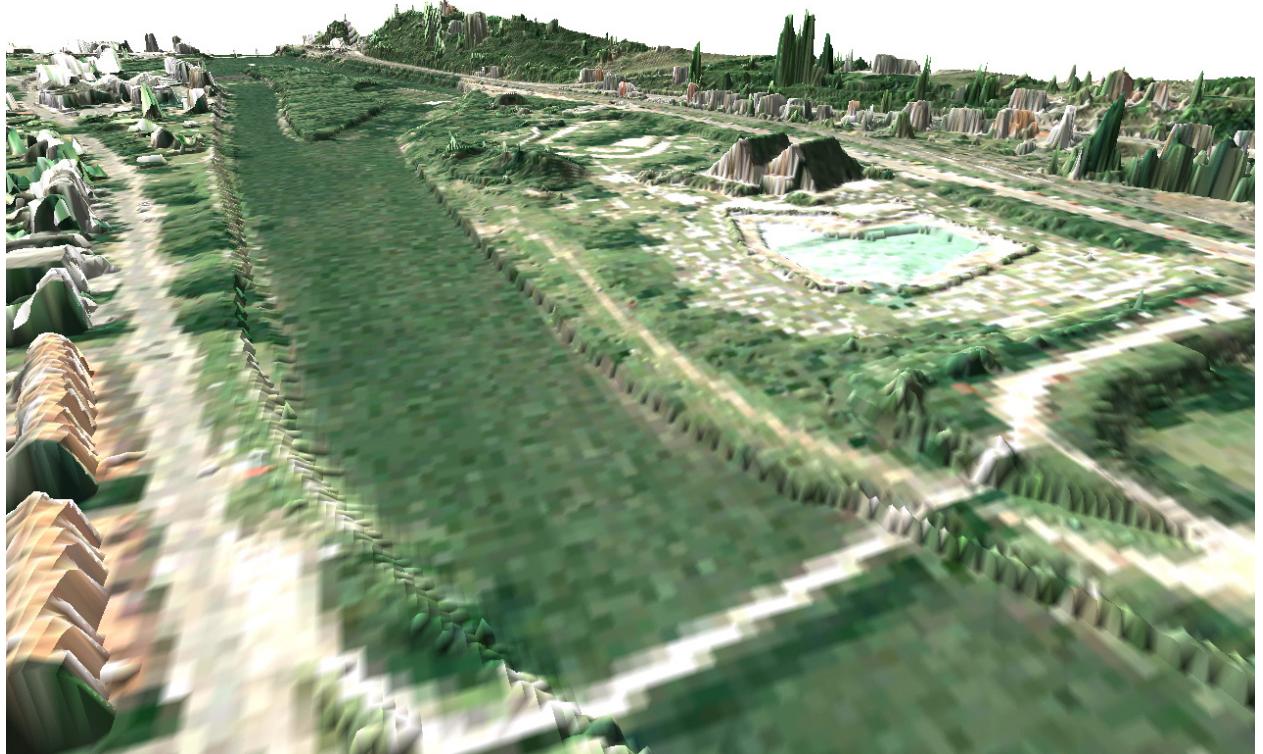


Elaboration d'outils intégrés de gestion des
données topographiques et morphologiques pour
la modélisation des crues et inondations



Mémoire présenté par

Sylvain DETREMBLEUR

en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes
Approfondies en Sciences Appliquées

Année académique 2002 – 2003

Mémoire présenté par **Sylvain DETREMBLEUR** en vue de l'obtention du Diplôme

d'Etudes Approfondies en Sciences Appliquées

**ELABORATION D'OUTILS INTEGRES DE GESTION DES DONNEES
TOPOGRAPHIQUES ET MORPHOLOGIQUES POUR LA MODELISATION DES
CRUES ET INONDATIONS**

L'activité de recherche dont bénéficie ce travail a consisté à poursuivre le développement du logiciel quasi-tridimensionnel de modélisation des écoulements de surface de la suite WOLF.

Plus particulièrement, ce travail vise à développer et à rendre opérationnelle une filière automatique de traitement de données topographiques et morphologiques directement exploitables par WOLF2D. Ces algorithmes sont basés sur des approches hydrauliques ou sédimentaires, afin de générer une information complète sur grids réguliers organisés en blocs. Il s'agit d'exploiter des informations parcellaires, soit acquises par laser ou sonar multi-faisceaux, soit issues de campagnes plus classiques d'acquisition de profils en travers par méthodes topographiques.

Une adaptation des lois classiques de frottement est également suggérée et traitée numériquement afin de tenir compte de ce nouveau type d'information très dense ainsi que des obstacles locaux constitués par les ouvrages d'art imposant des mises en charge et des pertes de charge locales. Le bien-fondé de ces développements est mis en lumière par le routage de grosses applications réelles pour lesquelles des campagnes complémentaires sur sites, l'exploitation de laisses de crue locales et des enquêtes de terrain permettent des comparaisons significatives.

La réalisation de ce travail et l'aboutissement de celui-ci ont été effectués au sein du Laboratoire de Mécanique des Fluides, d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques des Professeurs A.G.H. Lejeune et M. Pirotton. Je tiens à les remercier pour leur accueil et l'aide qu'il m'ont procurée.

Je voudrais plus particulièrement exprimer ma gratitude au Professeur M. Pirotton, qui m'a montré l'utilité de ce travail, ainsi qu'à ses assistants P. Archambeau, Th. Mouzelard, S. Erpicum et B. Dewals. L'ambiance de travail qu'il parviennent à créer, détendue mais à la fois efficace, leurs conseils avisés et leur aide sont à la source de la réussite de ce mémoire.

Je voudrais également remercier Mr. P. Rigo et Mr. P. Dewil qui ont accepté d'être membres du jury.

Je ne saurais oublier ici tous mes proches, mais surtout Christine, qui ont su, de près ou de loin, me soutenir durant la réalisation de ce travail.

Merci beaucoup à tous...

TABLE DES MATIÈRES

<i>Table des matières</i>	<i>i</i>
I Introduction.....	1
II La lutte contre les inondations	3
II.1 Historique	3
II.2 Genèse d'une crue.....	4
II.3 Mesures préventives	5
II.4 Amélioration du système de collecte de données.....	6
II.4.1 Aménagement des cours d'eau.....	7
III Reconstruction topographique	9
III.1 Introduction.....	9
III.2 Acquisition des données de base.....	10
III.2.1 Sonar multifaisceaux.....	11
III.2.2 Laser interférométrique.....	11
III.3 Construction du lit mineur par procédé hydrologique sur l'Eau d'Heure.....	13
III.3.1 Extraction du lit mineur.....	13
III.3.2 Reconstruction du niveau de fond du lit mineur.....	17
III.3.3 Validation de la méthode.....	19
III.3.3.1 Validation du modèle en lit mineur.....	19
III.3.3.2 Validation du modèle en zones inondées.....	24
III.3.4 Conclusions de l'approche	25
III.4 Reconstruction du lit mineur à partir de sections transversales réelles	26
III.4.1 Analyse du format de fichier	26
III.4.1.1 Codage.....	27
III.4.2 Numérotation des profils	28
III.4.3 Formatage du fichier vers une forme exploitable	29
III.4.3.1 Création du fichier de sortie (.sxy) et gestion des sections multiples.....	31
III.4.4 Utilisation du fichier .sxy sur une topographie laser	33
III.4.4.1 Importation du fichier .sxy et restriction du nombre de sections.....	34
III.4.4.2 Edition des sections	35

III.4.5	Discrétisation des sections transversales	36
III.4.5.1	Comparaison directe avec les données laser	37
III.4.5.2	Discrétisation de la section et interpolation transversale	38
III.4.6	Recherche de l'emprise du lit mineur	39
III.4.6.1	Sélection de proche en proche	40
III.4.6.2	Sélection sur base des sections transversales	41
III.4.6.3	Sélection du lit mineur	43
III.4.7	Construction du contour de sélection	44
III.4.7.1	Paraboles en tant que fonctions	44
III.4.7.2	Paraboles paramétriques	50
III.4.7.3	Polynôme du quatrième degré	54
III.4.7.4	Parabole construite sur une approche Lagrangienne	56
III.4.8	Interpolation entre sections	60
III.4.8.1	Délimitation gauche-droite du lit mineur	60
III.4.8.2	Recherche des zones d'influence	62
III.4.8.3	Construction des valeurs interpolées	64
III.5	Résultats obtenus.....	66
III.5.1	Comparaison des différentes méthodes d'interpolation	66
III.5.2	Gestion des binômes	69
III.5.3	Gestion des dérivations et des seuils	72
III.6	Application de la méthode à la zone des prés de Tilff.....	74
III.6.1	Données hydrauliques	76
III.6.2	Sections non retravaillées	77
III.6.3	Situation après travaux	79
III.7	Conclusions	82
IV	Gestion des ouvrages d'art.....	83
IV.1	Introduction.....	83
IV.2	Paramètre d'inégale répartition des vitesses	84
IV.3	Première approche	85
IV.4	Seconde approche	90
IV.5	Conclusion	92
V	Modification de la loi de frottement	94
V.1	Introduction	94
V.2	Bords frottants	95
V.3	Surfaces frottantes réelles	97
VI	Conclusions	102
VII	Bibliographie	104

I INTRODUCTION

Depuis toujours, l'homme est confronté à un ennemi tout aussi puissant qu'imprévisible : la nature. Il n'existe pour l'instant aucun procédé qui puisse agir sur les grandes catastrophes naturelles que l'être humain doit subir. Que ce soit les tremblements de terre, les glissements de terrain, les ouragans ou encore les inondations, la seule alternative pour minimiser les effets de ces cataclysmes est de s'en prémunir au mieux.

Ce travail de D.E.A. se focalisera sur l'élaboration et la validation d'outils de modélisation visant à améliorer la prédition de l'ampleur des inondations attendues. Il constitue le résultat d'une année de recherche dans le secteur de l'hydraulique de surface et plus spécialement dans l'estimation de l'emprise des zones inondables par des modèles d'écoulements bi-dimensionnels.

L'importance de ce travail s'explique par les besoins actuels d'obtenir des modèles numériques permettant de donner des cartes de risques sur le réseau hydraulique Wallon. Un tel outil ne peut en effet être performant que moyennant la prise en compte correcte et précise des différents paramètres, naturels ou non, présents dans les cours d'eau.

D'ores et déjà il est utile de mettre en évidence les différents points qui seront abordés au cours de ce recueil.

Dans un premier temps, quelques lignes seront consacrées aux moyens mis en œuvre actuellement pour lutter contre les inondations. Parmi ceux-ci nous dégagerons ceux où les développements entrepris dans ces pages interviendront.

Dans un deuxième temps, les aspects de reconstruction du lit mineur des rivières seront étudiés en fonction du type de données topographiques disponibles. L'information de base qui peut être utilisée provient de nombreuses campagnes de relevés menés par la méthode du laser interférométrique embarqué en avion ou par sonar multifaisceaux embarqué en bateau. La topographie obtenue permet alors de connaître le lit majeur des rivières, la surface du lit mineur, voire son fond. Le travail le plus important reste le « creusement » de celui-ci lorsque c'est nécessaire. Lorsque la donnée du sonar n'existe pas, l'information disponible se présente sous la forme de sections en travers davantage tournées vers l'utilisation de modèles hydrauliques unidimensionnels. Dans d'autres cas, seule une estimation de la cote moyenne de fond est disponible via des plans terriers ou des profils en long. L'outil développé visera à utiliser de manière la plus automatique et la plus conviviale possible l'information de façon à représenter le plus fidèlement possible la structure du lit principal d'écoulement.

Le troisième point qui sera abordé dans ce travail sera centré sur les écoulements aux abords immédiats et sous les ouvrages de franchissement des rivières. Plus spécifiquement, c'est le phénomène de mise en charge du tablier des ponts qui sera abordé. En résulteront des modifications au niveau du code de calcul via l'adjonction d'une équation permettant d'évaluer les pertes générées par l'obstacle. Ces approches se baseront sur des résultats obtenus à une dimension lors d'un travail de fin d'études et seront extrapolées dans un système bi-dimensionnel.

En quatrième lieu, des modifications des codes de calcul disponibles actuellement seront envisagées au niveau des pertes par frottement engendrées dans l'écoulement. Contrairement aux modèles unidimensionnels où le calcul du périmètre mouillé permet de tenir compte de l'entièreté de la surface frottante, un modèle bidimensionnel ne fait traditionnellement intervenir que les surfaces projetées horizontalement. Lorsque la section de passage se trouve être fort encaissée ou que l'on se situe à proximité des berges, la quantité d'énergie dissipée par les deux modèles peut différer sensiblement. Il convient dès lors de développer les corrections nécessaires qui sont respectivement une correction de la surface frottante suivant les pentes locales et l'utilisation de bords frottants.

II LA LUTTE CONTRE LES INONDATIONS

II.1 Historique.

Les inondations sont des catastrophes naturelles auxquelles nous pouvons difficilement échapper. Le phénomène climatique qui en est la source ne peut en effet être contrôlé et la solution idéale pour pouvoir se prémunir totalement des inondations est très onirique. Souvenons-nous de plusieurs évènements tels que la crue de l'hiver 1925-1926, celle de décembre 1993 qui fut suivie de la crue de janvier 1995 (25 millions € de dégâts en région Wallonne), la crue de février 2002 (figure 1) ou encore celle du début de cette année (figure 2).



Figure 1 : Ham-sur-Heure sur l'Eau d'Heure (février 2002).



Figure 2 : Dinant sur la Meuse (janvier 2003).

La lutte contre les inondations a donc existé de tout temps. Au fur et à mesure des années, de plus en plus de moyens ont été mis en œuvre pour tenter d'endiguer au mieux les catastrophes. Afin de situer le phénomène dans un contexte global et de pouvoir positionner le domaine d'application des développements envisagés dans ce travail, nous brosserons, dans les quelques paragraphes suivants, la gestion globale qui a été entreprise notamment en Wallonie.

II.2 Genèse d'une crue.

Une crue naturelle est un phénomène qui est généré par des précipitations sur un bassin versant. Toute précipitation n'est pas à la base d'une crue. Il existe un certain aléa météorologique qui fait que l'intensité, la durée et la répartition d'une précipitation sur un terrain en état saturé peut être à la base d'une inondation. A la suite d'une averse, une certaine quantité d'eau qui n'a pas été interceptée par la végétation atteint le sol. Cette dernière peut alors ruisseler vers une rivière ou s'infiltrer dans le terrain. C'est la partie ruisselante et hypodermique qui sont intéressantes car leur dynamique est beaucoup plus

rapide que la partie infiltrée. En fonction des caractéristiques du bassin versant (type de couverture, topographie,...), le hyéogramme de pluie fournit un hydrogramme de débits entrants dans la rivière et qui vont s'y propager. Ensuite, suivant la capacité d'écoulement de la rivière, les hydrogrammes provenant des différents bassins versants se propagent, se cumulent et génèrent éventuellement des débordements. L'existence d'un débordement n'est pas nécessairement synonyme de dégâts importants, tout dépend de la vulnérabilité du lit majeur c'est-à-dire de la quantité et de la qualité des biens qui peuvent être endommagés par la présence d'eau.

Ces différentes considérations sont reprises dans le schéma suivant (Sethy [6]). Les cadres bleus indiquent les éléments sur lesquels l'homme ne peut agir directement, les cadres rouges précisent ce que l'homme peut influencer via les procédés écrits en vert.

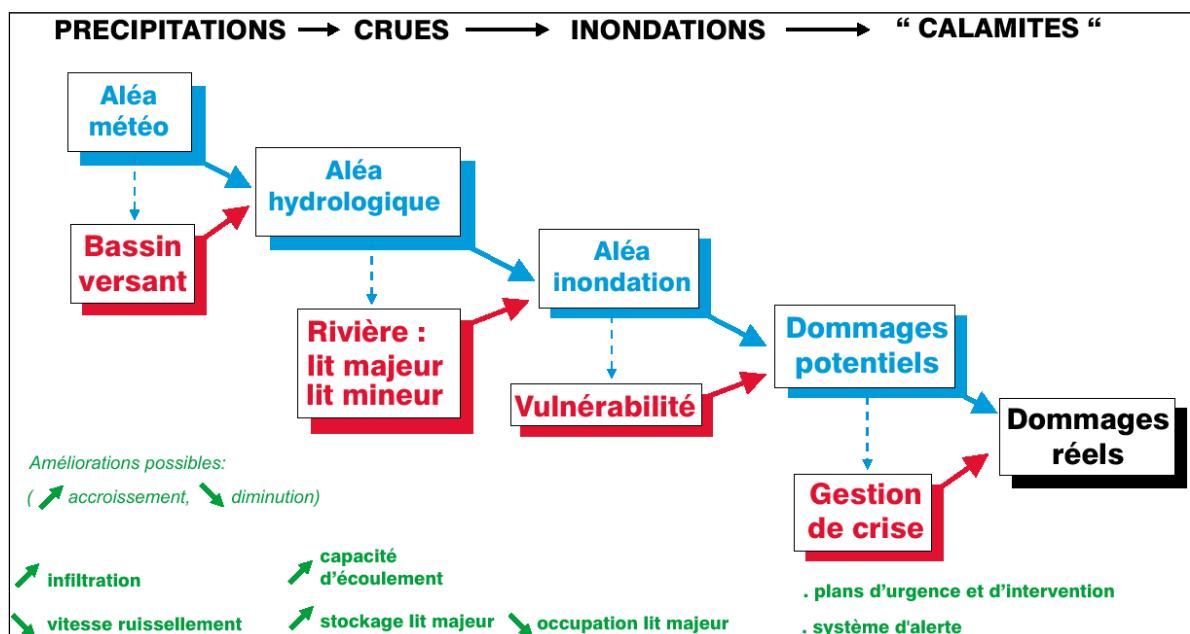


Figure 3 : La genèse des crues (source Sethy).

II.3 Mesures préventives.

Suite aux déductions faites sur base du schéma ci-dessus, des mesures de gestion intégrée ont été entreprises sur le réseau hydrographique notamment en aménageant les propriétés du lit des principaux cours d'eau de la région Wallonne et en améliorant la prévision et la gestion de crise en modifiant la gestion hydrologique et hydraulique de l'ensemble du réseau. Ces mesures peuvent se classer en deux grandes familles :

- La première concerne les aménagements dans les cours d'eau

- La seconde concerne une amélioration du système de collecte des données et une amélioration de la gestion des outils qui gèrent ces données.

Quelques-unes des mesures utilisées sont décrites brièvement ci-après.

II.4 Amélioration du système de collecte de données.

De nombreux appareils de mesure sont déjà actuellement installés sur site et le parc ne fait que s'agrandir au cours du temps. Les principaux instruments disponibles sont constitués de stations limnigraphiques, qui font par ailleurs l'objet de campagnes récurrentes (figure 4), de pluviomètres ou pluviographes (figure 5) ou encore de débitmètres électroacoustiques (figure 6) (Sethy [6]). Ces instruments fournissent des informations en temps réel, permettant une gestion efficace en période de crise, mais ils donnent également les informations nécessaires pour alimenter les modèles numériques. La disponibilité d'un historique important sur plusieurs stations permet l'évaluation de statistiques fiables pour le calcul de récurrences, indispensables notamment pour le design de structures hydrauliques.

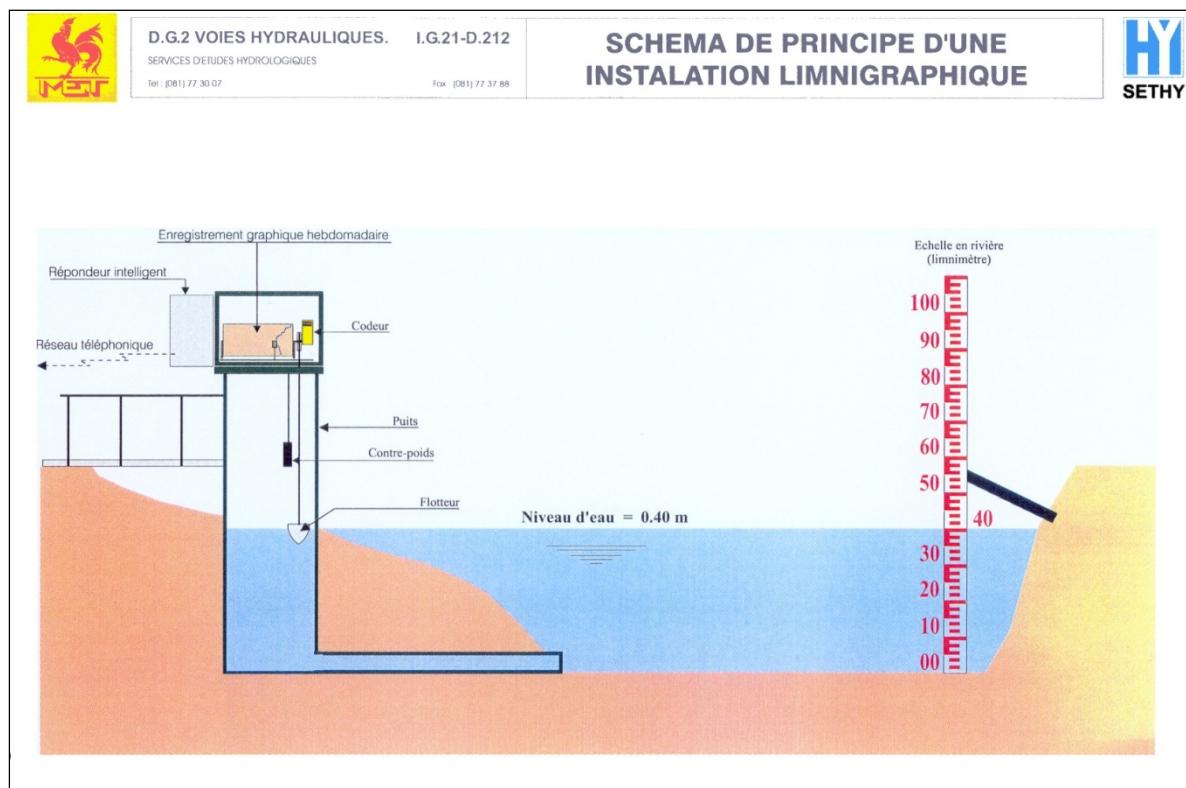


Figure 4 : Principe de fonctionnement d'une station limnigraphique.

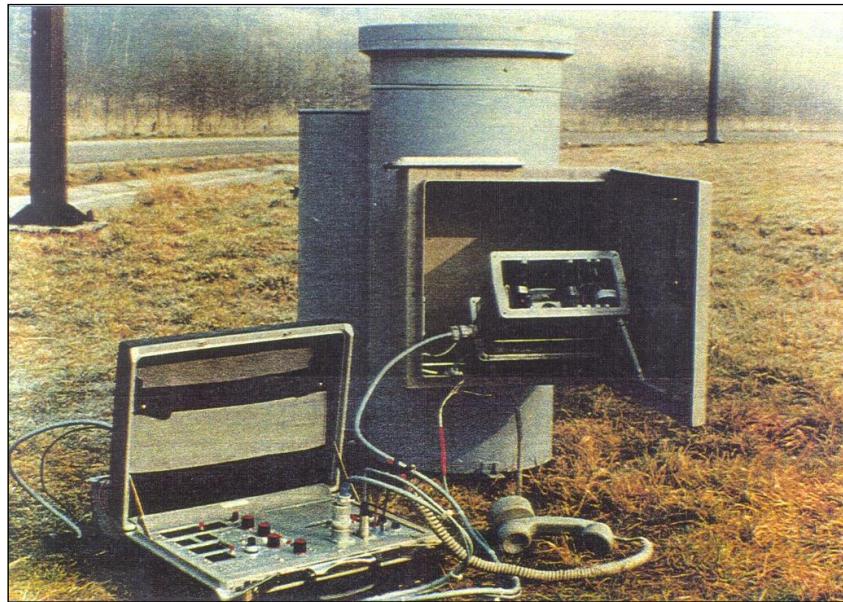


Figure 5 : Pluviomètre de Silenrieux (Eau d'Heure).

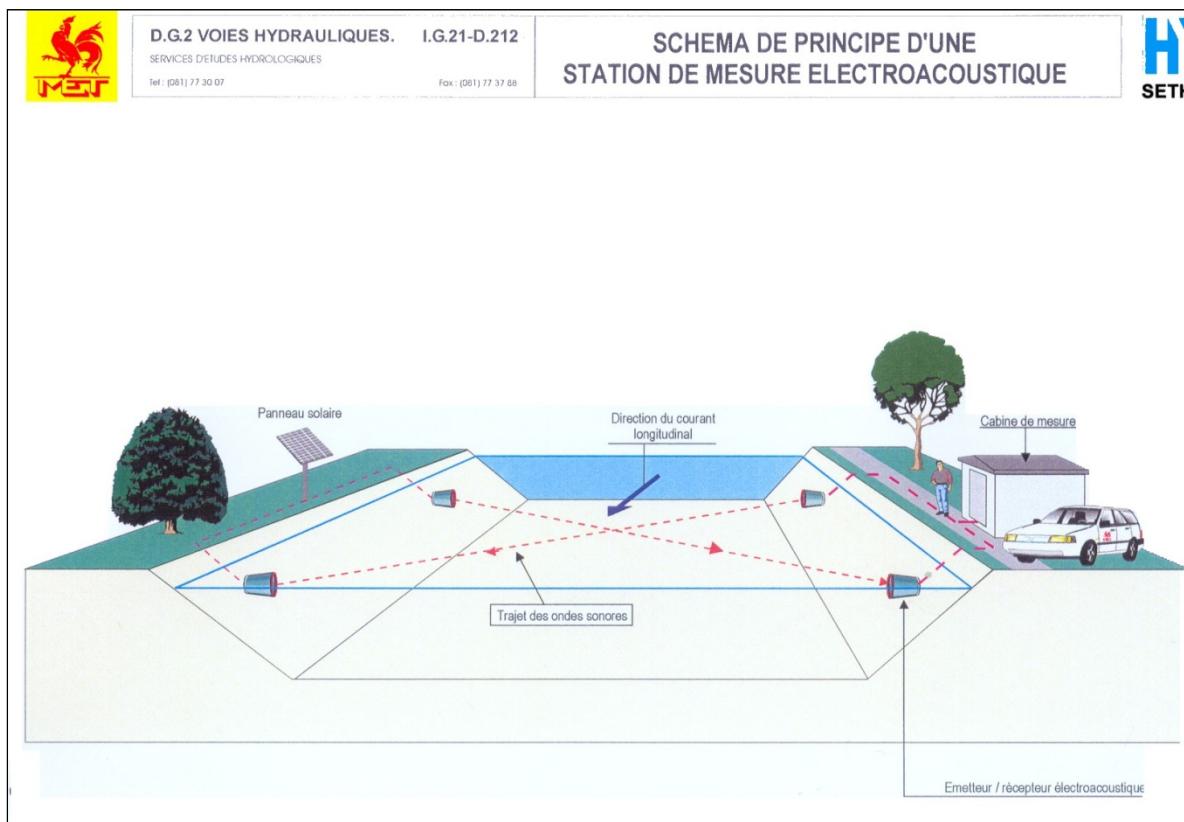


Figure 6 : Principe de fonctionnement de mesure du débit.

II.4.1 Aménagement des cours d'eau.

Les aménagements entrepris dans les différents fleuves et rivières nous rapprochent de l'utilité des développements numériques qui sont présentés dans ce travail. En effet, les mesures qui ont été mises en œuvre n'ont pu être entreprises que moyennant des études détaillées visant à prouver leur efficacité sur la réduction des risques d'inondation. De telles

études, réalisables sur base de modèles numériques, sont d'autant plus précises et rapidement exécutées que l'outil de calcul au sens large est performant. C'est ici que ce travail de D.E.A. prend tout son sens dans la mesure où les procédés d'acquisition et de traitement topographique développés accélèrent l'obtention des données de base du modèle. En outre, les développements relatifs aux ouvrages de franchissements et aux pertes par frottements améliorent la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

Sont repris ci-dessous quelques types d'aménagements ayant nécessité des études hydrauliques pour estimer leur impact positif ou non.

- Donner un espace supplémentaire à l'eau : dragage « écologique » de façon à rendre une capacité hydraulique plus importante.
- Eliminer certains obstacles : modernisation de certains ponts et par conséquent suppression des piles présentes en rivière de façon à augmenter la section de passage.
- Aménager les berges : construction de murs anti-crue locaux afin de protéger certaines zones plus vulnérables.
- Améliorer la fonction d'écrêtage des barrages-réservoirs : gestion plus appropriée permettant de laminer plus efficacement la crue et par conséquent d'attendre des débits plus faibles à l'aval.

III RECONSTRUCTION TOPOGRAPHIQUE

III.1 Introduction

Au cours de l'élaboration d'un modèle numérique de simulation hydraulique, une des parties les plus importantes est sans aucun doute la qualité de la donnée topographique. Celle-ci influence de manière importante l'écoulement du cours d'eau que ce soit par la pente qu'elle procure ou encore par la section de passage qu'elle détermine dans le lit mineur. Il est donc primordial de la traiter précisément, tout en gardant à l'esprit que ce travail doit pouvoir se réaliser dans un laps de temps le plus court possible.

C'est le but recherché dans les développements qui suivent. Le modèle numérique qui est utilisé est un outil développé au sein du service d'Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques de l'Université de Liège. Cet outil, nommé Wolf 2D, est de type quasi-tridimensionnel et utilise les équations hydrodynamiques intégrées sur la hauteur. La procédure de résolution des équations par volumes finis est assurée par un code de calcul écrit en Fortran. En outre, une interface de pré-processing et de post-processing est attachée à ce code. Le but de celle-ci est de rendre l'exploitation d'un modèle tout aussi conviviale qu'efficace. Ecrite en Visual Basic, elle permet notamment l'introduction de données topographiques via une matrice reprenant la valeur des altitudes par sélection de mailles sur un grid donné.

Il est donc possible de représenter fidèlement et de manière relativement simple une topographie. Des outils permettant d'acquérir des valeurs fournies sous forme de fichier X, Y, Z sont d'ailleurs déjà disponibles et permettent de traiter efficacement des données de modèle numérique de terrain (MNT) ou de bathymétrie par sonar.

Dans un premier temps, l'application d'une méthode d'imposition de l'altitude de fond en lit mineur sera présentée. L'expérience retirée lors de l'élaboration et de la validation de cette méthode est à la source des développements entrepris dans ce domaine. C'est au sein du code source de l'interface écrite en Visual Basic que va se concentrer l'élaboration de la méthode d'interpolation, les résultats pourront directement être visualisés pour estimer le travail accompli notamment sur l'Ourthe qui a fait l'objet d'une application du nouveau module. Sur la figure 7 est présentée une fenêtre d'affichage type de l'interface. Outre une fenêtre générale, on en distingue une autre qui représente la topographie et l'altitude fixée maille par maille ainsi qu'une palette de couleurs précisant le dégradé.

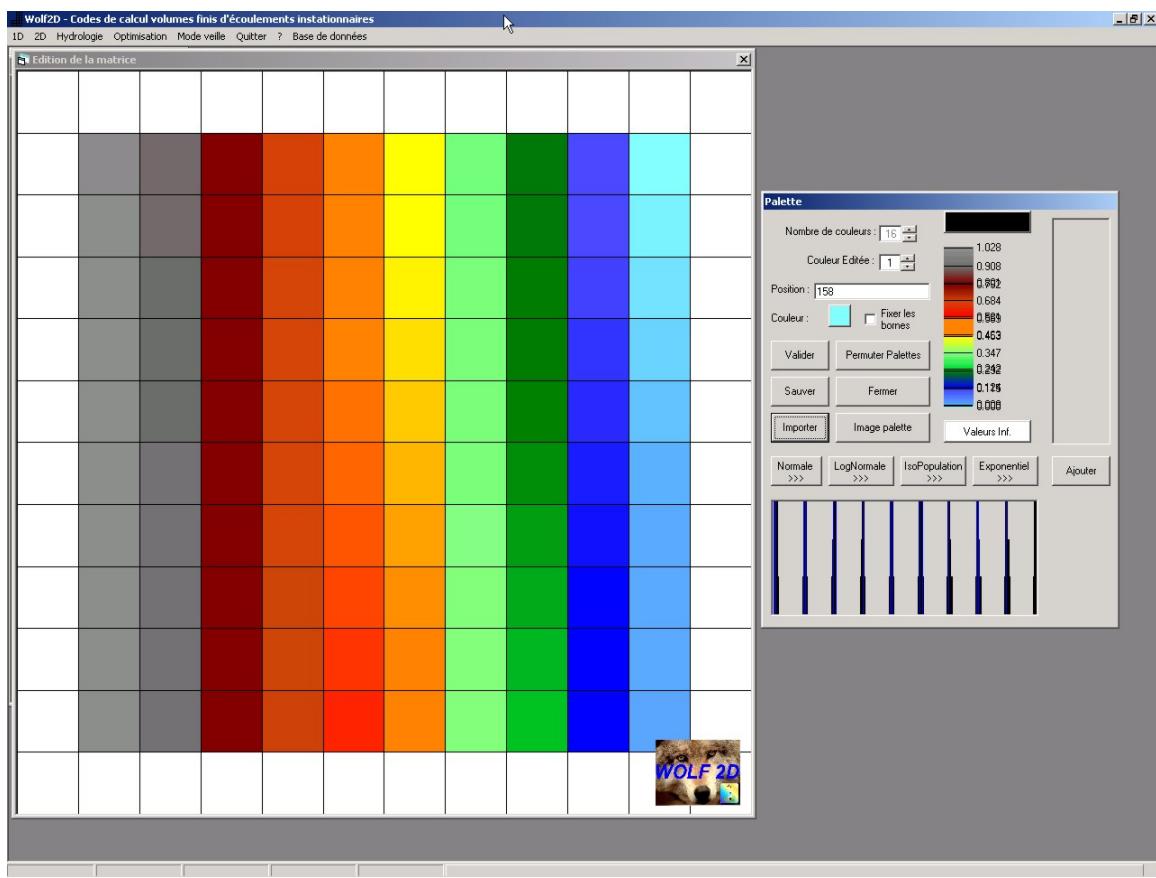


Figure 7 : Interface de visualisation Wolf 2D.

III.2 Acquisition des données de base.

Dans le but d'obtenir une donnée topographique tridimensionnelle de qualité, deux méthodes modernes peuvent être mises en œuvre. La première fournit une information relative au lit mineur, c'est le principe du sonar multifaisceaux tandis que l'autre fournit l'information lit majeur, c'est le principe du laser interférométrique. Ces deux technologies ont d'ailleurs été utilisées sur une grande partie du réseau hydraulique Wallon navigable

pour couvrir actuellement environ 2000 kilomètres de rivières et fleuves sur base d'un grid de 1 mètre de côté et d'une précision de 15 centimètres en altitude.

III.2.1 Sonar multifaisceaux.

Le principe de base du sonar est relativement simple. L'appareil de détection envoie un faisceau d'ondes perpendiculairement à l'axe de la navigation. Les ondes réfléchies sont analysées en temps réel de façon à fournir le niveau du fond. A cet appareil est couplé un système de positionnement satellite qui fournit, en temps réel également, la position du bateau. Finalement, un procédé inertiel (INS) permet d'apporter les corrections nécessaires pour corriger le roulis et le tangage du navire. On comprend aisément dans ce cas que ce procédé ne peut s'appliquer qu'à des cours d'eau d'un certain gabarit puisque le navire nécessaire pour ces mesures doit être relativement stable et donc présenter un tonnage suffisant (figure 8).

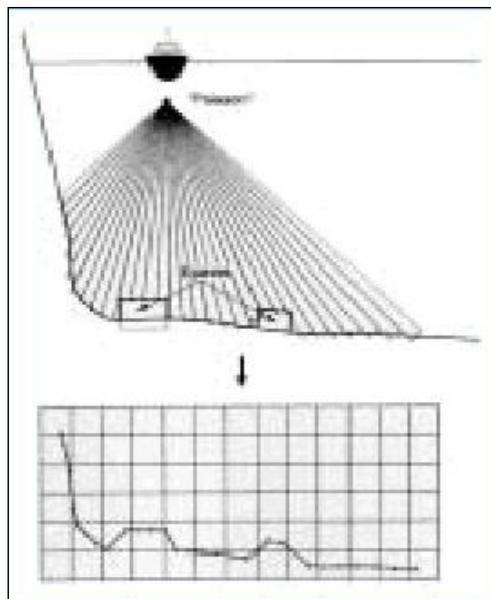


Figure 8 : Principe du sonar multifaisceaux.

III.2.2 Laser interférométrique.

Le principe du laser interférométrique consiste à envoyer depuis un avion un rayon laser qui se réfléchit au sol. En combinant ce principe avec un système GPS et un système INS, on obtient une représentation fidèle de la topographie. Un des gros avantages du laser est qu'il permet d'obtenir deux échos lors d'un même passage. Le premier représente le sommet de la végétation et le second le niveau du sol. Une telle information permet dès lors de se faire une idée du type de végétation présente et des coefficients de frottement auxquels on peut la lier.

