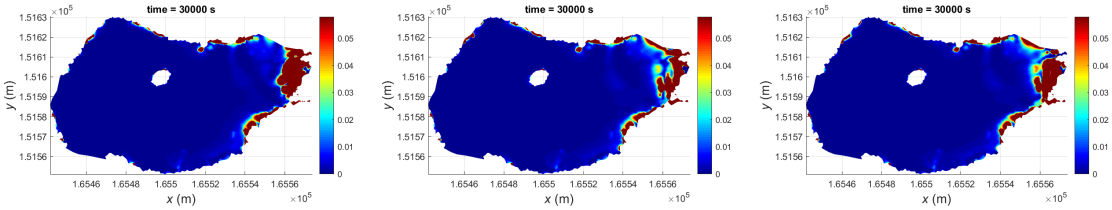


FIGURE 4.15 – Distribution de τ^* pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70

- **Maillage 4** :

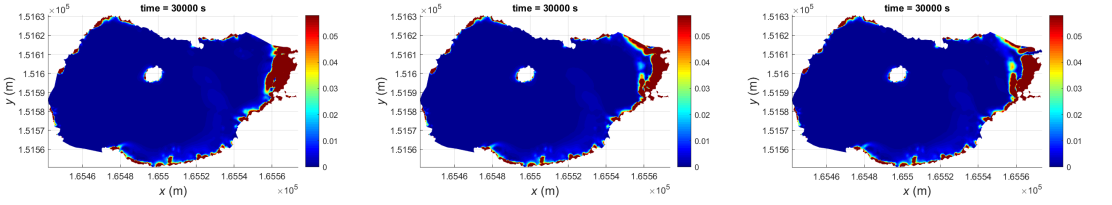


FIGURE 4.16 – Distribution de τ^* pour les simulations A_ BR70, Milieu70 et Source70

Dans l'ensemble, les comparaisons ci-dessus montrent clairement la très faible influence de la position d'injection du débit sur la distribution de la contrainte. En effet, lorsque les entrées considérées sont *Source* et *Milieu*, la zone d'emport reste identique pour un maillage donné. Une légère différence est observable lorsque le débit est injecté du côté du Blanc-Ry (BR), dans ce cas la contrainte se plaque davantage sur la berge sud (berge du bas sur les images) et diminue sur la berge nord. Ces résultats sont à nuancer contre les berges où le tirant d'eau est très faible car la contrainte y est surestimée.
Les résultats variant peu selon le raffinement du maillage, on peut globalement retenir que **la position du segment d'injection du débit n'influence pas significativement la présence d'une zone d'emport** des sédiments à l'amont de l'étang mais que l'emplacement et l'envergure de cette zone peuvent légèrement varier en fonction de ce paramètre.

4.2.2 Distribution de l'écoulement

Comme pour l'analyse de l'influence du débit prélevé, la distribution de l'écoulement est affichée grâce aux cartes de distribution et d'orientation des vitesses. Les vitesses absolues V (cartes en couleurs) ont été affichées avec une échelle allant de 0 à $0,15$ $[m/s]$, cette limite étant fixée empiriquement. Les orientations des vitesses sont représentées sur les cartes par des flèches.

- **Maillage 3** :

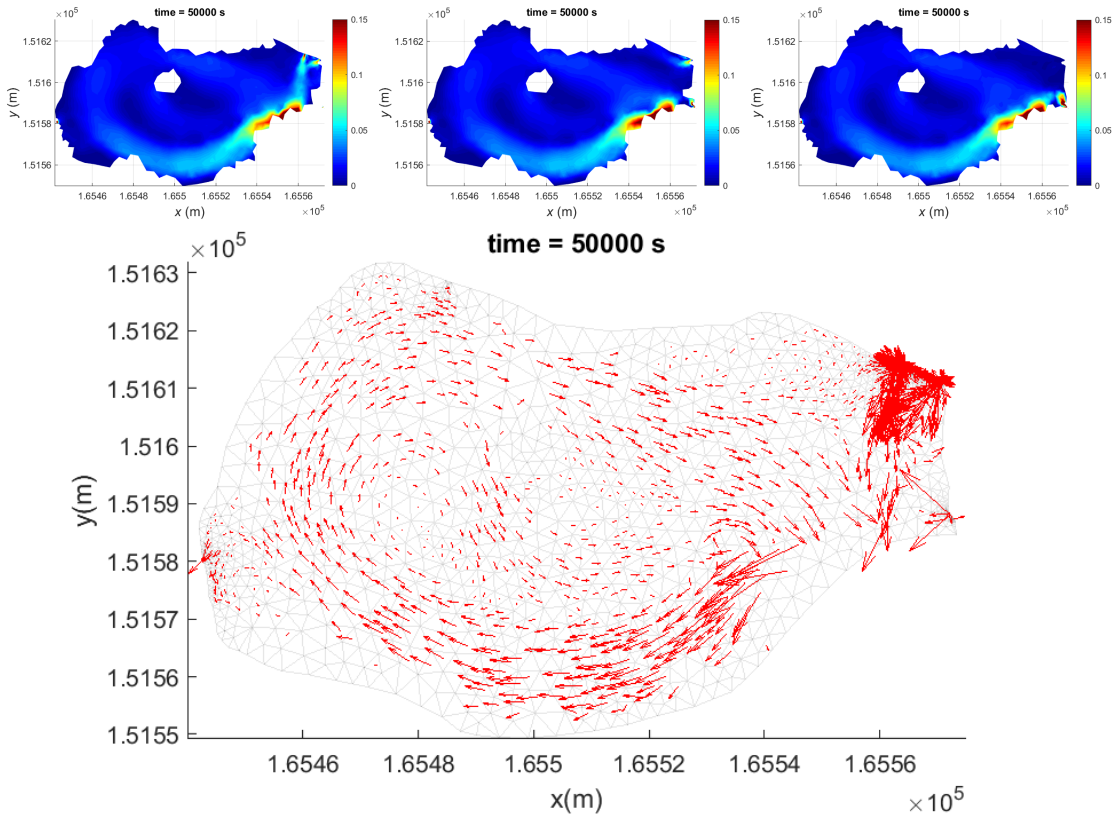


FIGURE 4.17 – Distribution de V pour les simulations WM_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour WM_ BR70

- **Maillage 5** :

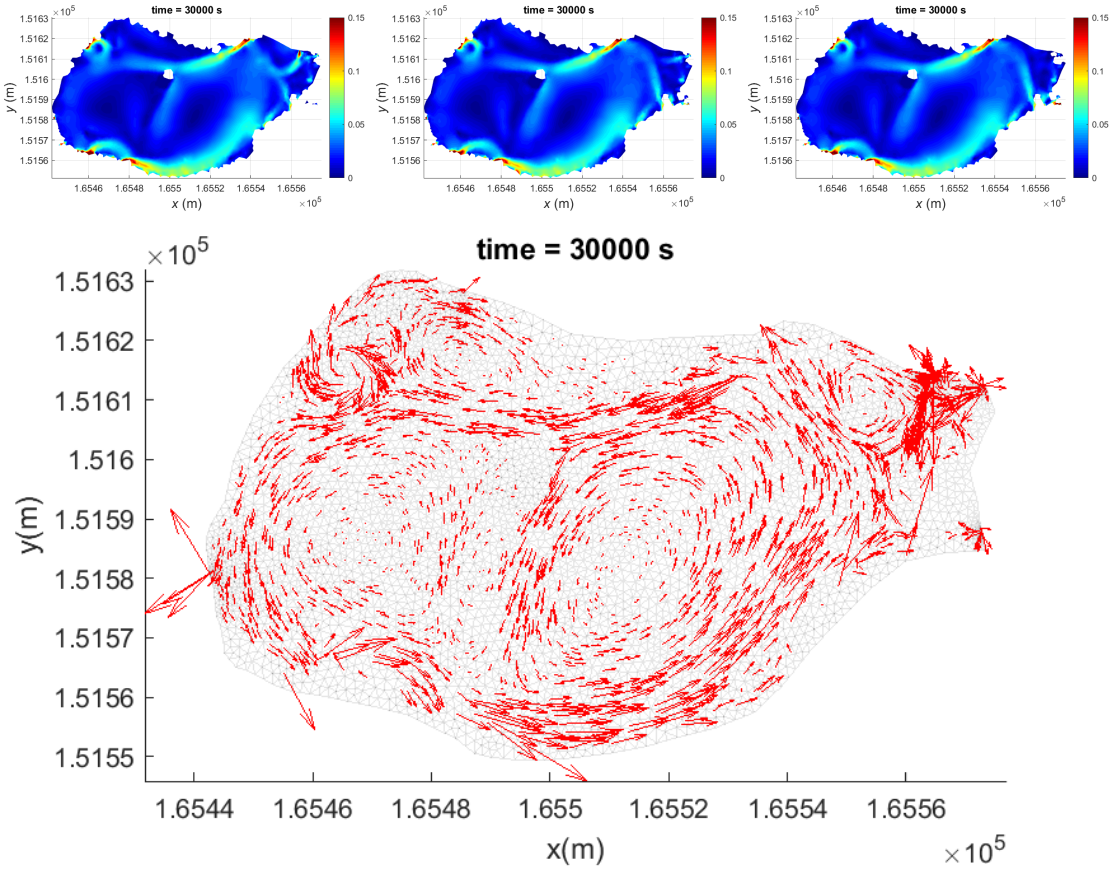


FIGURE 4.18 – Distribution de V pour les simulations L_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour L_ BR70

- **Maillage 6** :

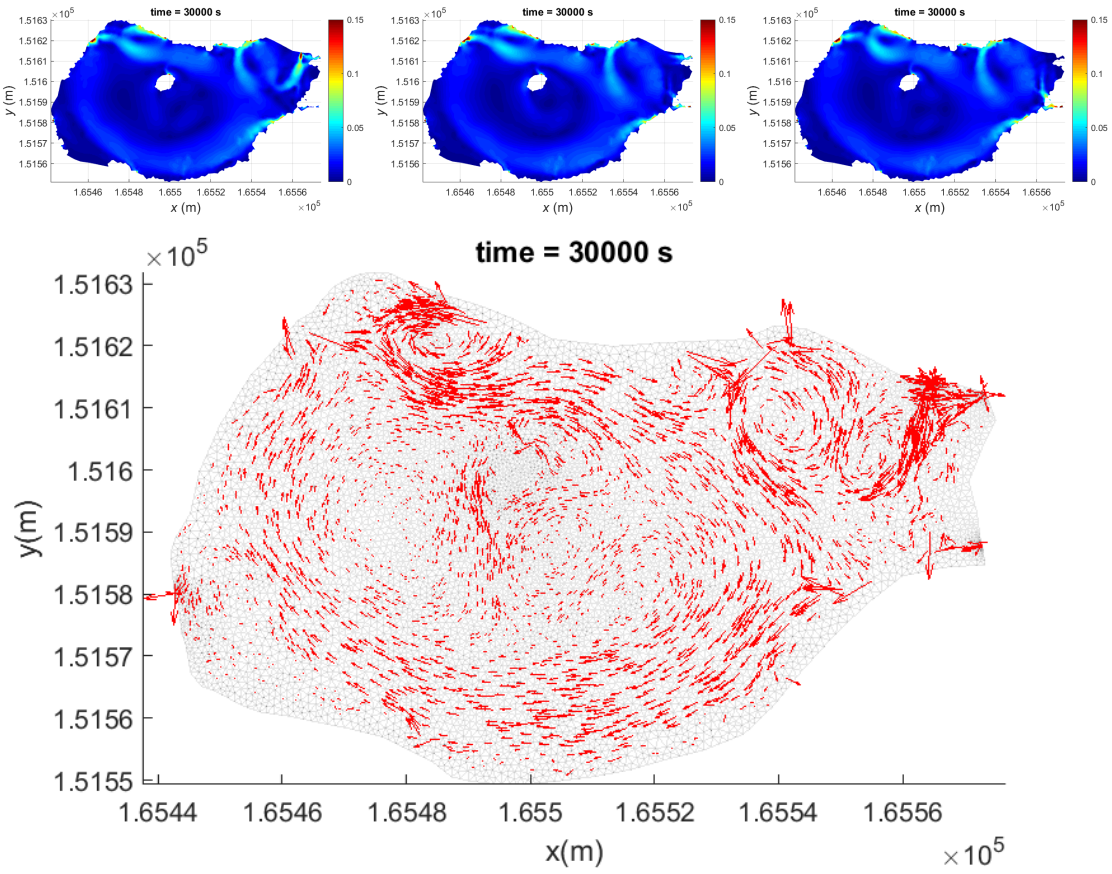


FIGURE 4.19 – Distribution de V pour les simulations B_ BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour B_ BR70

- **Maillage 4** :

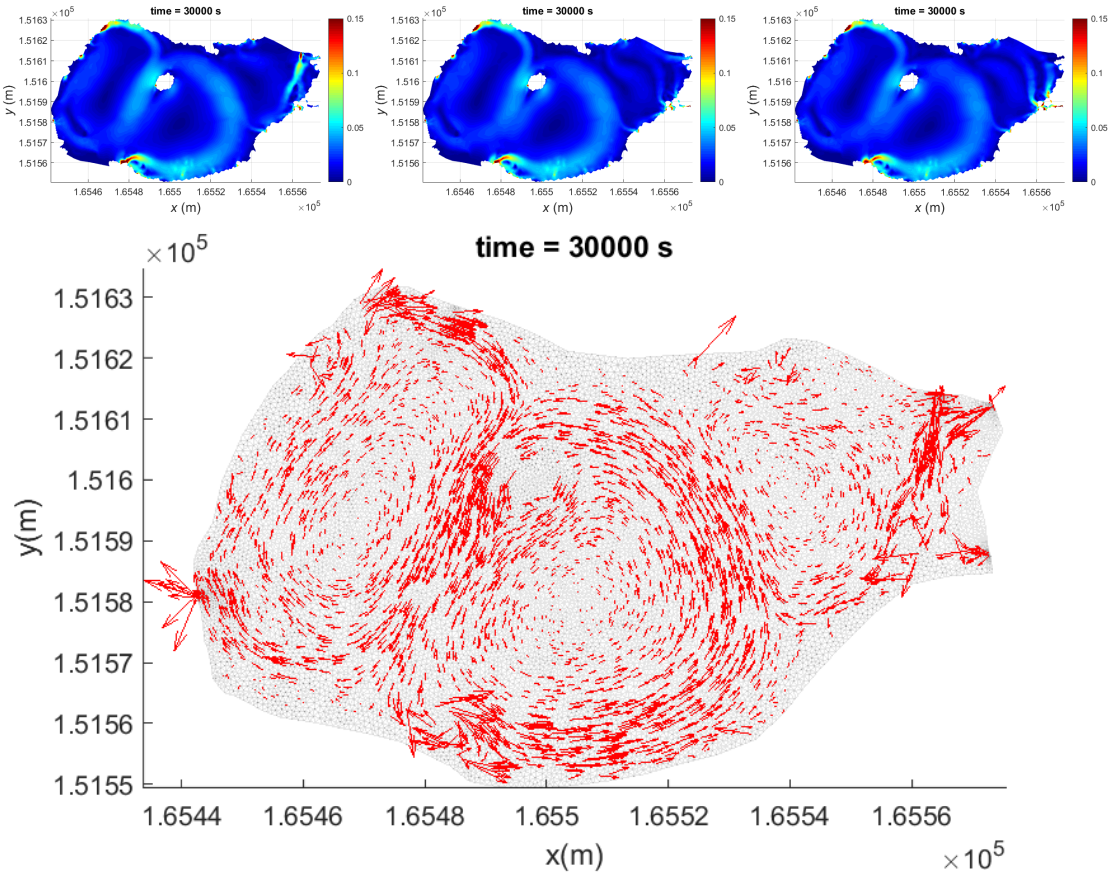


FIGURE 4.20 – Distribution de V pour les simulations A_BR70, Milieu70 et Source70 et orientation de V pour A_BR70

La comparaison des écoulements en fonction de la position d'injection du débit permet de corroborer les conclusions obtenues lors de l'analyse de ce paramètre sur la distribution de la contrainte. Sur les maillages les moins raffinés le positionnement du segment d'injection du côté du Blanc-Ry ne change pas l'écoulement. Cependant, on retrouve sur les maillages plus fins une organisation différente des recirculations dans la zone amont de l'étang, proche des points d'injection. L'écoulement dans le reste de l'étang n'est pas impacté par un changement de position d'injection du débit. On peut globalement retenir que **la position du segment d'injection n'a pas d'influence sur la distribution globale de l'écoulement** dans l'étang mais permet de **légèrement modifier les recirculations** dans la zone amont.