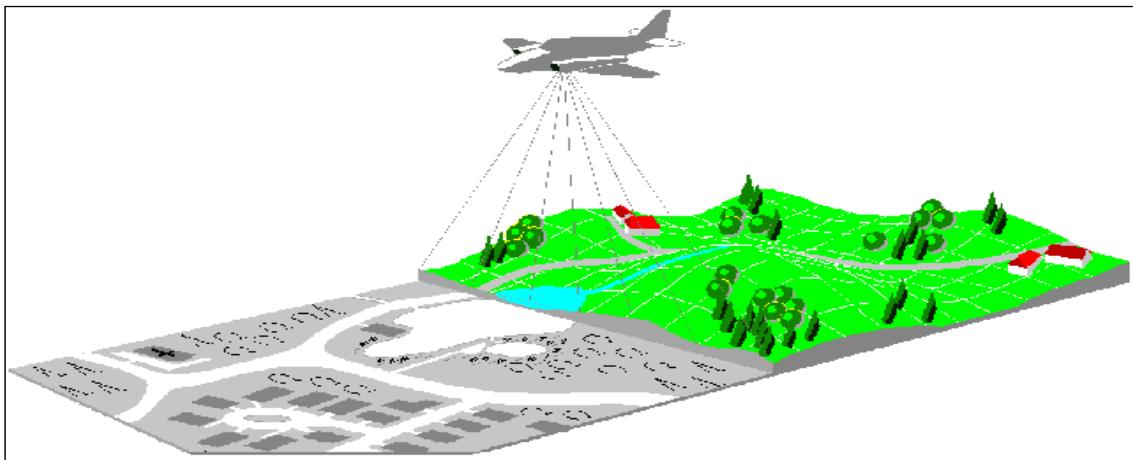


Figure 9 : Principe du laser aéroporté.

Il est actuellement exclu d'utiliser le système de sonar sur les cours d'eau non navigables. Dans ce cas, l'information disponible est fournie uniquement par le MNT et seule la surface libre du lit mineur est connue (figure 10). C'est ici qu'interviennent les méthodes d'interpolation visant à reconstruire la topographie du lit mineur.

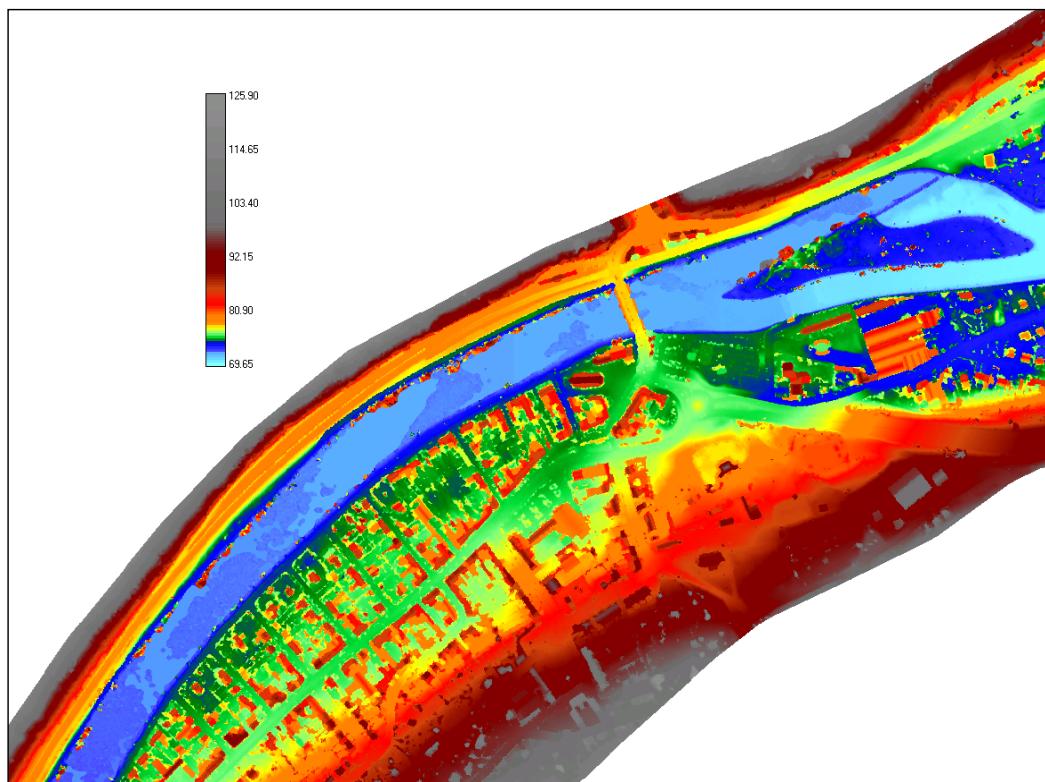


Figure 10 : MNT de l'Ourthe à Tilff (altitudes en m).

III.3 Construction du lit mineur par procédé hydrologique sur l'Eau d'Heure.

Le paragraphe évoqué ici décrit principalement les premières approches envisagées lors des traitements de cartes topographiques relevées par laser interférométrique. Les applications envisagées concernent un cours d'eau de faible largeur où, bien évidemment, la qualité du traitement du lit mineur revêt toute son importance. Il est en effet primordial que la topographie de fond et que la largeur du lit principal d'écoulement soit correctement évaluées sous peine d'engendrer rapidement des erreurs de plusieurs dizaines de pourcents sur les capacités du lit d'écoulement à plein bord.

Le cours d'eau envisagé est celui de l'Eau d'Heure caractérisé par une largeur d'une dizaine de mètres en moyenne. La discréétisation spatiale utilisée pour l'étude hydraulique de cette rivière est formée de mailles carrées de 2 mètres de côté. On voit ici qu'une mauvaise estimation de la largeur du lit mineur peut prendre des proportions importantes. Une erreur d'une maille provoque un rétrécissement de la section de 20 pourcents ce qui est loin d'être négligeable pour une modélisation correcte des écoulements observés.

Sur la topographie laser dont nous disposons pour réaliser une modélisation numérique de l'écoulement, les valeurs fournies en lit majeur correspondent au niveau du sol. Lorsqu'on se trouve au droit du lit mineur, la valeur fournie correspond à la surface libre de celui-ci puisque le laser s'est réfléchi sur la surface de l'eau. Même si cette représentation est acceptable dans le cas d'une propagation d'onde raide de grande hauteur par rapport à la hauteur d'eau dans la rivière (par exemple l'onde induite par la rupture d'un barrage), cette hypothèse est mise en défaut pour l'étude de petits débits, même s'ils sont à l'origine de phénomènes d'inondations.

Il importe donc de procéder à la modification de la cote de fond de la rivière afin de la modéliser le plus correctement possible, toute altération non physique du champ de hauteur portant un préjudice grave à la dynamique d'ensemble du modèle.

III.3.1 Extraction du lit mineur.

L'imposition d'une cote de fond sur l'Eau d'Heure passe préalablement par le repérage et l'extraction de son lit mineur. Le problème de repérage de celui-ci, a priori anodin, se révèle être une tâche relativement délicate suite aux problèmes énoncés ci-dessous :

- La densité de la végétation perturbe la prise de mesure par endroits, le lit mineur est donc partiellement occulté et sa largeur difficile à estimer (figure 11),

- Le levé laser laisse apparaître certains bras d'eau qui sont soit des dérivations soit des bras morts, ce qui laisse encore un doute quant au tracé exact de la rivière (figure 12).

Le premier problème peut être résolu par l'utilisation des plans terriers de l'Eau d'Heure qui reprennent la vue en plan de la rivière au 1/1000^{ème}. Ainsi, tant le tracé curviligne que la largeur peuvent être estimés avec précision aux endroits où le modèle numérique de terrain fait défaut.

Quant aux incertitudes liées au tracé de la rivière pour cause de dérivations potentielles, les plans terriers ne permettent pas d'apporter une réponse pour l'ensemble des points problématiques. En effet, certaines dérivations ne sont pas représentées ou ont été sensiblement modifiées au cours des années. Ce n'est que par des visites sur place que de telles indéterminations peuvent être levées.

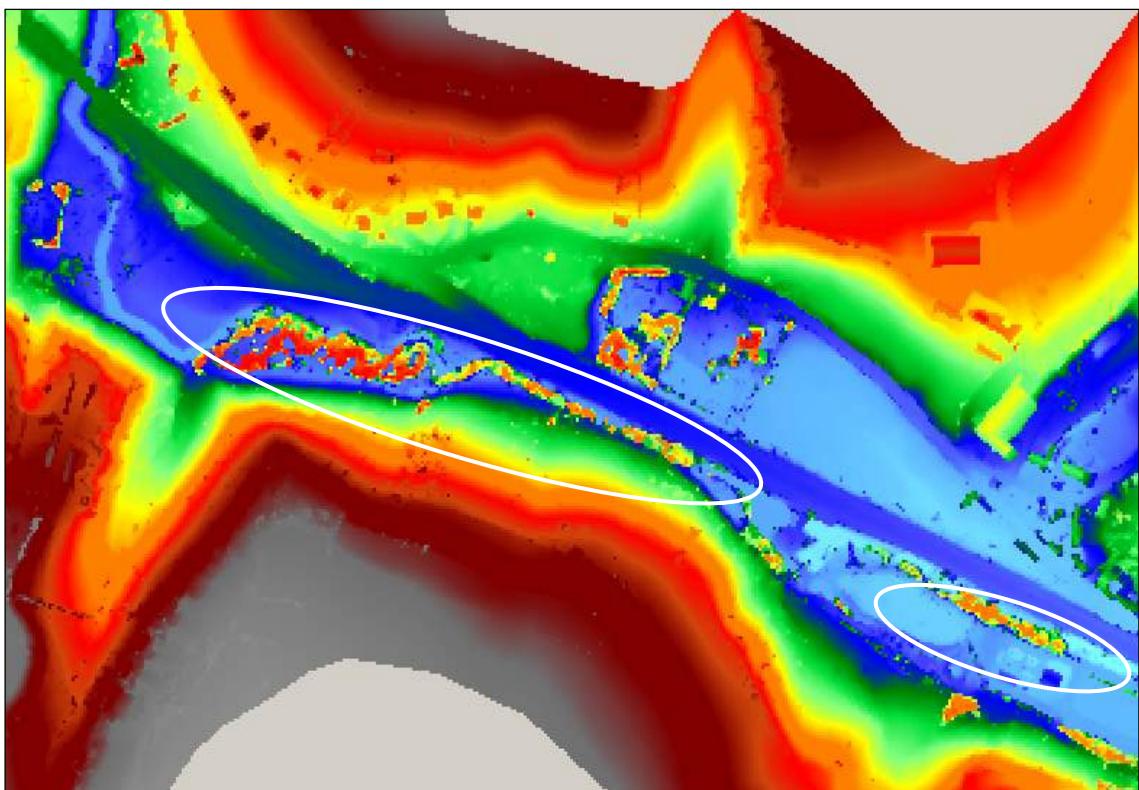


Figure 11 : Exemple de végétation ne permettant pas d'estimer la largeur du lit mineur (barrage de Battefer).

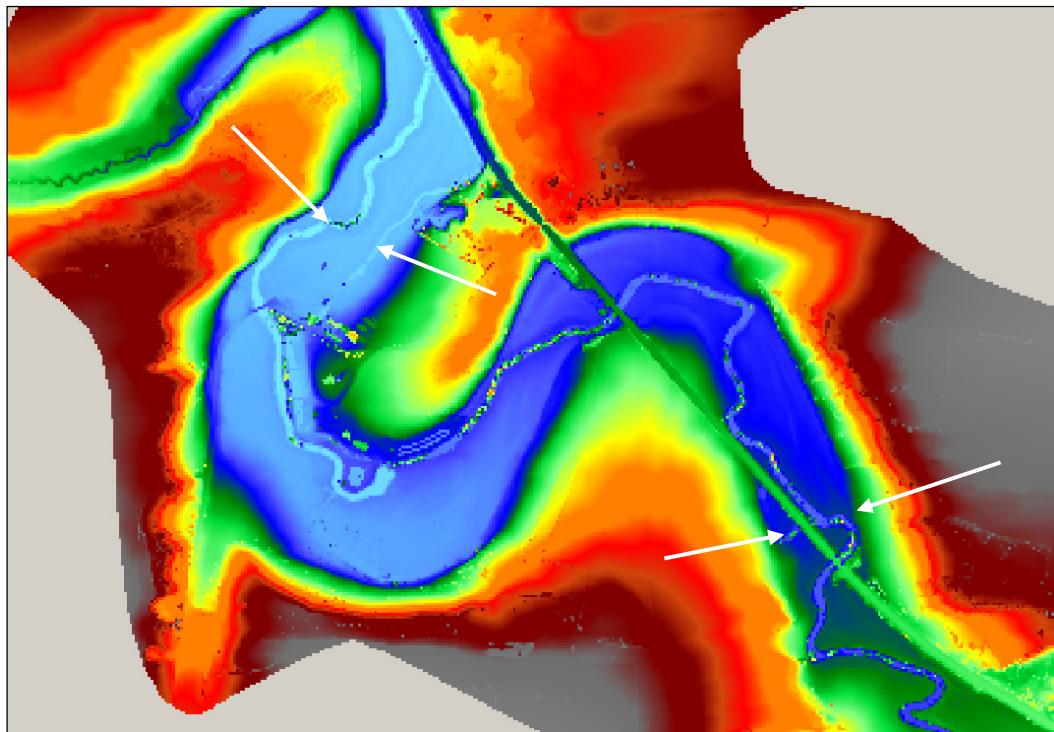


Figure 12 : Exemples d'incertitudes quant au tracé de la rivière (près de Pry).

Deux méthodes différentes furent successivement utilisées pour permettre la sélection du lit mineur après lesquelles une imposition à une cote forfaitaire permet de distinguer celui-ci dans la topographie laser et, de facto, permet son extraction en vue d'un traitement de l'altitude de fond.

- La première méthode utilisée consiste à choisir un point (X,Y) situé sur le lit mineur, pour ensuite sélectionner les éléments voisins censés appartenir à ce dernier sur base d'un accroissement d'altitude forfaitaire. Par exemple pour une rivière dont la surface libre présente une pente de 1 %, discrétisée sur des mailles de 1 mètre, le critère de sélection mailles stipule que l'accroissement maximum entre deux mailles est de $1 \text{ m} \times 1\% \text{ soit } 1 \text{ cm}$. Toutefois, la présence de la végétation imperméable au laser, ainsi que la présence de nombreux ouvrages de franchissement grèvent fortement l'efficacité de cette technique comme l'illustre l'image suivante.

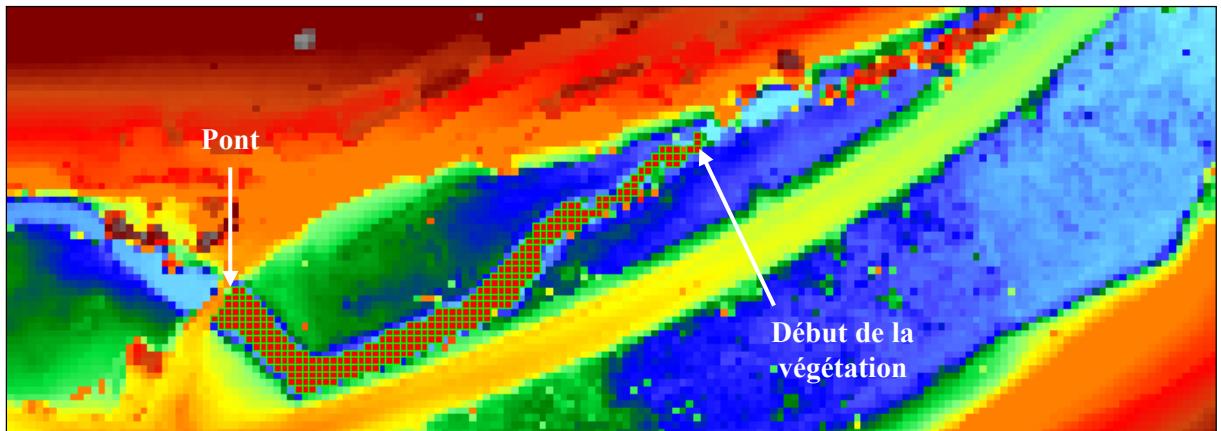


Figure 13 : Sélection de proche en proche.

Comme on le voit, en amont la sélection est stoppée par un pont, tandis qu'à l'aval du point initiateur, c'est la végétation qui arrête la progression de l'étendue de la sélection.

Cette technique se révèle donc très coûteuse en temps par les manipulations ponctuelles qu'elle impose, la sélection étant rapidement bloquée pour une des deux raisons sus-mentionnées. Qui plus est, les différents ouvrages de franchissement ainsi que la végétation sont toujours présents et une méthodologie de traitement automatique ultérieur reste à imaginer.

- La seconde technique a été mise au point lors de cette étude de manière à circonscrire le problème rencontré à ce stade. La largeur de la rivière étant relativement constante, du moins sur des distances assez importantes, un outil de sélection d'un lit constant aligné sur un axe curviligne a été implémenté. La procédure consiste, une fois le tracé curviligne quelconque déterminé par l'utilisateur, à sélectionner une zone centrée sur le tracé, et de largeur prédéfinie. Les avantages de cette méthode sont multiples par rapport à la technique précédente. Retenons principalement la possibilité de traiter des tronçons de rivière de beaucoup plus grande ampleur et le fait que tout obstacle (végétation, ouvrage de franchissement) est automatiquement éliminé puisque faisant partie de la sélection de points. Néanmoins, cette méthode reste fort coûteuse en temps par la nécessité de déterminer manuellement les points fixant l'axe médian de la rivière.

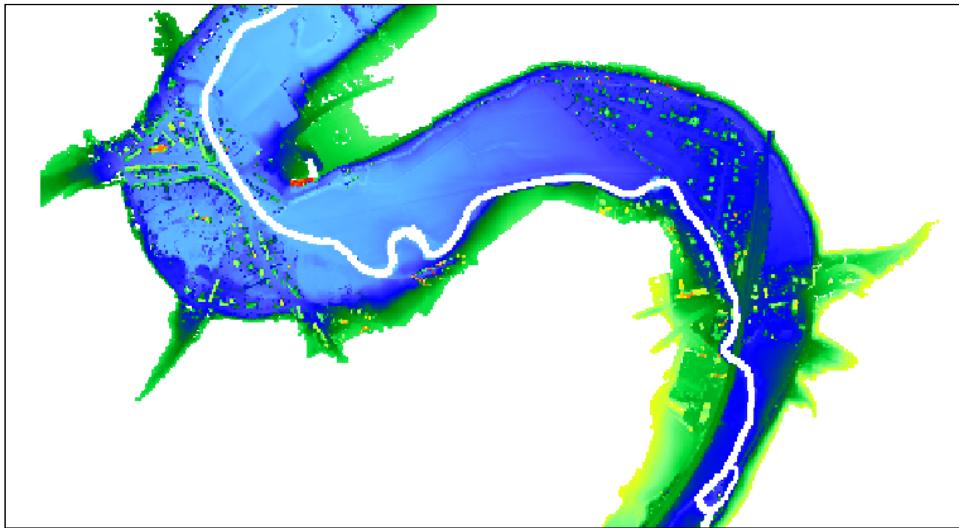


Figure 14 : Topographie après extraction du lit mineur (Ham-sur-Heure) (m).

III.3.2 Reconstruction du niveau de fond du lit mineur.

Les seules informations disponibles sur l'altitude de fond du lit mineur proviennent des profils en long relatifs aux plans terriers. On dispose ainsi d'une cote de fond supposée constante sur la largeur à différents endroits répertoriés sur les vues en plan. Le problème majeur consiste à reporter ces informations sur le tracé fortement curviligne du lit mineur, ce qui complique singulièrement la tâche du calcul des altitudes.

Dans le cadre de cette première approche de l'interpolation de la topographie de fond d'une rivière, la solution retenue a consisté à encoder les repères d'altitude connus ainsi que l'espace les séparant, et à interpoler l'altitude sur l'ensemble des points du lit mineur. Il faut toutefois veiller à ce que l'interpolation soit correctement dirigée, c'est-à-dire que les variations longitudinales d'altitude soient réalisées le long du tracé curviligne de la rivière. Pour ce faire, une technique issue des méthodes de calcul hydrologique (WOLFHYDRO) a été transposée. Elle consiste à définir le lit mineur comme un bassin versant sur lequel on force des réseaux de convergence, réseaux qui seront ensuite utilisés pour réaliser l'interpolation d'altitudes entre points connus. Concrètement, la procédure itérative détermine le nombre de mailles « drainées » par chaque volume fini de calcul, l'exutoire du « bassin », c'est-à-dire le point aval de l'axe curviligne étant finalement affecté de la valeur maximale, tandis que les bords deviennent des lignes de crête.

En vue de traiter l'ensemble du cours d'eau de l'Eau d'Heure, ce ne sont pas moins de 200 points significatifs qui furent choisis pour servir à l'interpolation de la topographie du lit mineur. Le résultat d'un tronçon situé aux alentours de Ham-sur-Heure est représenté sur la figure suivante. On y distingue clairement les variations d'altitude qui se produisent dans

les axes locaux de la rivière. On peut également constater la consistance des résultats sur les bras parallèles.

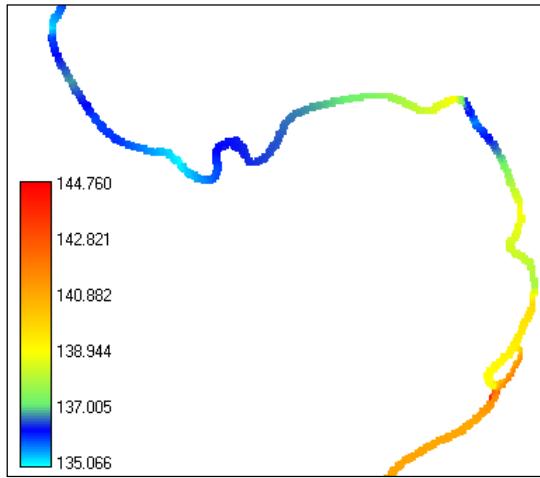


Figure 15 : Topographie du lit mineur reconstruite sur base d'un procédé hydrologique (m).

L'opération finale consiste à assembler l'information reconstruite sur la topographie laser pour obtenir la donnée globale ainsi que l'on peut le voir sur la figure qui suit :

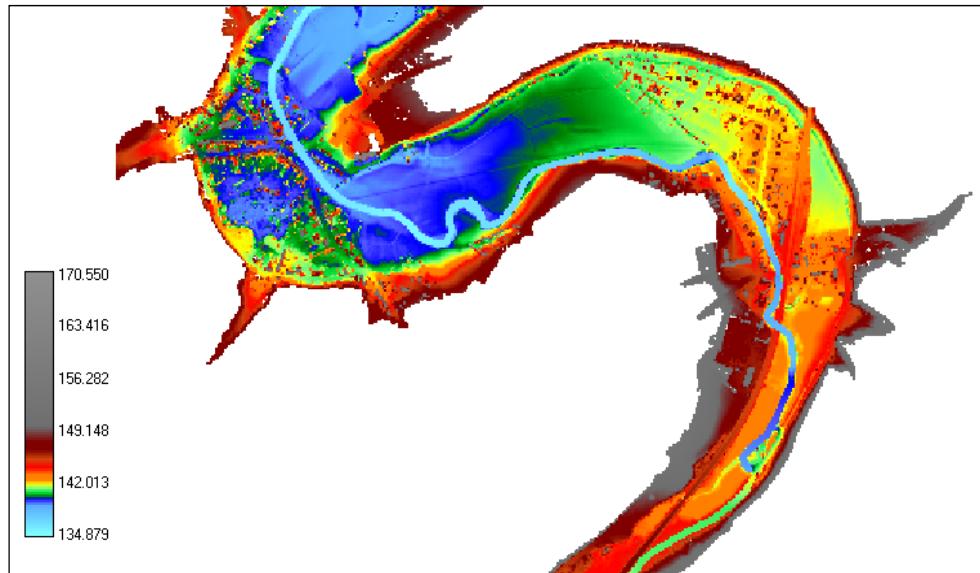


Figure 16 : Topographie assemblée à Ham-sur-Heure (m).

Le procédé d'interpolation envisagé dans le cas de ce cours d'eau s'est finalement révélé très coûteux en temps de par les nombreuses opérations manuelles qu'il demande, tant pour le relevé des données sur les plans terriers que pour l'insertion de ces données au sein de la carte topographique. Ce manque d'automatisme sera un des initiateurs des développements ultérieurs visant à obtenir un outil plus systématique.

III.3.3 Validation de la méthode.

A la suite de la reconstruction de la topographie du lit mineur sur l'ensemble de l'Eau d'Heure, de nombreuses simulations visant à valider le profil de l'altitude de fond ont été envisagées. Celles-ci ont été effectuées dans des conditions d'écoulements tant en lit mineur qu'en lit majeur. Il est à noter que la confluence avec la Sambre est également gérée dans les simulations et que la topographie de fond de celle-ci a pu être imposée grâce à la bathymétrie du cours d'eau.

La validation de cette méthode repose sur la comparaison entre d'une part les stations de mesures placées sur le cours d'eau par le Service des Etudes Hydrologiques et Statistiques (Sethy) et d'autre part entre les hauteurs d'eau constatées dans les simulations, mais aussi par comparaison des zones inondées. Ces stations sont au nombre de 5 le long de l'Eau d'Heure et sont géoréférencées de façon à obtenir une comparaison fiable (figure 18). De plus, certaines stations possèdent une section de contrôle qui permet de connaître le débit passant via l'utilisation de courbes de tarage mises à jour de façon récurrente par des campagnes de jaugeages pour des écoulements d'ampleurs différentes (figure 17).

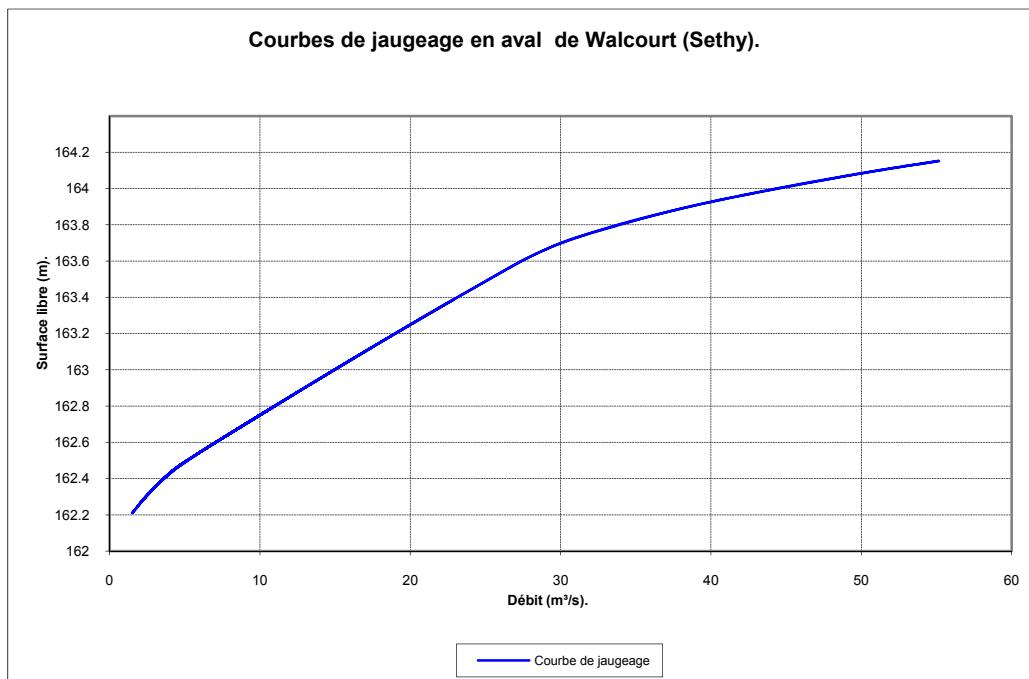


Figure 17

III.3.3.1 Validation du modèle en lit mineur.

Dans un premier temps, une vague de simulations a été envisagée sur une longueur d'environ 10 kilomètres s'étendant du barrage de l'Eau d'Heure jusqu'à l'aval de Walcourt. Cette zone est richement instrumentée ce qui permet de valider le modèle et de caler un

coefficent de frottement par rapport à des écoulements concentrés en lit mineur. Les premiers résultats étaient loin d'être satisfaisants. Pour différents coefficients de frottement choisis entre 30 et 35, les différences d'altitudes de surface libre entre les résultats des simulations et les valeurs ayant existé aux stations de mesure pouvaient atteindre 80 cm. En outre, ces différences n'agissaient pas dans le même sens : certaines valeurs aux stations étant sous-estimées, d'autres étant surestimées. Cette constatation a mené à la conclusion que le coefficient de frottement ne pouvait pas être seul en cause puisque son augmentation ou sa diminution ne pouvait agir qu'en faveur du calage de certaines stations uniquement. Les problèmes encourus devaient dès lors trouver leur explication dans un domaine plus fondamental : la topographie et la largeur du lit mineur.

Suite à ces constatations, une analyse et une inspection très détaillée du lit mineur a été entreprise. La première donnée qui a été vérifiée concernait la largeur du lit mineur. Dans l'ensemble, et sur base des plans terriers, celui-ci s'avérait posséder une largeur relativement constante sur certains tronçons. Ce fait permettait d'ailleurs de sélectionner son emprise comme cela a été expliqué avant. Néanmoins, le cumul d'effets d'élargissements locaux, seulement visibles lors d'une approche très approfondie, et l'effet de la taille de discréétisation (2 m) qui peut engendrer rapidement des erreurs compte tenu de la faible largeur de la rivière, étaient pour une grande partie responsables des erreurs observées.

L'autre donnée fondamentale à prendre en compte est l'altitude de fond. L'examen détaillé des altitudes reconstruites et des niveaux tirés des plans terriers a montré certains décalages attribuables à la méthode hydrologique à la base du processus de reconstruction. Cette méthode a permis de connaître la longueur développée du filaire de rivière envisagé via le tracé du chemin de convergence dans le lit mineur. Par la suite, le report des cotes et des distances cumulées provenant des plans terriers sur ce contour curviligne a permis de reconstruire la topographie. Le problème est que ce chemin de convergence tracé par procédé hydrologique ne se trouve pas nécessairement au centre de la rivière. En effet, le passage dans les méandres se fait tantôt en passant à l'intérieur du virage tantôt à l'extérieur.

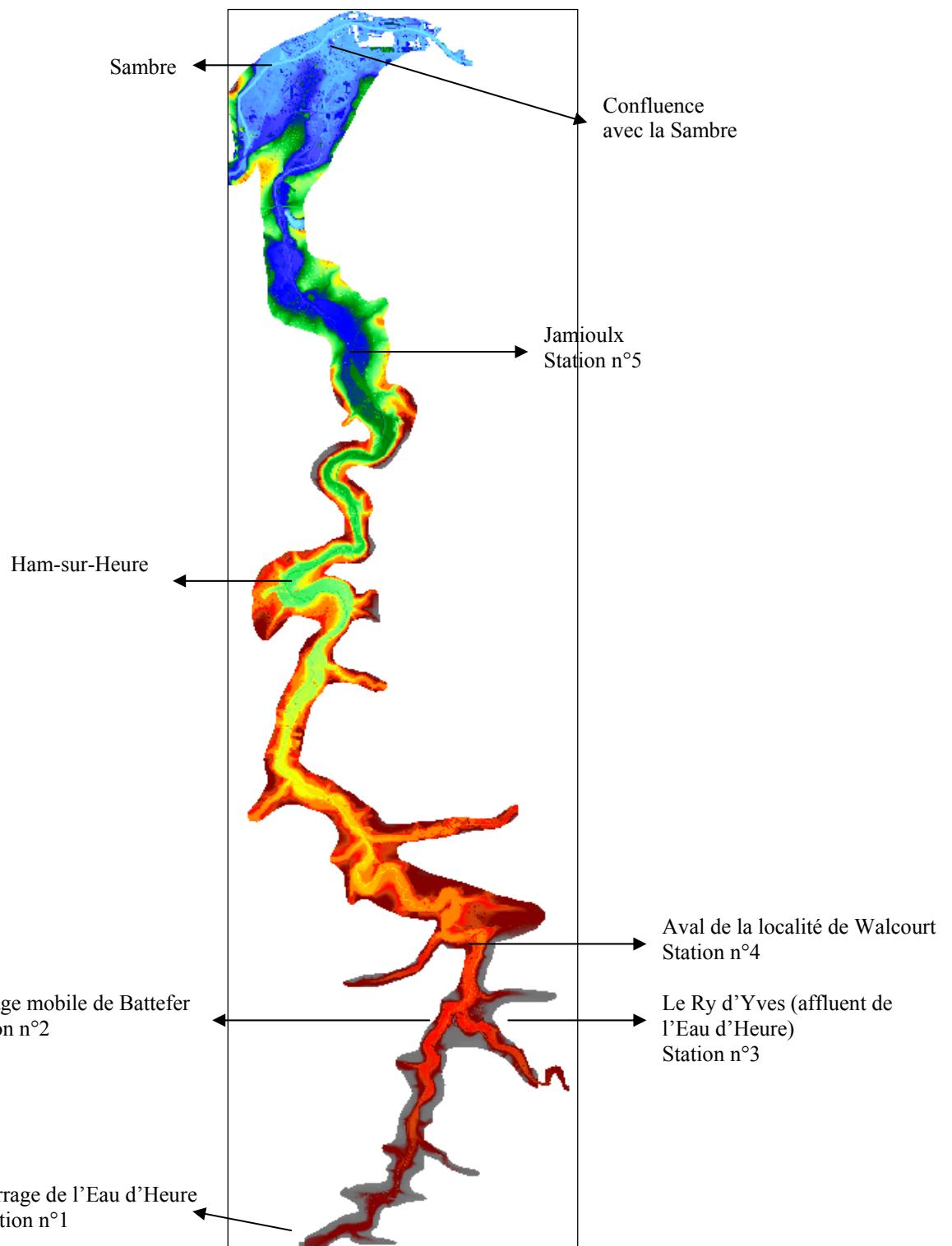


Figure 18 : Topographie de la vallée de l'Eau d'Heure reprenant la position des stations limnimétriques servant de base à la validation du modèle.

Ce phénomène, propre au procédé hydrologique a inévitablement induit le positionnement incorrect des points d'altitude de fond puisque la distance cumulée calculée le long du chemin pouvait différer de la longueur cumulée d'un tracé au centre de la rivière. Il faut ajouter à ce problème le fait que l'Eau d'Heure possède une topographie de fond très chahutée montrant souvent des contrepente ou des déclivités très importantes rendant difficile l'interpolation d'altitude de fond.

Au final, ces problèmes ont nécessité un contrôle systématique et un ajustement manuel sur une grande partie des premiers 10 kilomètres envisagés, modifications qui ont nécessité un grand nombre d'heures de travail. En ce qui concerne l'affluent de l'Eau d'Heure, le Ry d'Yves, celui-ci a vu sa topographie entièrement réimposée à la main. Il possède une largeur dépassant rarement les 5 ou 6 mètres et se réduisant parfois à 2 mètres tout en présentant un niveau de fond fort chahuté. Ce sont ces caractéristiques particulières qui ont nécessité cette reconstruction manuelle toujours basée sur les plans terriers de l'affluent.

Pour être complet, quelques visites sur le terrain ont permis d'affiner l'approche visant à la validation du modèle en prenant mesure de l'emplacement des culées des nombreux ponts enjambant l'Eau d'Heure (70 environ) et en évaluant l'état d'activité des dérivations présentes. Ces observations ont ensuite été incluses dans le modèle de façon à obtenir les résultats suivants pour la validation du modèle :

Crue de février 2002	Station 4	Station 2	Station 3	Station 1
Surface libre SETHY (m)	164.152	167.318	171.684	182.959
Frottement (Strickler)	K = 40	K = 40	K = 30	K = 40
Surface libre Wolf2D (m)	164.21	167.35	171.61	182.96
Différentiel (cm)	5.8	3.2	-7.4	0.1

Tableau 1 :Résultats de calage pour la crue du 13/02/2002.

Crue de janvier 2001	Station 4	Station 2	Station 3	Station 1
Surface libre SETHY (m)	163.166	167.003	170.759	183.051
Frottement (Strickler)	K = 28	K = 28	K = 30	K = 28
Surface libre Wolf2D (m)	163.14	166.97	170.7	183.04
Différentiel (cm)	-2.6	-3.3	-5.9	-1.1

Tableau 2 : Résultats de calage pour la crue du 06/01/2001.

Les résultats sont relativement concluants et montrent que le modèle est apte à représenter la réalité. Le coefficient de frottement différent utilisé dans la colonne de la station 3 correspond au Ry d'Yves. Par sa morphologie et par la végétation qui l'encombre

localement, un coefficient « plus frottant » a été utilisé. Cette valeur du coefficient de frottement, cohérente avec la physique observée, fournit de bons résultats de calage et semble donc correcte.

Trois validations du modèle ont été effectuées sur des épisodes de crues différents de façon à se rendre compte de l'évolution du coefficient de frottement en fonction de la hauteur d'eau ou du débit. Certaines études théoriques et pratiques passées ont en effet montré que le coefficient de frottement utilisé dans la loi de Manning (loi utilisée dans Wolf 2D pour modéliser les pertes par frottement) peut prendre des valeurs différentes selon le débit en rivière [4].

Au contraire d'autres lois, telle celle de Nikuradse (équation 3.1) [1], la loi de Manning n'utilise pas la notion de rugosité relative, c'est-à-dire le rapport entre la taille de la rugosité et la hauteur d'eau. Une loi comme celle de Nikuradse montre que, à taille de rugosité identique mais pour des hauteurs d'eau de plus en plus grande, l'énergie dissipée par frottement diminue.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \operatorname{Log} \left[\frac{k}{3,7H} \right] \quad (3.1)$$

où f est le coefficient de frottement,

k est la taille de rugosité,

H est la hauteur d'eau.

L'approche est différente dans la loi de Manning où le coefficient de frottement est indépendant des conditions hydrauliques et ne dépend que de la nature de la surface frottante. On conçoit dès lors que pour des débits plus importants, généralement liés à des hauteurs d'eau plus importantes, la rugosité présente au fond se fasse de moins en moins sentir. Ces considérations expliquent pourquoi on peut observer une variation du coefficient de frottement dans la loi de Manning avec le débit pour obtenir le calage d'une ligne d'eau. Cette observation a été mise en évidence lors du calage du modèle ainsi que l'on peut le constater sur le graphique suivant :

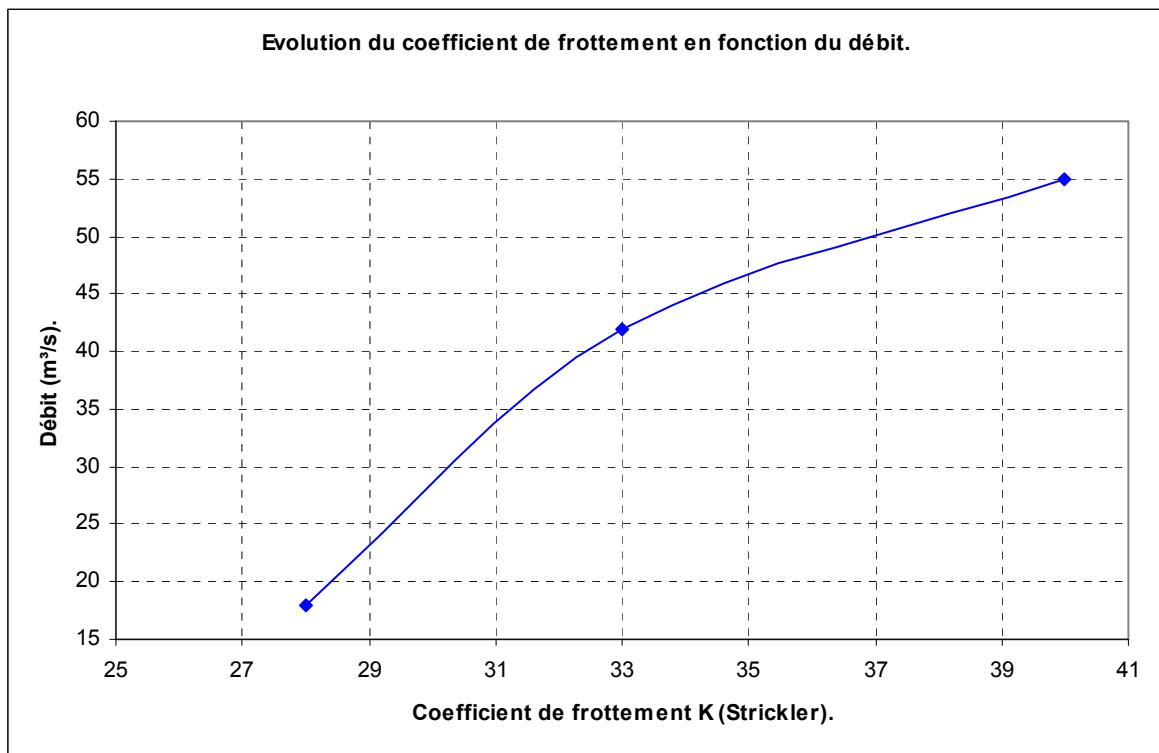


Figure 19 : Relation entre coefficient de frottement et débit sur l'Eau d'Heure.

III.3.3.2 Validation du modèle en zones inondées.

Après la validation des 10 premiers kilomètres du cours d'eau, le calage du modèle sur le tronçon aval a débuté. Au contraire de son prédecesseur, ce dernier ne possède qu'une station de mesure pour permettre des comparaisons de surfaces libres. Ce manque d'information a tout naturellement demandé d'effectuer la validation du modèle par comparaison entre emprises de zones inondées réellement (photographies aériennes et cartes de zones inondées fournies par le Sethy) et les zones immergées dans le modèle hydraulique. Ces comparaisons ont bien entendu été effectuées entre des données correspondant au même épisode de crue. Encore une fois, plusieurs adaptations, tant du point de vue de la largeur du lit mineur ou encore au niveau de sa topographie de fond, ont été effectuées de façon à obtenir une bonne validation.

Cette approche est présentée au travers des 3 figures suivantes montrant successivement une carte officielle d'une zone inondée lors de la crue du 13 février 2002, une photo aérienne prise le même jour et les résultats fournis par le modèle hydraulique (Wolf 2D) après stabilisation de l'écoulement pour le débit constaté lors du pic de crue du 13 février.

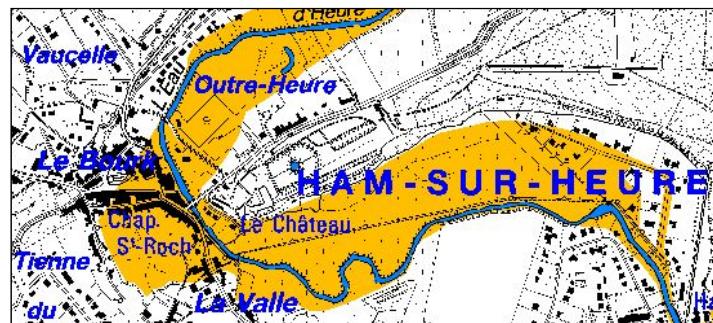


Figure 19 : Zones officiellement référencées (Sethy).



Figure 20 : coupe a-a, Figure 21 : coupe b-b.

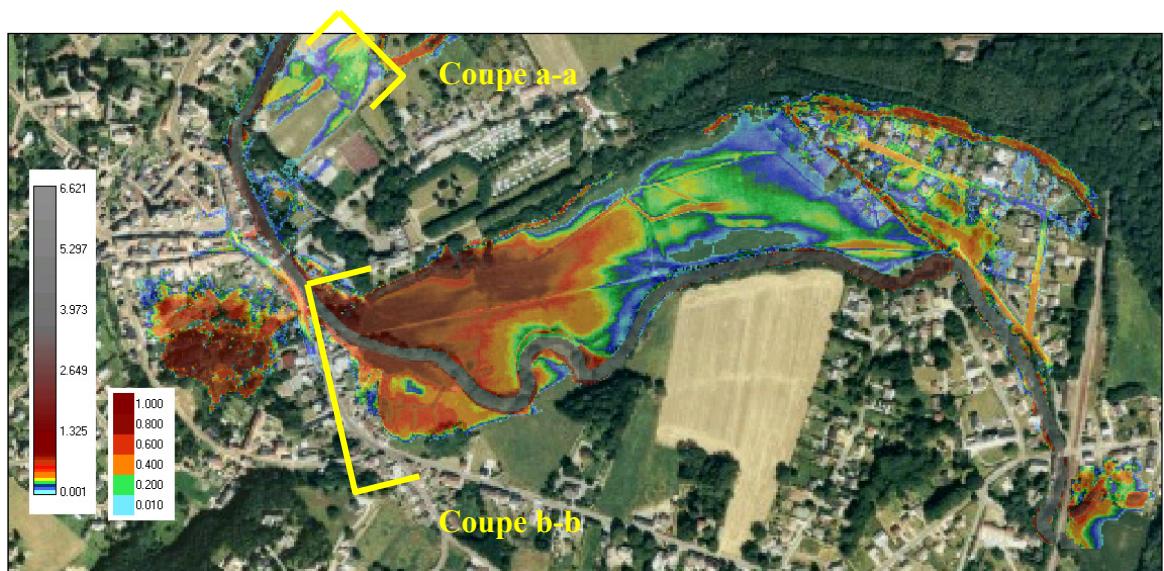


Figure 22 : Inondations à Ham-sur-Heure.

III.3.4 Conclusions de l'approche.

Il ressort des tests de validation menés sur l'Eau d'Heure qu'il est nécessaire d'envisager une approche plus systématique et performante vis-à-vis de la reconstruction topographique

du lit mineur. Le temps passé pour confronter les données de terrain aux valeurs topographiques imposées dans le modèle est la preuve que le développement de l'outil intégré de gestion des sections transversales est nécessaire. Ce sont les différentes étapes de création, de recherche et, finalement, de validation qui sont retracées dans le chapitre suivant.

III.4 Reconstruction du lit mineur à partir de sections transversales réelles.

Les conditions de navigabilité de l'Ourthe font que la méthode du sonar y est inapplicable. Dès lors, la reconstruction du lit mineur s'impose en superposant l'information laser et un fichier reprenant les sections transversales. Ce fichier contient environ 1448 sections espacées en moyenne de 50 mètres. Ces données, fournies par le Sethy, résultent d'un relevé topographique effectué dans les années 1970. Une telle information demandera dès lors une validation sur base d'épisodes de crues récents, compte tenu que la morphologie de la rivière a pu évoluer depuis le relevé. Une gestion tout-à-fait manuelle de ce fichier est à proscrire vu le nombre de sections en jeu, et le développement d'une gestion quasi-automatique est requis. Les paragraphes qui suivent retracent le cheminement suivi pour l'élaboration de l'outil d'interpolation tout en décrivant les options disponibles. Dès lors, ce texte se veut une synthèse théorique tout en étant une sorte de mode d'emploi.

III.4.1 Analyse du format de fichier.

Les fichiers en notre possession possèdent la structure suivante et sont stockés sous format ASCII :

Type;NPRF;NPT;X;Y;Z

113;1;1;235705.17;146435.77;60.08
165;1;2;235707.03;146440.41;57.43
165;1;3;235708.91;146445.03;57.21
....
360;1;38;235747.89;146541.55;62.33
362;1;39;235747.89;146541.55;62.6
270;1;40;235748.52;146543.09;62.61
272;2;1;235786.59;146360.02;69.66

Le fichier est composé de 6 colonnes de données représentant respectivement :

- Un codage qui n'a pu être déterminé même après une analyse de plusieurs sections.
- Le numéro du profil considéré.

- Le numéro du point dans le profil.
- Les coordonnées X, Y, Z dans le système Lambert Belge.

III.4.1.1 Codage.

Le codage indiqué dans la première colonne présente certaines similitudes entre sections. En vue d'obtenir une information utile sur le lit de la rivière, une analyse de la première colonne du fichier a été envisagée. Il apparaît notamment que la valeur de code 111 semble correspondre au point bas du lit mineur dans la section considérée bien que le point correspondant au code 111 ne soit pas toujours l'altitude la plus basse. Les valeurs entourant le chiffre 111 sont à chaque fois 165 et s'étendent pratiquement jusqu'aux limites du lit mineur. En dehors de celui-ci, le codage devient difficilement interprétable et ne correspond plus physiquement.

Une demande quant à la signification des valeurs de code a été faite auprès du Sethy mais leurs archives n'ont, elles non plus, su apporter une quelconque information. L'utilisation de ces codes en vue de déterminer la largeur du lit mineur est dès lors une méthode peu fiable compte tenu des imprécisions relevées et de la méconnaissance de la correspondance physique de ces codes (figure 23). D'autres méthodes seront envisagées en vue de déterminer la limite des berges de la rivière.

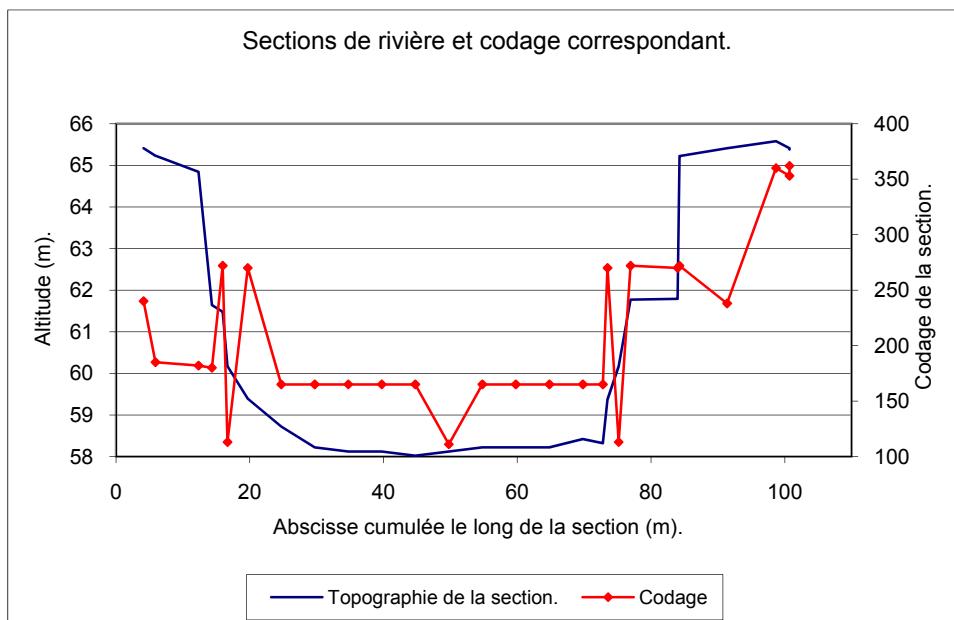


Figure 23 : Comparaison entre le codage et la topographie de la section.

III.4.2 Numérotation des profils.

Certains numéros de profils peuvent posséder plusieurs points ayant la même numérotation comme le montre l'extrait de fichier suivant :

```
186;107;1;235876.02;140608.8;78.49
186;107;1;235829.8;140579.81;78.59
855;107;2;235877.28;140606.83;78.54
855;107;2;235830.84;140578.33;78.63
855;107;3;235878.09;140605.56;78.53
855;107;3;235831.7;140577.11;78.62
855;107;4;235879.22;140603.83;78.5
```

Ce format de numérotation est caractéristique de deux sections très proches l'une de l'autre et qui sont reprises sous le même numéro de profil. Un tel format se justifie notamment au droit d'un seuil où l'on peut disposer de sections avant et après celui-ci. Néanmoins, un problème se pose : la numérotation des points appartenant à la section n'est pas cyclique, c'est-à-dire que ce n'est pas nécessairement la première ligne correspondant à chaque point qui fournit la donnée d'une même section. Comme on peut le voir sur la figure 24 qui représente le profil 107, les deux sections proposées sont presque identiques mais certaines discontinuités et l'abscisse cumulée hors échelle (points de mesure présents sur 300 mètres normalement) montrent que l'énumération des points n'est pas nécessairement cyclique. Un traitement spécifique de ces cas particuliers sera intégré dans le projet de façon à choisir adéquatement les points appartenant à une même section.

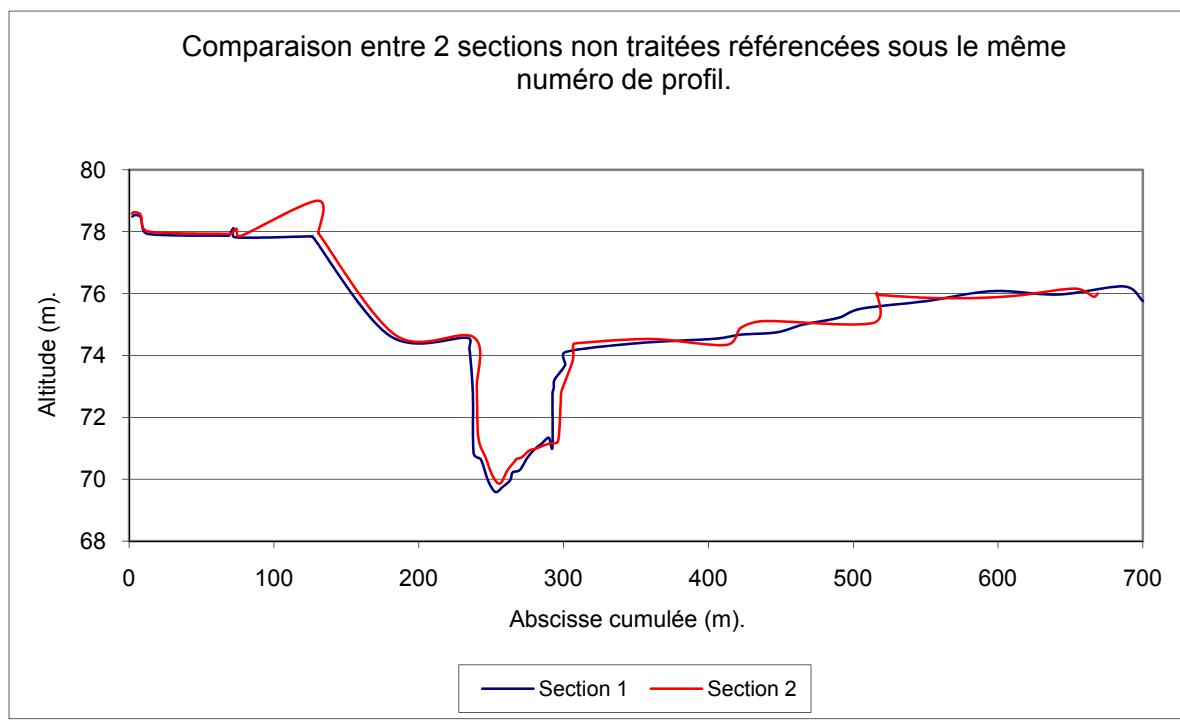


Figure 24

III.4.3 Formatage du fichier vers une forme exploitable.

Le fichier de sections transversales du Sethy est écrit sous une forme peu utilisable dans le cadre de la méthode développée de par les problèmes ponctuels décrits précédemment mais aussi parce que différents paramètres utiles devront être adjoints aux sections. Dès lors, une nouvelle structure de fichier sera employée pour les procédés de reconstruction topographique dans Wolf 2D mais, dans un soucis de généralité, cette structure pourra également être utilisée par le code de calcul unidimensionnel. Dans les quelques paragraphes qui suivent nous retracons le travail important qui a mené à l'obtention d'un fichier sous forme exploitable.

Outre une interaction facilitée, le fichier de sortie produit permettra l'utilisation d'une même section à plusieurs endroits différents. Chaque section est donnée par la suite des points (énumérés de la rive gauche vers la rive droite) la représentant et situés sur la droite qui représente la trace de la section. Les coordonnées de ces points sont donc fournies sous une forme XZ qui représentent respectivement l'abscisse relative par rapport au point origine de la section en rive gauche et l'altitude absolue. Cette forme particulière permet alors d'utiliser une même section à plusieurs endroits simplement en précisant la référence à laquelle elle doit être attachée et l'orientation qu'elle doit avoir.

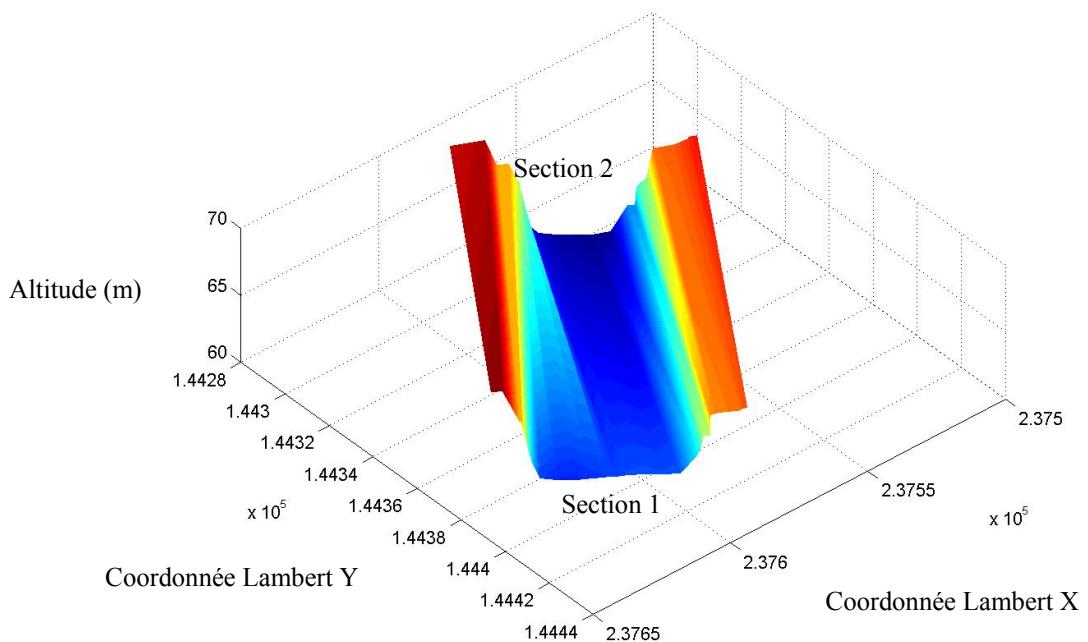


Figure 25 : Représentation tridimensionnelle entre 2 sections réelles (Matlab).

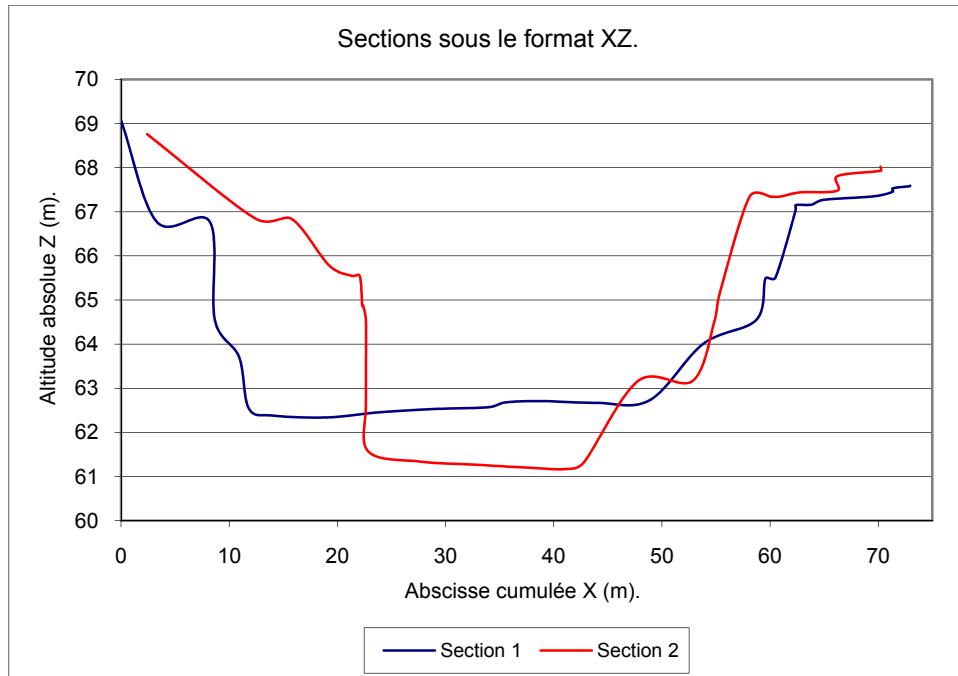


Figure 26 : Coordonnées relatives dans le format XZ.

Le format de fichier de sortie est de la forme suivante :

```

872
40,0
0,60,08
4.999268,57,43
9.989863,57,21
14.99496,58,38
18.95552,58,83
...
108
1268,5961,0,#FALSE#,#TRUE#,10,236539.7,145921.2,236596,146001,39.737,58.02,99999,99999,
99999,99999,#FALSE#
1355,5917,0,#FALSE#,#TRUE#,11,236622.9,145864,236687.1,145970.9,54.237,58.099,99999,999
99,99999,99999,#FALSE#
...

```

Il comprend successivement les informations suivantes :

- Le nombre de sections transversales énumérées dans le fichier source.
- Pour chaque section transversale :
 - Le nombre de relations XZ suivi de la valeur 0 qui est inutilisée ici.
 - Les valeurs XZ de chaque point constituant la section calculées par rapport au point de référence.
- Le nombre de sections réelles à considérer lors du traitement à 2 dimensions (ce nombre représente les sections présentes sur la zone étudiée).

- Pour chaque section, les informations suivantes sont fournies sur une même ligne :
 - L'indice i de la maille où le centre de la section est positionné.
 - L'indice j de la maille où le centre de la section est positionné.
 - L'altitude relative si elle est utilisée.
 - Un booléen qui indique si on utilise une altitude absolue (FALSE) ou une altitude relative (TRUE).
 - Un booléen qui indique si on utilise une section réelle.
 - Le numéro de la section réelle.
 - La coordonnée Lambert X de la référence gauche de la section.
 - La coordonnée Lambert Y de la référence gauche de la section.
 - La coordonnée Lambert X de la référence droite de la section.
 - La coordonnée Lambert Y de la référence droite de la section.
 - La distance X d'un point représentatif du lit mineur (la valeur 99999 indique que cette option n'est pas utilisée).
 - L'altitude Z d'un point représentatif du lit mineur.
 - La distance X de la position de la berge gauche du lit mineur.
 - L'altitude Z de la position de la berge gauche du lit mineur.
 - La distance X de la position de la berge droite du lit mineur.
 - L'altitude Z de la position de la berge droite du lit mineur.
 - Un booléen qui précise si une nouvelle section a été insérée manuellement (TRUE).

III.4.3.1 Création du fichier de sortie (.sxy) et gestion des sections multiples.

La façon de procéder consiste à parcourir séquentiellement le fichier de données. Dans un premier temps, les profils ne contenant qu'une seule section sont repérés et ceux en contenant plusieurs le seront également. La gestion des profils ne contenant qu'une seule section ne pose pas de problèmes particuliers, le nombre de points ainsi que leurs références XZ par rapport au premier point repéré sur la section sont stockés.

Par contre, les autres profils doivent subir un traitement particulier. Le traitement consiste à repérer les différents points numérotés 1 et les différents points numérotés 2 du profil à sections multiples. On calcule ensuite la distance entre les couples de points (1,2). Les couples dont la distance est minimale donnent chacun 2 points appartenant à une même section. Une droite peut alors être déterminée par chaque couple de points déterminé ci-dessus.

L'appartenance des autres points (3, 4, 5,...) à l'une ou l'autre section est testée en fonction de la distance minimale par rapport à la droite de régression calculée avant. Ce calcul s'effectue en abaissant la perpendiculaire au point considéré sur la droite de régression ; ce procédé fournit le point de la droite de régression le plus proche de celui considéré. Il est à mettre en évidence que cette méthode n'est applicable que si l'espace séparant les points d'une même section est inférieur à la distance entre deux sections. En effet, si tel n'était pas le cas, la droite calculée sur le premier couple de points choisi serait perpendiculaire aux sections et le résultat fourni serait incohérent. Néanmoins, il semble logique qu'un ordre de grandeur sépare les deux espaces mentionnés ci-dessus : l'espace entre deux points d'une section est de l'ordre du mètre alors la distance entre sections est de l'ordre de la dizaine de mètres. D'ailleurs aucun problème de ce type n'a été rencontré dans les sections traitées jusqu'à présent.

Un exemple de deux sections contiguës est présenté ci-dessous afin d'illustrer ce qui précède. On voit sur la figure suivante qu'une énumération cyclique force à choisir des points situés sur une puis sur l'autre section, ce qui n'est pas correct. Les triangles oranges donnent la distance entre chaque premier point et la droite de régression de la première section. Lorsque ces triangles ont une valeur élevée, on constate que le point à considérer est le second énuméré dans la liste. Dès lors, le critère de sélection montre son efficacité et la section correcte peut être tracée (figure 28).

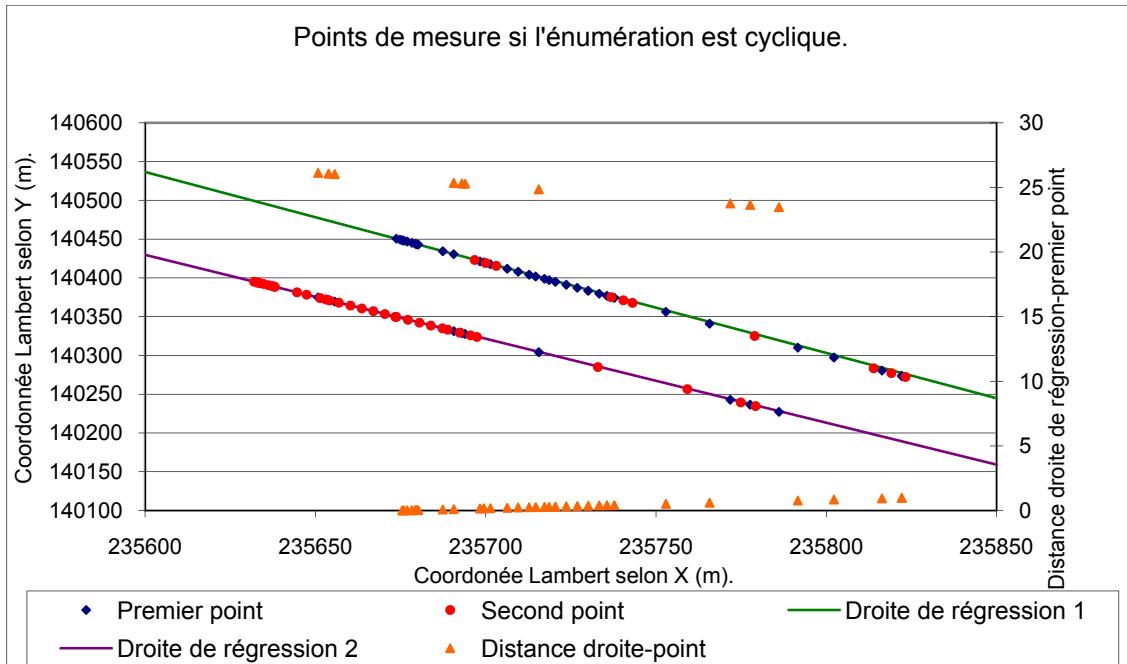


Figure 27

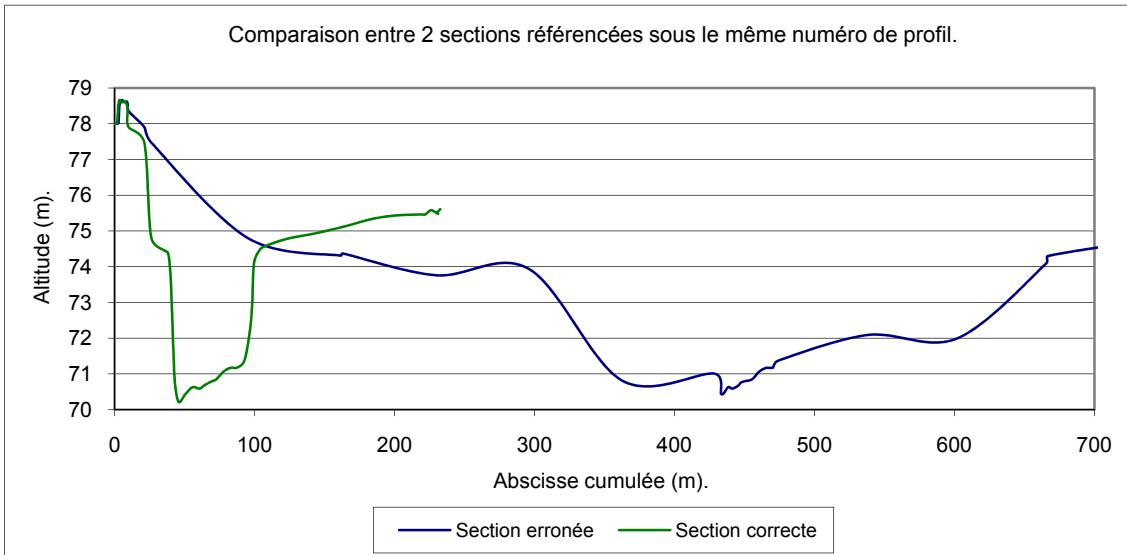


Figure 28

III.4.4 Utilisation du fichier .sxy sur une topographie laser.

Il est nécessaire que la carte de topographie utilisée soit géoréférencée dans le même système que celui des sections réelles. Cette nécessité est rencontrée naturellement dans le cas où la topographie est un modèle numérique de terrain (coordonnée Lambert Belge). Une fois la carte chargée, un menu spécifique est alors disponible et présente la structure suivante :

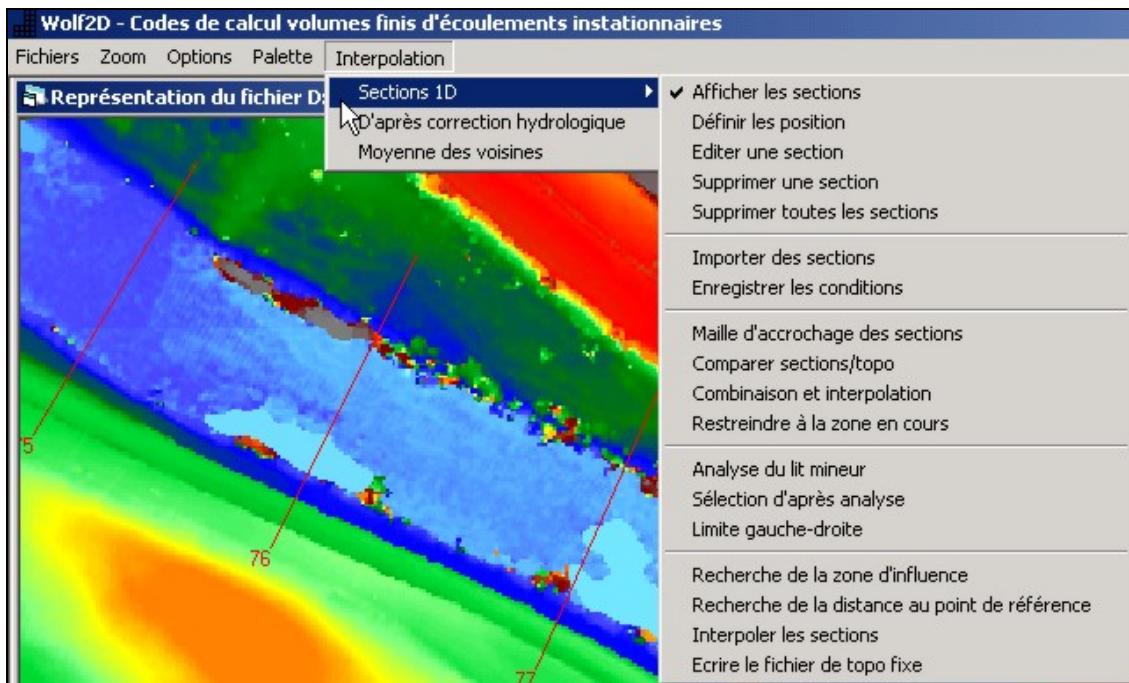


Figure 29 : Menu d'interpolation.

III.4.4.1 Importation du fichier .sxy et restriction du nombre de sections.

La fonction « importer des sections » permet de superposer la trace des sections à la carte topographique et d'attacher un numéro d'ordre sur le côté gauche de chaque section. Grâce à cette information, l'orientation correcte de chacune d'elle peut être vérifiée. Le chiffre affiché correspond au numéro d'ordre des sections déjà fixé précédemment lors de l'élaboration du fichier .sxy. De ce fait, les sections qui ne font pas partie de la carte éditée sont également numérotées. (figure 30).

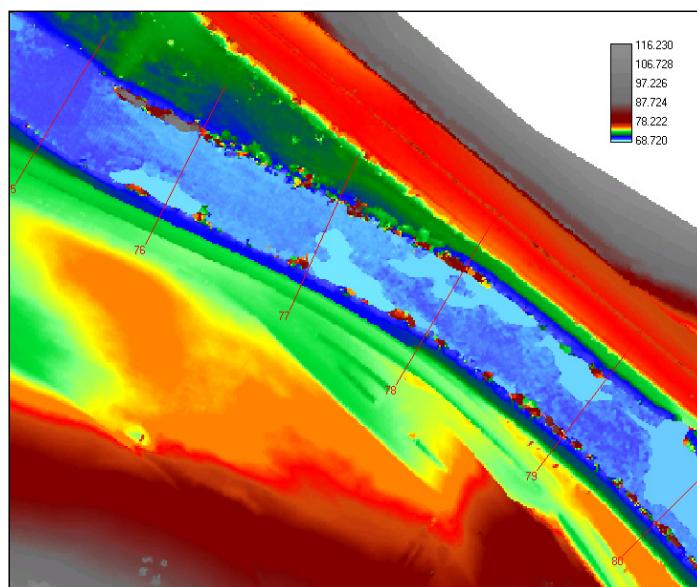


Figure 30 : Surimposition des sections.

Le nombre important de sections présentes dans un même fichier .sxy suggère un tri parmi celles-ci de façon à ne garder que celles qui sont utiles sur la carte topographique chargée. L'option « restreindre à la zone en cours » permet d'effectuer cette opération. Outre l'élimination des sections inutiles, le milieu de la trace de chaque section (centre géographique) est déterminé et est attaché à la maille la plus proche du grid de topographie. Ce rattachement permet de déterminer le i et le j précédemment fixés par défaut à 2 dans le fichier .sxy. Cet endroit particulier est matérialisé par un point blanc lors de l'affichage (figure 31).