4.3 Impacts des crues

Il est clair que les observations de terrain indiquent que les périodes de crue sont la cause d'un transport accru de sédiments. Comme décrit à la section *3.4.3 Variation du débit en cas de crue*, l'écoulement de l'étang a été simulé en considérant un

débit variable suivant un hydrogramme de crue (voir *Figure 3.18*). Ces simulations étant très longues, leur nombre est plus restreint. C'est pourquoi chaque paramètre étudié n'a pas pu être simulé.

De plus, l'arrivée massive de sédiments dans l'étang en cas de crue risque très probablement de modifier la morphologie du lit de l'étang modifiant l'écoulement qui, à son tour, modifierait ensuite les zones d'érosion et de dépôt. Ces phénomènes et interactions pourraient être étudiés et il serait intéressant de réaliser des simulations avec sédiments en cas de crue sur de longues périodes. Le temps et la puissance de calcul que requiert ce type de simulation ne nous a pas permis de le réaliser.
Voici donc, du maillage le plus grossier au maillage le plus fin, les comparaisons qui peuvent être faites grâce aux simulations avec hydrogramme.

4.3.1 Suivi du débit de sortie

Délai suite au pic de crue

Lors de la crue, un décalage est observé entre le pic de crue à l'entrée et le pic de crue à la sortie. Sur la figure 4.21, ce décalage est mesuré dans le cas d'une crue avec prélèvement à 50% et à 70%

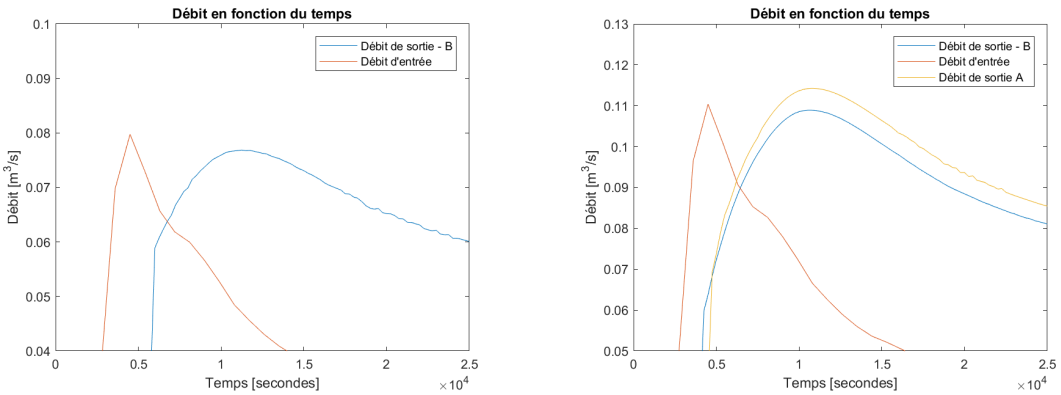


FIGURE 4.21 – Pics de débit lors d'une crue - prélèvement 50% (gauche) et prélèvement 70% (droite)

Avec un prélèvement de 50%, ce décalage vaut $\cong$ 6750 secondes et à 70%, il vaut $\cong$ 6250 secondes. Lorsque le débit prélevé est plus conséquent, le décalage est légèrement plus faible mais reste de l'ordre d'une heure et 45 minutes dans les deux cas.

Débits à la sortie et au déversoir

Avant l'épisode de crue, l'eau sort uniquement par la nouvelle sortie envisagée. La figure 4.22 montre qu'à partir d'un certain débit, l'eau se met à sortir par le déversoir. Après le pic de crue, le débit au déversoir diminue mais reste présent. L'étang est alors dans un nouvel état stable mais la hauteur d'eau y est plus

importante qu'avant la crue. Puisque le débit de sortie diminue très lentement dans le temps, la hauteur d'eau avant crue ne sera probablement pas atteinte avant l'épisode de pluie suivant. En période de sécheresse, la hauteur d'eau pourrait diminuer jusqu'à atteindre celle observée dans les simulations sans crue.

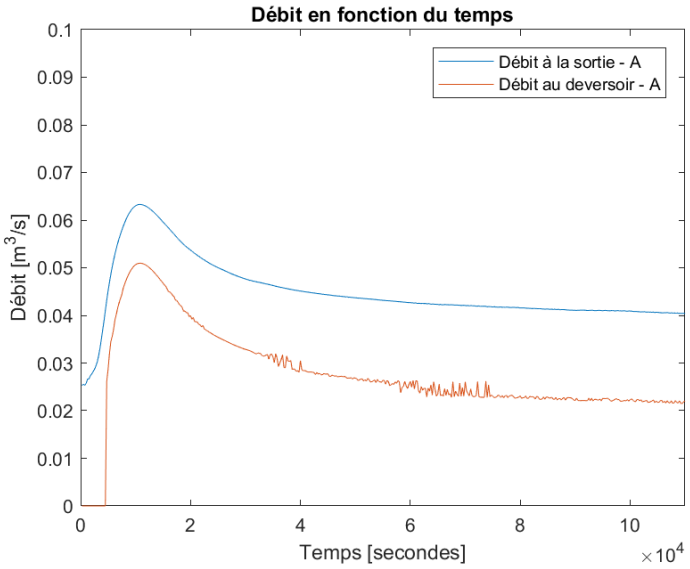


FIGURE 4.22 – Évolution des débits à la sortie et au déversoir en fonction du temps

4.3.2 Impact du débit prélevé en cas de crue

Contraint par le temps, seules deux simulations mesurant l'influence du débit prélevé en cas de crue ont été réalisées sur le maillage 6. Les distributions de contrainte et de l'écoulement au pic de la crue sont comparées ci-dessous.

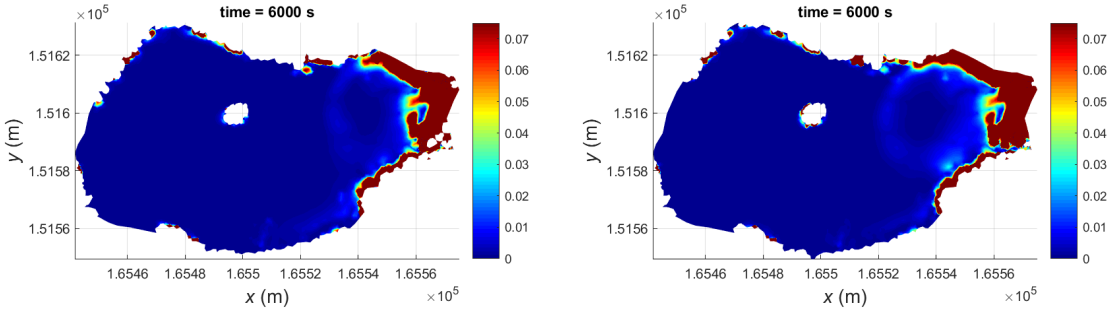


FIGURE 4.23 – Comparaison de la distribution de contrainte τ^*au pic de la crue - B_Milieu50_crue & B_Milieu70_crue

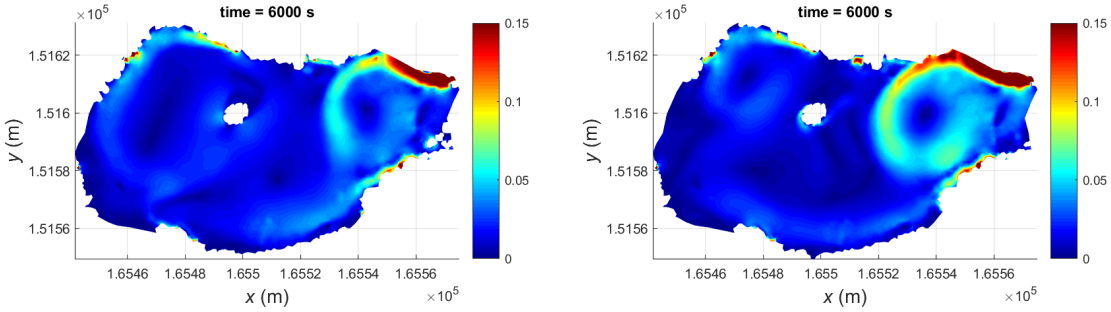


FIGURE 4.24 – Comparaison de la distribution de la vitesse V au pic de la crue - B_Milieu50_crue & B_Milieu70_crue

Les résultats obtenus lors de l'analyse de l'impact du débit prélevé (Section *4.1 Influence du débit prélevé*) se confirment même en cas de crue. En effet, la comparaison des résultats indique clairement l'absence d'impact significatif du débit prélevé sur la distribution de contrainte, bien que la recirculation près de l'entrée semble plus intense lorsque le débit augmente. Cette conclusion, en cas de crue, reste fragile puisque obtenue sur un unique maillage. Des simulations analogues sur des maillages plus fins pourraient permettre de la vérifier.

4.3.3 Impacts des crues sur la contrainte de cisaillement

- **Maillage 5** :

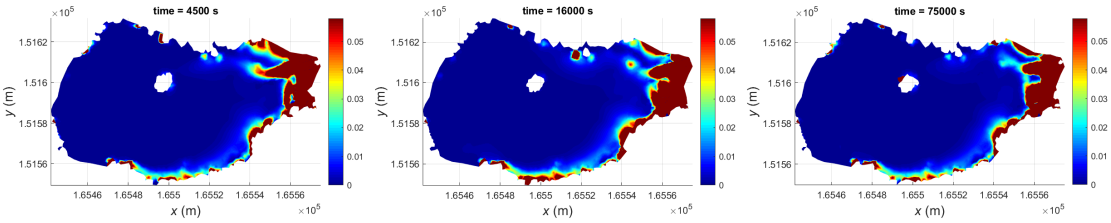


FIGURE 4.25 – Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue (t = 4500, t = 16 000 et t = 75 000) - L_Milieu70_crue

La répartition de la contrainte à 16 000 secondes étant déjà très similaire à celle à 75 000 secondes, les résultats seront donc seulement affichés au pic (t = 4500) et en situation stable (t = 75 000).

- **Maillage 6** :

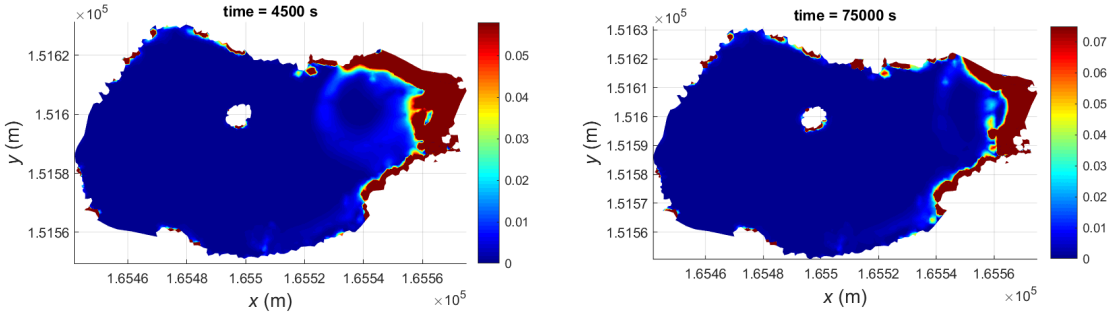


FIGURE 4.26 – Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) - B_Milieu70_crue

- **Maillage 4** :

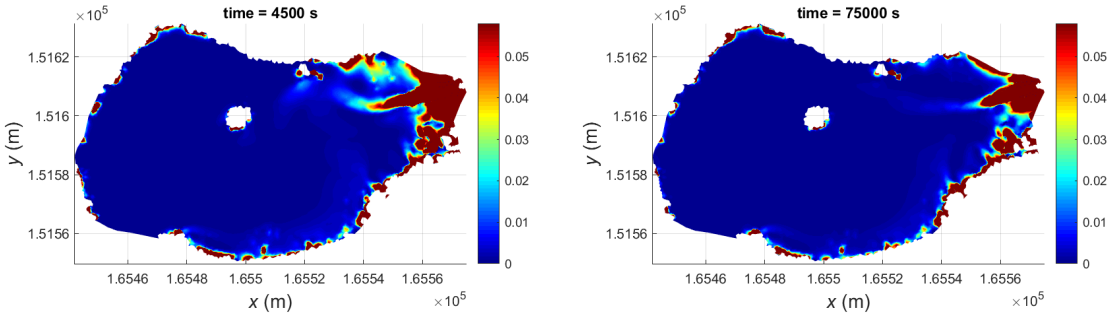


FIGURE 4.27 – Évolution de la distribution de contrainte au cours de la crue A_Milieu70_crue

Comme attendu, les crues modifient significativement la distribution de la contrainte d'emport τ^*. Une "langue" de contrainte s'étend sur une distance de 100 à 200 $[m]$ supplémentaires en comparaison avec les résultats obtenus lors des simulations à débit constant. Cette dernière se résorbe petit à petit après le pic de la crue. Ainsi une crue annuelle permet de transporter les sédiments jusque dans le premier tiers de l'étang. Elle ne permet donc pas d'entraîner les sédiments jusqu'à l'exutoire. Les périodes de crue sont donc défavorables dans l'objectif d'éviter le colmatage de l'étang.

4.3.4 Impact de crue sur la distribution de l'écoulement

- **Maillage 5** :

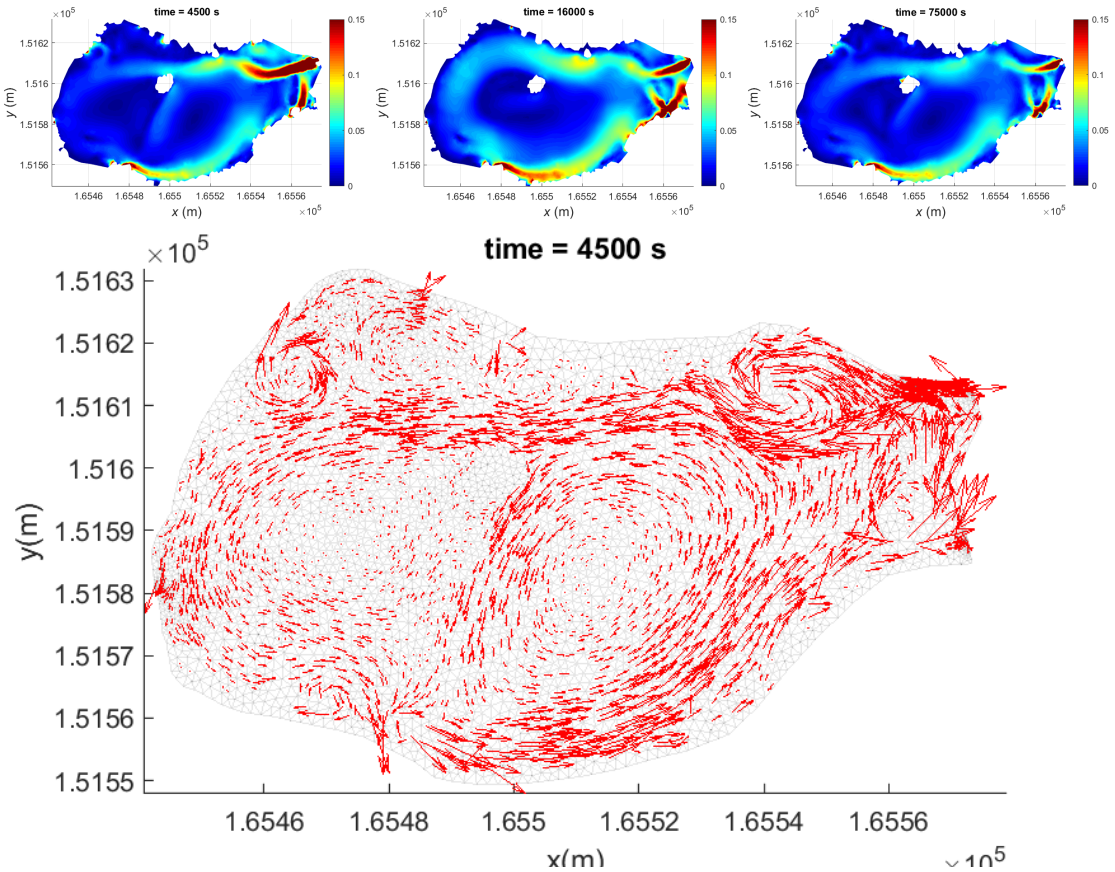


FIGURE 4.28 – Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500, t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - L_Milieu70_crue

De la même manière que pour la répartition de la contrainte, l'écoulement à 16 000 secondes est déjà très similaire à celui à 75 000 secondes. Les résultats seront donc seulement affichés au pic (t = 4500) et sur la situation stable (t = 75 000).