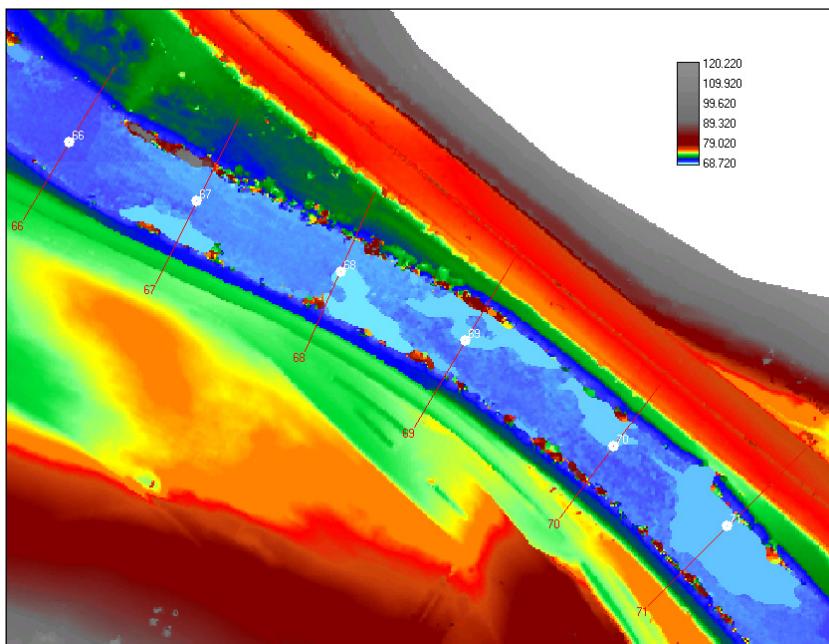


Figure 31 : Restriction des sections et positionnement du centre géographique.

III.4.4.2 Edition des sections.

De manière à pouvoir visualiser de façon optimale les deux informations disponibles (topographie 2D et section réelle), une fenêtre propre à chaque section peut être affichée via l'option « éditer une section ». Celle-ci permet d'obtenir les coordonnées de la section en cours ainsi que son tracé, ses mailles d'attribution,... et de modifier celles-ci si nécessaire (figure 32).

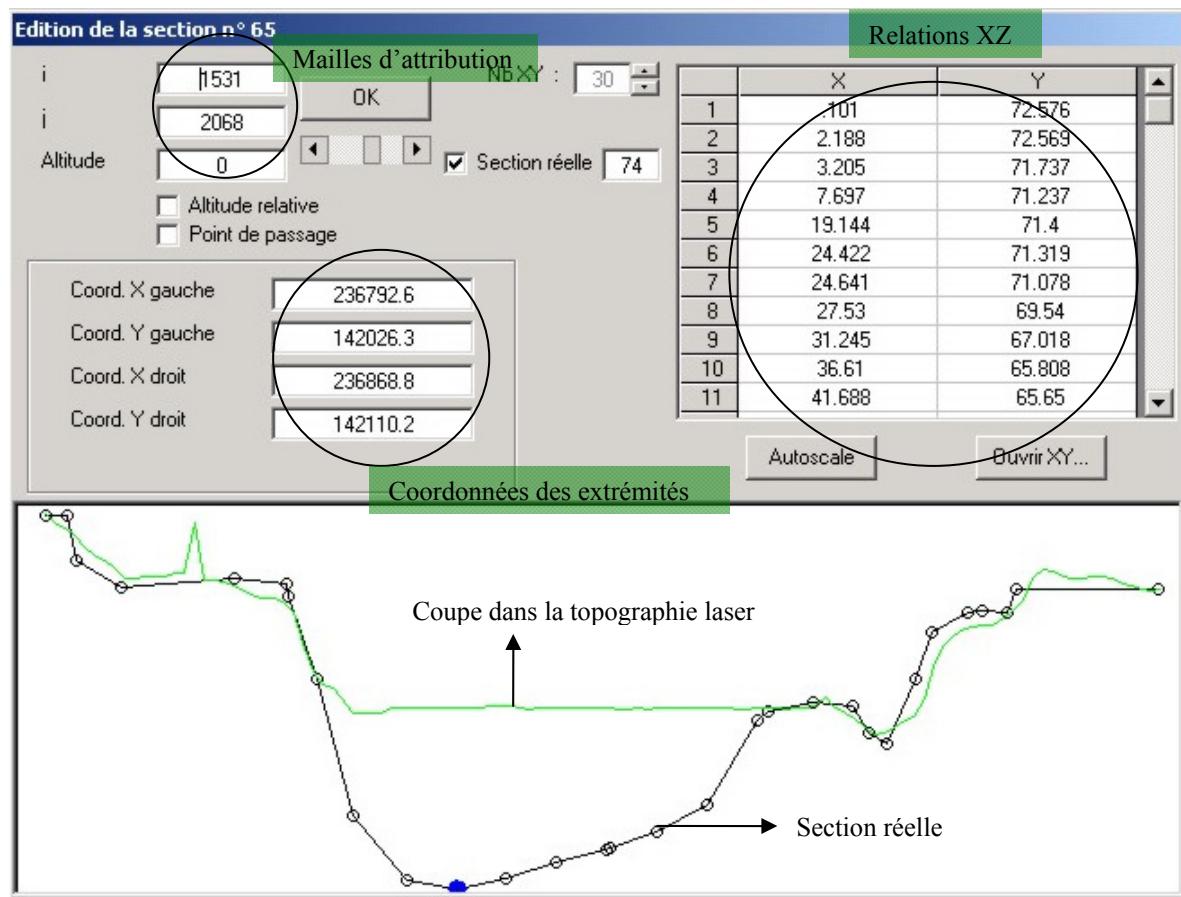


Figure 32

III.4.5 Discréétisation des sections transversales.

Les données de base qui seront utilisées pour la reconstruction du lit mineur sont les sections définies dans les paragraphes précédents. Elles ne peuvent être employées telles quelles, car une comparaison avec la topographie laser doit être menée afin de déterminer l'information la plus correcte possible. Les différences marquantes entre le modèle numérique de terrain et les sections transversales réelles proviennent de trois sources différentes :

- La surface libre du cours d'eau captée par le laser est bien entendu différente du fond réel.
- La végétation provoque également des différences. Il faut remarquer que celle-ci est majoritairement supprimée dans le lit majeur par des comparaisons entre le premier et le second écho du laser. De rares zones sont néanmoins oubliées à cet endroit. La végétation surplombant la rivière reste par contre présente et ce à cause d'une mauvaise réflexion du second écho sur la surface de l'eau.

- Les bâtiments marquent aussi de grosses différences. Cela s'explique logiquement puisque la prise de mesure des sections ne peut se réaliser par dessus une construction.
- Certaines zones du modèle numérique de terrain ont été affectées à une valeur par défaut par l'entreprise s'occupant des relevés en raison d'une mauvaise prise de mesure du laser.

L'obtention de l'information utilisée pour les calculs d'interpolation demande dès lors une analyse comparative entre les deux données disponibles. On remarque que la topographie laser est en général inférieure à la valeur fournie par la section transversale et, qu'en outre, la donnée pertinente dans le lit mineur est toujours sous la surface libre. C'est donc la valeur la plus basse qui sera retenue car elle représente notamment la valeur pertinente dans le lit majeur (info laser) et qu'elle élimine les pics provoqués par la végétation. Deux méthodes sont possibles afin d'atteindre ce but :

- La première consiste à interpoler les points connus des sections réelles en prenant comme altitude la valeur la plus basse au droit de ce point (§ III.4.5.1).
- La seconde consiste à discréteriser la section réelle à la précision des données laser (1 mètre) et ensuite à interpoler en prenant la valeur d'altitude la plus basse au droit des points discréterisés (§ III.4.5.2).

III.4.5.1 Comparaison directe avec les données laser.

Cette méthode ne fournit pas nécessairement de bons résultats. Il arrive que la discréterisation en long de la section ne soit pas suffisamment fine et que l'interpolation faite diffère fortement de l'information laser. De ce fait l'information la plus exacte peut être oubliée ce qui ne garantit pas de bons résultats. On peut observer ce phénomène sur les figures suivantes où l'on voit que la section de calcul (trace noire) est inférieure à la donnée laser mais que par contre les maxima locaux sont tout à fait lissés. L'option « comparer section/topo » permet d'exécuter cette opération.

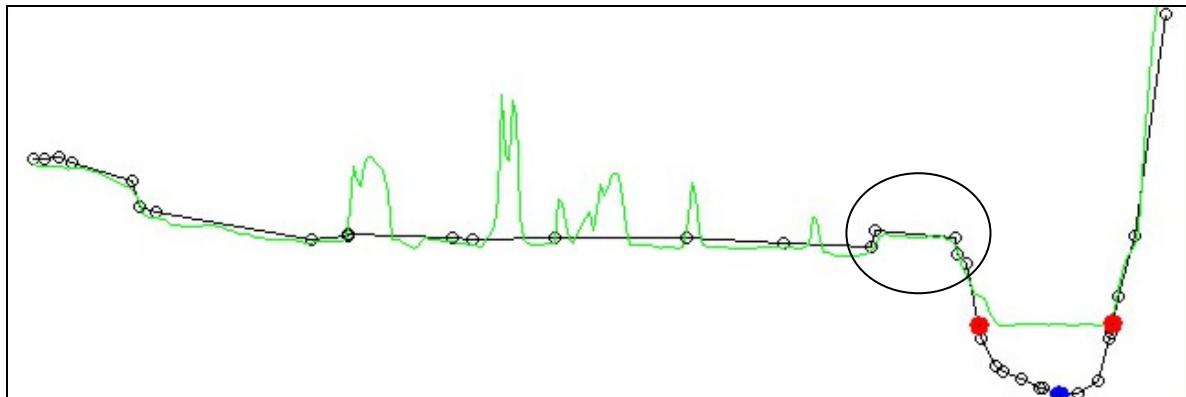


Figure 33 : Situation avant interpolation.

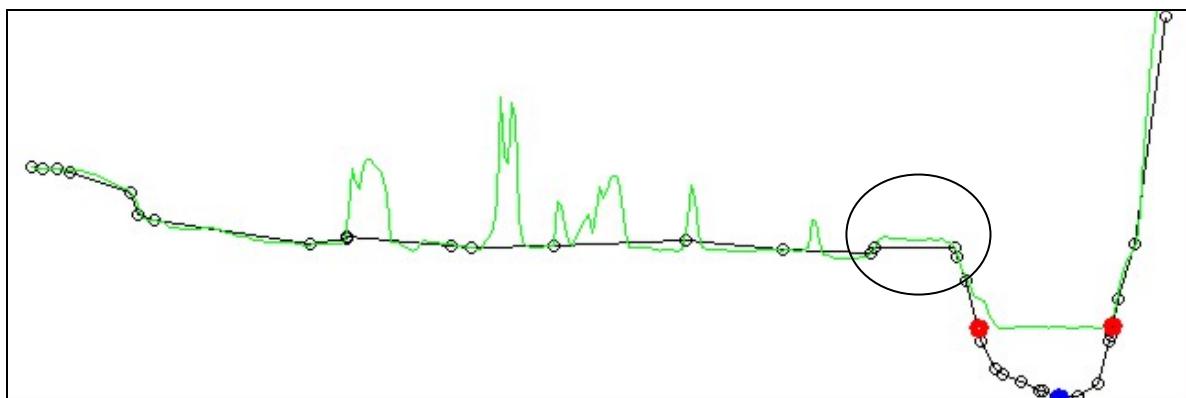


Figure 34 : Situation après interpolation (ronds noirs).

III.4.5.2 Discréétisation de la section et interpolation transversale.

Cette méthode fournit, quant à elle, de bien meilleurs résultats. On s'aperçoit d'une adéquation de qualité entre la donnée laser et la nouvelle section calculée. Dans le menu, c'est l'option « combinaison et interpolation » qui doit être appliquée dans ce cas.

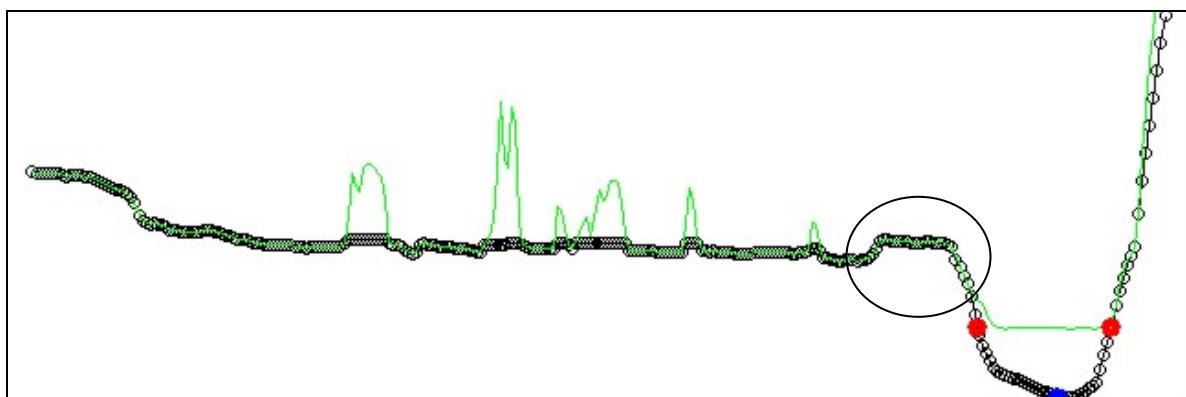


Figure 35 : Situation après discréétisation et interpolation (ronds noirs).

Il ne faut pas perdre de vue que le traitement topographique du lit mineur n'interviendra que sur la largeur de celui-ci, plus quelques mètres de chaque côté (cette zone d'emprise peut être éventuellement rectifiée manuellement). De cette façon, les singularités observées

en lit majeur (bâtiments) ne subiront pas de modifications topographiques puisqu'elles ne seront pas touchées par le traitement effectué. Seule la végétation présente au bord de la rivière sera éliminée car elle sera intégrée dans la zone d'interpolation. Cependant, cette méthode présente un léger inconvénient. Dans le cas où la zone de modification sélectionnée englobe un endroit où la section interpolée est inférieure à la topographie laser, il y a un risque de sous-estimer légèrement l'altitude locale (figures 36 & 37). Néanmoins, ce type de problème reste très limité et ne génère qu'une faible erreur dans le résultat fourni.

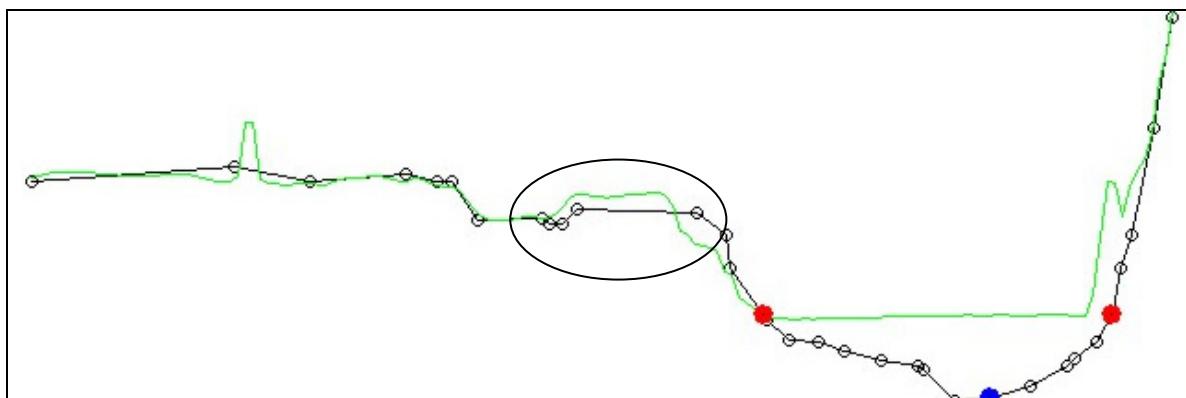


Figure 36 : Situation avant interpolation.

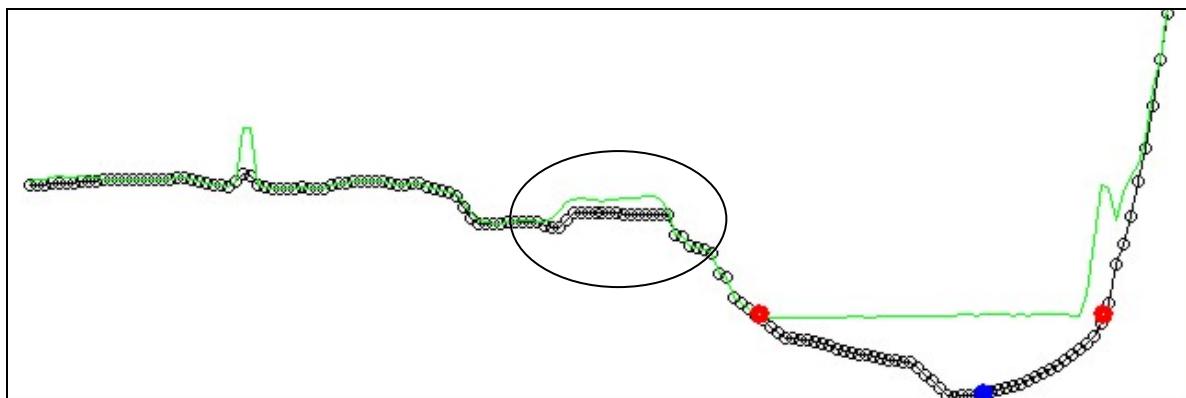


Figure 37 : Sous-estimation locale de l'altitude.

III.4.6 Recherche de l'emprise du lit mineur.

En vue de déterminer la zone sur laquelle l'interpolation doit être effectuée, il convient de repérer adéquatement le lit mineur. La méthode de sélection doit en outre permettre la sélection des zones de végétation en bord de rivière de manière à ce qu'elles soient éliminées lors de l'interpolation. Le dernier prérequis est de ne pas s'étendre abusivement car en dehors du lit mineur et de sa végétation, l'information laser doit être conservée.

III.4.6.1 Sélection de proche en proche.

Une première méthode relativement naturelle est de considérer les mailles de proche en proche tout comme une des méthodes employées dans le cas de l'Eau d'Heure. Comme la surface libre du lit mineur ne diffère pas beaucoup d'une maille à l'autre, une sélection se basant sur une différence maximale de hauteur entre mailles peut être envisagée. Une telle procédure ne permet pas de sélectionner la végétation en bord de rivière ni de franchir des obstacles tels les ponts puisque le différentiel topographique qu'imposent ces singularités est de loin supérieur au différentiel que l'on se donne. De façon à améliorer ce concept, il est maintenant possible de sélectionner plusieurs mailles pouvant servir de point de départ aux mailles qui s'étendent. De cette manière, on obtient une emprise plus complète mais l'utilisation de cette méthode est relativement limitée et doit être adjointe à un autre type de sélection.

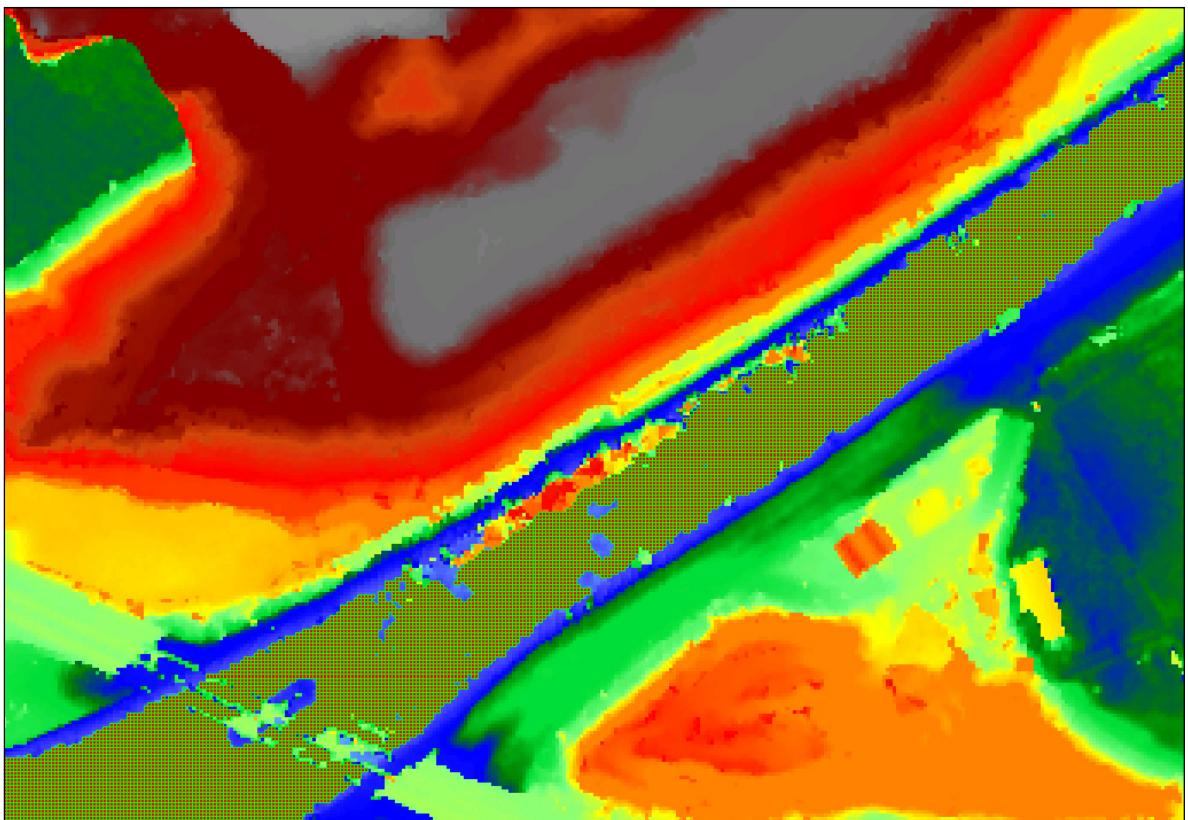


Figure 38 : Sélection du lit mineur de proche en proche.

III.4.6.2 Sélection sur base des sections transversales.

La détermination de la largeur du lit mineur peut naturellement se déduire par l'intersection d'une droite horizontale avec la section transversale locale. L'altitude de référence de cette droite pourrait être prise comme une altitude moyenne de la surface de l'eau sur une zone définie. Néanmoins, une telle approche pourrait conduire à une estimation d'altitude supérieure à la surface libre locale ce qui reviendrait à négliger la donnée laser entre l'altitude moyenne et la surface libre effective. Il est donc préférable d'éviter cette méthode de détermination de la largeur puisqu'elle conduit à privilégier l'information de section transversale quand l'information laser est présente. Dans cet ordre d'idée, la manière la plus correcte pour déterminer l'altitude de la droite d'intersection est de sélectionner l'altitude de surface libre au droit de la section transversale considérée. Plusieurs possibilités sont alors offertes pour déterminer l'emplacement du point de surface libre à considérer :

- Rechercher le point le plus bas de la section transversale. Ce procédé n'est pas nécessairement fiable notamment dans le cas où la rivière se sépare en deux ou plusieurs bras.
- Rechercher le point de la section transversale qui présente le plus grand différentiel d'altitude avec les données laser. Cette approche n'est pas valable lorsque de grands bâtiments ou de la végétation sont présents.
- Une autre de méthode est de considérer l'intégrale des différentiels entre les données laser et la section transversale pour une certaine zone qui est caractérisée par des altitudes de surface libre fort proches les unes des autres. Concrètement, l'utilisateur définit une largeur d'intervalle et un différentiel d'altitude. L'intégrale est évaluée en partant du centre de l'intervalle tout en vérifiant le critère de différentiel d'altitude. Si ce critère n'est pas vérifié, la zone de calcul est décalée de la largeur définie jusqu'à parcourir toute la section.

Après plusieurs essais, c'est la troisième méthode qui se révèle la plus efficace et qui permet d'appliquer la procédure systématiquement. Cette dernière, de par son processus, fournit en outre la liste des points au droit d'une section ainsi que leur altitude. Cela permet dès lors la construction d'une droite de régression sur ceux-ci. C'est cette dernière qui sera retenue pour déterminer les intersections avec les sections transversales et par conséquent la limite des berges.

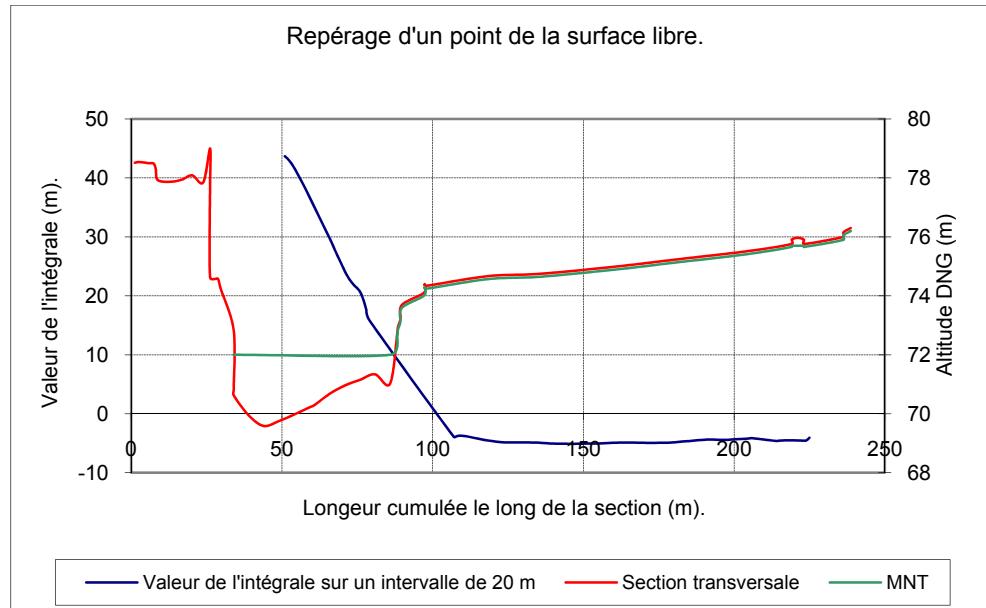


Figure 39 : Repérage d'un point du lit mineur.

Sur la figure suivante, on distingue en bleu le point qui est représentatif du lit mineur et en rouge les limites de ce dernier. Ces deux points rouges peuvent éventuellement être déplacés manuellement de façon à sélectionner une largeur plus importante. Cette opportunité peut se révéler intéressante dans les cas où de la végétation présente sur la berge doit être sélectionnée afin d'être éliminée.

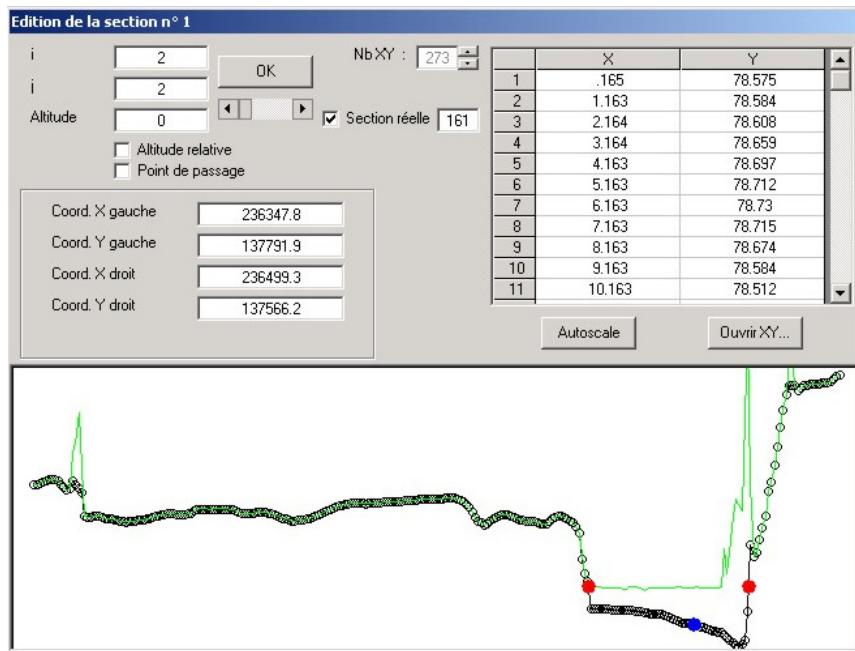


Figure 40 : Points délimitant le lit mineur.

III.4.6.3 Sélection du lit mineur.

Lorsque le traitement proposé au paragraphe précédent a été appliqué et que les éventuelles corrections manuelles ont été apportées, la sélection proprement dite peut être envisagée. Nous sommes maintenant en possession de zones d'emprises locales au droit de chaque section. Le nœud du problème est maintenant de déterminer la manière dont il faut relier ces différents points de façon à former un contour continu.

Un procédé, certes brutal mais très rapide, est de relier les différents points d'une même berge par des droites. Cette méthode donne de très bons résultats dans le cas de rivières relativement rectilignes mais montre très vite ses limites lorsque des méandres apparaissent. En effet, dans un tel cas, la berge à l'intérieur du méandre est systématiquement rognée et la berge à l'extérieur de celui-ci n'est pas atteinte.

Dès lors, une autre méthode doit être envisagée. Tout en ayant pour but de ne pas augmenter considérablement le temps de calcul, il apparaît naturel de considérer une courbe polynomiale d'un degré abordable mais suffisamment riche pour suivre les sinuosités de la rivière. Le regroupement de ces critères a orienté les premiers développements vers le tracé d'un contour défini par des paraboles. Par la suite, d'autres types de courbes seront développés de façon à tester le gain de précision éventuel qu'ils pourraient apporter.

Dans les paragraphes qui suivent, nous montrerons pour chaque type d'interpolation envisagée, l'évaluation de trois données nécessaires :

- La construction de la courbe sur les points de berges.
- La façon d'évaluer la longueur développée du filaire du lit mineur. Cette évaluation sera utile pour construire le contour de sélection du lit mineur mais aussi lors de l'interpolation proprement dite.
- La façon d'évaluer la position X, Y d'un point d'une parabole en fonction d'une abscisse curviligne donnée. En effet, lors du calcul du contour de sélection ou lors de l'interpolation entre sections, le filaire développé du lit mineur sera découpé en intervalles constants qui constituent ici l'abscisse curviligne donnée. Pour chaque intervalle, il est nécessaire de connaître le point (X, Y) de la courbe construite à partir duquel la topographie interpolée sur les sections extrêmes sera reconstruite.

III.4.7 Construction du contour de sélection.

La filière de raisonnement utilisée tant pour la construction du contour de sélection que pour la construction des contours servant à l'interpolation de la topographie sera identique. Le calage des courbes polynomiales pour le tracé du contour de sélection sera réalisé sur les points se situant à mi-distance entre les points de berges au droit des sections ou sur des points de passages supplémentaires imposés manuellement. Une fois la courbe obtenue, celle-ci sera parcourue de manière curviligne discrète. En chaque point de discréétisation, la demi largeur de rivière interpolée entre les deux demi largeurs extrêmes est reportée selon une droite dont la pente est l'interpolation linéaire entre la pente des traces des sections extrêmes. Cette façon de procéder permet de reconstruire point par point la rive gauche et la rive droite de la rivière (figure 41).

III.4.7.1 Paraboles en tant que fonctions.

L'utilisation de paraboles en tant que fonctions « classiques » amène une certaine restriction quant à l'orientation du tracé du lit mineur par rapport aux axes cartésiens qui sont définis. De par la nature bijective d'une fonction « classique », il est en effet impossible qu'un même point X ait en correspondance 2 points Y différents.

Cette restriction sera contournée en effectuant préalablement une rotation des points entrant en ligne de compte pour la construction de la parabole. Trois sections seront utilisées pour la construction des différentes courbes ce qui permet de définir la rotation qui est exécutée comme celle qui aligne la section centrale sur l'axe des Y. De plus, les références des points sont fournies en coordonnées Lambert Belge (6 chiffres avant la virgule et donc un seul chiffre après la virgule pour une variable définie en simple précision). Ces coordonnées seront translatées de façon à augmenter le nombre de chiffres après la virgule et par conséquent augmenter la précision de la construction de la parabole.

Des paraboles seront construites sur chaque couple de trois points qui se suivent. Un exemple de ce type est illustré en figure 41. On y distingue la parabole centrale qui est discréétisée par des points distants d'un intervalle curviligne constant. Les 2 courbes sur les berges sont en fait une succession de points construits depuis les points centraux par report des distances et des orientations interpolées entre sections transversales. Le tracé englobant le lit mineur sera finalement représenté par une succession de points reliés par des segments de droite. Puisque chaque triplet de points se voit attacher une parabole, un segment séparant deux sections obtient 2 informations distinctes. Il est alors possible de conserver l'information donnée par une courbe ou d'effectuer la moyenne entre les 2 paraboles

présentes. Il ressort de ceci que le choix se révélant le plus efficace est la moyenne des 2 courbes puisqu'il permet de construire un contour relativement « lisse ».

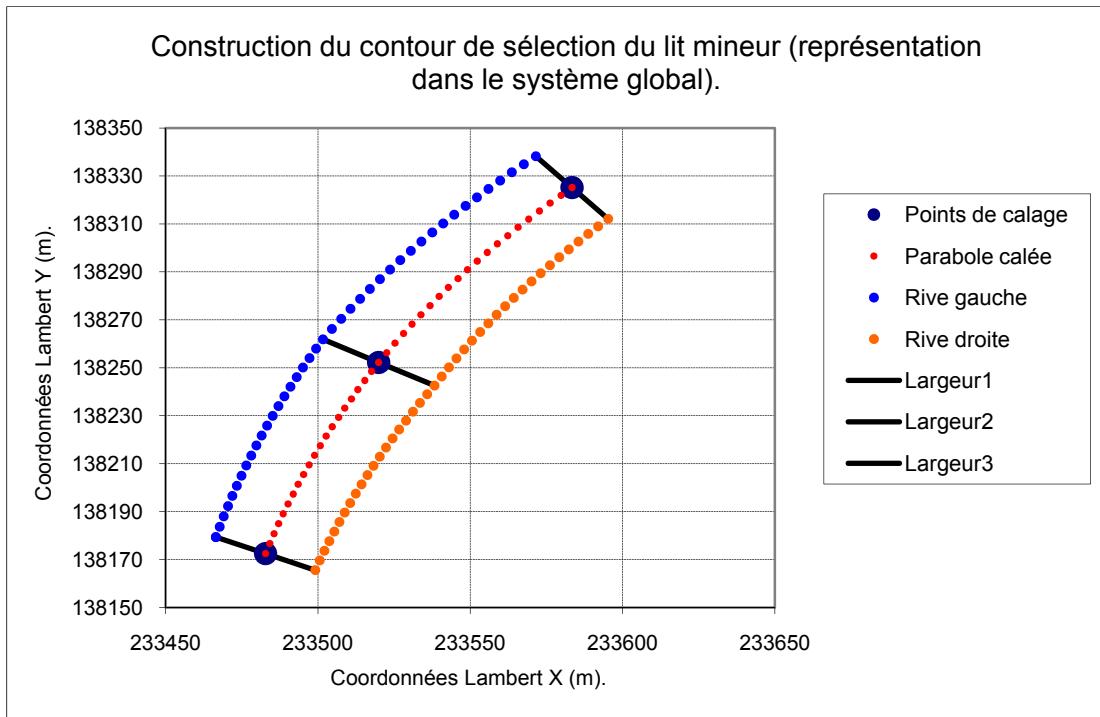


Figure 41 : Détermination de l'emprise du lit mineur.

Calage de la parabole.

La parabole est caractérisée par trois paramètres qu'il est nécessaire de caler. Il s'agit d'imposer trois conditions pour rendre la résolution du problème univoque. Celles-ci sont fournies par les trois points de passage situés au centre de la rivière. Soit la parabole d'équation $y = \alpha \cdot x^2 + \beta \cdot x + \gamma$ et les points de passage de coordonnées $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$.

Pour chacun de ces points l'équation polynomiale doit être vérifiée ce qui revient à

résovoudre le système suivant :
$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 & x_3 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}}_B \quad (3.2)$$

La solution de ce système peut s'écrire sous la forme $X = A^{-1} \cdot B$ et, en toute généralité, on peut aussi écrire la résolution sous la forme :

$\underbrace{A^T A}_{Y} X = \underbrace{A^T B}_{Z} \iff Y^{-1} Y X = Y^{-1} Z \implies X = Y^{-1} Z$. Celle-ci permet, outre la résolution

exacte d'un système où le nombre d'inconnues est égal au nombre d'équations, de trouver la solution d'un système surdéterminé au sens des moindres carrés.

Longueur développée.

Afin d'obtenir une interpolation correcte, il est important de connaître la longueur développée du filaire de rivière que nous venons de déterminer. L'expression fournissant la longueur d'une courbe peut être déduite de l'intégration d'un incrément de l'abscisse curviligne de la courbe (ds). Ce dernier peut s'exprimer en fonction des incrément de dx et dy relatifs aux axes cartésiens dans lesquels la parabole est représentée (figure 42).

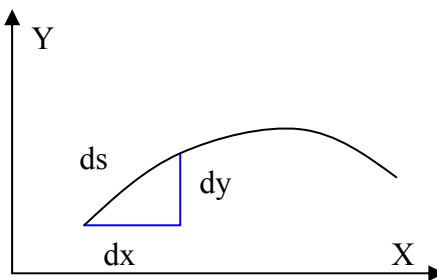


Figure 42 : Calcul de la longueur de la courbe par intégration.

L'expression analytique de l'intégrale permettant l'évaluation de la longueur développée est évaluée comme suit :

$$L = \int_{S_1}^{S_2} ds = \int_{S_1}^{S_2} \sqrt{dx^2 + dy^2} \, ds = \int_{X_1}^{X_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \, dx = \int_{X_1}^{X_2} \sqrt{1 + f'(x)^2} \, dx \quad (3.3)$$

où L est la longueur développée,

S_1 et S_2 sont les bornes d'intégration en coordonnées curvilignes,

X_1 et X_2 sont les bornes d'intégration fournies par les coordonnées du point central du lit mineur,

f' est la dérivée première de la parabole calée.

Dans le cas précis qui nous préoccupe, l'expression de la longueur développée prend la forme suivante en fonction des paramètres de la parabole :

$$\int_{X_1}^{X_2} \sqrt{4.\alpha^2.x^2 + 4.\alpha.\beta.x + \beta^2 + 1} dx \quad (3.4)$$

La longueur du filaire peut s'évaluer de façon exacte en calculant l'équation 3.5. Dans un souci de simplicité de programmation, les paramètres sont écrits sous une autre forme. Les coefficients α et β sont remplacés par a et b , tandis que les bornes d'intégrations selon x sont renommées m et n .

$$L = \frac{-b\sqrt{1+b^2+4.a.b.m+4.a^2.m^2} - 2.a.m\sqrt{1+b^2+4.a.b.m+4.a^2.m^2} + b\sqrt{1+b^2+4.a.b.n+4.a^2.n^2}}{4a} + \frac{2.a.n\sqrt{1+b^2+4.a.b.n+4.a^2.n^2} - \text{ArcSinh}(b+2.a.m) + \text{ArcSinh}(b+2.a.n)}{4a} \quad (3.5)$$

Evaluation des points de berges.

Sur base de la longueur développée calculée suivant la méthode présentée ci-dessus, nous découpons le filaire du lit mineur en plusieurs intervalles de longueur constante. Le nombre de divisions entre 2 sections s'élève au nombre de 20 ce qui, compte tenu d'un intervalle entre sections transversales de 50 mètres environ, assure une discrétisation suffisamment fine.

A l'extrémité de chaque intervalle reconstruit (modélisé par le point d'abscisse curviligne Pint), les demi largeurs locales (Lint_g et Lint_d) sont calculées par interpolation linéaire des demi largeurs des deux sections connues les plus proches de l'intervalle envisagé (Lg1, Ld1, Lg2, Ld2). Il en est de même pour l'évaluation de la direction dans laquelle ces demi largeurs doivent être reportées (Dint), qui est calculée par interpolation linéaire entre l'orientation des sections connues (α et β).

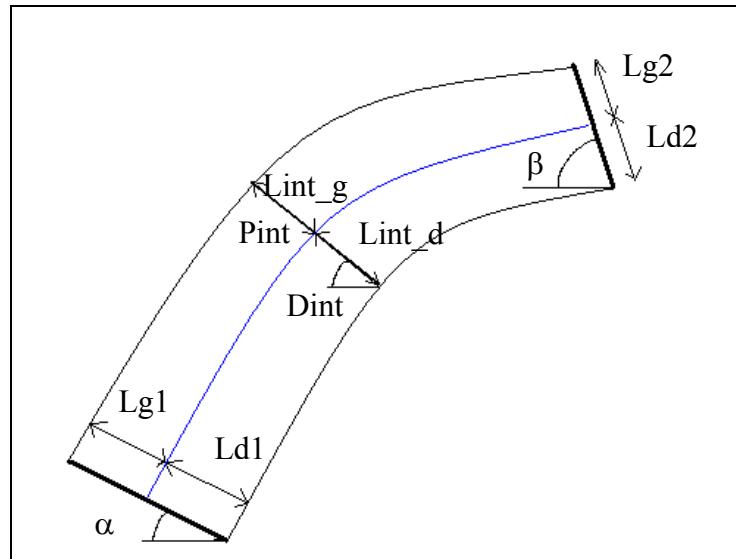


Figure 43 : Calcul de la largeur locale.

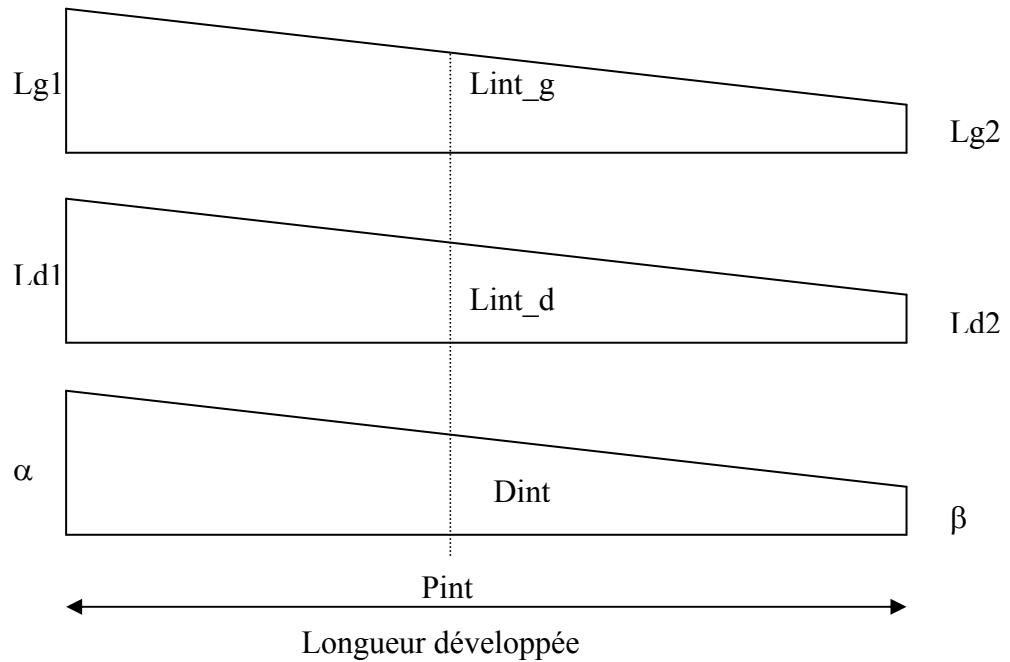


Figure 44 : Interpolation linéaire des différentes données suivant l'abscisse curviligne.

Les valeurs déterminées lors de l'interpolation seront reportées à partir de points appartenant à la courbe construite au centre de la rivière et ces derniers seront séparés par des intervalles curvilignes constants. Dès lors, pour connaître la position en X, Y de ceux-ci, il faut résoudre l'équation fournissant la longueur de la courbe par rapport à n. Nous connaissons en effet un point de départ d'abscisse X (borne inférieure de l'intégrale) et un intervalle curviligne de longueur S. La résolution par rapport à la borne supérieure de l'intégrale fournit l'abscisse X du point recherché. Sa coordonnée Y est, quant à elle,

directement déduite de l'équation de la parabole. En terme d'équations, le problème se présente sous la forme suivante où m , a , b et S sont connus:

$$S = \int_m^n \sqrt{4.a^2.x^2 + 4.a.b.x + b^2 + 1} dx \quad (3.6)$$

$$S - \frac{-b\sqrt{1+b^2+4.a.b.m+4.a^2.m^2} - 2.a.m\sqrt{1+b^2+4.a.b.m+4.a^2.m^2} + b\sqrt{1+b^2+4.a.b.n+4.a^2.n^2}}{4a} + \frac{2.a.n\sqrt{1+b^2+4.a.b.n+4.a^2.n^2} - \text{ArcSinh}(b+2.a.m) + \text{ArcSinh}(b+2.a.n)}{4a} = 0 \quad (3.7)$$

Il est malheureusement impossible d'obtenir une forme analytique rigoureuse pour l'expression de n en fonction des autres variables sur base de l'équation 3.7. C'est pourquoi un développement en série pour n proche de m est d'abord appliqué après avoir effectué l'intégration de l'équation 3.6 (équation 3.8). Compte tenu des faibles courbures qui entrent en jeu dans ce contexte, un développement à l'ordre 2 est satisfaisant ainsi qu'il est montré dans le tableau 1.

$$S = \sqrt{c + m(b + a m)} n + \frac{(b + 2 a m) n^2}{4\sqrt{c + m(b + a m)}} \quad (3.8)$$

$$n = -\frac{2 \left[c + b m + a m^2 - \sqrt{(c + m(b + a m))^2 + (b + 2 a m)\sqrt{c + m(b + a m)} s} \right]}{b + 2 a m} \quad (3.9)$$

Ce tableau présente des comparaisons entre les développements en série exécutés au premier et second ordre et la solution exacte de l'intégrale pour 2 paraboles de courbure différente (les paramètres autres que s et n sont gardés constants au sein d'un même groupe de 3 colonnes). Il présente le calcul de s en fonction de n inversement à ce qui doit être fait. Cette obligation vient du fait qu'il est impossible de résoudre l'équation 3.7 en fonction de n . Néanmoins la qualité des résultats et les conclusions ne sont pas mises en défaut.

On distingue dans les 3 premières colonnes concernant l'intervalle s les résultats relatifs à une parabole de faible courbure qui caractérise bien les sinuosités rencontrées en rivière. Les développements en série fournissent de bons résultats avec une meilleure adéquation pour le premier ordre qui profite de la faible courbure en jeu. Néanmoins, l'erreur de

l'approximation du second ordre reste négligeable au vu des dimensions caractéristiques en rivière.

Les 3 colonnes suivantes présentent une parabole de plus forte courbure et montrent que le deuxième ordre se révèle plus fiable. De telles courbures peuvent éventuellement être rencontrées et donc, nous opterons toujours pour une approximation au second ordre assez précise dans les deux cas.

Valeur de n (m)	Valeurs de l'intervalle s (m)					
	1er ordre	2ème ordre	Exacte	1er ordre	2ème ordre	Exacte
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.502	0.501	0.502	25.254	25.191	25.191
1	1.004	1.001	1.004	50.508	50.254	50.254
1.5	1.507	1.502	1.507	75.762	75.191	75.191
2	2.009	2.002	2.009	101.016	100.000	100.000
2.5	2.511	2.503	2.511	126.270	124.683	124.683
3	3.013	3.004	3.013	151.524	149.238	149.238

Tableau 1 : Valeurs de l'abscisse horizontale n en fonction de l'intervalle curviligne s donné.

III.4.7.2 Paraboles paramétriques.

L'utilisation de paraboles paramétriques permet d'obtenir une généralisation de la méthode proposée dans les paragraphes précédents. La représentation d'une courbe à l'aide de paramètres permet de s'affranchir de la bijection qu'impose une fonction telle que présentée avant. Ainsi l'étape visant à effectuer une rotation des trois sections de façon à aligner celle du centre sur l'axe des Y peut être évitée. Une translation des points représentatifs des sections est tout de même effectuée de façon à obtenir suffisamment de chiffres significatifs dans les calculs envisagés.

La suppression de l'étape de rotation des points permet un gain de temps lors de l'évaluation du contour du lit mineur mais, comme nous le verrons dans la suite, le calcul des distances sur base de paraboles paramétriques est un peu plus coûteux en temps. Au final, la différence de temps entre la méthode précédente et celle présentée dans ce paragraphe est minime. Cette différence est d'autant moins significative que la durée totale du calcul se chiffre à quelques secondes à peine pour quelques dizaines de sections.

Calage de la parabole

Le formalisme utilisé pour représenter la courbe souhaitée dans un contexte paramétrique consiste à utiliser une fonction polynomiale d'un paramètre U pour décrire tant la coordonnée X que la coordonnée Y des points recherchés.

$$\begin{cases} X = a.U^2 + b.U + c \\ Y = d.U^2 + e.U + f \end{cases} \quad (3.10)$$

où a, b, c, d, e, f représentent des paramètres à déterminer.

En exprimant chacune de ces coordonnées suivant un polynôme du second degré en U, il est permis de représenter une fonction parabolique quelconque à deux dimensions. Ce concept est illustré sur les deux figures suivantes.

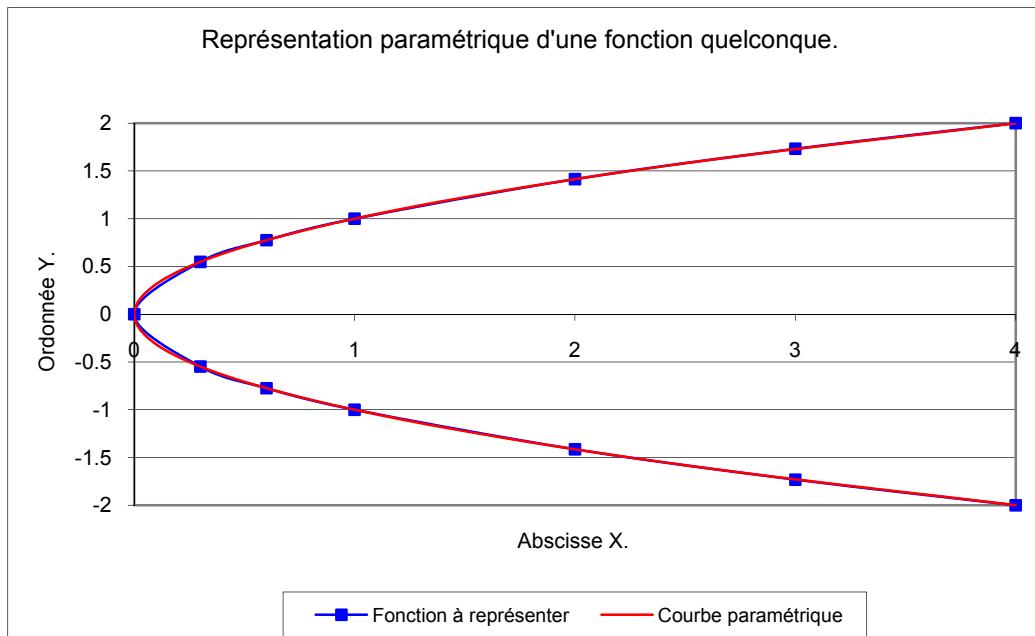


Figure 45 : Représentation d'une parabole par une fonction paramétrique.

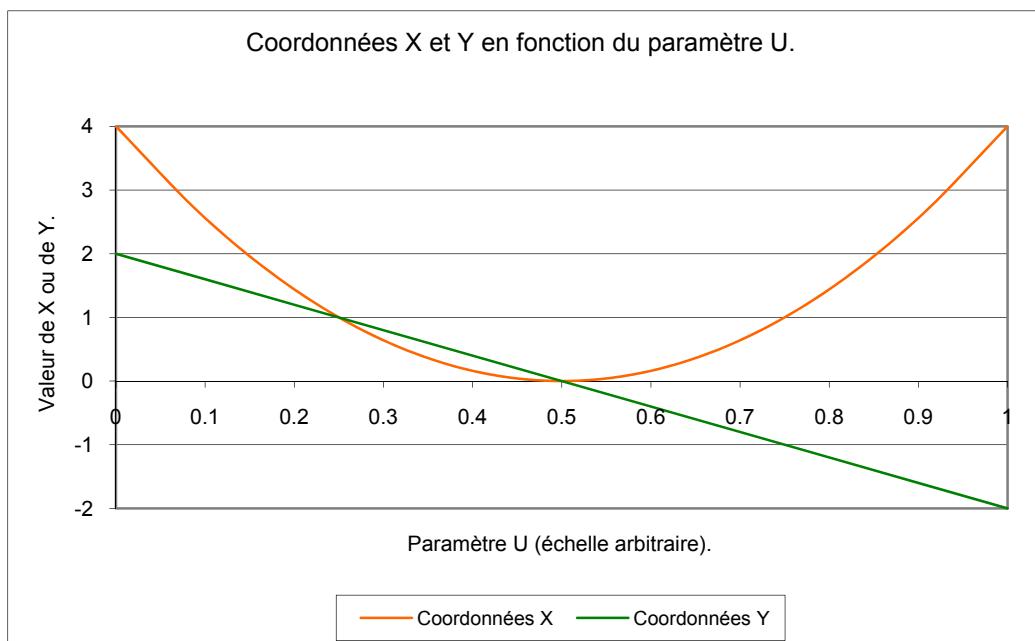


Figure 46 : Valeurs prises par les coordonnées X et Y en fonction du paramètre u.

La résolution du système ci-dessous permet d'obtenir la valeur des 6 paramètres permettant de représenter la courbe passant par les 3 points fixés. Dans ce système, les paramètres U_1 , U_2 et U_3 doivent être fixés dans un intervalle arbitraire qui est choisi entre 0 et 1. La valeur de U_2 est prise à 0,5 ce qui assure que le point de calage intermédiaire représente le sommet de la parabole. Il est évident qu'une multitude de paraboles passant par 3 mêmes points existe, mais dans notre cas, l'absence d'un critère objectif de calage ne permet pas d'optimiser la forme de celle-ci.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_1^2 & U_1 & 1 \\ U_2^2 & U_2 & 1 \\ U_3^2 & U_3 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a & d \\ b & e \\ c & f \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \end{bmatrix}}_B \quad (3.11)$$

Longueur développée.

L'évaluation de la longueur développée s'effectue toujours sur base de l'intégrale permettant de calculer l'abscisse curviligne d'une courbe (x,y).

$$L = \int_{S_1}^{S_2} ds = \int_{S_1}^{S_2} \sqrt{dx^2 + dy^2} \, ds \quad (3.12)$$

Dans cette équation la dérivée est cette fois exprimée via les différentiels dx et dy fonctions de U de façon à effectuer le calcul en coordonnées paramétriques. On obtient alors l'intégrale suivante qui, après résolution entre les bornes de l'intervalle du paramètre U , permet de connaître la longueur de la parabole.

$$L = \int_{U_1}^{U_2} \sqrt{4u^2(a^2+d^2) + 4u(ab+de) + e^2b^2} \, du = \int_m^n \sqrt{u^2g + uh + i} \, du \quad (3.13)$$

où, pour simplifier l'écriture de l'équation et des résultats ultérieurs, on remplace :

- $4(a^2+d^2)$ par g
- $4(ab+de)$ par h
- e^2+b^2 par i
- U_1 et U_2 par m et n

La résolution de cette intégrale est toujours possible analytiquement mais le résultat obtenu demande un grand nombre d'opérations. En outre, cette solution fait intervenir une évaluation de logarithme qui provoque un net ralentissement dans le langage de

programmation utilisé. En conséquence, l'évaluation de la longueur développée sera évaluée au moyen d'un développement en série limité à l'ordre 3 (équation 3.13). Les tests apportés pour permettre la comparaison entre la solution exacte et le développement au troisième ordre montrent que la différence obtenue est toujours de l'ordre du demi-mètre ce qui assure une précision suffisante puisque les données majoritairement utilisées sont fournies sur des grids de 1 mètre de côté.

$$L = \sqrt{i+m(h+gm)} n + \frac{(h+2gm) \left[(2g^3 n^2 + 2\sqrt{g(i+hm)} + h\sqrt{i+m(h+gm)} + 2gm\sqrt{i+m(h+gm)} \right] n^2}{4(i+m(h+gm)) \left[h + 2gm + 2\sqrt{g(i+m(h+gm))} \right]} + \frac{(-h^2 + 4gi)n^3}{24(i+m(h+gm))^{3/2}} \quad (3.14)$$

Evaluation des points de berge.

La construction des points de berge et, par conséquent, du tracé du lit mineur s'effectue de la même façon que lorsqu'on utilise une parabole construite « classiquement ». La seule différence dans le procédé réside dans le fait que la courbe est cette fois représentée en fonction du paramètre U . De nouveau, dans ce cas, le calcul de l'emplacement d'un point distant d'un intervalle curviligne S donné d'un autre point n'est pas possible analytiquement. L'évaluation de l'incrément du paramètre U se fera comme précédemment en développant l'équation en série de Taylor au deuxième ordre de façon à trouver la borne supérieure de l'intégrale. L'évaluation de cette valeur en fonction des autres paramètres étant très complexe, il est inutile de donner l'expression de la solution ici.

Le résultat obtenu est identique à celui acquis lors de l'utilisation d'une parabole « classique » tout en gardant cette fois un souci de généralité dans le traitement envisagé. La combinaison d'une sélection de proche en proche et du contour déterminé ci-dessus permet dès lors d'obtenir une sélection précise du lit mineur totalement affranchie des obstacles en rivière.

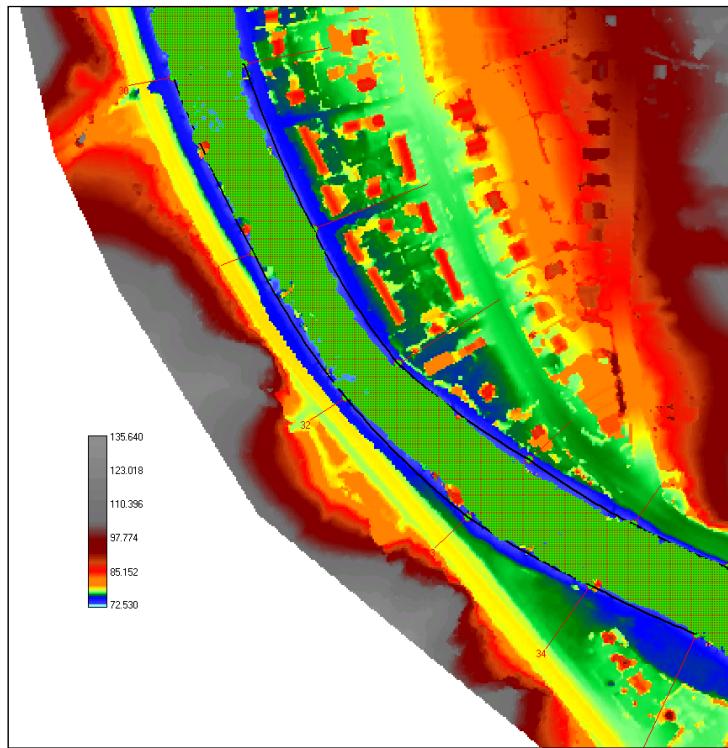


Figure 47 : Sélection de proche en proche (vert) et contour parabolique moyené (noir).

III.4.7.3 Polynôme du quatrième degré.

Suite à l'utilisation des concepts de paraboles pour retracer le lit mineur, il s'est avéré que certains endroits en rivière étaient mal estimés car ils présentaient une sinuosité fort importante. Cet effet peut être représenté efficacement par des paraboles tant que les changements de courbure ne sont pas trop rapprochés. Dans le cas contraire, la parabole s'adapte mal puisqu'elle est limitée à une courbure constante. C'est la première raison pour laquelle l'implémentation d'une courbe de degré supérieur a été envisagée.

La seconde raison réside dans la volonté d'estimer la différence de précision de représentation du lit mineur qui peut exister entre des courbes de degrés différents. Il se peut en effet qu'une fonction de degré supérieur à 2 s'adapte mieux au tracé d'une rivière qui, naturellement, ne possède pas de berges suivant le tracé de paraboles.

Le choix s'est alors porté vers un polynôme de degré 4. La suite logique des événements voudrait que ce soit une courbe de troisième degré qui eut été choisie. Suite à la structure de l'implémentation du code qui se prête mieux à une adaptation pour une courbe du quatrième degré et suite au fait que cette fonction secale sur 5 points, permettant ainsi de conserver une « symétrie » par rapport au point milieu, c'est le polynôme du quatrième degré qui a été implémenté.

Calage du polynôme.

Dans le cas d'une courbe du quatrième degré ce sont cette fois 5 paramètres qu'il s'agit de caler pour satisfaire la forme générale de l'équation :

$$y = a.x^4 + b.x^3 + c.x^2 + d.x + e \quad (3.15)$$

Ces 5 paramètres pourront être fixés grâce à l'imposition de 5 conditions. Celles-ci seront matérialisées par les coordonnées des points représentatifs des sections transversales. On obtient ainsi le système suivant dont la résolution sera menée de la même façon que lors du calage de paraboles.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1^4 & x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^4 & x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^4 & x_3^3 & x_3^2 & x_3 & 1 \\ x_4^4 & x_4^3 & x_4^2 & x_4 & 1 \\ x_5^4 & x_5^3 & x_5^2 & x_5 & 1 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix}}_B \quad (3.16)$$

Chaque groupe de 5 points décrivant le lit mineur est traité en vue de déterminer une courbe passant par ceux-ci. De ce fait, plusieurs courbes peuvent représenter un segment séparant deux points (4 courbes par segment au maximum). Il est alors permis d'effectuer des moyennes entre ces courbes de façon à utiliser toute l'information disponible.

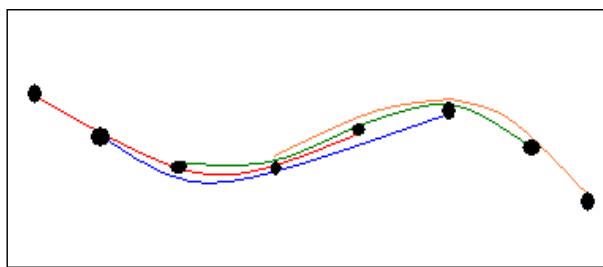


Figure 48 : Superposition des courbes de façon à moyenner l'information.

Il est à remarquer que la théorie développée dans ce paragraphe n'utilise pas le formalisme paramétrique étant donné qu'historiquement elle fut développée avant l'implémentation des paraboles sous forme paramétrique. Cette théorie demande donc la translation et la rotation des points de calage afin que la courbe représentée soit une fonction dans des axes orthonormés X, Y.

Evaluation des longueurs.

L'estimation de la longueur de la développée de la courbe se base toujours sur le principe de l'estimation de l'abscisse curviligne où, cette fois, l'expression de la dérivée de la fonction (cubique) confère à l'équation une structure nettement plus compliquée à intégrer.

Cette complexité grandissante mène à l'abandon de la solution analytique et des développements en série. C'est pourquoi l'estimation de la longueur de la courbe ainsi que l'abscisse fournissant une abscisse curviligne donnée seront évaluées en parcourant la courbe par petits incrément. Ce type d'évaluation ralentit fortement le calcul jusqu'à un niveau fort élevé qui ne pourrait trouver compensation que dans une qualité de résultat nettement accrue.

Malheureusement, on observe que peu de différences entre l'évaluation du tracé du lit mineur par paraboles ou par polynômes du quatrième degré. De plus, la courbure variable que fournit le quatrième degré est quelquefois source d'oscillations dans la courbe ce qui ne représente en rien le tracé de la rivière. En conclusion, l'utilisation de ce type de courbes est peu recommandable dans le cas qui nous occupe et ne sera plus utilisé par la suite.

Suivant les considérations évoquées ci-dessus, le tracé d'une rivière de courbure importante pourra être évalué en ajoutant des points de passage aux endroits délicats ce qui permettra de préciser le tracé du cours d'eau.

III.4.7.4 Parabole construite sur une approche Lagrangienne.

La détermination de largeur d'emprise du lit mineur étant importante pour obtenir une reconstruction de celui-ci aussi fidèle que possible, une quatrième et dernière approche de sélection a été envisagée. Compte tenu des précédentes évaluations, celle-ci est basée sur l'utilisation d'une parabole, courbe semblant présenter un degré adéquat et générant un nombre d'opérations acceptables pour sa résolution. Tout en gardant à l'esprit que la parabole possède une courbure constante et tout en ayant pour but d'améliorer la représentation de la succession de méandres de courbures alternées, le module développé et testé ici utilise une parabole calée sur 5 points. Compte tenu du nombre de degrés de liberté contenu dans une courbe du second degré (3), seuls les 3 points centraux verront la courbe passer par eux. Les 2 points extrêmes serviront « d'optimiseurs » de façon à modifier les paramètres de représentation de la parabole et de donner ainsi une idée de ce qui existe autour des 3 points centraux.

D'une façon générale, la parabole sera tout d'abord calée au mieux sur les 5 points disponibles par approximation aux moindres carrés. Ensuite, l'adjonction de trois équations faisant intervenir la théorie des multiplicateurs de Lagrange permettra de faire passer la parabole par les trois points centraux tout en passant au mieux par les 2 points de calage extrêmes.

Calage de la parabole.

Dans un premier temps, puisque le nombre de paramètres à caler est inférieur au nombre de conditions à fixer, le système est surdéterminé et ne peut plus être résolu en inversant la matrice $[A]$. La résolution s'effectue dès lors en prémultipliant chaque membre de l'équation par la matrice transposée de $[A]$ et en prémultipliant les deux membres par l'inverse de $[A]^T.[A]$. De cette façon, la solution obtenue pour les trois paramètres caractérisant la parabole permet de construire une courbe s'approchant des 5 points de calage au sens des moindres carrés. L'approche utilisée se base sur le formalisme paramétrique tel qu'il a été décrit précédemment. Le paramètre U est cette fois choisi dans un intervalle présentant une échelle plus importante. Il est compris entre 0 et 10, les points intermédiaires étant variables afin d'optimiser les paramètres de la parabole.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_1^2 & U_1 & 1 \\ U_2^2 & U_2 & 1 \\ U_3^2 & U_3 & 1 \\ U_4^2 & U_4 & 1 \\ U_5^2 & U_5 & 1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a & d \\ b & e \\ c & f \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \\ X_5 & Y_5 \end{bmatrix}}_B \quad A^T \cdot A \cdot X = A^T \cdot B \quad X = [A^T \cdot A]^{-1} \cdot A^T \cdot B \quad (3.17)$$

Ce type de résolution permet d'obtenir un résultat comparable à celui représenté sur la figure 49, mais qui est insuffisamment précis pour l'application envisagée. Les écarts qui naissent entre les points de passage et le résultat issu du système peuvent atteindre une dizaine de mètres.

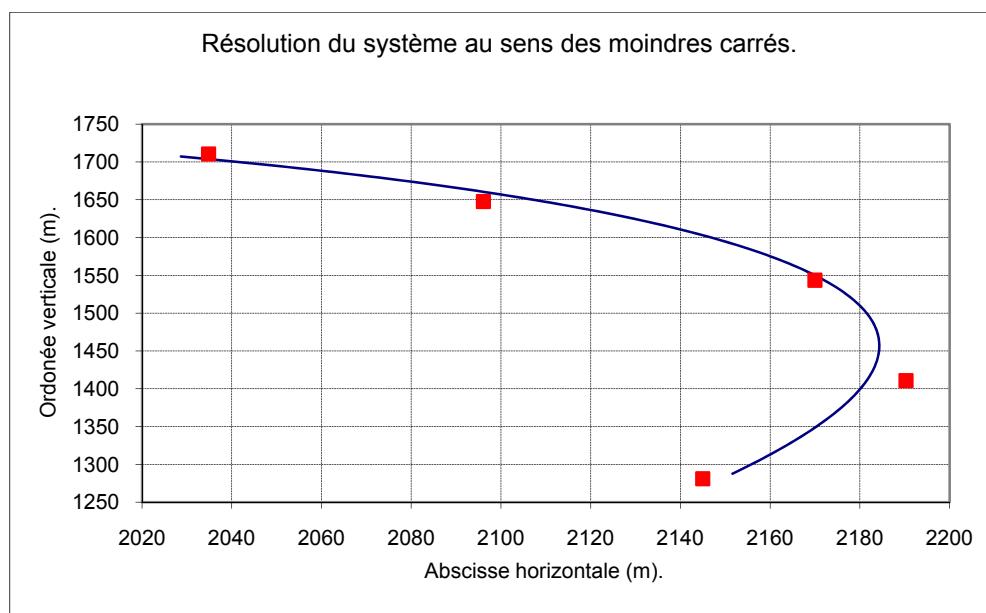


Figure 49 : Résultat obtenu lors de la résolution du système surdéterminé.

Le principe de l'approche par multiplicateur de Lagrange suggère d'ajouter des équations supplémentaires au système de base de façon à donner une prépondérance à certaines informations [2]. D'une façon tout à fait générale, la théorie des multiplicateurs s'applique sur un système qui n'est pas surdéterminé c'est pourquoi la prémultiplication par la matrice A transposée est nécessaire. Le système à résoudre s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} (A^T \cdot A)_{i,j} & -(G_{i,l})^T \\ G_{l,j} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T \cdot B \\ g_l \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

où $A^T \cdot A$ représente une matrice 3 par 3 dans notre cas,

G représente les paramètres multiplicatifs des équations de Lagrange,

X est la matrice des paramètres de la parabole,

λ est la matrice des multiplicateurs inconnus,

$A^T \cdot B$ contient une forme retravaillée des points de passage,

g contient les valeurs à faire respecter via les multiplicateurs.

Dans notre cas, les multiplicateurs seront associés aux 3 points de passage intermédiaires et, par conséquent, la matrice g contiendra les coordonnées (X,Y) des points 2, 3 et 4. La matrice G contiendra, quant à elle les paramètres U_2 , U_3 et U_4 relatifs aux 3 points de passage. Puisque l'information contenant les 5 points de passage est contenue dans le système au travers des matrices $A^T \cdot A$ et $A^T \cdot B$, la résolution via les multiplicateurs va garder en mémoire cette information tout en faisant passer une courbe par les trois points intermédiaires. En fonction des notations utilisées dans ce travail, la théorie générale prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} (A^T A)_{1,1} & (A^T A)_{1,2} & (A^T A)_{1,3} & -U_2^2 & -U_3^2 & -U_4^2 \\ (A^T A)_{2,1} & (A^T A)_{2,2} & (A^T A)_{2,3} & -U_2 & -U_3 & -U_4 \\ (A^T A)_{3,1} & (A^T A)_{3,2} & (A^T A)_{3,3} & -1 & -1 & -1 \\ U_2^2 & U_2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ U_3^2 & U_3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ U_4^2 & U_4 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a & d \\ b & e \\ c & f \\ \lambda_1 & \lambda_4 \\ \lambda_2 & \lambda_5 \\ \lambda_3 & \lambda_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A^T B)_{1,1} & (A^T B)_{1,2} \\ (A^T B)_{2,1} & (A^T B)_{2,2} \\ (A^T B)_{3,1} & (A^T B)_{3,2} \\ X_2 & Y_2 \\ X_3 & Y_3 \\ X_4 & Y_4 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Après résolution de ce système, les 6 paramètres permettant de construire la parabole sous forme paramétrique sont disponibles. En outre, la valeur des 6 multiplicateurs de Lagrange sont disponibles permettant ainsi une évaluation de la qualité de la courbe construite. En effet, il est possible d'agir sur la valeur des paramètres U intermédiaires de façon à

construire différentes courbes. Tout comme dans le paragraphe III 4.7.2.1 où le paramètre intermédiaire U_2 fixé à 0,5 assure le passage du minimum de la parabole par le point central, la variation de U_2 , U_3 et U_4 permet d'obtenir des valeurs de multiplicateurs différentes dont la somme est minimale pour la courbe la mieux ajustée. Différents tests ont montré que le paramètre central (U_3) avait nettement plus d'influence que les deux autres. Dès lors, U_1 , U_2 , U_4 et U_5 sont fixés respectivement à 0, 2, 8 et 10, tandis que U_3 prend des valeurs discrètes entre 2 et 8 de façon à minimiser la somme des multiplicateurs de Lagrange et ainsi obtenir la courbe la mieux adaptée aux 5 points. Cette courbe donne également une idée de la contrainte nécessaire pour vérifier les équations supplémentaires introduites qui est minimale dans le cas de la solution optimisée.

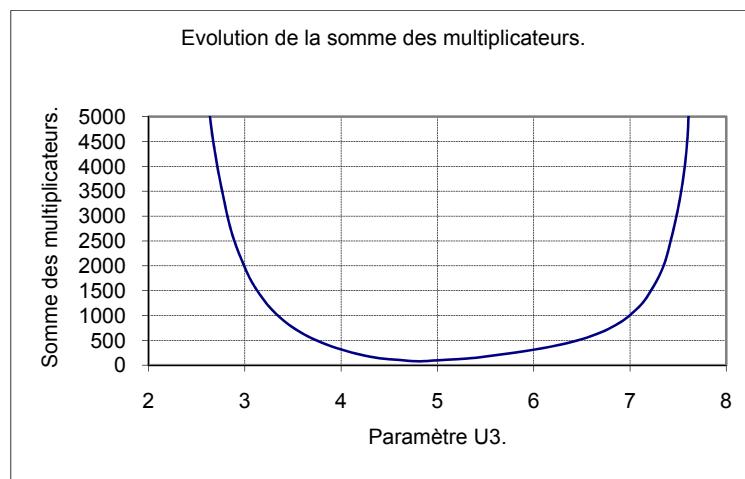


Figure 50 : Paramètre U_3 optimisé.