- **Maillage 7** :

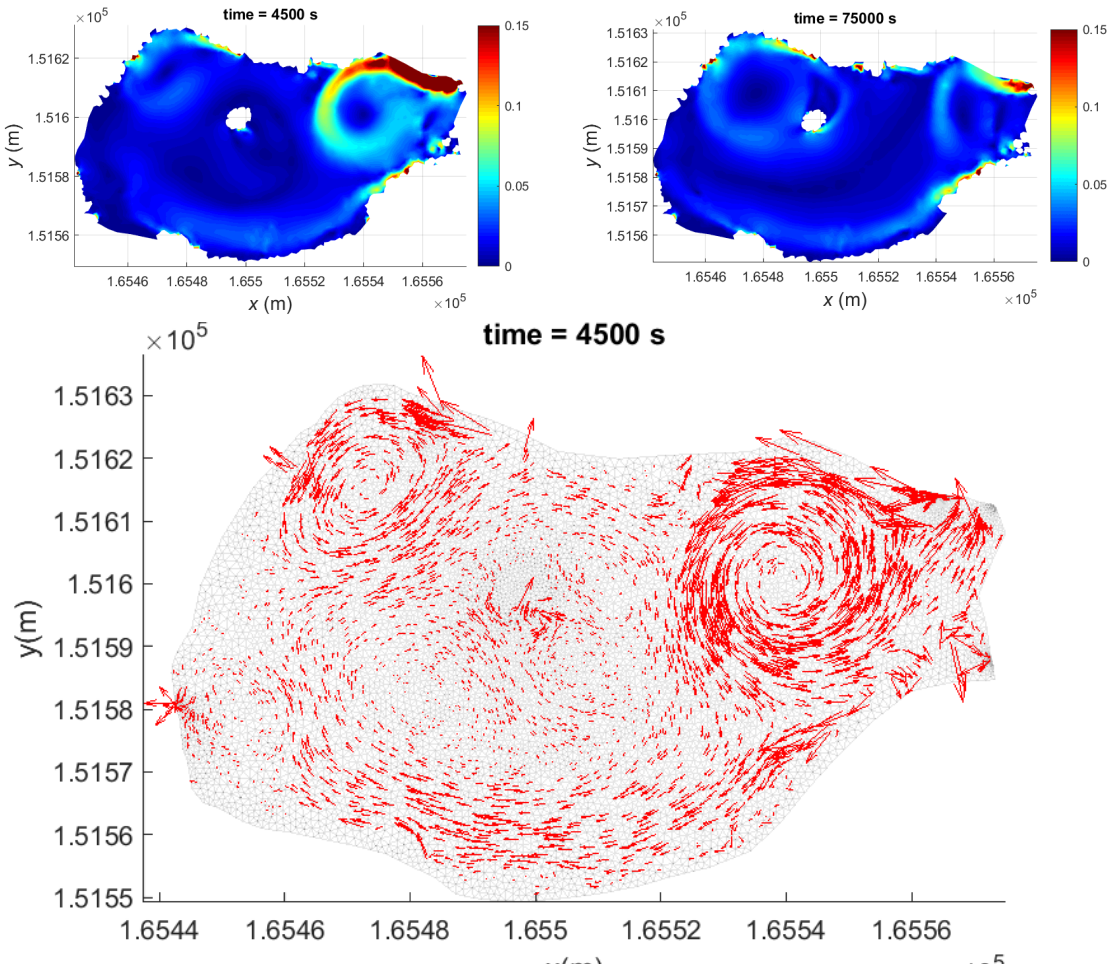


FIGURE 4.29 – Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - B_Milieu70_crue

- **Maillage 4** :

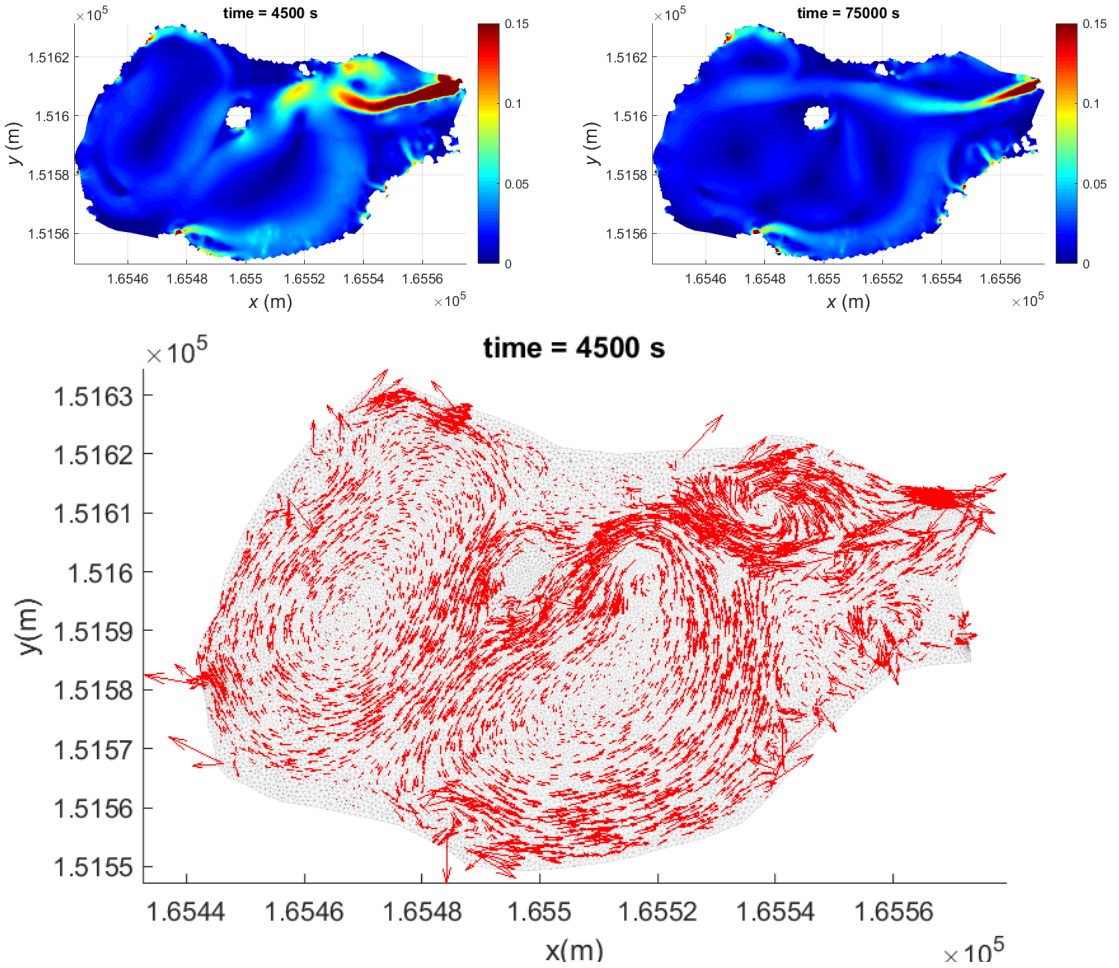


FIGURE 4.30 – Évolution de la distribution de V au cours de la crue (t = 4500 et t = 75 000) & Orientation de V au pic de la crue (t= 4500) - A_Milieu70_crue

Comme attendu, les crues modifient significativement la distribution de l'écoulement dans l'étang. Les simulations réagissent différemment en fonction du maillage utilisé, il est donc compliqué de tirer une conclusion quant à la manière dont l'écoulement s'organisera dans l'étang en cas de crue. De plus, le fait que le débit de sortie et donc le niveau d'eau restent supérieurs au niveau initial pendant une longue période (Section *4.3.1 Débits de sortie pendant un épisode de crue*) permet de se rendre compte de l'influence de la hauteur d'eau dans l'étang sur l'écoulement. La morphologie de celui-ci ne pourrait donc être étudiée avec précision qu'en analysant cette hauteur d'eau sur des périodes extrêmement longues permettant de rendre compte de sa lente évolution au fil des crues de différentes intensités.

Pour conclure, une crue annuelle **permet d'étendre la zone où la contrainte de cisaillement est suffisante pour emporter les sédiments** dans le premier tiers de l'étang. **Leur impact sur la morphologie de l'écoulement au pic de la crue est significatif** et recoupe les observations à propos de la contrainte τ^*. La lente évolution de la hauteur d'eau implique que la morphologie de l'écoulement

ne pourrait donc être étudiée à moyen et long terme qu'en simulant sur des périodes beaucoup plus longues.

4.4 Estimation de la distribution des sédiments

Dans le chapitre 3 sont affichés quelques résultats de simulations avec sédiments. Dans cette section, en mesurant l'avancée des sédiments sur les figures, la vitesse moyenne d'avancée dans la direction x du front de sédiments est estimée. Cette dernière semble disparate au tout début des simulations mais rejoint une tendance vers le ralentissement. Cela s'explique par l'étalement progressif du cône de dépôt (Figure *4.31*).

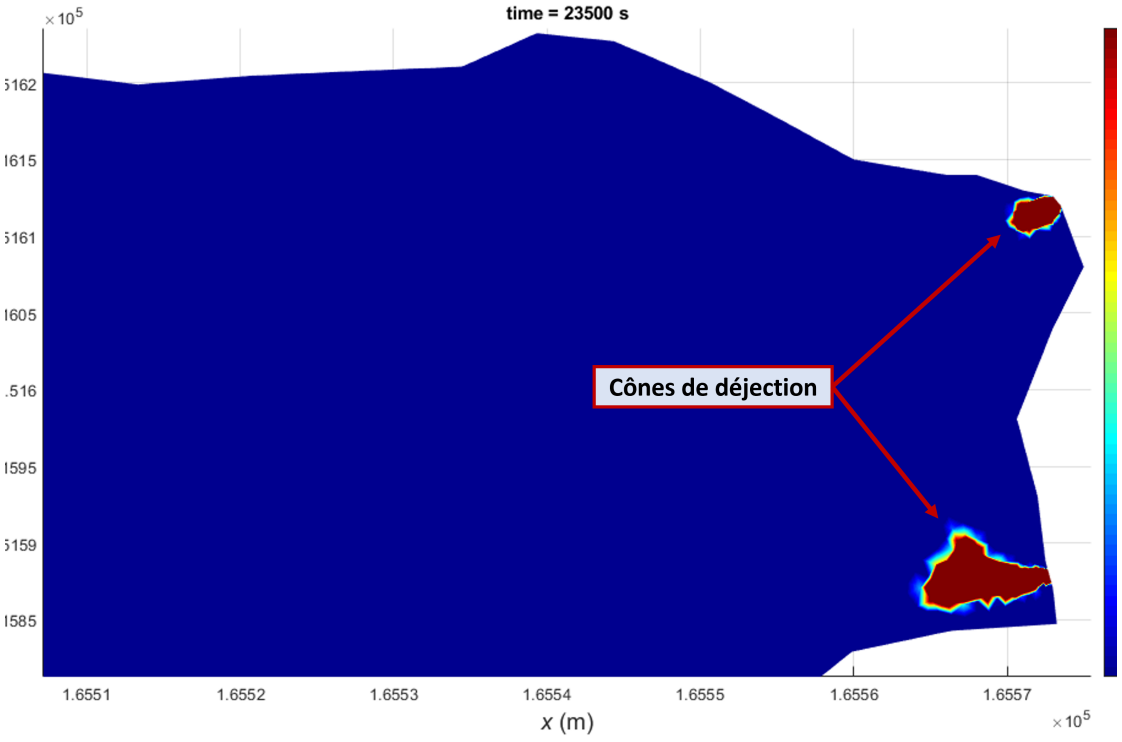


FIGURE 4.31 – Exemple de résultats numériques du transport de sédiments - A_Milieu70_sedim

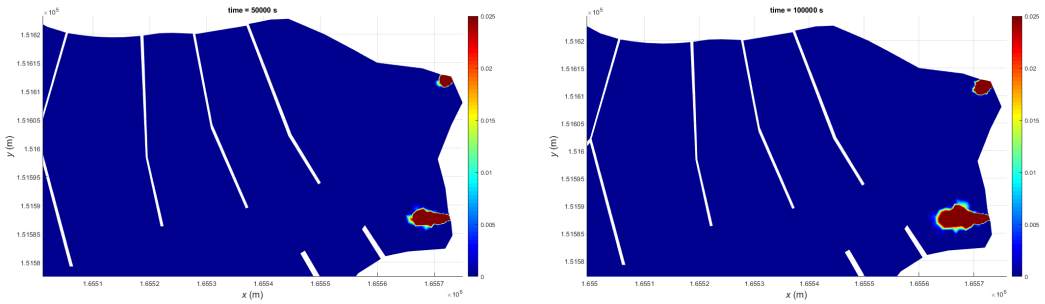


FIGURE 4.32 – Exemple de résultats numériques du transport de sédiments - E3_Milieu70_sedim à 50 000 et 100 000 secondes

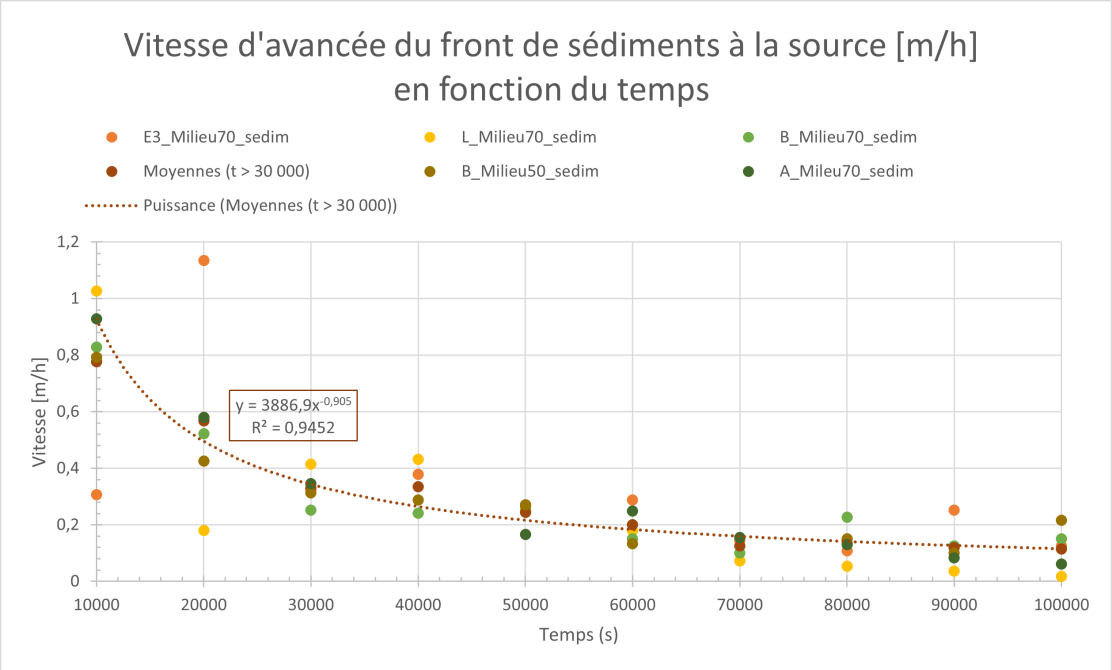


FIGURE 4.33 – Vitesse d'avancée du front de sédiments à la source $[m/h]$ en fonction du temps pour différentes simulations