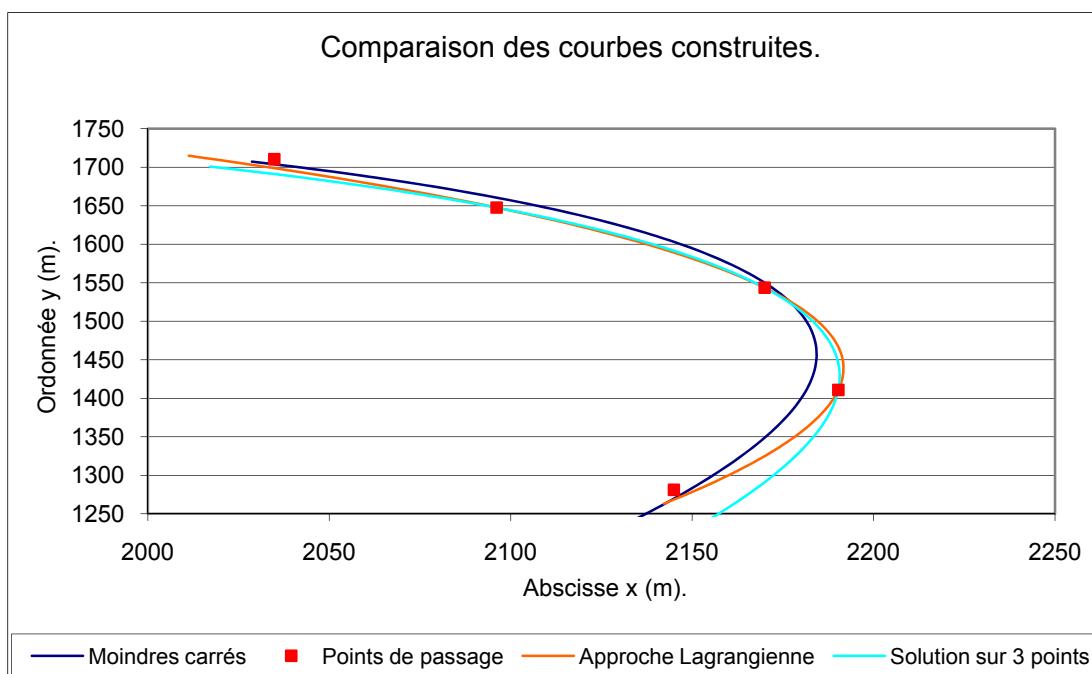


Figure 51

Sur la figure 51, on constate que l'approche Lagrangienne peut apporter certains avantages car elle fait sentir l'influence de points plus éloignés qui apportent une information complémentaire non négligeable quant au suivi du tracé de la rivière.

Les traitements ultérieurs relatifs à l'évaluation des longueurs et des coordonnées sont tout à fait semblables à ceux évoqués précédemment dans le cas des paraboles paramétriques et ne posent par conséquent pas de problèmes particuliers.

III.4.8 Interpolation entre sections.

Une des deux étapes les plus importantes étant maintenant accomplie (la sélection de l'emprise du lit mineur), il reste à reconstruire ce dernier sur base des sections transversales présentent sur la zone extraite uniquement. En toute généralité, un point de repère dans le lit mineur est nécessaire de façon à obtenir une ligne de conduite lors de l'interpolation. Cette trace sera construite soit sur le point bas du lit mineur soit sur le centre géographique des sections. Cette trace sera réalisée en utilisant les mêmes procédures que celles utilisées lors de la délimitation du lit mineur. L'utilisateur est alors libre de choisir entre un tracé parabolique sur 3 ou sur 5 points de contrôle, ou éventuellement une courbe du quatrième degré.

Tant le suivi des points bas de la rivière que le vecteur suivant le centre géographique des sections assurera que le chenal préférentiel d'écoulement sera conservé le long du contour tracé. De plus, le tracé suivant les centres de sections pourra s'avérer utile dans certains cas particuliers qui seront détaillés plus tard.

III.4.8.1 Délimitation gauche-droite du lit mineur.

Le tracé précisé dans l'introduction servira, en plus d'une ligne de conduite lors de l'interpolation, d'une délimitation du lit mineur en une partie gauche et une partie droite. Cet aspect est absolument nécessaire afin de se repérer spatialement et permet en outre d'obtenir des zones « gauches » et « droites » sensiblement différentes selon le tracé choisi, ce qui influera quelque peu sur la topographie de fond obtenue. Le contour calé sur les points bas de la section se réalise en utilisant l'option « Limite gauche-droite, rechercher le point bas de la section ». Quant à la détermination d'un tracé sur le centre géographique des sections, il se réalise en deux phases : tout d'abord il s'agit d'activer l'opération « Maille d'accrochage des sections, rechercher la maille située au centre de la section » et ensuite d'utiliser « Limite gauche-droite, maille d'accrochage de la section ». Cette dernière opération construit le vecteur qui représentera le contour choisi.

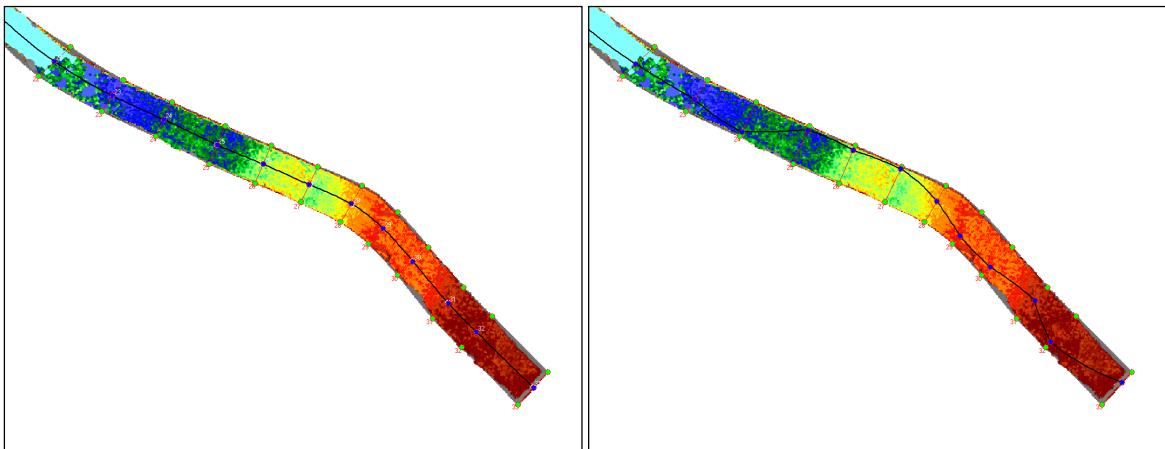


Figure 52 : Tracé selon le centre géographique des sections, Figure 53 : tracé suivant le point bas.

Suite à cette opération visant un contour de repérage en lit mineur, la matrice de topographie lit mineur en cours de traitement est transformée afin de repérer aisément les différentes zones.

Un outil de sélection des mailles se trouvant sous le contour tracé a été implémenté de façon à automatiser le traitement de grandes quantités de données. Après sélection du contour, la valeur forfaitaire de 10 est appliquée à ces mailles de façon à les distinguer de leurs voisines. En outre, toutes les mailles se trouvant à « gauche » de la frontière de séparation sont forfaitairement amenées à la valeur -1. Il faut remarquer que l'appellation « emplacement à gauche » est totalement indépendante de ce qui affiché à l'écran. En effet, toutes les sections transversales utilisées sont listées préalablement suivant un sens commun partant à chaque fois du premier point relevé dans le fichier de données. Ce premier point est toujours placé du côté où se trouve la numérotation de section et détermine par conséquent le côté « gauche » de la donnée à interpoler. Les mailles restantes et qui constituent par conséquent le côté droit sont modifiées et portées à la valeur forfaitaire de 1. La structure obtenue finalement est représentée sur la figure suivante où la frontière de séparation gauche-droite est calée sur les points bas de la rivière.

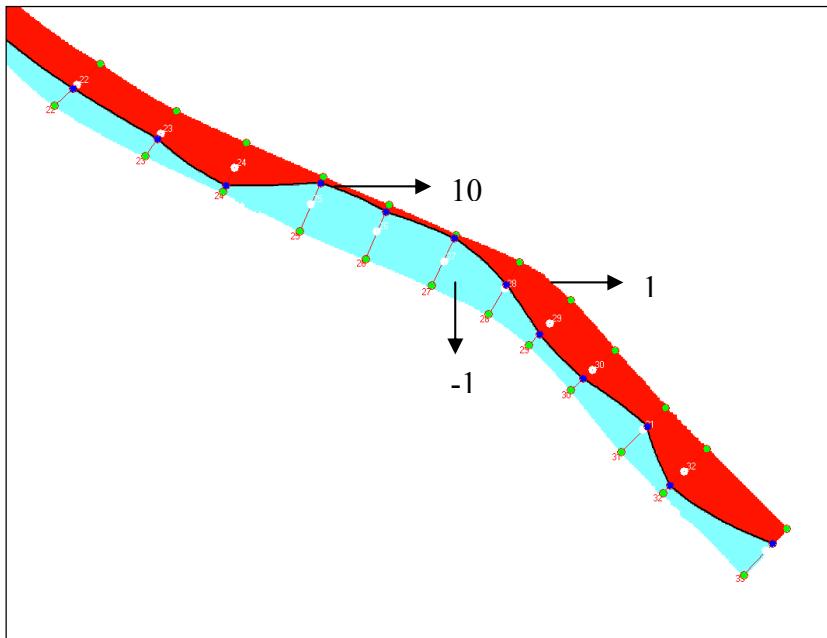


Figure 54 : Lit mineur délimité en zone gauche-droite par une frontière basée sur les points bas en rivière.

III.4.8.2 Recherche des zones d'influence.

La recherche des zones d'influence est une procédure très importante dans le processus de reconstruction topographique du lit mineur. Son but est de numérotter chaque maille de la carte utilisée de façon à attribuer à chacune de celles-ci un numéro d'ordre qui sera le témoin de son appartenance à une partie de la trace frontière déterminée dans la rivière. Concrètement, chacune des mailles de la limite tracée selon le centre géographique ou selon le point bas de la rivière est numérotée en ordre croissant et stockée en mémoire. Ensuite, une évaluation itérative de proche en proche permet de numérotter chaque maille de rivière pour matérialiser son appartenance au point de la trace frontière.

Dans un premier temps, toutes les mailles de la zone d'interpolation sont fixées à une distance forfaitaire très importante. Sur chaque maille du contour (maille en jaune), une sélection est effectuée sur les 9 voisins de celle-ci et la distance par rapport à la maille centrale est évaluée. Les 9 voisines sont ensuite ajoutées à la fin de la mémoire. Une fois les mailles en jaune parcourues, les mailles placées en fin de mémoire sont passées en revue et, pour chacune d'elles, la distance de ses neufs voisins est calculée. En outre, les neufs voisins obtiennent chaque fois le numéro de zone de leur maille centrale.

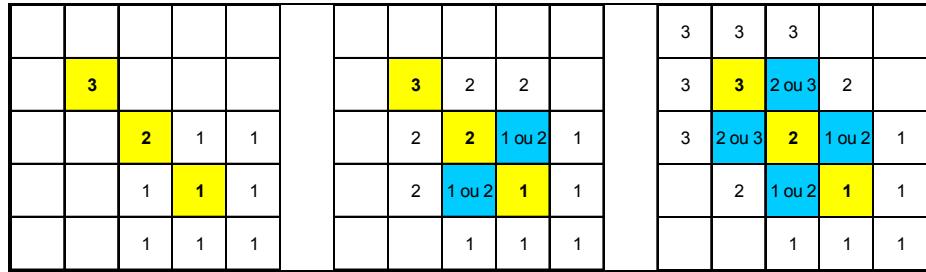


Figure 55 : Détermination des zones d'influence après passage sur le contour limite gauche-droite.

Dans un second temps, une fois toutes les distances calculées, les mailles contiguës et possédant un numéro de zone différent sont réévaluées. Soit une maille en zone 1 et une maille en zone 2. On teste si la distance de la maille 1 ne serait pas plus petite si elle s'attachait à la zone 2. Si c'est le cas, celle-ci change d'attribution de zone. Dans le cas où la distance de comparaison s'avère être identique, la maille traitée garde la première valeur de zone qui lui avait été imposée. La procédure se termine quand on n'arrive plus à diminuer la distance de comparaison d'aucune maille. Cela signifie que le positionnement des zones d'influences est définitivement figé. Le résultat obtenu est du type représenté à la figure 56.

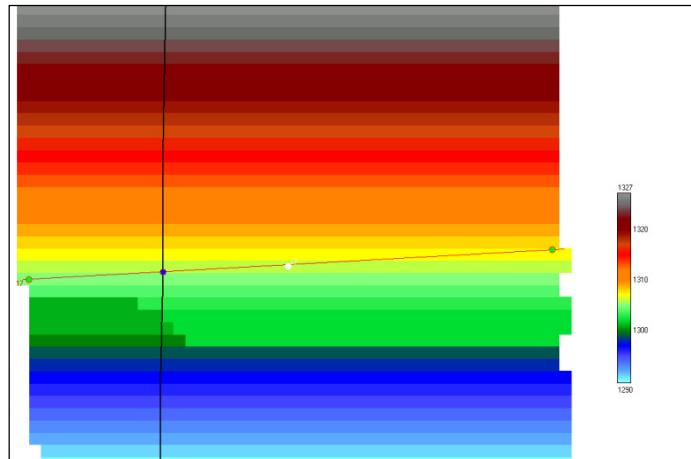


Figure 56

Ce type d'évaluation pourrait aussi être effectué d'une manière non itérative en évaluant directement la distance de chaque maille de la matrice par rapport aux mailles constituant la trace de mailles jaunes. Les zones d'influence seraient alors déterminées par le critère de distance minimale d'une maille à une de ces mailles. Il faut garder à l'esprit que la détermination des zones d'influence depuis un contour frontière continu, comme c'est le cas ici, constitue un cas particulier de la méthode. En effet, celle-ci doit aussi être applicable dans le cas où l'on doit étendre des zones depuis des mailles non jointives (figure 57).

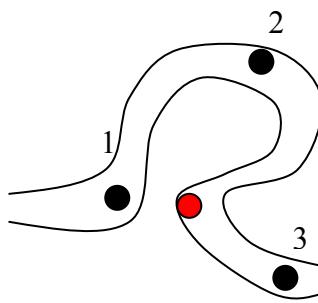


Figure 57

Dans ce cas, on conçoit aisément que, selon une méthode d'évaluation directe de la distance, le point rouge appartient à la zone 1 puisque plus proche de celle-ci que de la zone 3. Cependant, ce point doit logiquement appartenir à la zone 3. Ce problème pourrait être évité en testant si la droite qui relie les points en cours d'évaluation coupe ou non le contour du lit mineur. Ce procédé requiert de nombreuses opérations de tests qui peuvent être oubliées en utilisant avantageusement la méthode de proche en proche décrite précédemment.

En outre, ce processus demande un nombre important d'évaluation de distances. Il est en effet courant de devoir construire les zones d'influence sur une carte qui compte 300.000 mailles et dont le contour frontière contient environ 3000 mailles. Dès lors, le nombre d'évaluation à effectuer s'élève à $3000 \times 300\ 000$ soit 900 millions, ce qui est trop important.

En conclusion, l'évaluation directe des distances est peu intéressante et seule la méthode de proche en proche sera conservée ici.

III.4.8.3 Construction des valeurs interpolées.

La phase finale du processus est l'interpolation proprement dite qui consiste à obtenir l'altitude locale comme étant le résultat de l'interpolation entre les 2 sections transversales qui l'entourent. Le schéma suivant illustre la façon dont la topographie est évaluée :

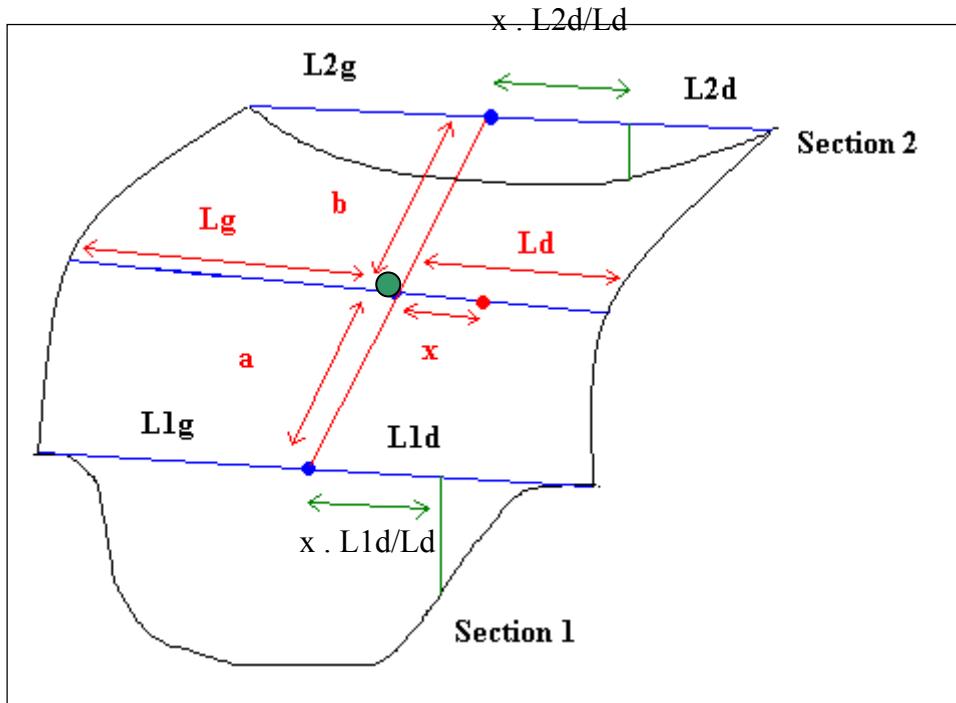


Figure 58

Le processus d'évaluation se réalise comme suit :

- On parcourt le contour reliant les centres de rivière ou les points bas de celle-ci. A chaque maille du contour (point vert) l'évaluation de la distance curviligne entre les deux sections les plus proches est évaluée, soit $a+b$.
- Pour les mailles (point rouge) entrant dans la zone d'influence du point vert, la distance x est évaluée ainsi que la demi largeur locale ou la largeur totale (cf § 4.9.1) tout comme lorsqu'on construit le contour de sélection du lit mineur.
- La distance permettant d'obtenir l'endroit où il faut prendre la valeur topographique de la section 1 est extraite selon une interpolation linéaire : $x . L_{1d}/l_d$ ou par : $x.(L_{1g}+L_{1d})/(l_g+ l_d)$ selon l'option choisie. Il en est de même pour déterminer l'altitude à considérer en section2 : $x . L_{2d}/l_d$ ou par $x.(L_{2g}+L_{2d})/(l_g+ l_d)$.
- Ensuite, ces 2 valeurs d'altitude de fond sont pondérées au prorata des distances curvilignes a et b de façon à rendre la valeur à imposer au point rouge.
- En outre, pour les mailles dont la voisine appartient à une autre zone, la distance entre la maille en cours de traitement et la maille suivante du contour est évaluée par un parcours suivant la diagonale ou le bord des cellules. Il se peut en effet que cette maille se trouve à la même distance de deux mailles du contour. Un choix avait du être fait lors de la détermination des zones d'influence en gardant le premier numéro

attribué mais, objectivement, cette maille pouvait tout aussi bien appartenir à une autre zone. Dans ce cas puisqu'il n'est pas possible de discerner son appartenance, une moyenne est faite entre l'information d'altitude apportée si la maille appartenait à la première zone et l'information fournie si elle appartenait à la seconde zone.

III.5 Résultats obtenus.

Les résultats présentés dans les quelques pages qui suivent concernent majoritairement un tronçon de l'Ourthe s'étendant du pont de Tilff jusqu'à l'aval des Prés de Tilff. Celui-ci possède des caractéristiques intéressantes pour effectuer des tentatives d'applications de la méthode et des validations de celle-ci puisqu'il présente une certaine sinuosité mais qu'il est aussi caractérisé par un bras de dérivation, un seuil fixe et un barrage mobile.

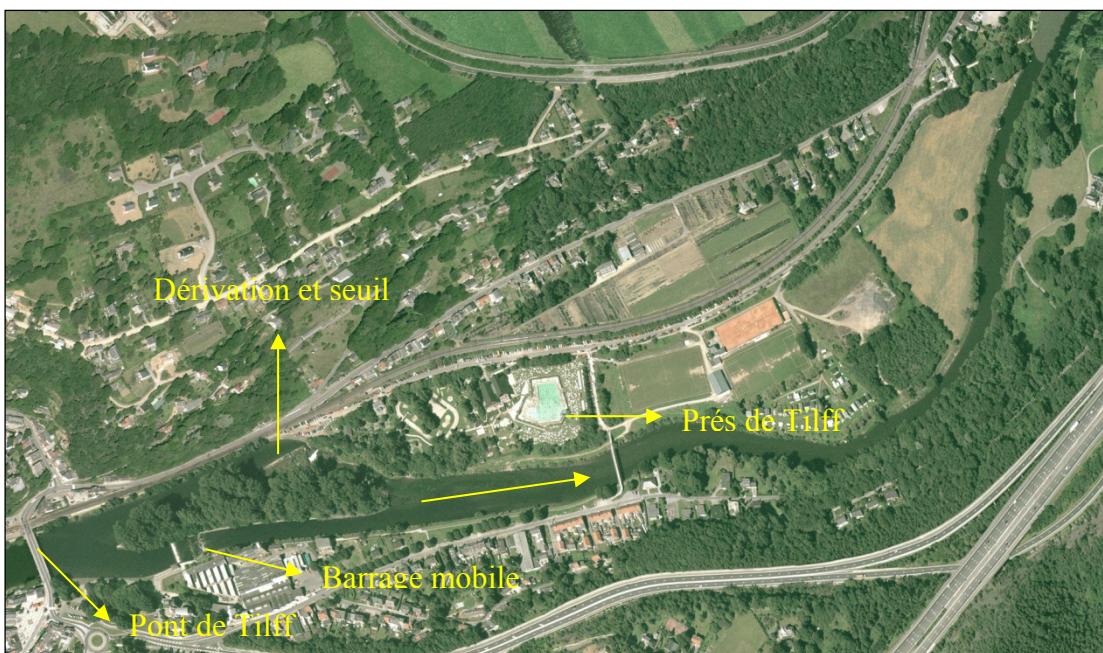


Figure 59 : Zone traitée et servant de validation.

III.5.1 Comparaison des différentes méthodes d'interpolation.

Lors de la reconstruction du lit mineur, différentes options sont possibles pour effectuer l'opération d'interpolation. Le premier choix est de s'orienter vers un contour frontière tracé sur les points bas des sections ou sur les centres géographiques de celles-ci. Ce choix se fera sentir au niveau des zones d'influence qui s'étendront de manière différentes. Cette distribution peut dès lors affecter la valeur topographique calculée ultérieurement (figures 60 et 61). On remarquera également la consistance des résultats quant au tracé du lit préférentiel d'écoulement qui se situe généralement à l'extérieur des courbes.

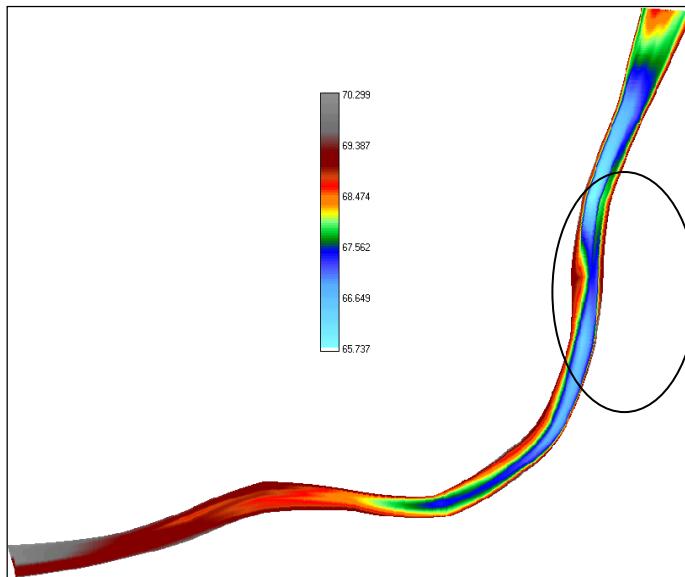


Figure 60 : Contour limite au centre géographique, interpolation suivant la largeur totale.

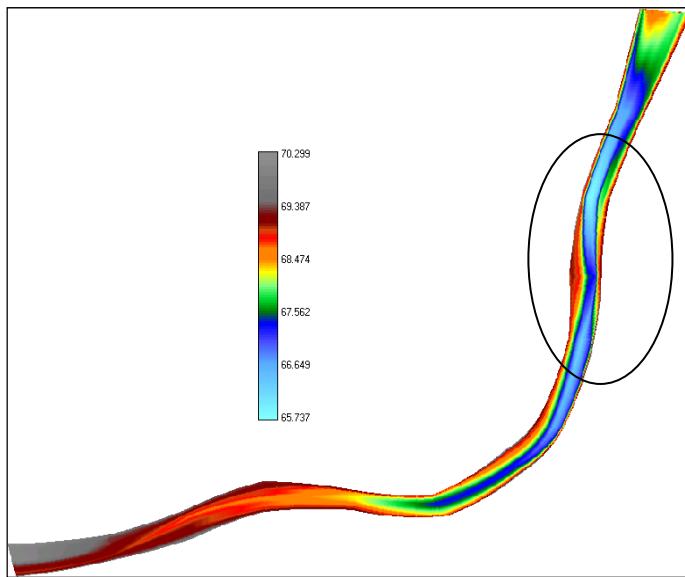


Figure 61 : Contour limite sur les points bas, interpolation suivant la largeur totale.

Le second choix réside dans le fait que l'on peut réaliser le stretching des sections extrêmes de 2 façons différentes (largeur totale ou gauche-droite). Lors de l'évaluation de la topographie de chaque maille, les 2 sections les plus proches de celle-ci sont stretchées en fonction du rapport des largeurs au droit de la maille et au droit des sections. L'option largeur totale fournit une valeur de stretching selon le rapport des largeurs globales tandis que l'option gauche-droite calcule un rapport faisant intervenir les demi-largeurs.

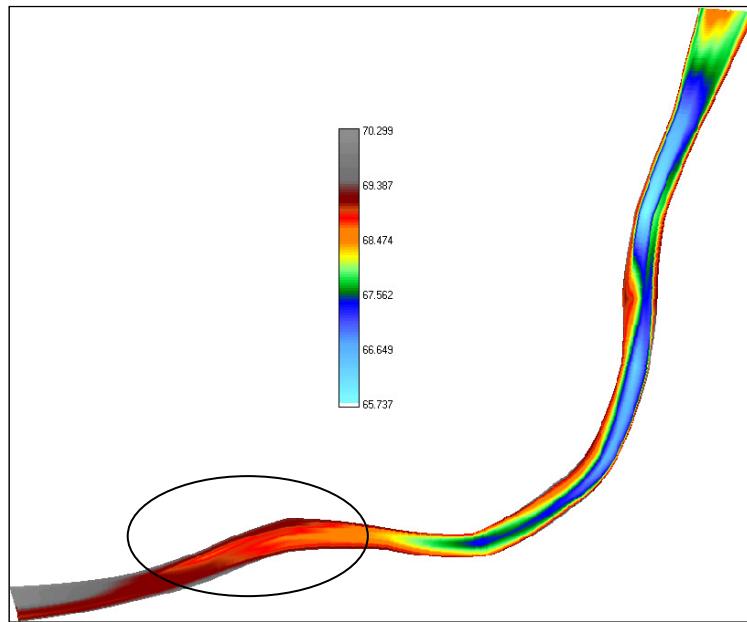


Figure 62 : Contour limite au centre géographique, interpolation suivant les largeurs gauche et droite.

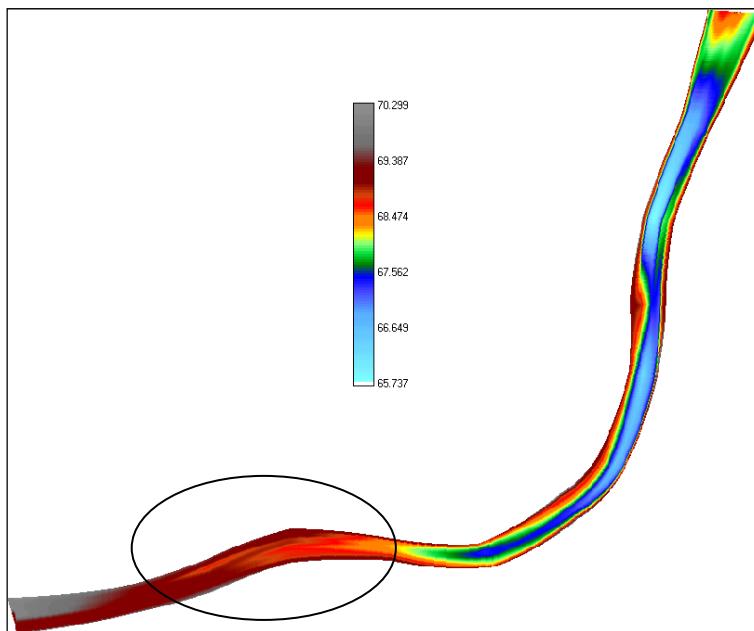


Figure 63 : Contour limite au centre géographique, interpolation suivant la largeur totale.

Ces différentes options donnent des résultats certes différents, mais relativement proches les uns des autres, tout en respectant à chaque fois le passage imposé par les sections transversales (figures 64 et 65). Certains problèmes peuvent néanmoins apparaître lors de l'utilisation d'un contour type point bas lorsque le tracé oscille entre la rive gauche et la rive droite de la rivière et qu'il s'approche trop des rives. Ainsi l'évaluation des zones d'influence et des opérations de stretching produisent un résultat assez saccadé. Ce type de

problème peut être résolu en utilisant un contour fixé sur les centres géographiques des sections.

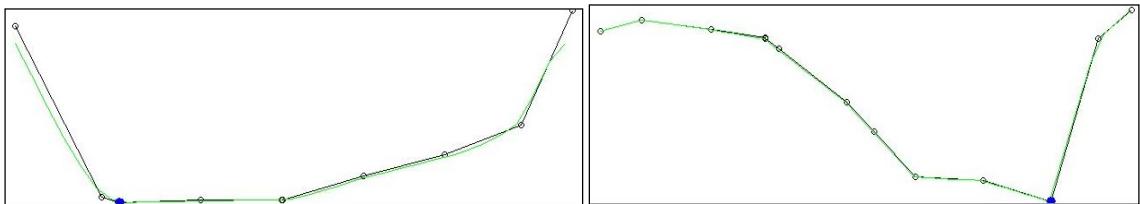


Figure 64, Figure 65 : Comparaison de la topographie reconstruite (vert) avec les sections transversales.

Afin de se rendre compte du résultat obtenu, une vue tridimensionnelle du lit mineur reconstruit est présentée à la figure suivante. Afin d'observer un différentiel d'altitude appréciable, un stretching de l'échelle verticale a été appliqué (facteur 4). C'est d'ailleurs cette échelle distordue qui est responsable des ondulations que l'on observe au niveau du point bas. Celles-ci ne présentent en réalité qu'un différentiel de 1 ou 2 centimètres.

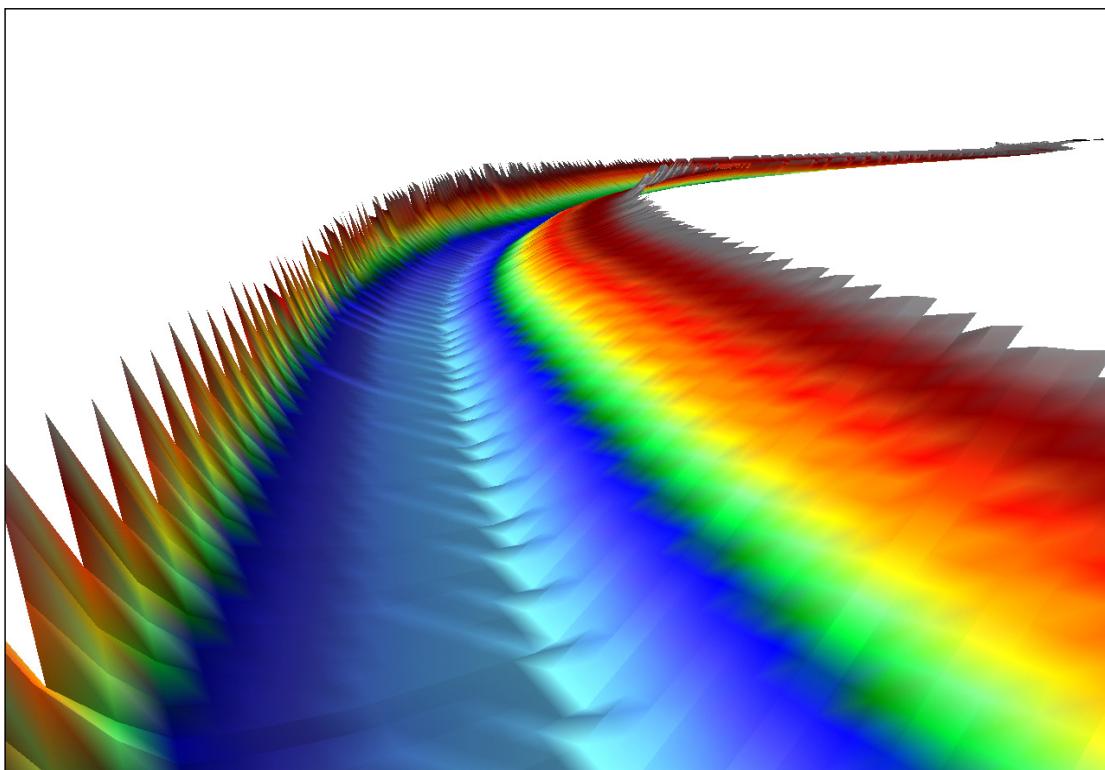


Figure 66 : Vue 3D du lit mineur reconstruit (stretching de l'altitude par un facteur 4).

III.5.2 Gestion des binômes.

Comme cela a été présenté dans le paragraphe 4.8.3, le calcul de la valeur d'altitude interpolée sur certaines mailles peut faire l'objet d'une moyenne dans le cas où la maille en question se trouve à équidistance de mailles sources de zones d'influences différentes (la maille en question est alors appelée « binôme »).

Le test d'équidistance utilisé dans les premières versions du module d'interpolation se basait sur une évaluation des longueurs en parcourant les mailles par segments horizontaux, verticaux et diagonaux. En outre, l'évaluation de la largeur locale de la section, qui permet de connaître l'échelle de stretching à appliquer, est évaluée de la même façon.

Nous allons ici évaluer, par rapport au cas de base où toutes les longueurs sont évaluées par « incrément » :

- Une interpolation où la longueur de stretching est évaluée en longueur réelle et les binômes testés en comparant les distances par incrément.
- Une interpolation où la longueur de stretching est évaluée par incrément et les binômes testés en comparant les distances réelles.
- Une interpolation où la longueur de stretching est évaluée en longueur réelle et les binômes testés en comparant les distances réelles.

De cette façon, nous pourrons nous rendre compte de l'effet induit soit par une évaluation des longueurs réelles d'interpolation soit par le moyennage des binômes.