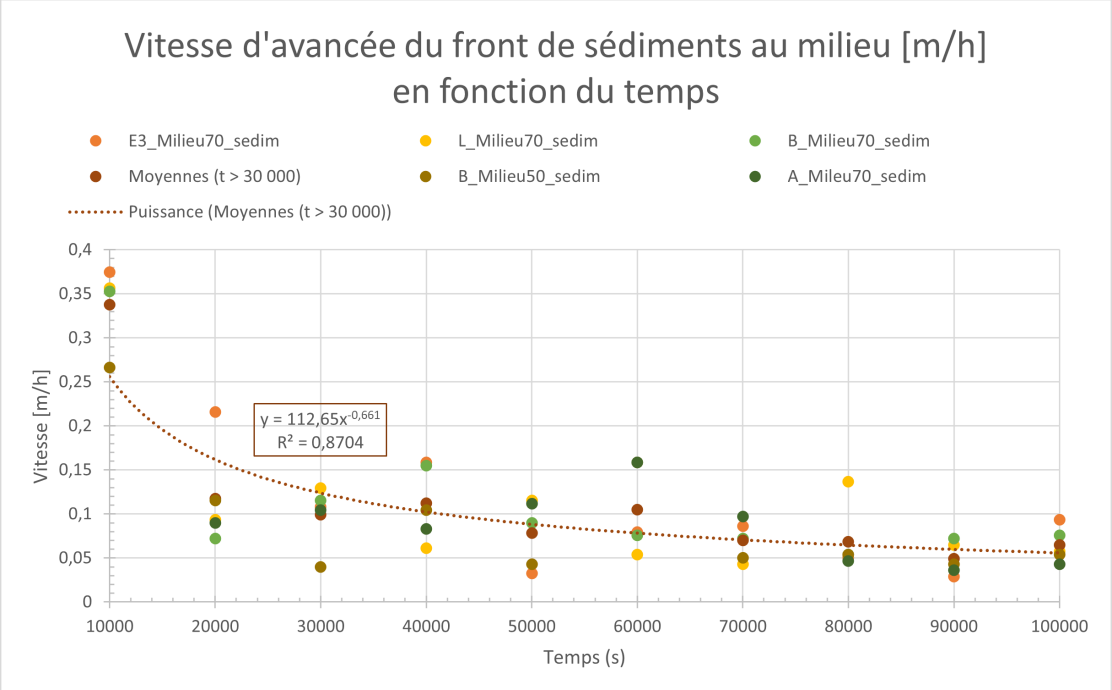


FIGURE 4.34 – Vitesse d'avancée du front de sédiments au milieu $[m/h]$ en fonction du temps pour différentes simulations

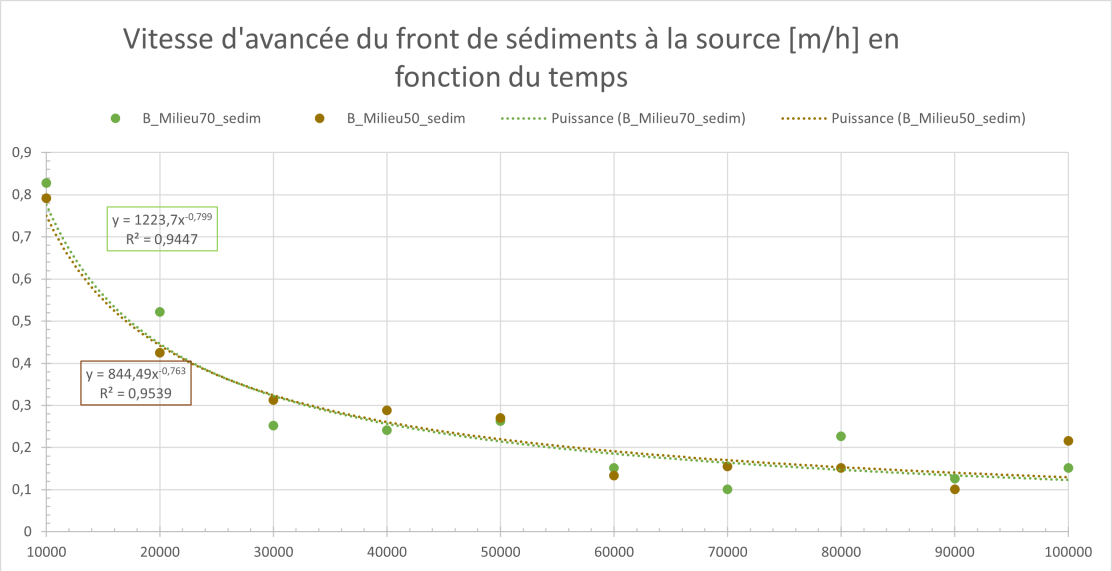


FIGURE 4.35 – Comparaison de la vitesse d'avancée du front de sédiments à la source $[m/h]$ en fonction du temps pour 50% et 70% de prélèvement

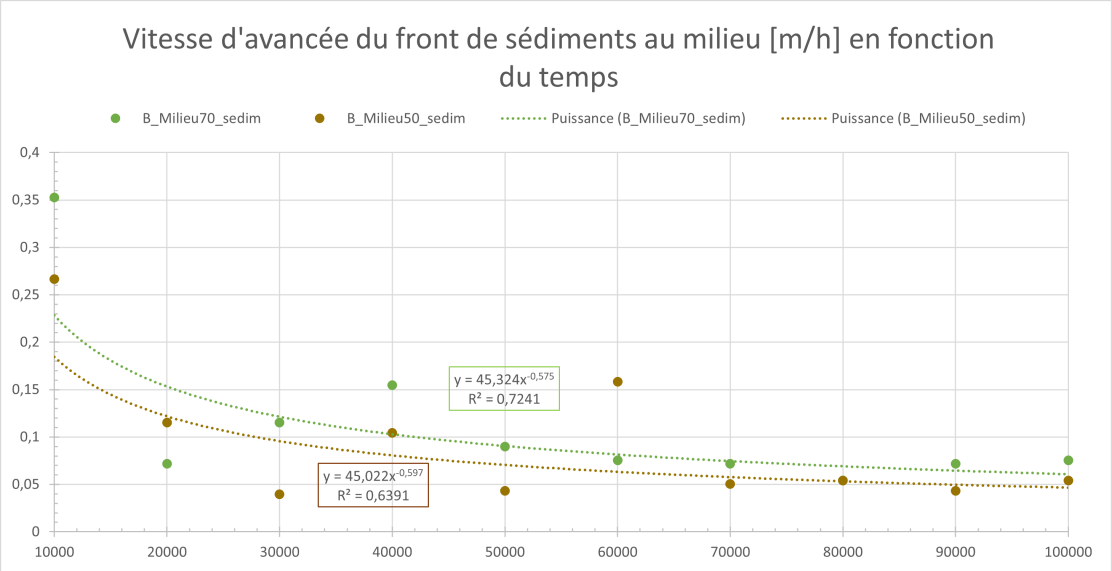


FIGURE 4.36 – Comparaison de la vitesse d'avancée du front de sédiments au milieu $[m/h]$ en fonction du temps pour 50% et 70% de prélèvement

Trois conclusions émergent des simulations avec sédiments et des résultats numériques présentés ci-dessus. Premièrement, il est clair que l'apport de sédiments par la source est supérieur. Les observations de terrain réalisées plusieurs semaines après la vidange de l'étang corroborent ce résultat. Deuxièmement, les simulations avec sédiments semblent réalistes mais nécessitent d'importantes capacités de calcul. En effet, des simulations plus longues seraient nécessaires pour voir apparaître le front de sédiments prévisible grâce à la distribution de la contrainte et aux observations de l'envasement découvert lors de la vidange de l'étang. Les courbes de vitesse, décroissantes, rendent compte de cet étalement et laissent présager l'apparition de cette pente progressive de sédiments à l'amont de l'étang. Attention,

tout de même, à ne pas interpréter les vitesses calculées littéralement. En effet, l'étalement latéral du cône de dépôts n'est pas pris en compte lors de l'estimation de la vitesse du transport de sédiments. Enfin, le débit prélevé ne **semble provoquer aucun impact sur le transport des sédiments** mais ce résultat est à confirmer puisqu'il a été obtenu sur un seuil maillage (Voir Figures 4.35 et 4.36).

4.5 Impacts des épis

4.5.1 Discussion du positionnement des épis

Pour entamer les recherches concernant le placement d'épis dans l'étang, un premier essai a été réalisé (Maillage 7 - Simulations E2). Les résultats obtenus sur ce maillage permettent d'orienter les choix pour la création d'un second maillage (Maillage 8 - Simulations E3). La comparaison des résultats obtenus sur ces deux configurations d'épis avec les résultats obtenus sur le maillage 4 permet d'étudier l'impact des épis en terme de contrainte de cisaillement ainsi qu'en terme d'organisation de l'écoulement.

Contrainte de cisaillement

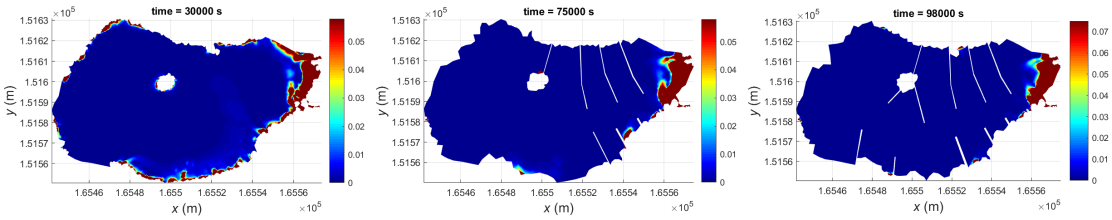


FIGURE 4.37 – Comparaison de la distribution de la contrainte dans les simulations A_Milieu70, E2_Milieu70 et E3_Milieu70

L'effet des épis sur la distribution de la zone d'emport est limité. Il apparaît tout de même que la contrainte diminue au nord de la zone amont de l'étang et semble s'orienter préférentiellement entre les épis.

Distribution de l'écoulement

Ici, l'échelle de couleur a été réduite sur l'intervalle [0 0,05] pour pouvoir augmenter la visibilité de l'effet des épis sur l'écoulement.

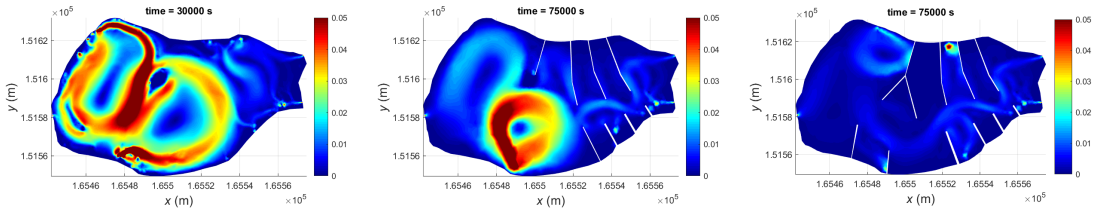


FIGURE 4.38 – Comparaison de la distribution de la vitesse dans les simulations A_Milieu70, E2_Milieu70 et E3_Milieu70

La comparaison des écoulements permet les observations suivantes. Premièrement, les épis orientent clairement le courant dans une direction privilégiée. Deuxièmement, l'installation d'épis sur tout l'étang semble nécessaire pour diriger l'écoulement directement vers l'exutoire. Troisièmement, l'écoulement s'installe sous la forme de méandres entre les épis.

4.5.2 Influence d'une crue sur les épis

Contrainte de cisaillement

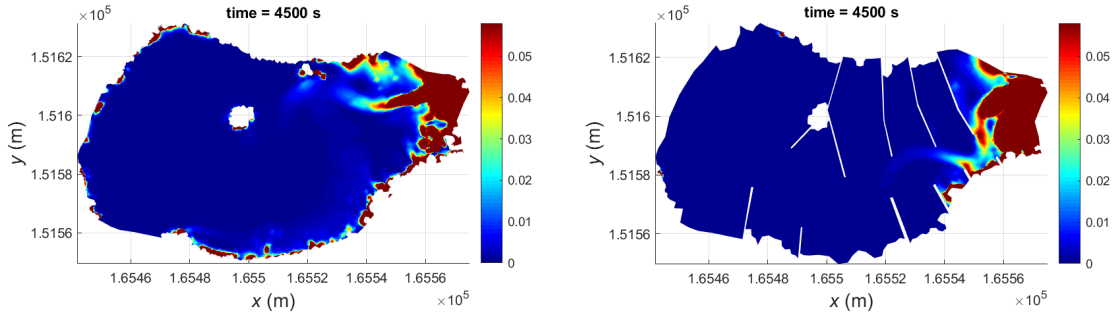


FIGURE 4.39 – Comparaison de la distribution de contrainte τ^* au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue

Distribution de l'écoulement

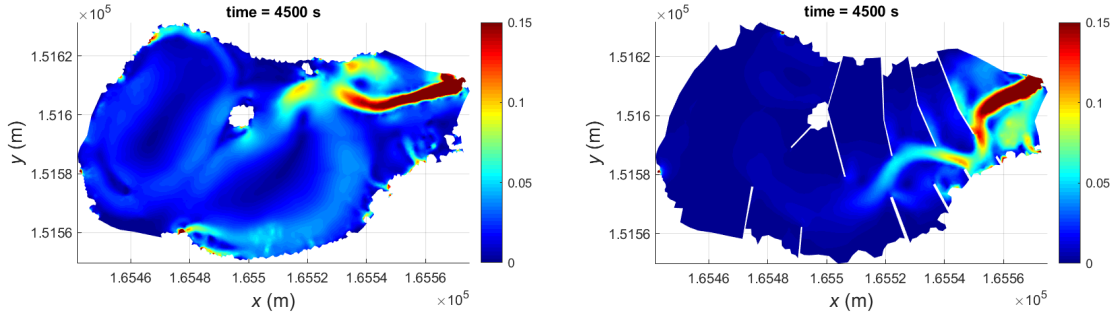


FIGURE 4.40 – Comparaison de la distribution de vitesse V au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue

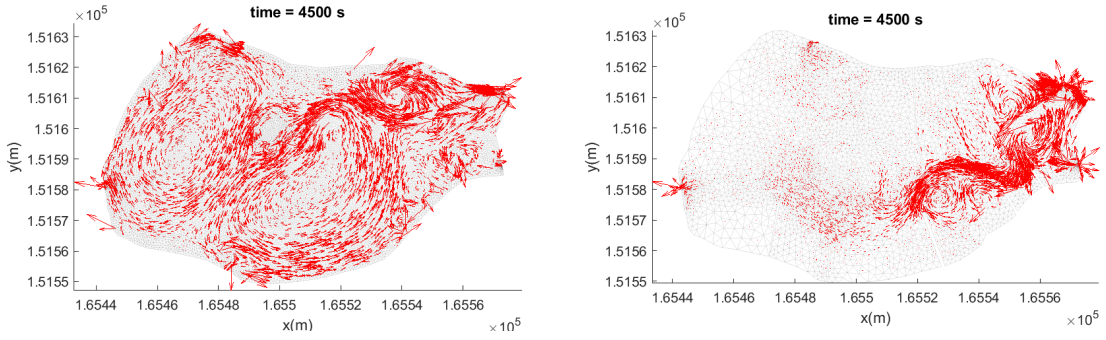


FIGURE 4.41 – Comparaison de l'orientation de vitesse V au pic de la crue avec et sans épis - A_Milieu70_crue & E3_Milieu70_crue

Comme attendu, les épis modifient la distribution de la contrainte d'emport τ^* et de l'écoulement dans l'étang lors d'une crue. La "langue" de contrainte et de vitesse s'étendant d'est en ouest sur la simulation sans épis, s'oriente maintenant vers l'ouverture entre les épis. Ces derniers vont donc bien orienter le flux de sédiments vers l'exutoire.

Sur le long terme, les recirculations entre les différents épis vont y favoriser le dépôt de sédiments, entamant une transition vers des zones plus marécageuses. Les sédiments qui se déposeront dans le sillon créé par les épis, seront petit à petit transportés jusqu'à l'exutoire.
A nouveau, il faudrait pouvoir simuler le comportement de l'étang sur plusieurs mois voire plusieurs années pour confirmer ces intuitions.

4.6 Conclusion

Un point essentiel émerge suite à l'analyse des résultats : la morphologie de l'écoulement est très impactée par le degré de raffinement du maillage et les simulations réalisées sur les différents maillages ne fournissent donc pas des résultats totalement cohérents.
D'un maillage à l'autre, l'écoulement change : le courant principal qui s'établit passe parfois au-dessus de l'île, parfois en dessous, le sens de rotation des recirculations et leur nombre change également. Ainsi l'étude de convergence réalisée ne permet pas d'affirmer que le raffinement des maillages soit suffisant. Néanmoins, lorsque les conclusions tirées des différentes simulations concordent lors de l'analyse de l'impact d'un paramètre d'étude donné (position du point d'injection, débit injecté,...), il semble raisonnable de considérer ces conclusions comme admissibles.

Ainsi, il a été observé que la variation du débit prélevé dans le Blanc-Ry hors période de crue a une faible influence sur la distribution de l'écoulement dans l'étang et permet de légèrement moduler l'intensité des recirculations. Mais cela n'a pas d'impact sur la distribution sur la contrainte de cisaillement.
Par ailleurs, le choix de la position d'injection semble permettre de modifier légèrement la distribution de la contrainte et la morphologie de l'écoulement dans la zone amont de l'étang, proche des entrées considérées.

Les simulations avec crues révèlent des résultats cohérents avec les suppositions, comme l'emport de sédiments plus loin dans l'étang et la modification importante de l'écoulement, lors du pic de crue. Elles révèlent aussi que la faible évolution de la hauteur d'eau implique un régime transitoire long, dans le temps. Il serait intéressant de simuler l'évolution de cet état métastable entre des crues de différentes intensités.
Les simulations avec sédiments ne permettent pas d'obtenir des résultats significatifs quant aux impacts des différents paramètres étudiés sur leur comportement. Elles confirment toutefois que *SVE2D* permet de simuler leur transport correctement. Elles confirment aussi les observations de terrain, qui indiquent que les sédiments se déposent principalement dans la zone amont de l'étang.
Enfin, les épis permettent de modeler l'écoulement et l'emport des sédiments dans une certaine mesure. Les possibilités offertes par ce type d'aménagement seront discutées dans le chapitre suivant.

L'analyse des résultats a fait ressortir un autre point important qui s'exprime sous forme d'**incohérences de conservation de volume**. (voir *Annexe A Conservation du volume*)

Chapitre 5

Scénarios envisagés

Au vu des résultats numériques présentés dans le chapitre précédent, 3 scénarios sont envisagés et décrits dans ce chapitre. Bien sûr, d'autres scénarios seraient envisageables mais ceux présentés sont identifiés comme les plus pertinents par rapport aux paramètres étudiés.

- Scénario 1 : Maintien de l'étang sans connexion avec le Blanc-Ry.
- Scénario 2 : Tentative de maintien de l'étang actuel avec connexion avec le Blanc-Ry.
- Scénario 3 : Retour progressif vers une zone marécageuse avec installation d'épis.

5.1 Scénario 1 : Maintien de l'étang sans connexion avec le Blanc-Ry

Ce scénario correspond à la situation actuelle de l'étang. C'est le cas le plus simple, l'étang est géré de la même manière qu'il l'a été jusqu'à maintenant depuis que l'UCLouvain a repris sa gestion. Cela signifie donc de continuer à réaliser une mise à sec tous les 10 ans au minimum.
En effet, la dernière vidange ayant eu lieu en 2007, les observations de terrain montrent qu'en 15 ans les sédiments se sont déjà accumulés en grande quantité dans l'étang, particulièrement du côté amont où il est facile d'observer l'ancienne palissade en bois placée par l'ancien garde-chasse, totalement recouverte de sédiments (Figure 1.22).

Il faut quand même préciser que les castors sont actuellement en train de créer une liaison entre le Blanc-Ry et l'étang tant à l'aval qu'à l'amont. Pour pouvoir maintenir ce scénario, il va donc falloir porter une attention particulière sur leur activité et même peut-être intervenir.

Ce scénario ne remplit pas l'objectif initial de renaturalisation de la zone mais permet plusieurs choses :

- Maintenir l'étang dans sa forme actuelle à laquelle nous sommes attachés.

- Laisser un délai pour approfondir les recherches sur ce projet de renaturalisation.

5.2 Scénario 2 : Tentative de maintien de l'étang actuel et connexion avec le Blanc-Ry.

L'objectif de ce scénario est d'établir une continuité hydrologique entre le Blanc-Ry et l'étang en prélevant un certain pourcentage du débit total du Blanc-Ry, sans aménagement dans l'étang. Les aménagements mis en place se limiteraient à l'installation de passes à poissons à l'amont et à l'aval. Ce scénario permettrait de briser la barrière écologique entre l'étang et le Blanc-Ry, cette barrière que le castor est déjà en train de rompre.
Dans ce scénario, l'idéal serait que les sédiments apportés par le Blanc-Ry soient emportés petit à petit jusqu'à la sortie de l'étang et donc finalement avoir autant de sédiments entrants que de sédiments sortants.
Malheureusement, les simulations concordent sur un point : sans aménagement, il n'est pas possible de canaliser le flux hydraulique et donc sédimentologique de l'entrée jusqu'à la sortie et cela, peu importe la position d'entrée ou le débit prélevé dans le Blanc-Ry.
L'étude du transport de sédiments, que ce soit leur avancée ou l'étude de la contrainte, montre qu'ils vont surtout s'accumuler à l'entrée. Lorsqu'ils se seront assez accumulés pour réduire la lame d'eau et augmenter la contrainte, les sédiments seront emportés plus loin formant alors un front en pente douce qui progressera petit à petit vers l'aval de l'étang. Pour confirmer ce comportement, il faudrait pouvoir simuler une période de plusieurs mois ou années.
Puisque le débit n'a pas d'influence significative sur l'emport des sédiments, le prélèvement adéquat du débit du Blanc-Ry devra être déterminé de manière à avoir un tirant d'eau suffisant au passage des poissons dans les passes prévues. La positionnement de ces dernières sera déterminée par les études de faisabilité les concernant puisque les simulations n'indiquent pas de position à favoriser.

Dans un tel scénario, la stratégie la plus intéressante serait de mettre en place des dispositifs pour réduire le débit solide entrant. Les barrages successifs de castors à l'amont de l'étang contribuent actuellement à permettre l'atterrissage des sédiments et de la matière organique. Il serait bénéfique d'en tirer parti. En complément, un bassin de sédimentation pourrait être installé à mi-pente de la passe à poissons amont pour piéger les sédiments avant leur entrée dans l'étang. Il y aurait alors seulement ce dispositif à curer à intervalle régulier. Il faudra alors prêter une attention particulière aux castors, qui pourraient avoir tendance à venir créer un barrage dans cette passe.
Ces stratégies et dispositifs ne permettent de diminuer le débit solide d'entrée qu'en provenance du Blanc-Ry. La quantité de sédiments en provenance de la source et l'apport de matière organique de la végétation environnante ne pouvant évidemment pas être régulés.

Enfin, il est important de noter qu'un tel scénario présente tout de même des

limites. Les sédiments ne seront jamais totalement retenus par ces dispositifs et une partie finira toujours par être charriée dans l'étang ; notamment en période de crue. Ainsi, ce scénario permet plusieurs choses :

- Établir une continuité hydrologique et écologique entre le Blanc-Ry et l'étang.
- Rallonger la période entre les mises en assec, rompant de fait moins régulièrement le cycle écologique de cette zone humide.
- Maintenir l'étang dans sa forme actuelle à laquelle nous sommes attachés.

5.3 Scénario 3 : Retour progressif vers une zone marécageuse avec installation d'épis

Dans ce scénario est considéré l'installation de passes à poissons à l'amont et à l'aval de l'étang ainsi que d'épis émergés. Ces derniers créeraient des zones de recirculation, où le dépôt de sédiments serait favorisé et un ruisseau en méandres apparaîtrait.
En fonction de l'implantation des épis, il serait possible de choisir la trajectoire globale du ruisseau et de favoriser des sections à l'écoulement plus rapide et d'autres plus calmes comme par exemple plusieurs mares successives. Ainsi la mise en place d'un tel dispositif ouvre le champ des possibles. L'impact des épis étant considérable, tant sur le transport des sédiments que sur l'écoulement dans l'étang, le choix du tracé du ruisseau et des paramètres (débit prélevé et point d'injection) orientera la recherche d'une configuration idéale des épis.

A nouveau, comme pour le scénario précédent, le prélèvement adéquat du débit du Blanc-Ry devra être déterminé de manière à avoir un tirant d'eau suffisant au passage des poissons dans les passes prévues. En ce qui concerne le point d'injection, deux stratégies de réflexion se dégagent. La première consiste à fixer la position du point d'injection (par le design de la passe à poissons par exemple) et à en déduire une disposition géométrique adaptée des épis pour concentrer le courant jusqu'à la sortie. La seconde, à l'inverse, consiste à fixer la position des épis (sur des critères paysagers par exemple) et à adapter alors le point d'injection en conséquence.
Par exemple dans le cas des simulations sur le maillage 7, si le point d'injection était situé à la source, lors d'un épisode de crue, la "langue" de contrainte d'emport des sédiments ne serait pas cassée par la première barrière d'épis mais serait renforcée par cette concentration de courant, emportant les sédiments plus loin vers la sortie.

Dans un tel scénario, il n'y aurait plus de zone de sédimentation privilégiée permettant un curage localisé, et l'étang évoluerait vers une zone finalement marécageuse, bien différent de ce qu'il est actuellement.
Cependant, les castors restent présents et ont tendance à construire un barrage là où le courant est puissant. En concentrant le flux venant du Blanc-Ry et de la source grâce aux épis, le courant sera plus fort. Le risque que les castors décident alors d'y faire un barrage n'est pas négligeable. L'impact des castors est difficile à prévoir. En effet, ceux-ci, véritables ingénieurs des bois, vont fort probablement s'approprier cette zone nouvellement marécageuse et l'aménager (creusement de

chenaux, construction de barrages, de huttes, etc...). Leur présence pourrait également partiellement empêcher le reboisement naturel de la zone, que l'on observe déjà progressivement dans la zone des macrophytes.

Ainsi, ce scénario ne permet pas de maintenir l'étang dans sa forme actuelle à laquelle nous sommes attachés, mais remplit les objectifs suivants :

- Établir une continuité hydrologique et écologique entre le Blanc-Ry et l'étang.
- Ne plus rompre le cycle écologique de la zone en supprimant les mises en assec.
- Augmenter la diversité d'écosystèmes.

Conclusion

Ce mémoire avait comme objectif l'étude de faisabilité de connexion hydrologique entre le Blanc-Ry et l'étang de Warlongroux ainsi que l'impact du nouvel apport de sédiments qui en découle.

L'étang de Warlongroux est un site très riche en biodiversité. Sa gestion actuelle implique une mise en assec décennale en vue de minéraliser la matière organique de son contenu vaseux. Cette mise en assec provoque une rupture écologique périodique qu'il serait souhaitable d'éviter.

L'étude sédimentologique, issue du prélèvement d'échantillons au cours du Blanc-Ry a permis d'obtenir la distribution granulométrique, le poids propre, la porosité et la concentration en matière organique des sédiments. L'évolution de ces grandeurs au fil du Blanc-Ry a également pu être observée. De plus, l'analyse des données hydrologiques disponibles et les mesures de débit sur le terrain permettent d'obtenir les débits alimentant l'étang. La prise d'images aériennes par drone et le traitement par photogrammétrie des images obtenues permettent quant à eux d'obtenir la bathymétrie de l'étang. Ces analyses et mesures ont permis de fixer les paramètres utilisés dans les diverses simulations réalisées.
La mise en assec de l'étang fut plusieurs fois reportée. Il a donc fallu arbitrer entre le raffinement du maillage, la quantité de simulations et la durée de simulations. Le parti pris a été celui de réaliser un maximum de simulations en faisant varier les paramètres étudiés sur des maillages de plus en plus fin.

La succession des premiers maillages et résultats obtenus ont orienté la définition du contour, de la méthodologie et des paramètres de création des maillages qui seront finalement utilisés pour simuler l'hydromorphologie de l'étang. La topographie de ces maillages se base sur le relevé bathymétrique.

L'étude des différents paramètres a permis d'apporter plusieurs conclusions intéressantes. Sans aménagement, les sédiments ne sont pas transportés jusqu'à la sortie et ont même tendance à s'accumuler à l'entrée. Hors épisode de crue, ni la position ni le débit prélevé dans le Blanc-Ry n'influencent significativement l'emport de sédiments.
En outre, la position d'entrée n'influence pas la distribution du débit et de la vitesse dans l'étang. Le débit prélevé quant à lui, augmente légèrement l'intensité des recirculations.
Lors du pic de débit d'un épisode de crue annuelle, la zone d'emport des sédiments s'étend jusqu'au tiers de l'étang. Les sédiments seront donc emportés dans l'étang lors de ces épisodes. L'augmentation brusque de débit conséquente aux crues en-

traîne une élévation du niveau d'eau dans l'étang. Un état métastable s'installe entre les pluies successives.

L'étude d'aménagements, sous la forme d'épis montre qu'il est possible d'orienter le flux de sédiments vers la sortie, mais sans en empêcher le dépôt. L'étang pourrait alors devenir un zone marécageuse. Mais celui-ci, tel qu'on le connaît maintenant changerait alors totalement d'aspect, visuel comme écologique.

Il serait alors possible, soit d'accepter cette transition, soit de continuer à gérer l'étang comme il l'est actuellement, c'est à dire en pratiquant une mise à sec périodique, soit d'installer un bassin de collecte de sédiments avant l'étang. Un curage périodique de ce bassin permettrait de ralentir la fréquence de vidanges complètes de l'étang.

Cette étude se limite à des considérations hydromorphologiques mais beaucoup de questions restent en suspens et seront étudiées prochainement par les acteurs de la gestion de l'étang. En fonction du scénario choisi, des recherches complémentaires devront sûrement être réalisées pour confirmer ces conclusions sur le long terme.
C'est pourquoi Thibaut Thyrion, le garde forestier actuel, envisage plutôt de refaire une vidange dans 4 à 5 ans lorsque plus d'informations seront disponibles, pour pouvoir envisager de revenir à un marais avec de belles mares ! Cela correspondrait à appliquer provisoirement le scénario 1 le temps d'étudier la mise en place d'une stratégie du type de celle développée dans le scénario 3. En effet, ce projet de renaturalisation du Blanc-Ry et de l'étang de Warlongroux demande une meilleure compréhension du milieu.