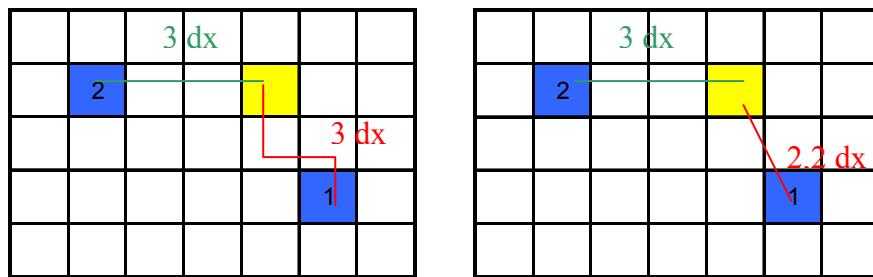
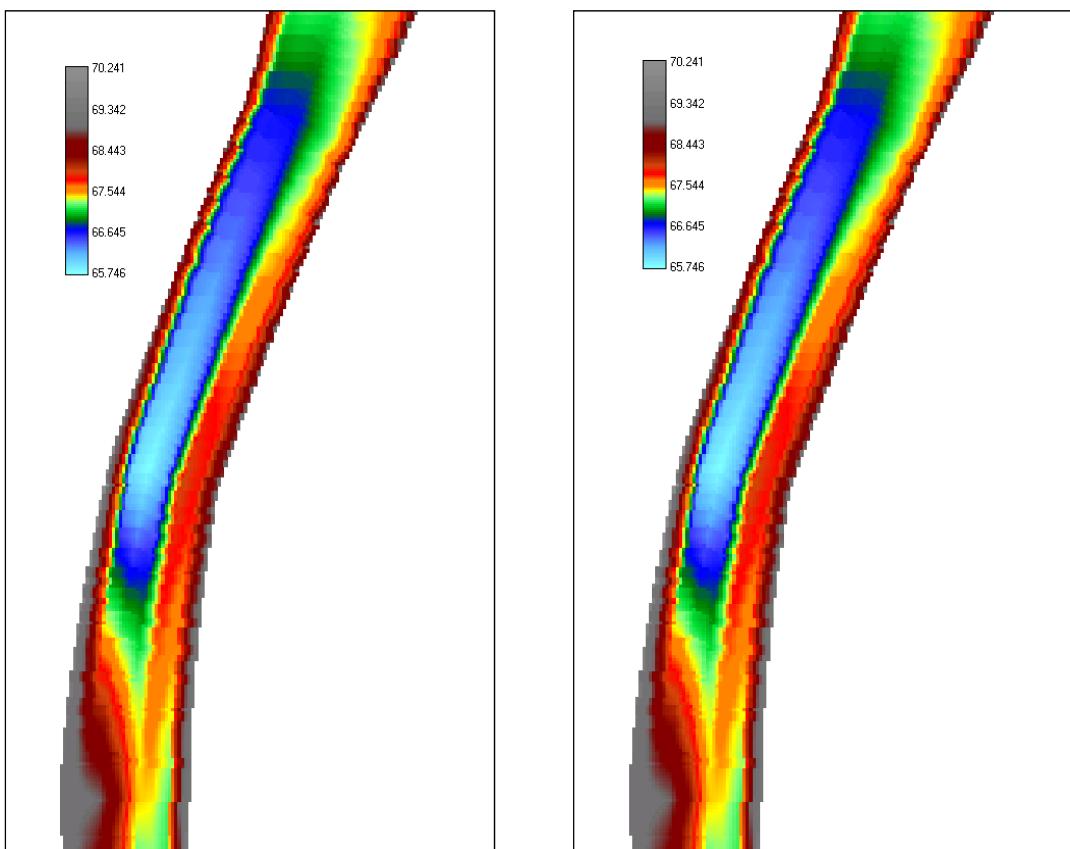
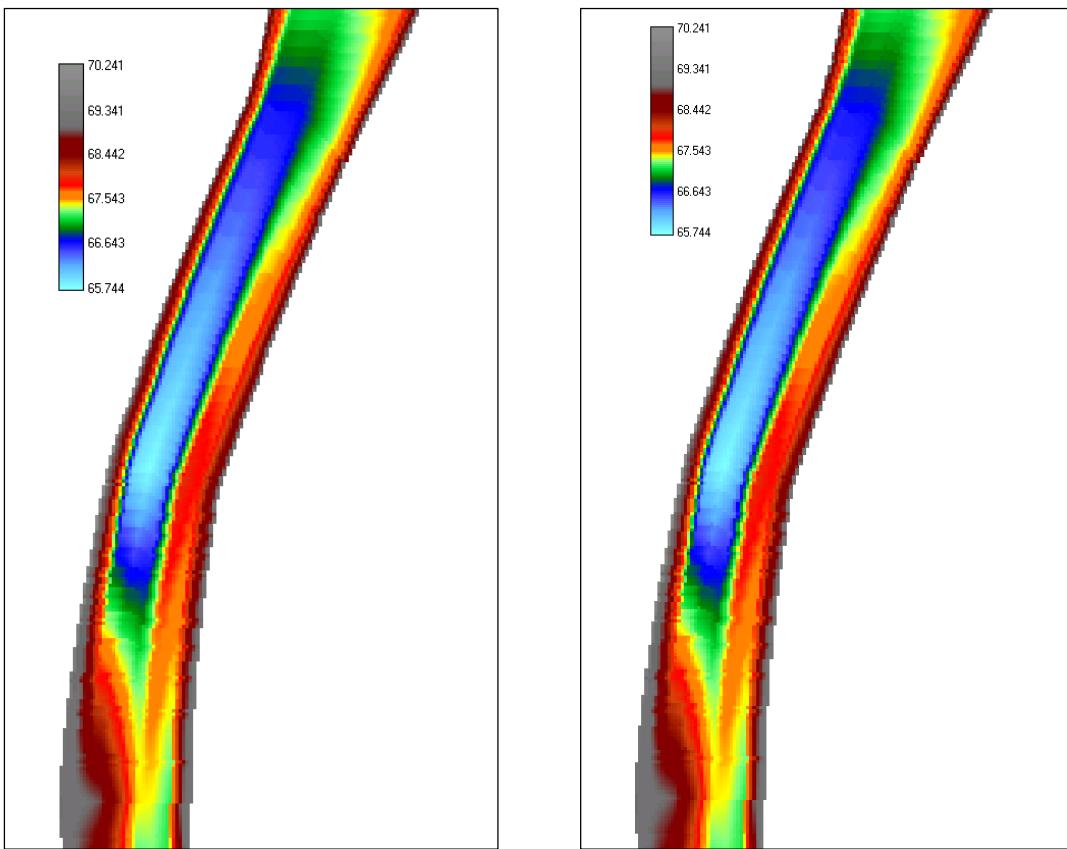


Figure 67 : Evaluation de l'entredistance par segments (gauche) et par distance réelle (droite).



On constate sur les 4 figures précédentes que la différence de moyennage des binômes est peu importante dans les versions implémentées. Ceci est le résultat de la discréétisation fine utilisée et donc des faibles différences d'altitudes présentes entre mailles.

Par contre, le type d'évaluation de la distance servant au stretching des sections montre que la longueur directe est de nature à exacerber des marches topographiques et à rendre plus irrégulier le fond du lit mineur.

Lors de la représentation du différentiel topographique entre une interpolation effectuée par stretching en longueur réelle et une autre en longueur par segments, les valeurs les plus importantes apparaissent le long des berges. Ceci semble évident puisque c'est à cet endroit que les deux distances ont le plus de chances d'être différentes.

En conclusion, les méthodes des figures 68 et 69 semblent les plus appropriées pour l'interpolation de la topographie de fond du lit mineur.

III.5.3 Gestion des dérivations et des seuils.

Il est fort fréquent de rencontrer sur nos rivières des dérivations et généralement les seuils qui y sont associés. Celles-ci doivent souvent leur présence à l'exploitation d'anciens moulins qui nécessitaient l'utilisation d'une dérivation pour amener l'eau jusqu'à eux et d'un seuil pour fournir une hauteur de chute suffisante. D'autres faits historiques peuvent aussi être responsables de ces séparations en plusieurs bras. Le cas se présente notamment sur l'Ourthe où l'ancien canal navigable constitue par endroits des bras de dérivations. Ou bien tout simplement, la présence d'îles en rivières qui provoque naturellement la séparation du lit principal.

La méthode développée ici ne permet pas, du moins pour l'instant, de traiter un lit mineur qui se sépare en 2 ou plusieurs bras et qui se referme ensuite. Un obstacle tel qu'une dérivation doit être évalué en deux parties. Tout d'abord il s'agit d'effectuer l'interpolation sur l'un des deux bras ainsi que sur une partie du lit mineur s'étendant à l'aval et à l'amont de la dérivation. Ensuite, il convient d'interpoler l'autre bras sur la longueur de la dérivation. L'assemblage des 2 parties fournit un résultat brut qu'il faut nécessairement retravailler manuellement au niveau de la séparation des bras ou de leur jonction. Cette intervention manuelle se cantonne généralement sur de faibles distances (20 à 30 mètres), mais demande néanmoins une grande attention pour imposer une topographie permettant un raccord adapté.

La gestion des seuils se révèle être également délicate. En toute généralité, en présence d'un seuil saillant, il suffirait d'ajouter trois sections au voisinage de celui-ci : une avant et une après reprenant les sections transversales connues les plus proches et une sur le seuil de façon à imposer la cote de crête. Cette opération peut donner de bons résultats mais il est apparu qu'il est plus rapide d'effacer le seuil lors d'une interpolation du lit mineur et, ensuite, d'imposer manuellement l'obstacle topographique. Ce procédé est utilisable uniquement lorsque le différentiel topographique avant et après le seuil est pratiquement nul. Dans le cas contraire, il ne faut pas utiliser la méthode ci-dessus mais il faut imposer trois sections de façon à cerner correctement l'obstacle.

Un exemple reprenant une dérivation ainsi qu'un seuil est présenté à la figure suivante. La zone se situe à hauteur de l'île du Moulin, juste en aval de Tilff.

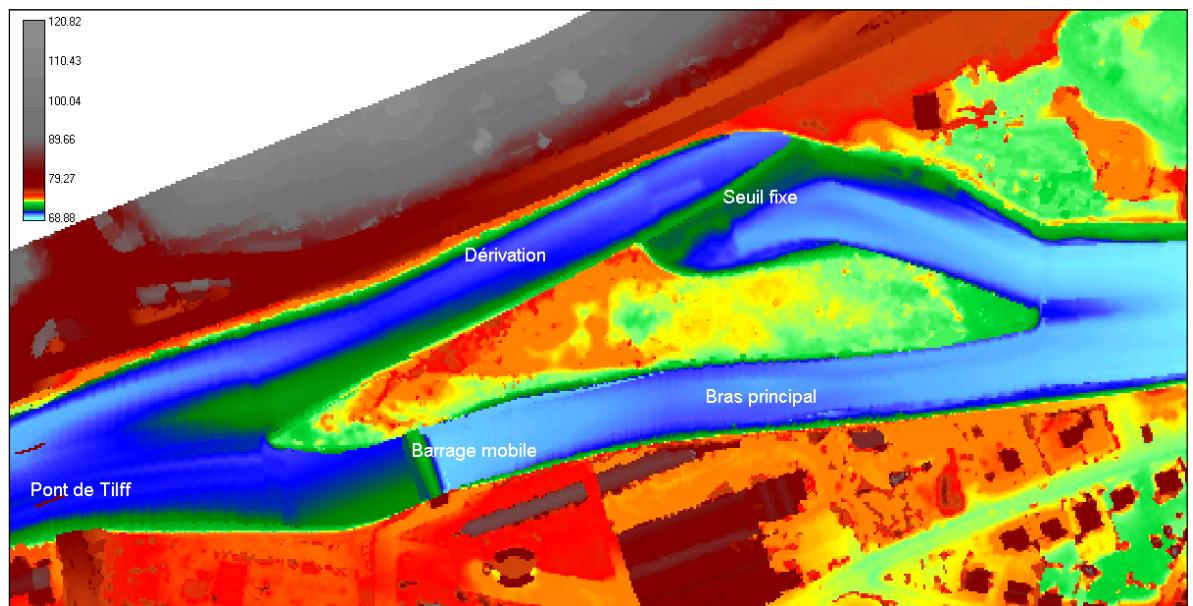


Figure 72 : Topographie du lit mineur reconstruite à l'île du Moulin.

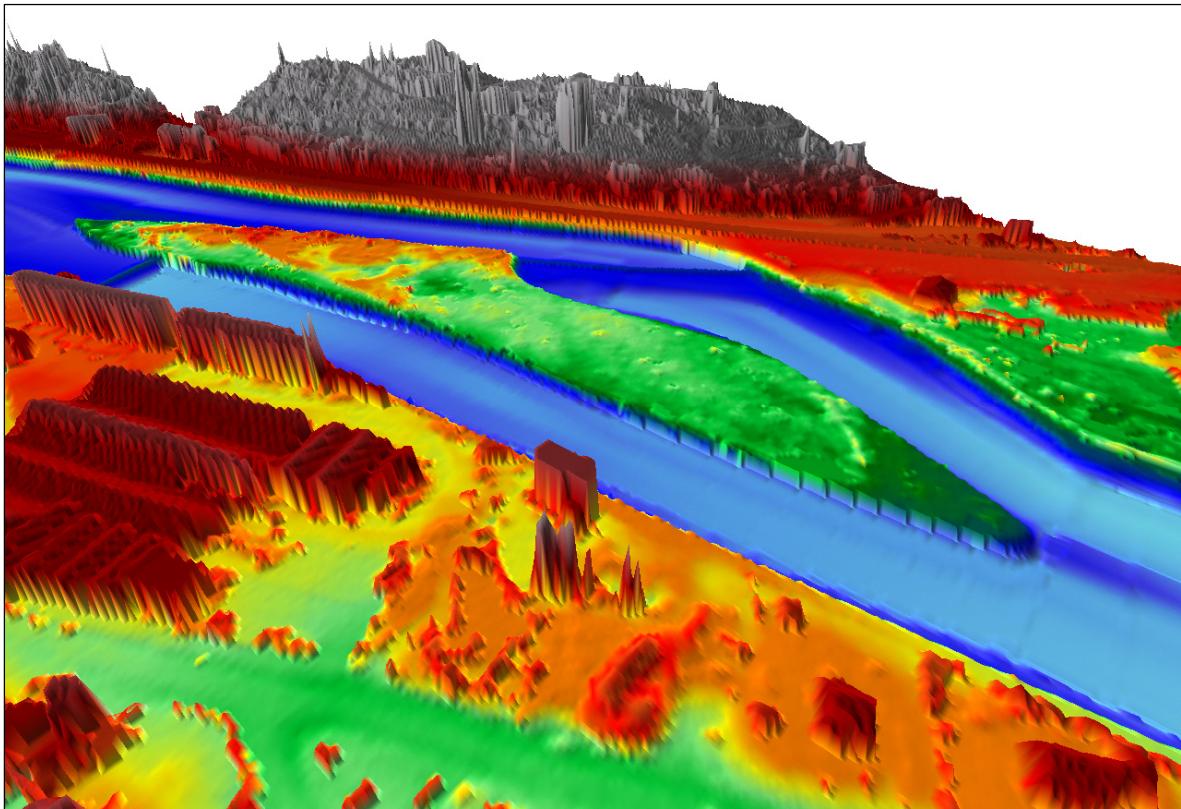


Figure 73 : Vue tridimensionnelle de l'île du Moulin depuis l'aval.

III.6 Application de la méthode à la zone des prés de Tilff.

Une validation de la méthode a été entreprise sur une zone de l'Ourthe s'étendant de Tilff jusqu'au barrage des Grosses Battes, juste après la confluence avec la Vesdre. Cette partie de l'Ourthe est particulièrement bien instrumentée et de nombreuses données sur les dernières crues ont été fournies par le Sethy.

- Deux stations limnimétriques sont implantées au niveau du barrage des Grosses Battes, une station en Vesdre munie d'une courbe de tarage permet de connaître le débit sur cette rivière et enfin une station au niveau de Campana propose des mesures de hauteur et de débit.
- Des cartes reprenant les zones inondées au cours des crues de 1993 et 2002 sont également à notre disposition.
- Enfin des photographies aériennes de ces 2 crues sont également en notre possession de façon à comparer efficacement les zones immergées.

Les principales zones à risques sur ce tronçon de rivière sont concentrées au niveau des prés de Tilff et juste en aval de ceux-ci, c'est pourquoi les comparaisons se focaliseront à cet endroit. En outre, un point de comparaison de hauteur d'eau est disponible en amont du

seuil de Campana mais celui-ci apporte peu d'informations suite à sa position en section critique. Les niveaux de surface libre ont tout de même été comparés et ne diffèrent que de 3 centimètres environ.



Figure 74 : Principales zones inondées aux Prés de Tilff et murs anti-crues en rive droite.

Ce tronçon est relativement intéressant pour démontrer la fiabilité de la méthode implantée et les qualités du code de calcul car des travaux ont été effectués depuis le barrage mobile jusqu'en aval des Prés de Tilff. Ceux-ci ont consisté en la construction de murs anti-crues, au renforcement de la rive droite par des talus en maçonnerie ou en gabion, mais aussi à l'augmentation de la section de passage en lit mineur. Les modifications résultant des travaux sont notamment visibles lors de la comparaison des sections en travers (datant des années 1970) et du modèle numérique de terrain qui est beaucoup plus récent. Ce fait est bien illustré sur la figure suivante qui montre les nouvelles berges de la rivière nettement différentes de celles existant antérieurement. La partie horizontale verte qui est la surface libre montre bien que le fond actuel doit être situé sous l'ancienne section. Le gain en terme de section mouillée peut atteindre 40 %, ce qui modifie sensiblement les niveaux d'eau observés.

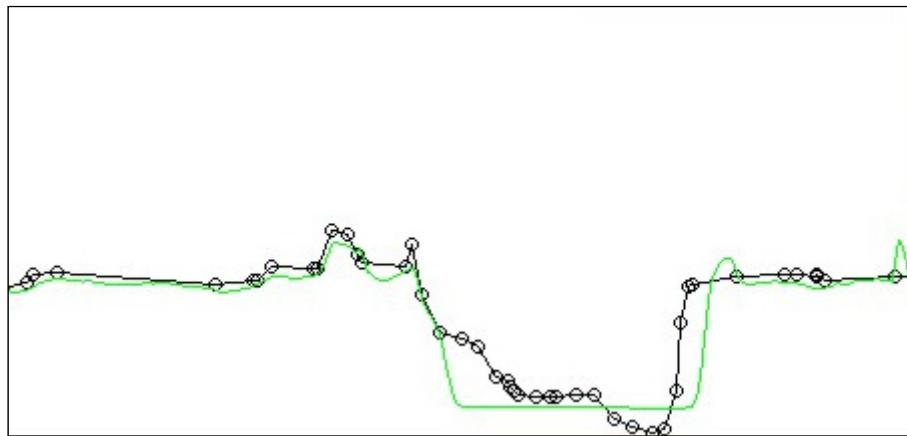


Figure 75 : Différences résultant des travaux.

III.6.1 Données hydrauliques.

Dans les quelques pages qui suivent, nous présenterons tout d'abord la situation hydraulique stabilisée en utilisant les anciennes sections pour modéliser la topographie, prouvant de cette façon que l'utilisation d'une topographie inconsistante ne mène pas à une modélisation correcte. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus en utilisant les sections transversales remises au gabarit actuel.

Tous les résultats de modélisation seront présentés en utilisant les paramètres hydrauliques permettant de caler le modèle. Il est en effet nécessaire de déterminer les coefficients de frottement à mettre en jeu pour obtenir un calage satisfaisant. Généralement, les coefficients utilisés en lit mineur ou en lit majeur sont différenciés de façon à tenir compte d'une végétation plus dense ou d'un rapport taille de rugosité/hauteur d'eau plus important. Pour le tronçon étudié, les coefficients de Strickler optimaux ont atteint la valeur de 42 en lit mineur et 30 en lit majeur.

La crue présentée dans les comparaisons s'est déroulée en février 2002. Lors de celle-ci, le débit dans l'Ourthe a atteint $570 \text{ m}^3/\text{s}$ au niveau de la station limnimétrique de Campana. Fait intéressant pour les comparaisons qui suivent, ce pic de débit a été observé à Campana le 13 février vers 22 heures. On peut estimer que le pic de crue ait atteint les Prés de Tilff approximativement à la même heure compte tenu de la faible distance qui les sépare. Or, les photographies aériennes disponibles ont sans doute été réalisées en milieu d'après-midi si l'on se base sur l'orientation des ombres générées par le soleil. Logiquement, celles-ci ont été prises lors de la montée en crue soit le 13 février aux environs de 15 heures. A cette heure, le pic de débit n'était pas encore atteint ($500 \text{ m}^3/\text{s}$ environ) et il faut dès lors considérer le niveau d'eau atteint sur les photographies comme légèrement inférieur à ce qui a du apparaître dans la soirée. Ce fait est à prendre en considération lors de la

comparaison des zones immergées d'autant plus que quelques centimètres supplémentaires suffisent parfois à inonder des endroits émergés.

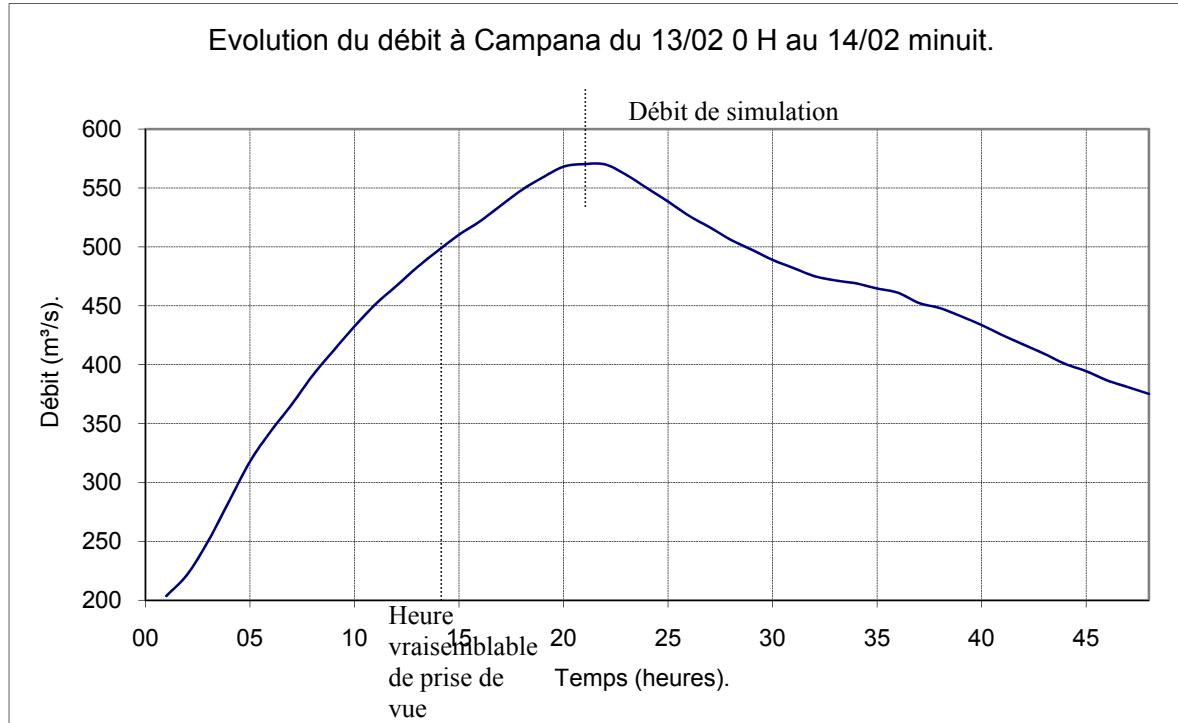


Figure 76

III.6.2 Sections non retravaillées.

La comparaison des zones inondées par le modèle hydraulique et des emprises effectivement apparues le 13 février 2002 est réalisable grâce au trois figures suivantes. On y distingue plusieurs désaccords qui se matérialisent par des hauteurs trop importantes dans le modèle hydraulique. Ceci est tout à fait normal puisque la topographie reconstruite ici utilise des sections transversales avant travaux.

On distingue, au niveau de la piscine, un remplissage de la zone inondable directement par la rivière, ce qui n'est pas le cas en réalité (zone 1). Le long du premier terrain de football (zone 2), on aperçoit une bande émergée et, plus à l'aval, au niveau du camping (zone 3), plusieurs endroits devraient être asséchés.

On peut tout de même remarquer la consistance de l'information fournie par le modèle numérique de terrain notamment au niveau de la zone 2 où la partie amont du terrain de football possède une moins grande hauteur d'eau que l'aval. Tout comme c'est le cas sur la photographie aérienne.

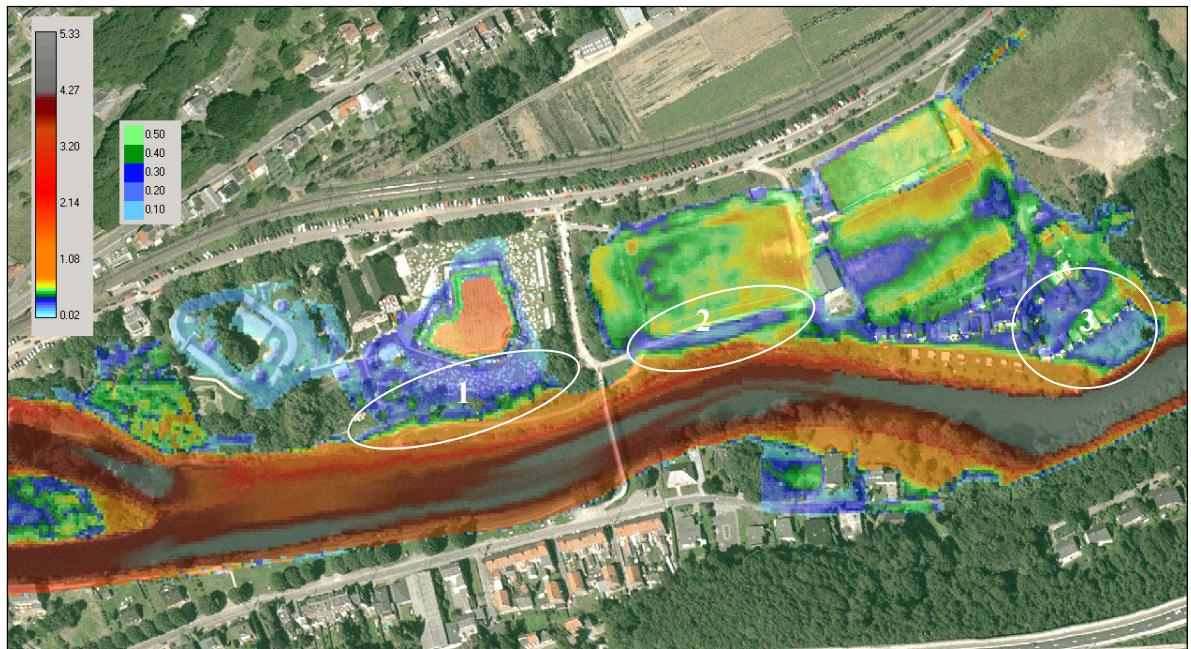


Figure 77 : Zones inondées par le modèle hydraulique (hauteur d'eau en mètres).



Figure 78 : Photographie aérienne du 13 février 2002.

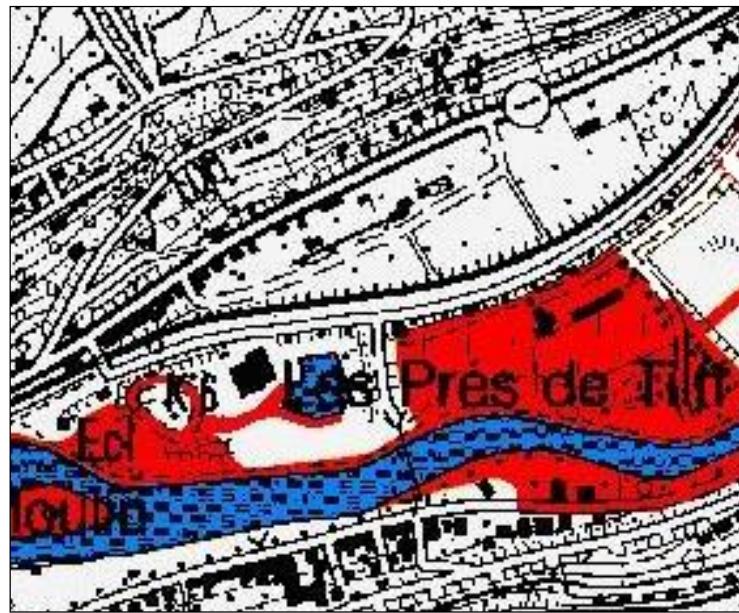


Figure 79 : Zones officiellement référencées.

III.6.3 Situation après travaux.

Les résultats obtenus après modifications des sections pour tenir compte des élargissements apportés sont relativement satisfaisants. Les trois zones traitées ci-dessus correspondent maintenant aux photographies aériennes.

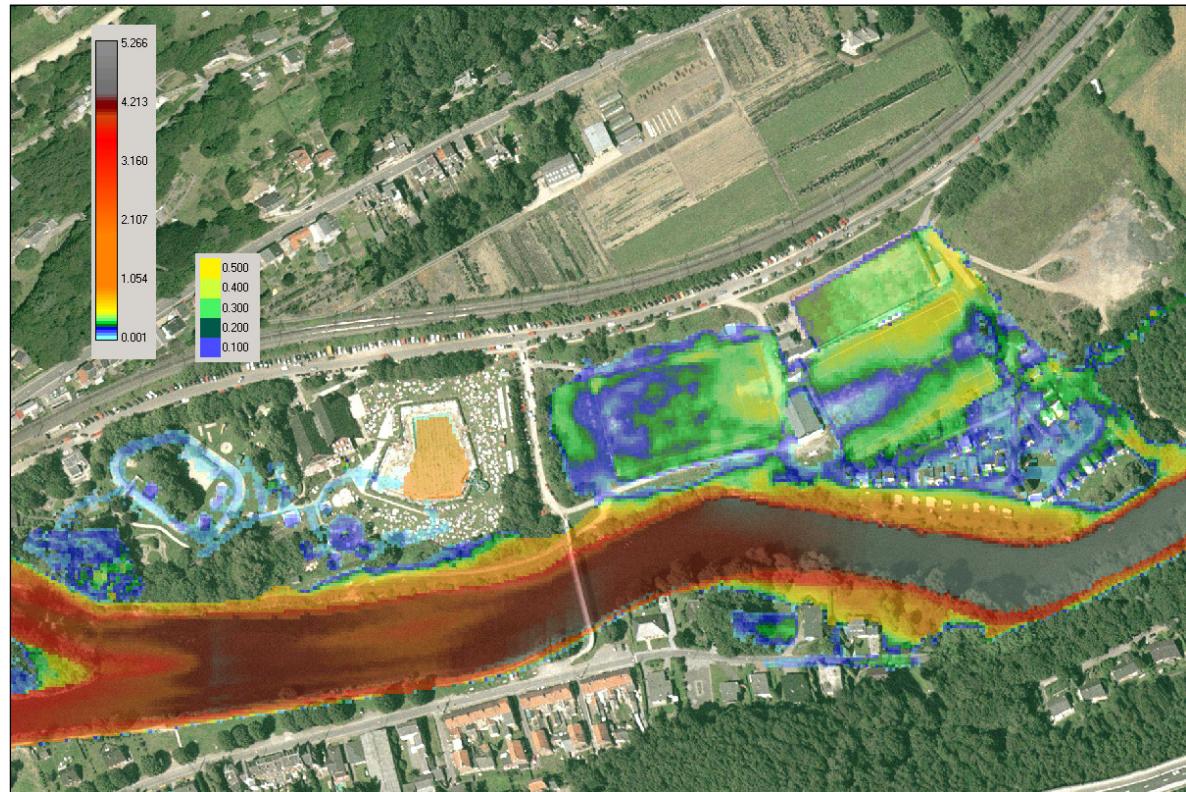


Figure 80 : Zones inondées par le modèle hydraulique après travaux (hauteurs d'eau en m).

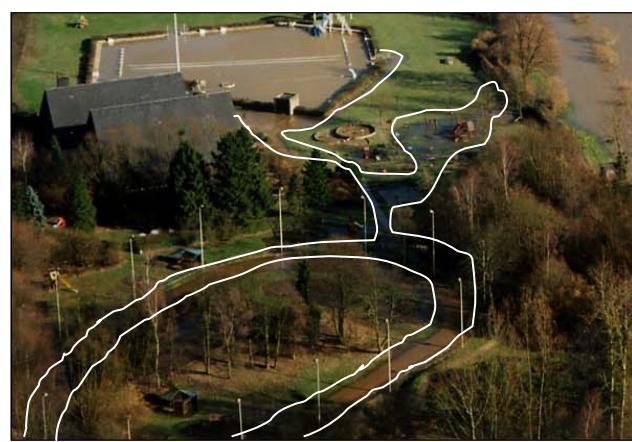
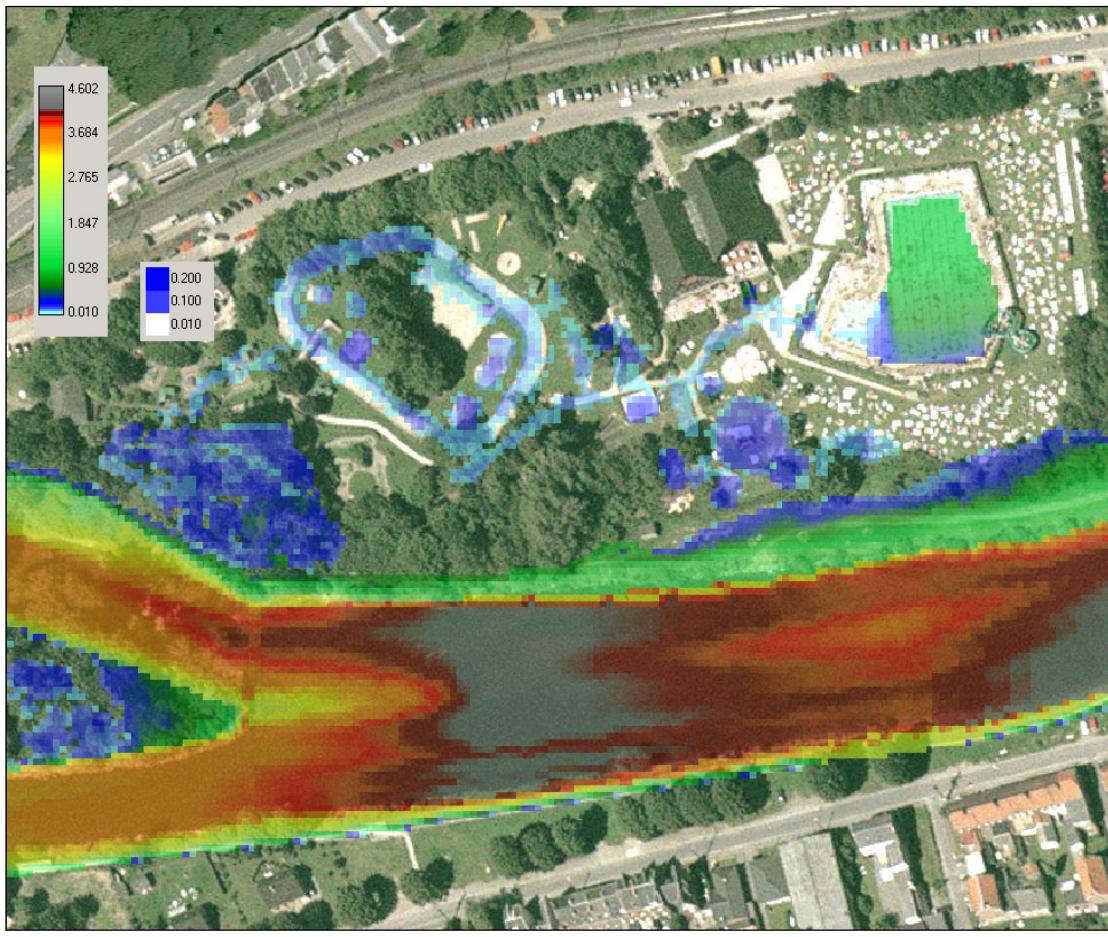


Figure 81, Figure 82, Figure 83.

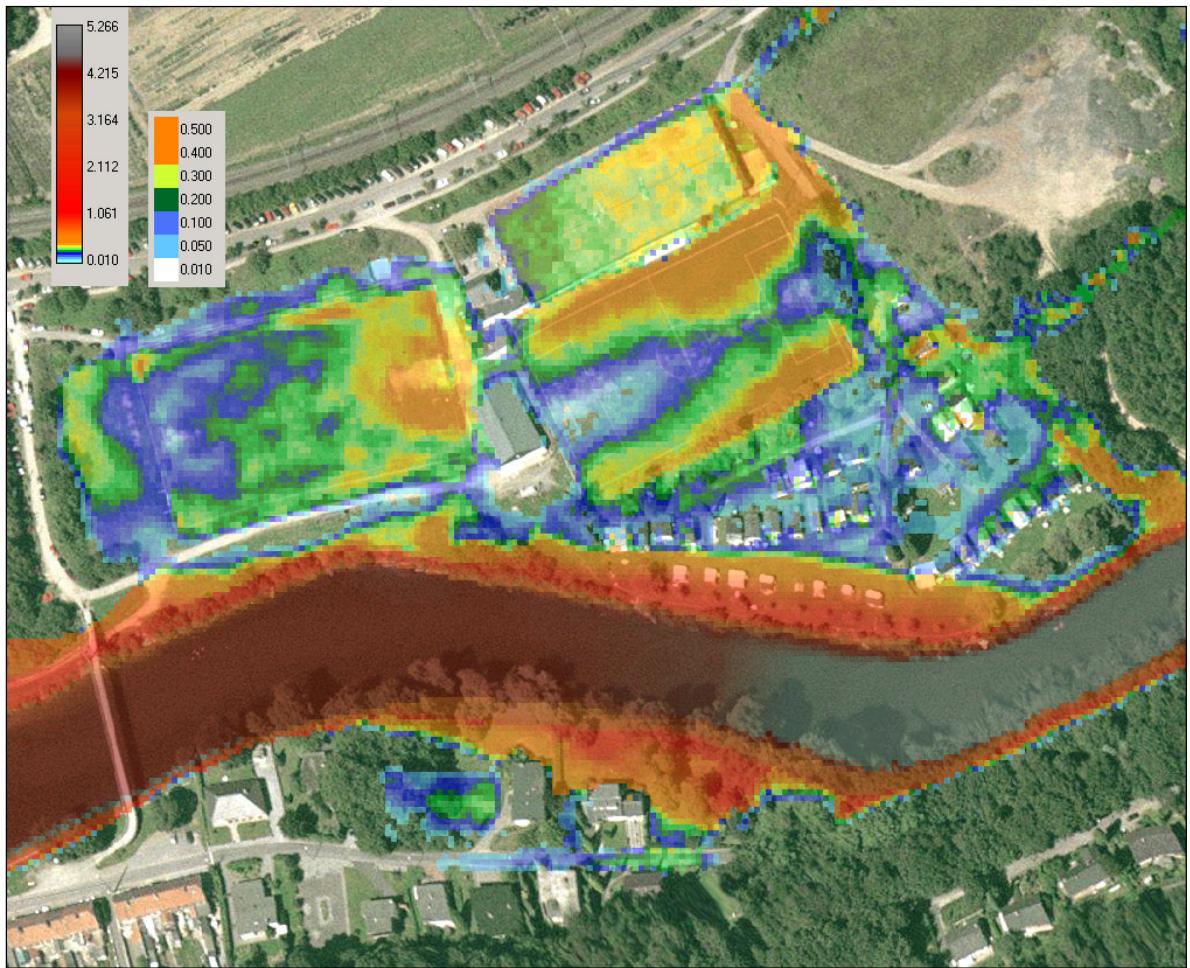


Figure 84 : Hauteurs d'eau en mètres.