Les perspectives d'approfondissement de ce sujet sont nombreuses tant sur un plan théorique que pratique. Une bathymétrie sans les arbres morts tombés dans l'étang permettrait d'améliorer la précision du modèle numérique de terrain. Des moyens complémentaires pourraient être mis en oeuvre dans ce sens comme par exemple la prise d'images grâce à une caméra type *Go Pro* au bout d'une perche. De plus, une campagne de carottage de la vase permettrait d'estimer l'apport en matière organique par la végétation environnante et l'apport de sédiments.
De surcroît, la réalisation de nombreuses simulations supplémentaires serait intéressante afin étudier plus exactement l'impact du raffinement du maillage et l'interaction entre les sédiments et l'écoulement à long terme. Cela permettrait notamment de réaliser un bilan de masse ; c'est à dire comparer les débits solides d'entrée et de sortie afin d'obtenir un ordre de grandeur de la vitesse d'accumulation des sédiments. Des simulations sur de longues durées en considérant une succession d'épisodes pluvieux et de périodes plus sèches, permettraient de mieux étudier l'évolution du niveau d'eau dans le temps.
Dans le domaine informatique l'utilisation de *SVE2D* pourrait être facilité du point de vue de l'utilisateur. En effet, le passage entres les différents logiciels est long et fastidieux (QGIS - GMSH - Matlab - Codeblocks). Centraliser les différentes codes sur une seule interface pourrait réduire le nombre de logiciels utilisés et le facteur d'erreur dû à la manipulation des données d'un logiciel à l'autre.

Des études parallèles pourraient également être réalisées sur la biodiversité du site, comme l'impact sur l'ichtyofaune qu'engendrerait une transition vers une zone marécageuse et les implications qui en découleraient. Ainsi des études dans plusieurs disciplines sont nécessaires concernant les aménagements végétaux, les passes à poissons, la barrière écologique que constituent les berges et notre rapport à l'étang et à la "nature" [1].

1. https ://www.gallimard.fr/Catalogue/GALLIMARD/Bibliotheque-des-Sciences-humaines/Par-dela-nature-et-culture♯

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette étude et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre directrice de mémoire Pr. Sandra SOARES FRAZAO, professeure d'hydraulique au sein du pôle *Civil and environmental engineering* de l'école polytechnique de Louvain à l'université catholique de Louvain, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils avisés, qui ont contribué à alimenter notre travail ; ainsi qu'à l'ensemble des équipes du service de gestion des espaces extérieurs de l'UCLouvain et en particulier Monsieur Thibaut Thyrion, pour leur collaboration et la confiance qu'ils nous ont accordées.

Nous remercions également l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'UCLouvain et les intervenants professionnels responsables de notre formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :

Monsieur Robin MEURICE et Madame Masoumeh EBRAHIMI qui nous ont beaucoup appris et partagé leurs connaissances et expériences en matière de photogrammétrie.

Messieurs Pierre MERTENS (UCLouvain - IMMC), Maxime THOMAS (UCLouvain - ELIE/SOLS), Sébastien François (UCLouvain - ELIE), Sébatien Lambot (UCLouvain - ELIE), Frédéric Van Wonterghem (UCLouvain - LACaMi), Yves Zech (UCLouvain - IMMC), Simon Ridley (UCLouvain - ELIE), Olivier Carlier D'Odeigne (SPW - Département Expertises Hydraulique et Environnement), et ... pour les données fournies, pour nous avoir permis l'accès au matériel de mesure et pour avoir répondu à nos questions concernant leur utilisation, ainsi que pour le partage de leurs expériences personnelles dans leurs domaines d'étude respectifs. Leur aide dans l'élaboration de ce mémoire a été précieuse.

La région Wallone pour les moyens de calcul fournis par le Consortium des Équipements de Calcul Intensif (CÉCI), financé par le Fonds de la Recherche Scientifique de Belgique (F.R.S.-FNRS) sous la convention n° 2.5020.11 et par la Région Wallone.

Monsieur Laurent Williot, Madame Annie D'Haene, Madame Isabelle Leterme, Madame Marie-Claire D'Haene, et Monsieur Antoine Markey pour avoir relu et corrigé notre mémoire. Leurs conseils de rédaction ont été très précieux.

Nos parents, familles et amis, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Bibliographie

[1] Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 licence (CC BY-SA). *QGIS Website*. 2020. URL : https://www.qgis.org/fr/site/index.html (visité le 12/05/2022).

[2] AGISOFT. *Agisoft Website*. 2022. URL : https://www.agisoft.com/ (visité le 06/05/2022).

[3] via Wikimedia Commons ANDREAS TREPTE. *Un Martin-pêcheur d'Europe, Marburg, Allemagne*. 2006. URL : https://www.avi-fauna.info/ (visité le 26/04/2022).

[4] Basant AWASTHI et al. « Analyzing the effect of distribution pattern and number of GCPs on overall accuracy of UAV photgrammetric results ». In : oct. 2019.

[5] via Wikimedia Commons BCB. *Saule Cendré au printemps*. 2007. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/Salix_cinerea_Habitus_in_spring_Germany.jpg (visité le 19/05/2022).

[6] via Pl@ntNet BENJAMIN DACQUIN. *Épilobe à tige carrée*. 2021. URL : https://bs.plantnet.org/image/o/3ccc76dce25fbf863fd5ec8186d4d3b906d58153 (visité le 19/05/2022).

[7] BOLDIE. *Anodonta cygnea from Sweden*. 2006. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anodonta_cygnea1.jpg (visité le 26/04/2022).

[8] Jurgiel BORYS. *QGIS Python Plugins Repository - Point sampling tool*. 2020. URL : https://plugins.qgis.org/plugins/pointsamplingtool/ (visité le 06/05/2022).

[9] Violaine CAPPELLEN. « Fonctionnement hydrologique du bassin versant forestier du Blanc-Ry (Louvain-la-Neuve) ». In : *Mémoire de fin de Master - Université Catholique de Louvain* (sept. 2012).

[10] via Wikimedia Commons CARL AXEL MAGNUS LINDMAN. *Aulne Glutineux*. 2007. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Klibbal2.jpg (visité le 19/05/2022).

[11] M.-A. DICONNE. « LES JAUGEAGES DES DÉBITS DES COURS D'EAU AU MOULINET HYDROMÉTRIQUE PAR LA MÉTHODE D'INTÉGRATION ». In : *La Houille Blanche* 58.1 (mars 1972). DOI : 10.1051/lhb/1972003.

[12] DJI. *MAVIC PRO*. 2022. URL : https://www.dji.com/be/mavic (visité le 12/05/2022).

[13] Kamboh S. A - Izzatul N. S - Labadin J. - Monday O. Eze. « Simulation of 2D Saint-Venant equations in open channel by using MATLAB ». In : *Journal of IT in Asia* (déc. 2015). DOI : 10.33736/jita.47.2015.

[14] via Wikimedia Commons Fornax. *Laîche des Marais*. 1986. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Carex_acutiformis_eF.jpg (visité le 19/05/2022).

[15] Jérome Fournier et al. « Analyses granulométriques principes et méthodes ». In : *CNRS* Dinard.100 p (oct. 2012).

[16] Meurice Robin - Sandra Soares Frazao. « A 2D HLL-based weakly coupled model for transient flows on mobile beds ». In : *Journal of hydroinformatics* (mars 2020). DOI : 10.2166.

[17] via Wikimedia Commons Georg Mittenecker. *Brochet à l'affût dans les branches d'un arbre mort*. 2007. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esox_hdm.JPG (visité le 19/05/2022).

[18] Leica Geosystems. *Leica GPS1200 Manuel de l'utilisateur*. 2007. URL : http://www.geoaxxis.de/manuals/gps1200/gps1200_user_fr.pdf (visité le 06/05/2022).

[19] Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle. *A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. 2022. URL : https://gmsh.info (visité le 01/06/2022).

[20] Peou HANG. « Les données poédologiques enrichissent la modélisation de la relation pluie-débit. Conception et dévelopement du modèle OGIVE et application à des micro bassins-versants belges ». In : *Thèse de Doctorat - Université Catholique de Louvain* (2002).

[21] via Wikimedia Commons Harald Olsen. *A European Beaver in Norway*. 2006. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beaver_pho34.jpg (visité le 26/04/2022).

[22] Lambrechts Jonathan. *QGIS Python Plugins Repository - GMSH*. 2021. URL : https://plugins.qgis.org/plugins/gmsh/ (visité le 06/05/2022).

[23] Benoît Camenen et Magnus Larson. « Transport solide par charriage sous une interaction houle-courant ». In : *Revue Européenne de Génie Civil* 9 :7-8 (2005). DOI : 10.1080/17747120.2005.9692789.

[24] Müller R. Meyer-Peter E. « Formulas for Bed-Load transport ». In : *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research* (juin 1948). DOI : 10.2112/06-0694.1.

[25] via Wikimedia Commons Michael Becker. *Mentha longifolia sur un alpage dans la forêt de Bregenz*. 2005. URL : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b9/Mentha_longifolia_2005.08.02_09.53.56.jpg (visité le 19/05/2022).

[26] David Dickenson of NATURESCENE. *Épilobe à grande fleur*. 2022. URL : http://www.naturescene.net/photos/Epilobium%5C%20hirsutum%5C%20plant.jpg (visité le 19/05/2022).

[27] Valeria-Ersilia Oniga, Ana-Ioana Breaban et Florian Statescu. « Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images ». In : *Proceedings* 352.2 (mars 2018).

[28] World Meteorological Organization. *Manual on Stream Gauging Volume I – Fieldwork*. World Meteorological Organization, 2010. isbn : 978-92-63-11044-2.

[29] via Wikimedia Commons Petr Filippov. *Typha angustifolia, from Bílé Karpaty Mountains, Rasová near Starý Hrozenkov, Czech Republic*. 2007. url : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Typha_angustifolia2.JPG (visité le 19/05/2022).

[30] Enoc Sanz-Ablanedo et al. « Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used ». In : *Remote Sensing* 1606.10 (oct. 2018).

[31] R. L. Soulsby. « Dynamics of marine sands ». In : (1997).

[32] The Code : :Blocks Team. *Code : :Blocks Website*. 2020. url : https://www.codeblocks.org (visité le 01/06/2022).

[33] UCLouvain. *Bois de Lauzelle (LLN)*. 2022. url : https://uclouvain.be/fr/decouvrir/bois-de-lauzelle-lln.html (visité le 12/05/2022).

[34] Leo C. Van Rijn. « Sediment Transport, Part I : Bed Load Transport ». In : *Journal of Hydraulic Engineering* (1984). doi : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).

[35] Service Public de Wallonie (SPW). *Fiche Descriptive - Carte du dépôt de la guerre (1865 - 1880)*. 1865. url : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/2005026d-c9e0-41c4-81f2-758ee21d47af.html (visité le 26/04/2022).

[36] Service Public de Wallonie (SPW). *Fiche Descriptive - Cartes de Ferraris (1770-1778)*. 2010. url : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/b8b9e555-a4d1-49bf-940d-31bbbf7613fc.html (visité le 26/04/2022).

[37] Service Public de Wallonie (SPW). *Fiche Descriptive - Cartes de Vandermaelen (1846-1854)*. 2007. url : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/67ed5145-72be-499b-8a95-c94711f344f1.html (visité le 26/04/2022).

[38] Service Public de Wallonie (SPW). *Fiche Descriptive - Orthophotos 1971*. 2016. url : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/3059d00d-9666-4a90-b606-88bbd861dd83.html (visité le 26/04/2022).

[39] Service Public de Wallonie (SPW). *Fiche Descriptive - Orthophotos 2021*. 2021. url : https://geoportail.wallonie.be/catalogue/7608c4c6-1434-4291-940c-8b9c8da64484.html (visité le 26/04/2022).

[40] Y.Martin. *Laîche Paniculée*. 2007. url : https://inpn.mnhn.fr/photos/uploads/webtofs/inpn/1/261021.jpg (visité le 19/05/2022).

[41] Sandra Soares Frazao - Yves Zech. « HLLC scheme with novel wave-speed estimators appropriate for two-dimensional shallow-water flow on erodible bed ». In : *Wiley InterScience* (jan. 2010). DOI : 10.1002/fld.2300.

Annexe A

Conservation du volume

Le débit d'entrée et de sortie ne coïncident pas, comme la figure A.1 le montre, et dès lors, le volume n'est pas conservé.

Pour calculer le débit d'entrée, l'hydrogramme de crue avec prélèvement à 70% est affiché, auquel est ajouté le débit constant de 0.0032 $[m^3/s]$ provenant de la source. Pour ce qui est du débit de sortie, des capteurs ont été placés dans les cellules transmissives de sortie. De cette manière, nous disposons des débits qx et qy dans chaque cellule. Ensuite, pour être le plus précis possible, les normales aux cellules de sortie ont été calculées, et le vecteur résultant de qx et qy pour chaque cellule à été projeté sur son vecteur normal correspondant. Finalement, le vecteur obtenu fut multiplié par la largeur du segment de sortie pour obtenir le débit en $m^3/sec.$ Cette méthode est plus rigoureuse mais en prenant seulement le vecteur résultant, les résultats sont très similaires.

Ce phénomène n'a pas pu être expliqué. Il pourrait être dû à la parallélisation, mais du peu de données que nous disposons les résultats sont similaires avec et sans parallélisation du code. Le fait d'avoir peu de données en non-parallélisé découle de l'utilisation d'un seul processeur rallonge énormément le temps de calcul d'une simulation.

Une seconde raison, plus plausible serait que dans ces simulations, on travaille avec de petits débits, et le problème pourrait venir d'un déséquilibre des flux de quantités de mouvement près des berges, là où l'eau ne bouge presque pas.

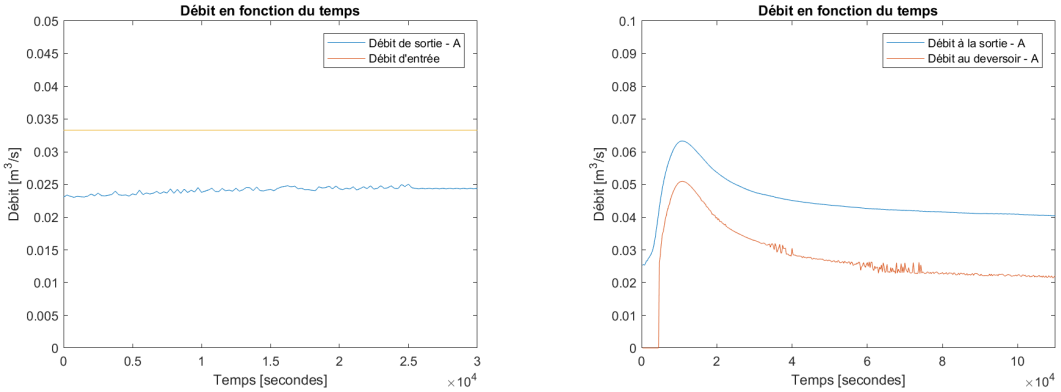


FIGURE A.1 – Comparaison des débits d'entrée et de sortie hors épiosde de crue (gauche) et avec (droite)

Pour illustrer cette non conservation du débit en chiffre, l'intégrale des courbes de crue a été faite à partir des courbes en épisode de crue de la figure A.1. L'intégrale correspond à l'aire sous la courbe et donc au volume injecté sur la période de temps affiché. Il s'avère que 5400 $[m^3]$ furent injectés aux entrées et 8700 $[m^3]$ furent éjectés à la sortie. Il y a donc 3300 $[m^3]$ qui sont sortis au total sur la durée étudiée. Le niveau d'eau dans l'étang devrait donc logiquement descendre.
Sur la figure A.2, est affichée la hauteur d'eau d'une cellule aléatoire mais inondée. On peut observer que le niveau d'eau augmente justement. En sachant que le maillage couvre une superficie d'environ 7500 $[m^2]$, que nous arrondissons à 7000 $[m^2]$ pour tenir compte des berges et de l'île qui ne sont pas couvertes d'eau.
En considérant que la hauteur d'eau dans l'étang est égale à la hauteur de la cellule aléatoire prise comme référence pour la figure A.2, le niveau d'eau augmente de 3.74 $[cm]$ sur la durée étudiée, ce qui correspond à un volume de 260 $[m^3]$ d'eau stocké dans l'étang.

La non-conservation du volume est flagrante, l'analyse de la hauteur d'eau nous indique que l'étang devrait stocker environ 260 $[m^3]$ alors que l'analyse des débits nous indique qu'il aurait du se vider de 3300 $[m^3]$.

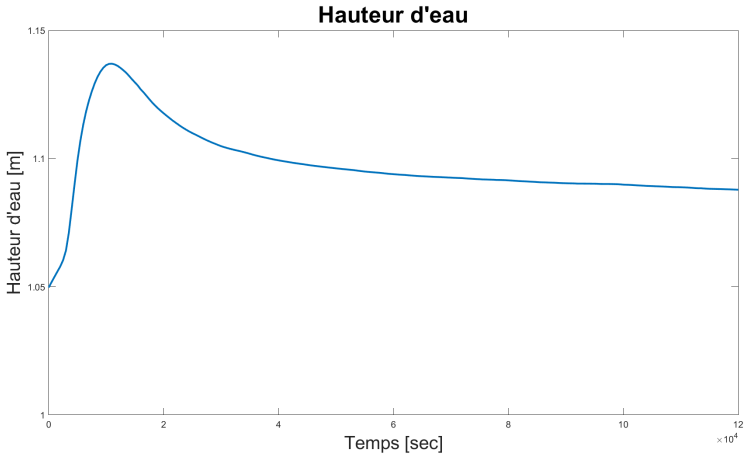


FIGURE A.2 – Hauteur d'eau en fonction du temps pour un épisode de crue - Maillage 4

Annexe B

Contacts

Si vous souhaitez nous joindre dans le futur afin de récupérer certains codes, informations, données ou photographies, nous sommes joignable aux adresses suivantes :

Nom	Prénom	Adresse e-mail	GSM
Leterme	Robin	robin.leterme@hotmail.be	+32 488 272 831
Williot	Antoine	antoinewilliot@yahoo.fr	+32 478 274 299
			+33 778 173 236

Annexe C

Calcul d'erreur entre les différents DEM

C.1 Balises GCP

La figure C.1 reprend toutes les positions mesurées dans le bois de Lauzelle.

C.2 Calcul des erreurs quadratiques moyennes

	GPS	LIDAR	MNT1	MNT2	MNT3	ERROR			
Id Point	Altitude	Altitude2	Altitude3	Altitude4	Altitude5	LIDAR	MNT1	MNT2	MNT3
1	63.478	63.700	67.755	63.123	63.281	0.2217	4.27707	-0.35483	-0.19731
2	63.022	63.254	65.757	62.790	62.837	0.23119	2.7341	-0.23264	-0.18536
3	62.635	63.047	65.509	62.405	62.577	0.41197	2.87386	-0.23028	-0.05839
4	62.145	63.114	63.755	61.737	62.059	0.96943	1.6107	-0.40778	-0.08569
5	62.526	63.239	0.000	61.631	0.000	0.71303	N/A	-0.89472	N/A
6	61.933	62.932	53.085	61.391	61.886	0.99945	-8.84771	-0.54199	-0.04688
7	61.833	62.981	53.277	61.417	61.839	1.14863	-8.55584	-0.41582	0.00626
8	62.293	62.996	55.676	61.768	62.268	0.70324	-6.61668	-0.52439	-0.02497
9	62.497	62.995	59.241	62.226	62.470	N/A	-3.25625	-0.27148	-0.0268
10	64.712	64.700	66.663	63.663	64.420	N/A	1.95123	-1.04855	-0.29135
11	62.838	62.990	65.016	62.973	62.910	N/A	2.17806	0.13488	0.07161
12	62.631	63.043	0.000	63.168	62.682	N/A	N/A	0.53748	0.05111
13	62.736	63.138	68.623	63.062	62.754	N/A	5.88686	0.32676	0.01782
14	63.247	63.205	68.928	63.088	63.080	N/A	5.68169	-0.15827	-0.16642
15	61.307	63.433	64.039	61.767	61.423	N/A	2.7319	0.45974	0.11596
16	61.951	63.323	63.585	61.889	61.947	N/A	1.63414	-0.06203	-0.00435
17	61.572	63.230	62.450	61.808	61.647	N/A	0.87775	0.23616	0.07556
18	63.222	63.206	68.230	62.483	62.968	-0.01633	5.00778	-0.73931	-0.25411
19	61.491	63.070	61.387	61.628	61.543	N/A	-0.10385	0.13678	0.05182
20	61.339	63.036	57.772	61.392	61.396	N/A	-3.56741	0.05244	0.05686
21	61.136	62.897	58.484	61.331	61.228	N/A	-2.65176	0.19533	0.09187
22	61.063	62.957	52.771	61.116	61.153	N/A	-8.29141	0.05289	0.09053
23	61.797	62.940	57.665	61.582	61.773	N/A	-4.13212	-0.21549	-0.02443
24	61.572	63.062	59.758	61.624	61.588	N/A	-1.81394	0.05225	0.01663
25	60.909	63.765	60.552	61.458	61.086	N/A	-0.35701	0.54951	0.17752
26	61.298	63.085	59.247	61.458	61.391	N/A	-2.05107	0.16002	0.09357
27	61.257	62.923	52.604	61.077	61.300	N/A	-8.6533	-0.17984	0.04282
28	61.837	62.928	56.481	61.756	61.884	N/A	-5.35602	-0.08118	0.04644
29	61.861	62.946	61.100	62.085	61.934	N/A	-0.76094	0.22357	0.07214
30	61.762	62.957	61.120	61.899	61.806	N/A	-0.64154	0.13718	0.0444
31	62.459	62.937	65.006	62.641	62.500	N/A	2.54724	0.18199	0.04122

32	62.705	63.061	67.276	62.962	62.744	N/A	4.57081	0.25755	0.03897	
33	61.936	62.928	63.344	62.261	62.017	N/A	1.40887	0.32565	0.08167	
34	61.800	62.956	62.835	62.136	61.870	N/A	1.03507	0.33607	0.07008	
35	62.252	63.025	67.515	62.612	62.302	N/A	5.26268	0.35936	0.0494	
37	63.832	64.080	0.000	0.000	63.707	0.2485	N/A	N/A	-0.12451	
38	63.036	62.910	0.000	0.000	63.066	-0.1255	N/A	N/A	0.03052	
36	63.210	63.390	0.000	0.000	63.251	0.1802	N/A	N/A	0.04152	
39	63.146	63.088	0.000	0.000	63.144	-0.05761	N/A	N/A	-0.00248	
40	66.523	63.978	0.000	0.000	64.353	-2.5454	N/A	N/A	-2.1696	
100	62.796	63.174	65.467	62.664	62.667	0.37872	2.67196	-0.13153	-0.12852	Deversoir
101	60.221	63.203	58.631	61.210	61.099	2.98143	-1.59035	0.98912	0.8773	Sortie Moine
102	67.007	63.035	0.000	0.000	0.000	-3.972	RMSE (m)	RMSE (m)	RMSE (m)	Hauteur talus
201	63.179	63.446	0.000	0.000	63.315	0.26695	3.90218	0.3891763	0.374662	Hauteur berge
200	63.237	63.336	0.000	0.000	0.000	0.09872				Berge Moine
300	64.612	64.612	0.000	0.000	0.000	0.00027				2e barrage castor amont
301	70.928	66.280	0.000	0.000	0.000	-4.6484				Prise sediments amont
302	70.346	64.425	0.000	0.000	0.000	-5.9207				1er barrage castor amont
						RMSE (m)				
						1.3895323				

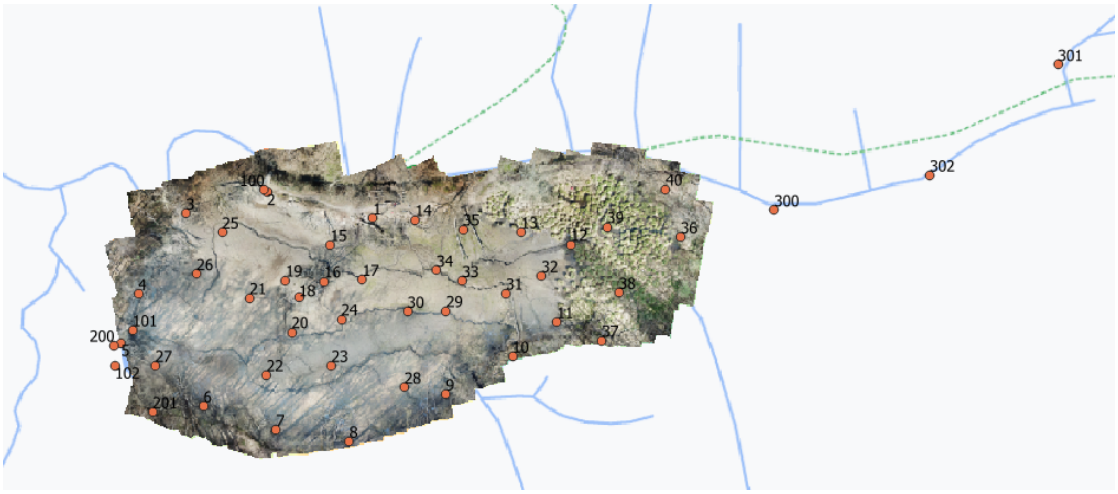


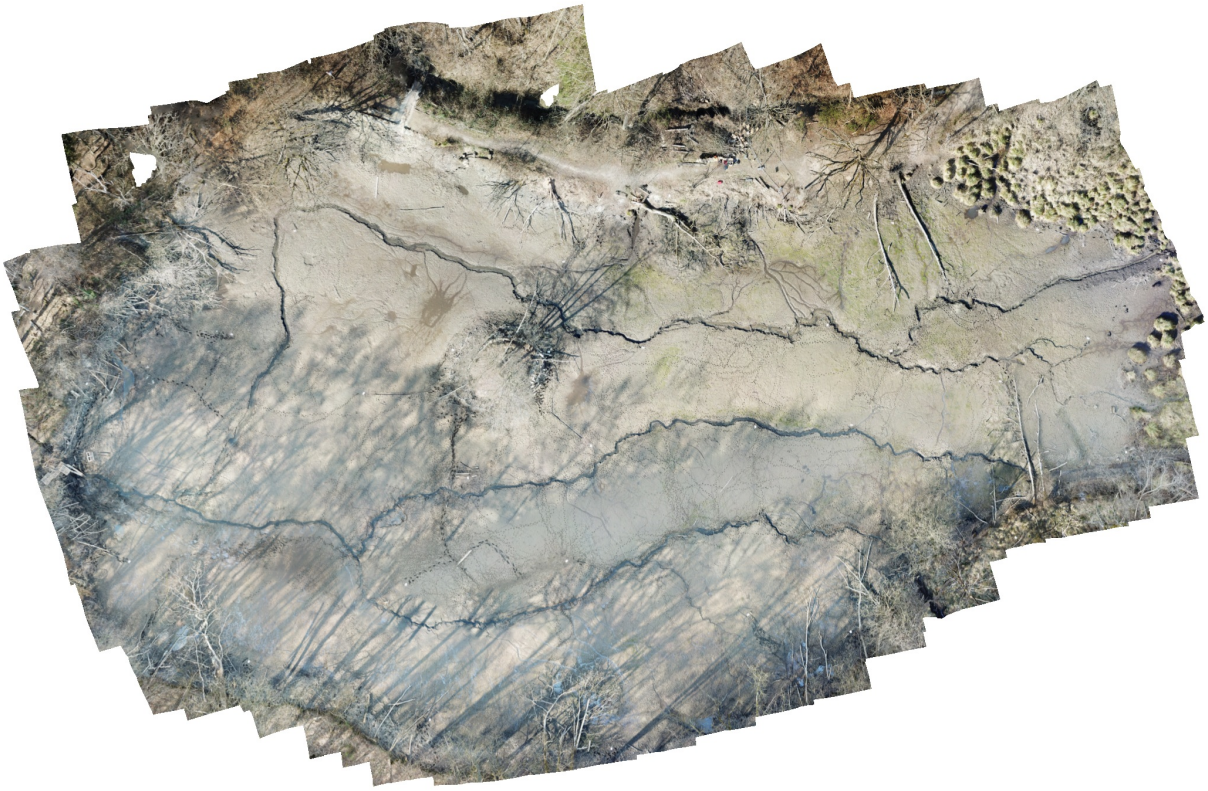
FIGURE C.1 – Emplacement des différentes mesures GPS dans le bois de Lauzelle

Annexe D

Rapport de photogrammétrie - MetaShape

Agisoft Metashape

Processing Report - Lauzelle
01 April 2022



Survey Data

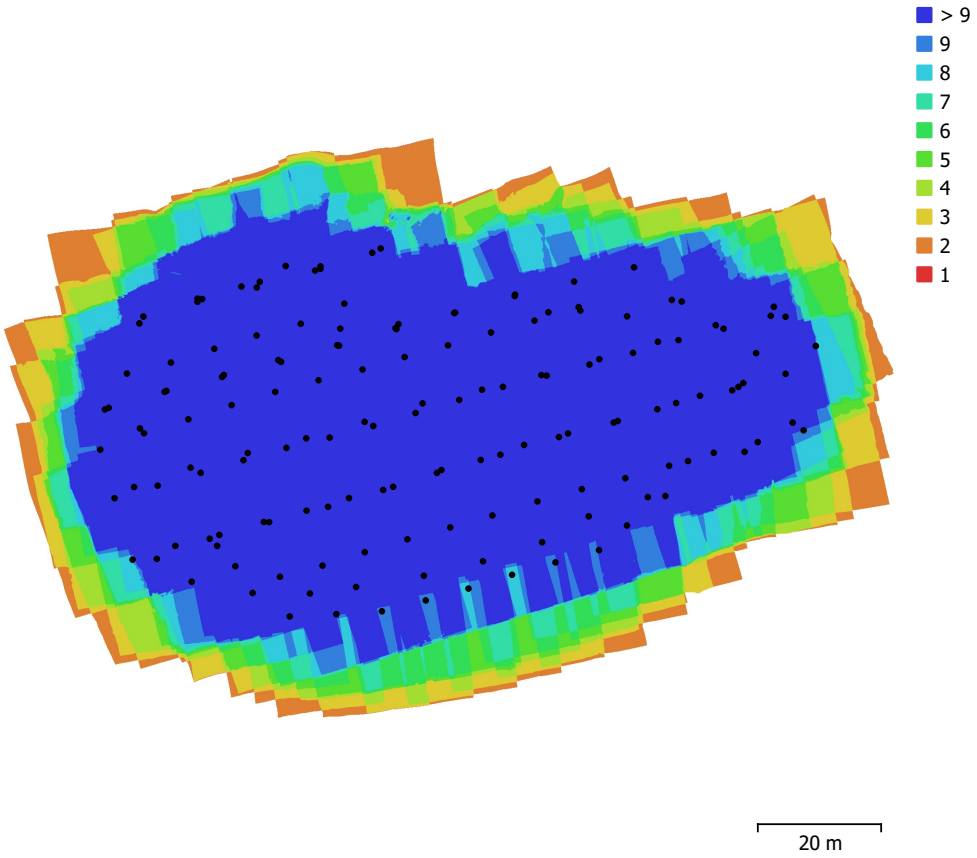


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	159	Camera stations:	154
Flying altitude:	15 m	Tie points:	1,043,134
Ground resolution:	8.79 mm/pix	Projections:	3,314,758
Coverage area:	9.96e+03 m²	Reprojection error:	0.731 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC220 (4.73mm)	4000 x 3000	4.73 mm	1.57 x 1.57 µm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

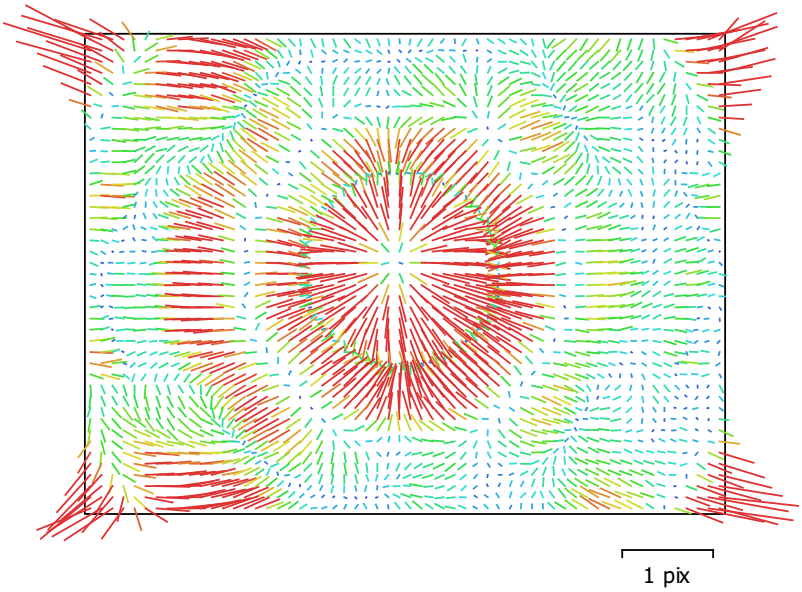


Fig. 2. Image residuals for FC220 (4.73mm).

FC220 (4.73mm)

159 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Fisheye	**4000 x 3000**	**4.73 mm**	**1.57 x 1.57 µm**

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	**1532.55**	89	1.00	0.12	-0.04	-0.44	0.36	-0.17	0.01	0.00
Cx	**-4.88954**	17		1.00	-0.01	-0.01	0.00	0.03	0.09	0.01
Cy	**10.519**	15			1.00	-0.03	0.04	-0.06	0.01	0.17
K1	**0.420078**	0.02				1.00	-0.97	0.89	0.01	-0.00
K2	**-0.0645144**	0.036					1.00	-0.96	-0.02	0.00
K3	**0.220124**	0.022						1.00	0.03	-0.01
P1	**-7.36893e-05**	0.0011							1.00	-0.03
P2	**3.408e-05**	0.00093								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

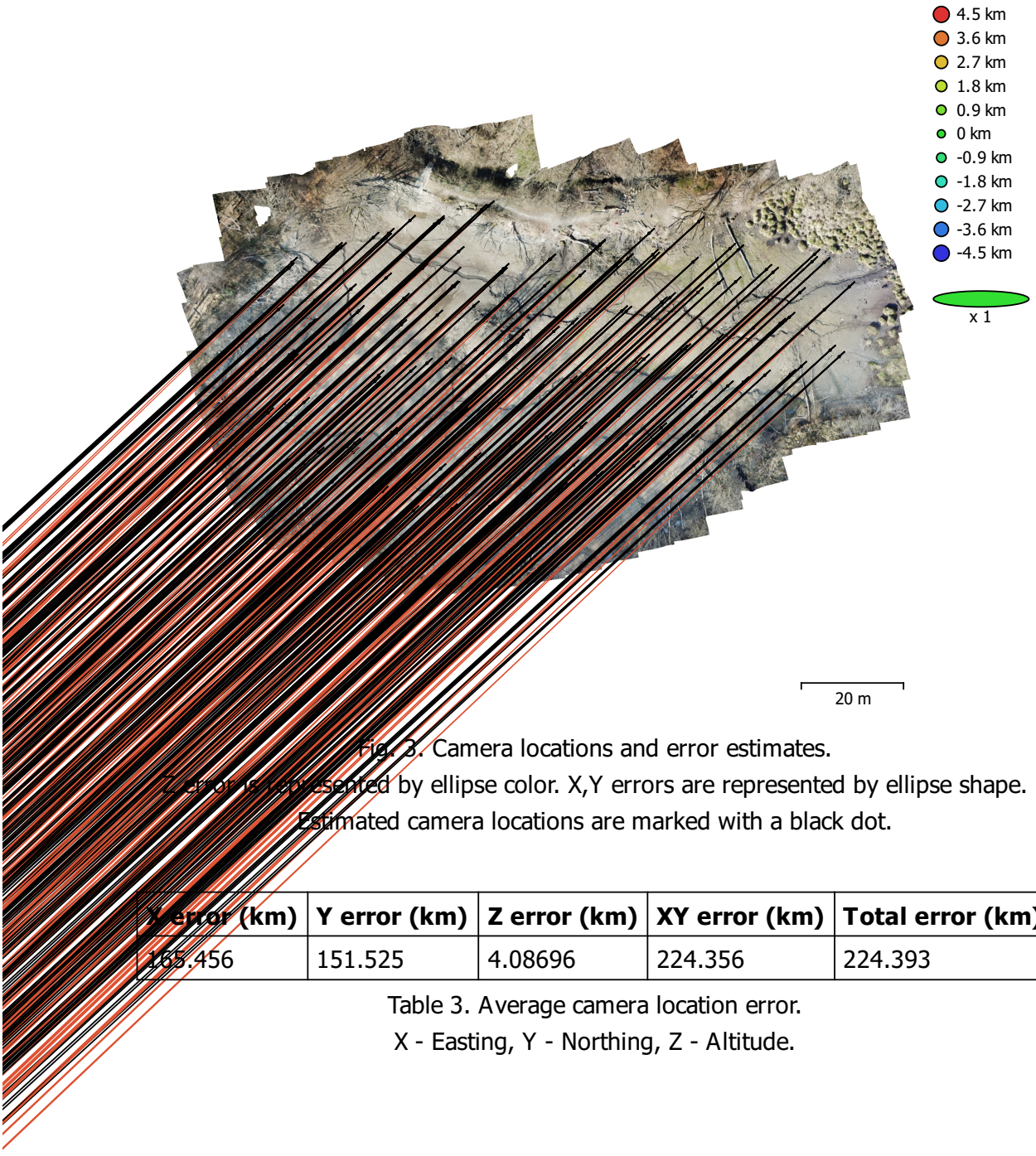


Fig. 3. Camera locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (km)	Y error (km)	Z error (km)	XY error (km)	Total error (km)
165.456	151.525	4.08696	224.356	224.393

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

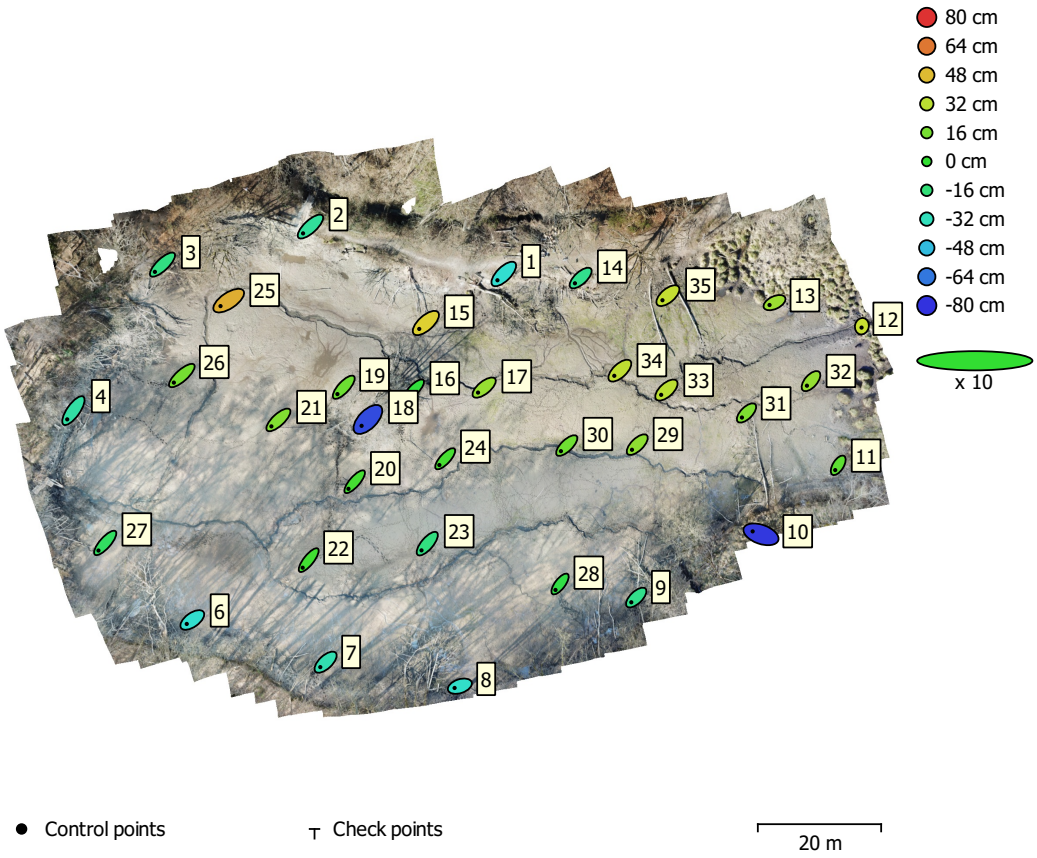


Fig. 4. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
34	19.3333	18.4913	30.6404	26.7527	40.676

Table 4. Control points RMSE.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1	-20.5255	-20.3535	-36.8017	46.7967	5.168 (11)
2	-23.979	-22.0597	-24.3947	40.7029	3.533 (12)
3	-24.6592	-23.415	-18.6077	38.7632	4.490 (9)
4	-20.052	-28.3339	-26.3829	43.5999	6.713 (9)
6	-17.9932	-12.8607	-36.095	42.3321	9.541 (9)
7	-17.2363	-16.0212	-29.3066	37.5852	8.023 (9)
8	-17.1094	-5.76479	-35.1599	39.5245	14.018 (4)
9	-16.0386	-15.2931	-20.7487	30.3583	6.414 (7)
10	-26.9989	9.54546	-78.624	83.6767	17.588 (5)
11	-9.75883	-15.4846	9.98354	20.849	4.098 (5)
12	-1.02024	-4.46346	34.8442	35.1437	12.759 (4)
13	-16.1396	-7.67225	24.6232	30.4245	4.736 (11)
14	-18.5718	-16.9488	-21.1971	32.886	3.074 (15)
15	-21.5278	-19.1645	43.0863	51.8378	3.059 (22)
16	-18.955	-19.3787	-2.35914	27.2101	1.473 (24)
17	-19.8365	-16.1073	23.4042	34.651	1.590 (23)
18	-20.4465	-20.7301	-74.1616	79.6727	4.480 (24)
19	-20.5141	-22.2508	13.5472	33.158	1.553 (25)
20	-20.1725	-23.0032	4.33964	30.9016	1.833 (17)
21	-22.6711	-20.9045	18.6064	36.0163	1.607 (24)
22	-19.5787	-24.559	3.3898	31.5905	1.830 (18)
23	-18.6921	-21.78	-18.1123	33.9385	2.125 (17)
24	-18.8916	-20.3635	4.74055	28.1787	1.649 (16)
25	-26.5503	-17.7247	51.4148	60.5191	3.699 (21)
26	-25.8476	-22.9364	15.5871	37.9096	1.630 (24)
27	-21.8472	-24.6333	-10.8737	34.6747	6.316 (10)
28	-14.8036	-19.2502	-4.65557	24.7264	3.453 (9)
29	-17.1138	-16.6121	21.3	31.9771	1.397 (22)
30	-18.8306	-18.145	14.234	29.7731	1.312 (22)
31	-14.8532	-14.7673	17.6516	27.3911	1.467 (20)
32	-13.1245	-14.866	22.8658	30.2671	2.529 (15)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
33	-17.0534	-15.4677	31.6183	39.1125	1.624 (23)
34	-17.9863	-16.6786	32.8402	40.9898	1.983 (26)
35	-17.6276	-14.9251	33.6667	40.8281	2.870 (17)
Total	**19.3333**	**18.4913**	**30.6404**	**40.676**	**4.058**

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

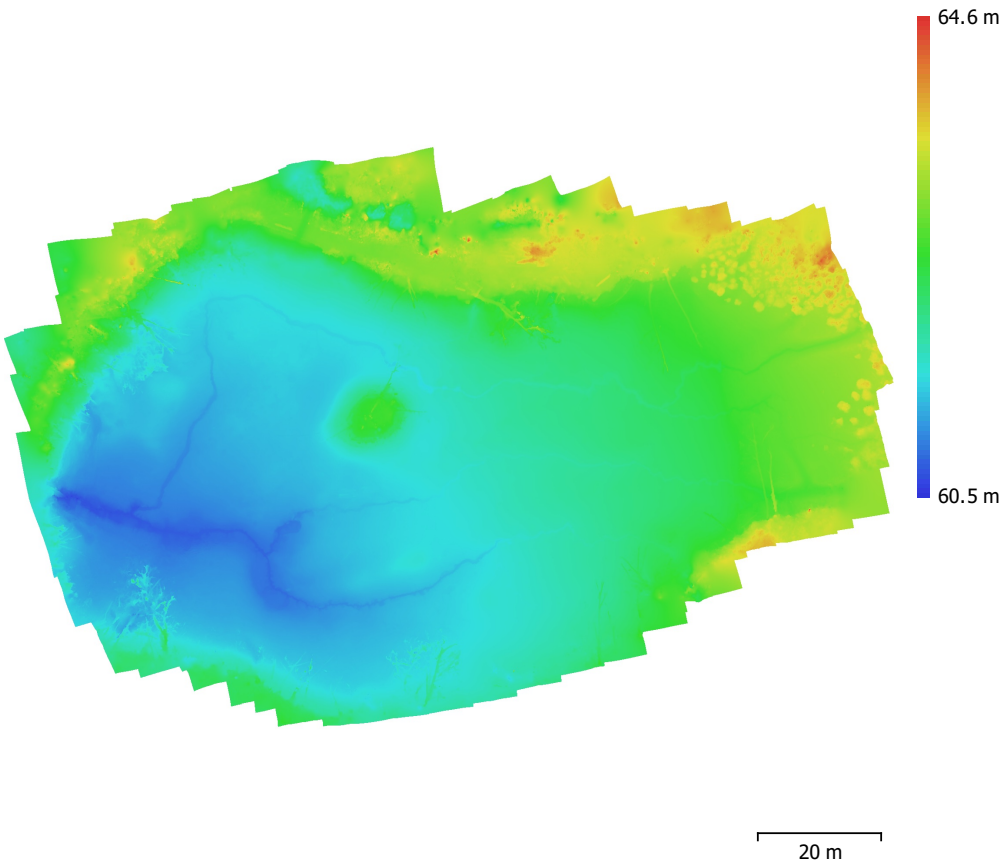


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution:	1.76 cm/pix
Point density:	0.323 points/cm²

Processing Parameters

General	
Cameras	159
Aligned cameras	154
Markers	36
Coordinate system	BD72 / Belgian Lambert 72 (EPSG::31370)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	1,043,134 of 1,299,190
RMS reprojection error	0.190809 (0.731464 pix)
Max reprojection error	0.586986 (44.4074 pix)
Mean key point size	3.51598 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.28845
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	100,000
Key point limit per Mpx	10,000
Tie point limit	50,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	10 minutes 3 seconds
Matching memory usage	816.17 MB
Alignment time	24 minutes 13 seconds
Alignment memory usage	1.04 GB
Date created	2022:03:30 09:52:02
Software version	1.8.1.13915
File size	92.80 MB
Depth Maps	
Count	154
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	10 hours 7 minutes
Memory usage	2.01 GB
Date created	2022:03:31 19:31:32
Software version	1.8.1.13915
File size	355.13 MB
Dense Point Cloud	
Points	28,688,116
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	10 hours 7 minutes

Memory usage	2.01 GB
Dense cloud generation parameters	
Processing time	25 minutes 3 seconds
Memory usage	3.43 GB
Date created	2022:03:31 19:56:35
Software version	1.8.1.13915
File size	425.16 MB
DEM	
Size	11,922 x 9,270
Coordinate system	BD72 / Belgian Lambert 72 (EPSG::31370)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 28 seconds
Memory usage	309.22 MB
Date created	2022:04:01 08:46:36
Software version	1.8.1.13915
File size	118.65 MB
Orthomosaic	
Size	16,379 x 10,677
Coordinate system	BD72 / Belgian Lambert 72 (EPSG::31370)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	7 minutes 59 seconds
Memory usage	1.56 GB
Date created	2022:04:01 07:51:36
Software version	1.8.1.13915
File size	2.59 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.8.1 build 13915
OS	Windows 64 bit
RAM	31.91 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz
GPU(s)	None

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**