Figure 85 : Photographie aérienne de comparaison.

III.7 Conclusions.

La méthode d'interpolation implémentée dans l'interface de pré et post-processing de Wolf 2D a montré, au travers d'applications réelles, les résultats satisfaisants qu'elle pouvait apporter. La gestion d'un nombre de données important est maintenant possible d'une façon tout à fait conviviale et performante.

Une fois que les bases permettant de lancer les procédures d'interpolation sont établies, la méthode se révèle très rapide mais il ne faut toutefois pas perdre de vue que l'utilisation de cet algorithme requiert un grand nombre de précautions quant à l'interprétation des données. Que ce soit lors de la sélection du lit mineur, phase pendant laquelle la corrélation de la topographie laser et des sections doit être interprétée, ou encore lors de la construction du lit mineur où l'information doit être vérifiée. Que ce soit lors du positionnement des seuils ou la gestion des confluences entre bras principaux et bras de dérivations, il est important de se demander si la physique du problème est correctement respectée. Toutes ces opérations prennent un temps considérable et ne sont que du ressort de l'utilisateur. Il ne faut non plus pas oublier qu'il subsiste toujours, malgré l'automatisme de la méthode, un travail manuel servant à éliminer la végétation surabondante sur les rives des cours d'eau.

En définitive, l'utilisation de la méthode d'interpolation et l'interprétation objective des données concrétisent un processus performant pour le traitement topographique des lits principaux d'écoulements.

IV GESTION DES OUVRAGES D'ART

IV.1 Introduction.

L'étude de l'écoulement de l'eau dans nos rivières en période de crue se révèle être très important dans le cadre de la détermination de cartes de risques d'inondations dans nos contrées. Le but poursuivi est, bien sûr, de modéliser au mieux ce que nous observons dans la nature. Un des principaux facteurs conditionnant un écoulement est sa topographie qui a été l'objet des développements présentés au chapitre 3. Cependant, il se peut que des obstacles viennent entraver un écoulement. Il peut s'agir d'obstacles naturels, tels des troncs ou d'autres objets hétéroclites, mais le caractère aléatoire de telles situations ne permet pas d'en faire une modélisation. Par contre, la présence d'ouvrages d'art enjambant une rivière peut être considérée.

L'entrave à l'écoulement que constituent les piles ou les culées d'un ouvrage sont prises directement en compte par la topographie ou par une zone imperméable imposée en rivière. Cet aspect est donc géré intégralement par les équations sans qu'aucune modification ne soit nécessaire. Par contre, l'entrave que constitue un tablier de pont, quand le niveau d'eau devient trop important, doit faire l'objet d'une méthode adaptée, un tel obstacle ne pouvant être modélisé par la topographie.

Malgré le caractère très marqué d'écoulement sous pression qui caractérise un tablier de pont en charge et qui le rend difficile à modéliser par un code de calcul à surface libre, il est important de pouvoir tenir compte d'un tel obstacle de façon à évaluer les surhauteurs engendrées en amont.

Dans les quelques pages qui suivent, nous décrirons les premiers balbutiements visant à prendre en compte les ouvrages d'art pour finalement aboutir à l'implémentation d'une loi caractérisant une perte locale au niveau du tablier du pont et permettant ainsi de modéliser son influence sur l'écoulement.

IV.2 Paramètre d'inégale répartition des vitesses.

Le paramètre d'inégale répartition des vitesses doit sa présence au sein des équations à la volonté de pouvoir modéliser un écoulement dont le profil des vitesses diffère d'un profil constant. Ce paramètre (ρ) agit au niveau du terme convectif des équations. Ci-dessous, l'équation d'un modèle complet unidimensionnel.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \rho u q}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_0 - S_f)$$

(3.20)

où q est le débit spécifique,

u est la vitesse,

h est la hauteur d'eau

ω est la section mouillée,

ρ est le paramètre d'inégale répartition des vitesses,

g est la gravité,

S_0 et S_f sont la pente de fond et la pente de frottement.

La borne inférieure que le paramètre d'inégale répartition peut atteindre est 1, caractérisant un profil de vitesse uniforme sur la hauteur. Sa borne supérieure n'est, a priori, pas définie, mais il est rare de voir apparaître des valeurs supérieures à 10. L'augmentation de ce paramètre se traduit sur l'écoulement par une hauteur d'eau accrue puisque des profils de vitesses autre qu'uniformes réduisent en quelque sorte la section active de l'écoulement. L'expression générale du coefficient d'inégale répartition à une dimension s'écrit :

$$\rho = h \frac{\int_{z_b}^{z_b+h} u^2 dz}{\left(\int_{z_b}^{z_b+h} u dz \right)^2}$$

(3.21)

où h est la hauteur d'eau,

u est la vitesse locale,

Z_b est le niveau du fond.

Dans le code de calcul Wolf 2D, ce paramètre est pris par défaut égal à 1. Il est en effet difficile d'agir autrement puisque les profils de vitesses en rivière diffèrent fortement d'un point à un autre et sont a priori inconnus. Cette « déficience » est contrebalancée lors du calage du modèle en agissant sur le paramètre de frottement qui remplace en quelque sorte la différence entre le paramètre d'inégale répartition réellement observé et celui pris par défaut.

IV.3 Première approche.

Dans cette première approche, deux différents concepts sont utilisés :

- Le premier prend en compte les effets géométriques des ouvrages qui peuvent être représentés par une variation topographique locale. Ce sont les culées et les piles qui sont considérées ici. Le tablier qui ne se trouve pas au droit des culées et des piles ne peut pas être pris en compte puisqu'une variation topographique nécessite la présence de matière sous celui-ci. Cette partie des tabliers sera traitée dans le deuxième aspect de l'approche. Le rétrécissement local de la section de passage sur sa largeur est donc géré par les modifications topographiques au droit du pont. **Deuxième aspect de l'approche**

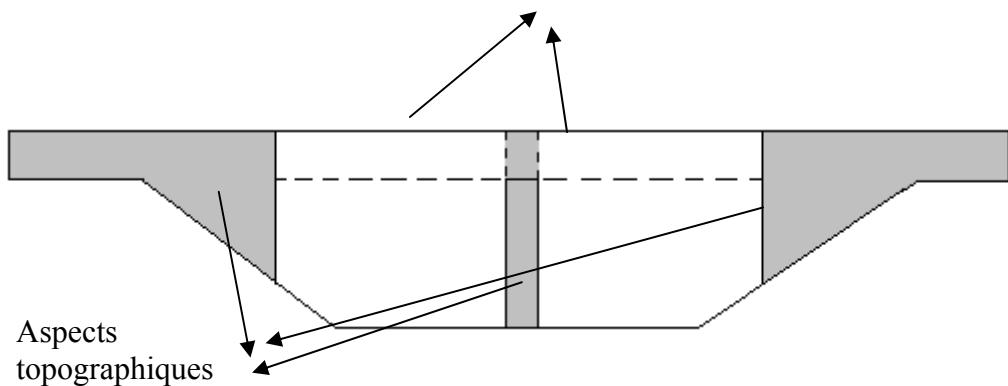


Figure 86: Différents termes de l'approche.

- Le second gère, quant à lui, les effets dynamiques. Ces effets peuvent se scinder en deux parties : l'évaluation d'un frottement majoré et la modification du paramètre d'inégale répartition des vitesses.

- Les effets de frottement apparaissent en plusieurs endroits selon le niveau atteint par la surface libre de l'écoulement. Si celle-ci est sous le niveau inférieur du tablier, la situation est semblable à un écoulement en rivière sans obstacle (figure 87). Si la surface libre atteint l'épaisseur du tablier, la surface frottante augmente considérablement puisque la face inférieure du tablier intervient également (figure 88). Enfin, lors d'une subverse totale de l'ouvrage, la face supérieure du tablier apporte sa contribution aux pertes (figure 89). Le système envisagé pour tenir compte de l'augmentation de la surface frottante consiste à calculer la perte obtenue à la figure 87 et à la doubler ou tripler suivant que l'on considère l'état de la figure 88 ou de la figure 89. Il va de soi que la perte est calculée en fonction de la vitesse réelle moyenne sous le tablier.

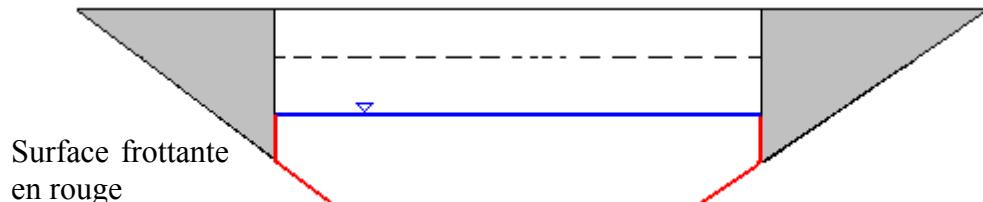


Figure 87

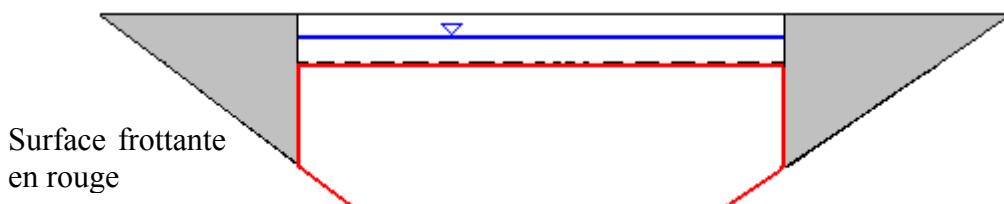


Figure 88



Figure 89

- Pour rendre compte du profil de vitesses changeant au niveau du pont , l'artifice utilisé est d'employer le paramètre d'inégale répartition des

vitesses qui permet de rendre compte d'une forme donnée de la distribution. Donc, en se donnant une distribution en fonction du niveau d'eau par rapport au tablier de l'ouvrage, il est possible de modifier la valeur du coefficient pour tenir compte de la présence du tablier. Nous allons illustrer ce principe dans un cas unidimensionnel et relatif aux 3 situations déjà explicitées ci-avant. Sur les schémas, h désigne la hauteur d'eau, h_i la hauteur sous le tablier, e_t l'épaisseur du tablier, u la vitesse et ρ le paramètre d'inégale répartition des vitesses. Lors de l'exploitation de ce procédé, les équations utilisées sont identiques à celles employées habituellement. Dans ce cas, l'information obtenue après calculs, en terme de hauteur d'eau, désigne la ligne piézométrique de l'écoulement, soit la hauteur sous tablier à laquelle est ajoutée la pression sous l'ouvrage. Il en est de même au niveau des vitesses qui sont affichées à l'écran en fonction de la « hauteur piézométrique » mais qui sont réévaluées pour obtenir la vitesse réelle dans le calcul du frottement.

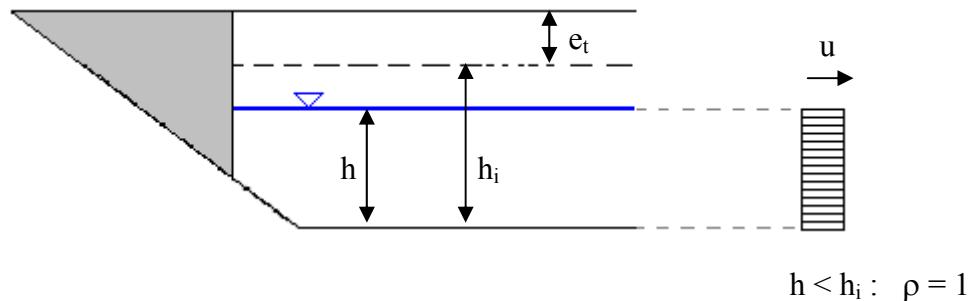


Figure 90

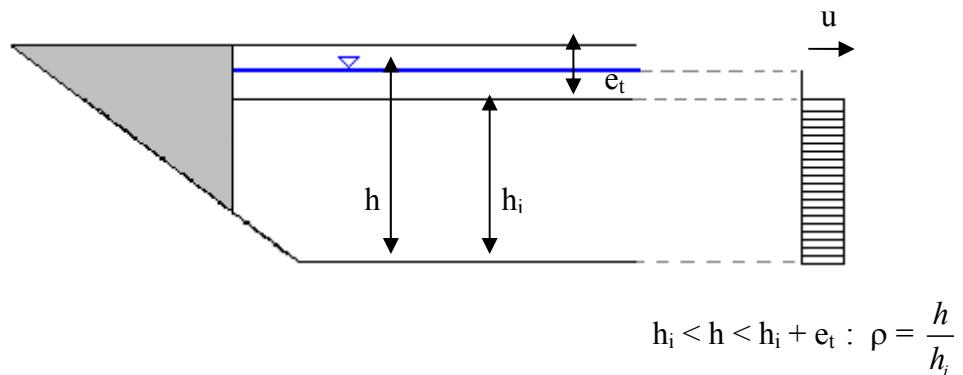


Figure 91

u

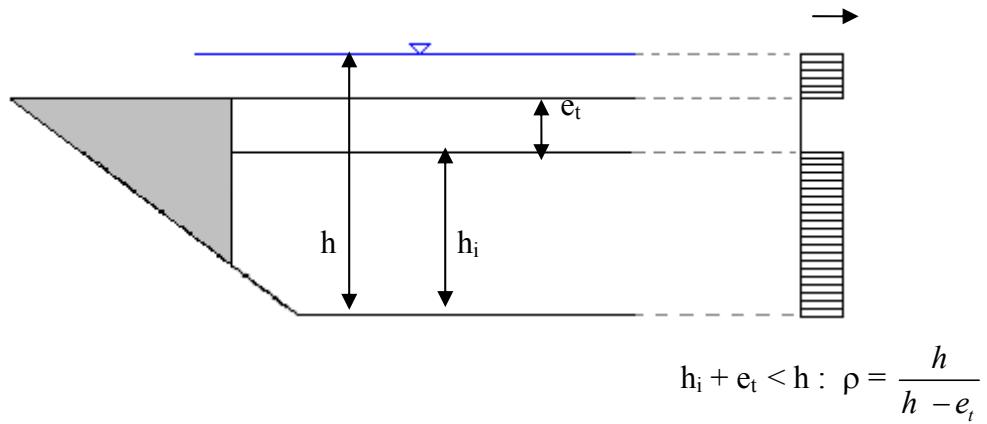


Figure 92

Une validation de cette approche a été envisagée lors d'essais menés en laboratoire sur un modèle réduit de pont placé dans un canal unidimensionnel [3].



Figure 93 : Modèle réduit pour l'étude de l'écoulement sous un ouvrage d'art.

Les résultats de cette étude ont montré que l'approche envisagée ci-dessus n'était pas suffisante notamment en ce qui concerne les profils de vitesses. L'écoulement sous le pont génère très souvent un tourbillon dans la tranche supérieure de l'écoulement au commencement de l'obstacle ce qui fournit un profil de vitesse présentant des composantes négatives (figure 94). Cette particularité provoque une augmentation brusque du coefficient d'inégale répartition des vitesses qui s'écarte des hypothèses formulées dans l'approche présentée. Plus en aval sous l'obstacle, les profils ont tendance à se stabiliser mais tout en gardant une forme qui s'écarte sensiblement des profils d'hypothèse et qui, par conséquent, génèrent un coefficient d'inégale répartition des vitesses différent (figure 95). Ce coefficient provoque uniquement une modification locale de l'épaisseur de la lame fluide mais ne génère des pertes dans l'écoulement que si un changement de régime apparaît.

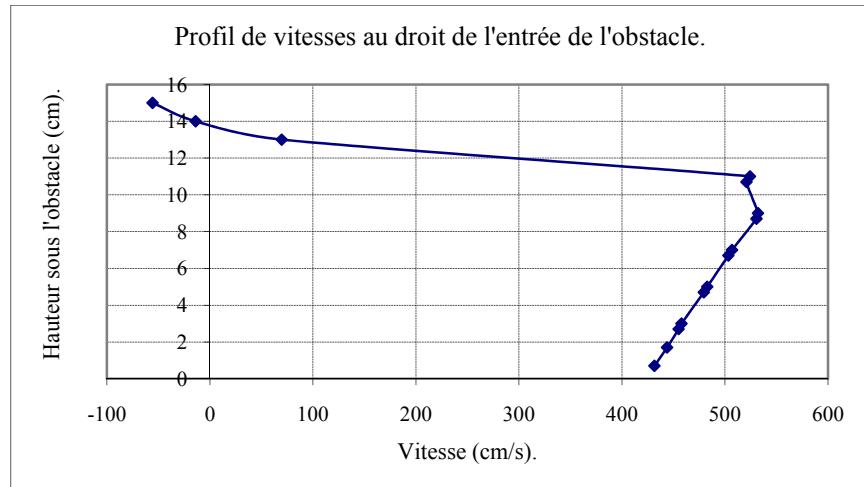


Figure 94

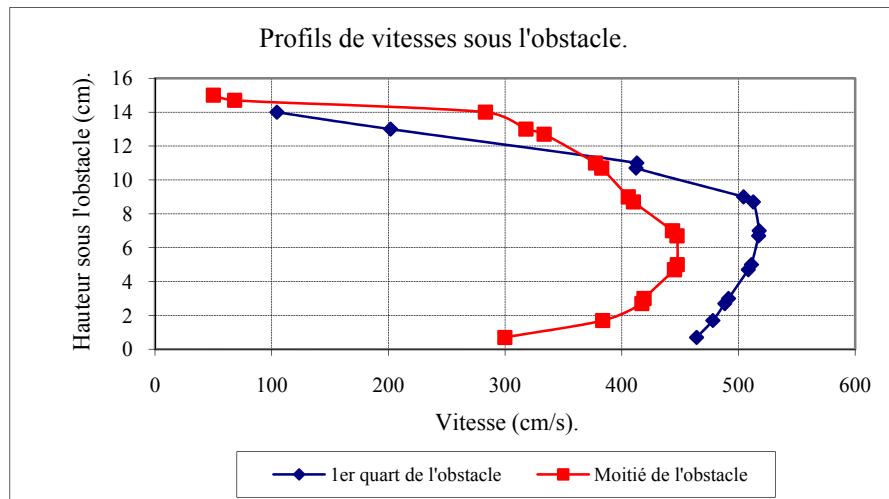


Figure 95

L'approche consistant à majorer le coefficient d'inégale répartition des vitesses par le rapport de la hauteur d'eau sur la hauteur disponible sous le tablier de l'ouvrage n'a pas permis de rendre compte du phénomène observé en laboratoire. Suite à cela, l'imposition d'un coefficient d'inégale répartition, prenant la valeur construite sur les profils de vitesses mesurés sur le modèle réduit, a été testée. Cette approche va dans le sens du phénomène observé (remontée du niveau d'eau en amont de l'obstacle) mais ne permet pas quantitativement de reproduire les faits observés.

Les conclusions de cette étude sont que l'écoulement sous-pression présent lors du passage d'un pont ne peut être complètement modélisé par les équations d'un écoulement à surface libre sauf si l'on adjoint au calcul une perte de charge locale à l'entrée et à la sortie de l'obstacle.

IV.4 Seconde approche.

Devant la difficulté de modéliser précisément les phénomènes locaux prenant naissance au droit des ouvrages d'art en rivière et celle que représente la connaissance des profils de vitesses au droit d'un ouvrage réel en charge, une approche plus générale a été envisagée. Celle-ci est basée sur une relation fournissant le différentiel de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval de l'obstacle en fonction du débit, de la section de passage et d'un coefficient de pertes issu d'essais expérimentaux. Cette loi proposée par Hamil [3] a été vérifiée dans le cadre de l'étude sur modèle réduit [4] et a été intégrée au code de calcul Wolf 2D.

$$\Delta H = \frac{Q^2}{A^2 \cdot C_d^2 \cdot 2 \cdot g} = \frac{V^2}{C_d^2 \cdot 2 \cdot g}$$

(3.22)

où Q est le débit en m^3/s ,

A est la section de passage sous l'obstacle,

C_d est le coefficient de pertes issu d'essais expérimentaux,

g est la gravité,

ΔH est la différence de surface libre entre l'amont et l'aval de l'obstacle.

Le coefficient de perte a été établi par Hamil pour différentes formes de ponts en fonction du rapport hauteur d'eau/hauteur disponible sous le tablier. En calant au mieux une courbe sur les points expérimentaux représentant le coefficient de pertes pour une section de passage rectangulaire, on obtient une droite d'équation :

$$C_d = 0,3 \cdot \frac{H_{Tablier}}{H_{Eau}} + 0,56$$

(3.23)

Pour l'instant aucune donnée relevée lors d'une crue n'est disponible. Le problème de la mise en charge des ouvrages et des conséquences que cela implique pour le pont en lui-même, mais aussi pour l'emprise des zones inondées en amont, devrait amener à certaines prises de mesures afin de finaliser la validation d'une telle loi dans des cas réels. Dans l'immédiat, un test vérifiant l'implémentation correcte de celle-ci a été réalisé pour un canal rectangulaire à fond plat de 40 mètres de large. La hauteur sous tablier est de 5 mètres et le débit passant est de 500 m^3/s . La condition aval conditionnant l'écoulement est fixée à

5 mètres assurant ainsi une mise en charge du tablier qui est situé plus en amont. Dans ces conditions, qui sont proches de celles rencontrées en Ourthe, l'évaluation de la perte par la formule de Hamil conduit à une valeur d'environ 50 centimètres, valeur tout à fait plausible pour les paramètres envisagés.

La perte explicitée dans l'équation d'Hamil représente un différentiel de surface libre c'est-à-dire une perte d'énergie si l'on ne tient pas compte du terme cinétique. La valeur tirée de l'équation ne peut simplement être introduite dans les équations utilisées dans Wolf 2D puisque celles-ci se basent sur la conservation de la quantité de mouvement et non pas sur la conservation d'énergie. Il faut donc imposer à l'écoulement une perte de quantité de mouvement qui fournit une différence de surface libre correspondant à la formulation d'Hamil. Cela peut être fait en calculant le bilan de quantité de mouvement de part et d'autre de l'endroit où se produit la perte où l'on impose un différentiel de surface libre calculé auparavant. Dans le code de calcul quasi-tridimensionnel, deux équations de conservation de quantité de mouvement sont résolues. Le calcul de la perte de quantité de mouvement est ici particularisée à une seule direction, l'autre étant tout à fait identique. Sur les schémas suivants, on distingue la topographie (Z), le débit spécifique (q), la hauteur d'eau (H), la différence de surface libre (ΔH , donnée par Hamil) et la taille de maille (dx).

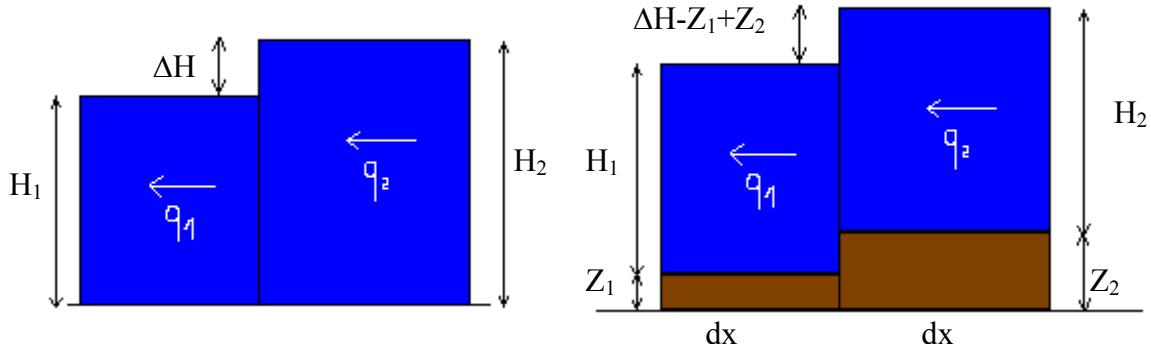


Figure 96 : Calcul de la perte de quantité de mouvement due à l'obstacle.

L'expression suivante permet de calculer la perte de quantité de mouvement nécessaire pour créer le différentiel de surface libre voulu indépendamment des termes de pente de fond ou de frottement. L'évaluation de la perte est effectuée lors de l'itération en cours pour être utilisée lors de l'itération suivante.

$$\frac{\partial uq}{\partial x} + \frac{\partial h^2}{\partial x} \cdot \frac{g}{2} = \left(\frac{\frac{q_1^2}{H_1} - \frac{q_2^2}{H_2}}{\Delta x} \right) + g \left(\frac{H_1^2 - H_2^2}{2\Delta x} \right) = \left(\frac{\frac{q_1^2}{H_1} - \frac{q_2^2}{H_1 + \Delta H}}{\Delta x} \right) + g \left(\frac{H_1^2 - (H_1 + \Delta H)^2}{2\Delta x} \right)$$

(3.24)

Dans un cas différent d'un fond plat, l'imposition d'une perte ΔH entre les hauteurs d'eau surestime le différentiel de surface libre. Cette surestimation est alors absorbée par le terme de pente de fond déjà présent dans les équations pour rendre au final le différentiel de surface libre voulu.

Sur le graphique suivant, on peut voir les résultats du cas test pour un pont dont la section de passage est rectangulaire. Une courbe montre la ligne d'eau quand il n'y a pas d'obstacles, deux courbes représentent un canal à fond plat orienté ou non par rapport aux axes x et y de la simulation et une troisième représente un canal qui a un décrochement topographique au niveau du passage du pont. Ces calculs sont effectués en s'assurant qu'aucune transition de régime n'intervient au droit du pont. Celle-ci ferait en effet naître des pertes supplémentaires dues à la présence du ressaut et qui devraient être prise en compte dans le différentiel de hauteur imposé.

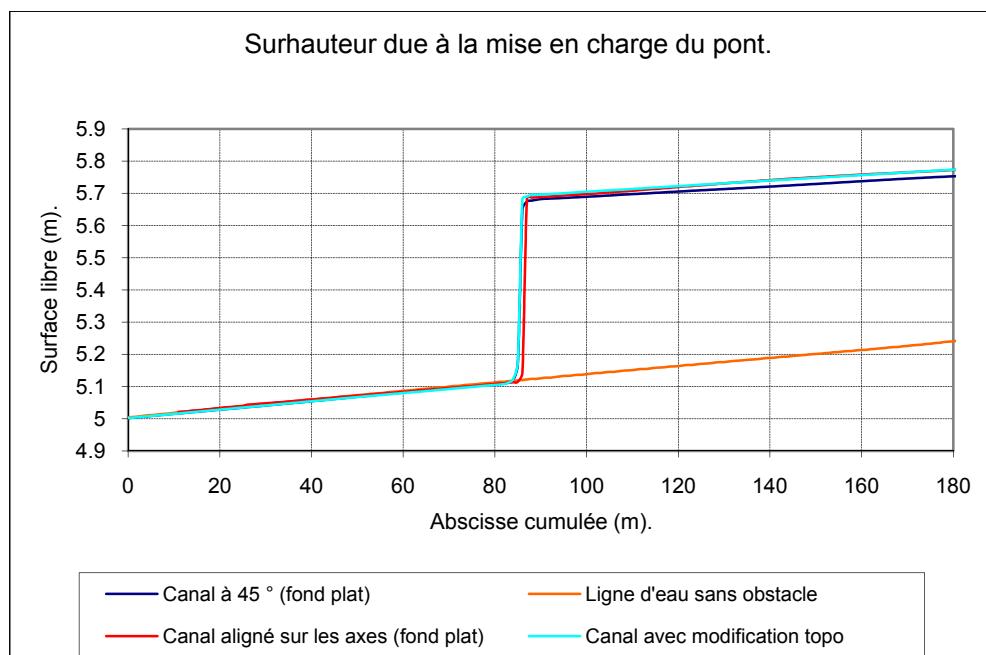


Figure 97

IV.5 Conclusion.

La gestion des perturbations générées par les ponts qui a été développée permet d'envisager le problème sous une approche globale, à savoir l'influence sur les niveaux d'eau en amont des obstacles, et donc directement sur les emprises des zones inondées. Certes, il ne permet pas de reproduire le phénomène local de mise en charge qui est, dans l'optique de la modélisation des zones inondables, d'un intérêt moindre.

La loi implémentée et testée permet de rendre compte des surhauteurs attendus pour un pont de section rectangulaire et complètement en charge. Il existe d'autres essais expérimentaux réalisés par Hamil qui considèrent les différentes phases de mises en charge de l'obstacle. En effet, pour des hauteurs d'eau proches de la hauteur sous tablier, l'écoulement est partiellement en charge et demande l'utilisation d'une autre loi faisant la liaison entre celle utilisée ici et une situation où le niveau d'eau est sous le tablier. Hamil propose également différentes lois selon la forme du pont envisagée.

Toutes ces variantes sont en cours d'implémentation de façon à gérer dans leur ensemble les problèmes occasionnés par le franchissement des ouvrages d'art.

V MODIFICATION DE LA LOI DE FROTTEMENT

V.1 Introduction.

Les lois de frottement expérimentales et historiques utilisées généralement en hydraulique de surface sont principalement celles de Manning ou de Chézy. Un des principaux avantages de ces lois est l'évaluation aisée des pertes par frottements. En effet, la pente de frottement peut être exprimée de manière explicite en fonction des divers paramètres hydrauliques ce qui rend le calcul aisé et rapide. Par contre, ces lois ne tiennent pas compte d'une taille de rugosité relative par rapport à la hauteur d'eau. C'est ce qui explique que l'on peut observer une variation du coefficient de frottement en fonction du débit dans la loi de Manning par exemple.

Une des formulations qui permet de tenir compte de la taille de la rugosité par rapport à la hauteur d'eau présente est la loi de Collebrook. Celle-ci est malheureusement plus complexe car elle ne peut donner la perte de frottement explicitement. La résolution itérative qui en découle alourdit considérablement le calcul et limite ainsi son utilisation dans la modélisation de grandes étendues. Les modifications apportées dans le cadre de ce travail ne visent pas à utiliser une loi de type Collebrook mais à raffiner la modélisation qu'offre la loi de Manning utilisée dans Wolf 2D.

Cette formulation est basée sur un très grand nombre d'essais expérimentaux qui ont visé à l'établir principalement dans des conditions d'écoulements unidimensionnels. Son adaptation classique vers une utilisation dans un code de calcul quasi-tridimensionnel demande quelques aménagements puisqu'il apparaît qu'elle ne dégénère pas naturellement vers la formulation originelle du 1D.

Dans un concept unidimensionnel, cette loi fait intervenir le rayon hydraulique de la section mouillée qui se transforme en une hauteur d'eau dans un contexte bidimensionnel. Il en résulte une perte d'information au niveau des frontières entre zones émergées et immergées puisque l'évaluation du frottement de bord n'est pas pris en compte (figure suivante).



Figure 98 : Surface frottante en 1D (à gauche) et en 2D (à droite).

Un autre problème prend naissance lorsque l'on passe d'une simulation unidimensionnelle vers une modélisation bidimensionnelle. Compte tenu du fait que les seules composantes de vitesses calculées sont dans un plan quasi-horizontal, seule la projection des surfaces des mailles dans le plan précédemment mentionné est prise en compte comme surface frottante. Dans un cas 2D, la discrétisation de la topographie des mailles en reconstruction constante provoque une sous-estimation de la surface frottante par rapport à une modélisation unidimensionnelle.



Figure 99 : Surface frottante en 1D (à gauche) et en 2D (à droite).

En quelque sorte, ces deux problèmes sont issus de la même source mais leur résolution passe par deux méthodes différentes : l'utilisation de bords frottants pour les mailles situées au niveau des bords limites de la simulation et une réévaluation de la surface frottante pour les mailles à l'intérieur du domaine.

V.2 **Bords frottants.**

Le concept de bords frottants a été implémenté au niveau du code de calcul de façon à traiter les mailles de calcul se trouvant à la limite des zones émergées et immergées. Dans l'approche envisagée, ceux-ci ne seront actifs qu'aux limites du domaine, c'est-à-dire au niveau des bords imperméables, pendant que toutes les autres mailles de calcul subiront le traitement présenté paragraphe V.3.

Le concept implémenté pour l'instant utilise une sommation du frottement de fond et du frottement de bord sur base de la loi de Manning utilisée en deux dimensions [7]. Pour

rappel, la formulation de la pente de frottement selon Manning utilisée en modèles unidimensionnels s'écrit sous la forme :

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (4.1)$$

où n est le coefficient de Manning, Q le débit et R le rayon hydraulique constitué par le rapport de la surface mouillée (A) et du périmètre mouillé (P).

Lors d'une application en bi-dimensionnel, la loi se trouve modifiée et le rayon hydraulique se réduit à la hauteur d'eau tandis que la pente de frottement est scindée en deux composantes, une selon x et l'autre selon y .

$$S_{f_x} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (4.2) \qquad S_{f_y} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (4.3)$$

La prise en compte du frottement se développant sur un ou plusieurs bords latéraux est effectuée par l'évaluation d'un rayon hydraulique calculé comme le rapport du volume mouillé et de l'aire mouillée. Cette valeur est introduite dans la relation de Manning réécrite d'une autre façon :

$$S_{f_x} = u \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{n^{3/2}}{R} \right)^{4/3} \text{ avec } R = \frac{V}{A} = \frac{S \cdot h}{S + h \cdot \sum_{w_k=1}^N l_{w_k}} \quad (4.4)$$

où S est la surface frottante au fond, h la hauteur d'eau, N le nombre de bords latéraux et l_w la longueur respective de ces bords. En tenant compte d'un coefficient de frottement différent sur le fond et sur les bords, la relation donnant la perte de frottement s'écrit :

$$S_{f_x} = u \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{n_b^{3/2}}{h} + \sum_{w_k=1}^N \frac{n_w^{3/2} l_{w_k, x}}{S} \right)^{4/3} \quad (4.5) \qquad S_{f_y} = v \sqrt{u^2 + v^2} \left(\frac{n_b^{3/2}}{h} + \sum_{w_k=1}^N \frac{n_w^{3/2} l_{w_k, y}}{S} \right)^{4/3} \quad (4.6)$$

où n_b désigne le frottement de fond et n_w le frottement de bord.

Cette formulation modifiée présente l'avantage majeur de dégénérer correctement pour une maille unique en largeur de modélisation.

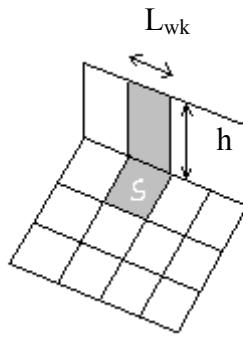


Figure 100 : Notations utilisées pour le frottement de bord.

V.3 Surfaces frottantes réelles.

Lors d'une modélisation quasi-tridimensionnelle, la surface frottante utilisée pour calculer l'énergie dissipée sur une maille est l'aire horizontale de celle-ci soit $dx * dy$. En comparaison avec une approche unidimensionnelle où la surface frottante est en relation avec le périmètre mouillé, la modélisation en 2 dimensions sous-estime l'aire en contact avec l'eau. Il s'agit donc de corriger cet aspect tout en conservant un formalisme qui dégénère correctement dans un cas unidimensionnel.

Un formalisme envisageable est de considérer que les bords « verticaux » créés par le différentiel topographique entre altitudes reconstruites en bord de mailles doivent être traités comme des bords frottants internes en appliquant la loi présentée au paragraphe précédent. Néanmoins, cette approche est contestable dans la mesure où la formulation décrite se simplifie correctement car la hauteur d'eau est aussi la hauteur frottante sur le bord vertical. Au sein du domaine par contre, la hauteur d'eau ne représente plus nécessairement la hauteur de la marche topographique et la loi décrite ne peut plus être scindée en frottement de fond et de bord. En outre, le frottement de bord au sein du domaine doit utiliser la composante de vitesse parallèle à la marche ce qui n'est pas le cas dans la formulation.

Ces constatations mènent à la conclusion que le concept présenté au paragraphe V. 2 doit être exclusivement réservé au traitement du frottement sur les bords frontières du domaine de modélisation et que la prise en compte d'une surface frottante supplémentaire doit être incorporée dans le terme de frottement de fond.

Cette modification consiste à augmenter l'aire initiale d'un facteur calculé sur base des pentes de fond locales selon x et selon y. Ces déclivités sont évaluées par différences centrées entre les valeurs topographiques connues au centre des mailles de calcul. On obtient ensuite le facteur correctif en prenant le cosinus de ces pentes.

$$\text{Surface frottante majorée} = \frac{dx \cdot dy}{\cos(\text{pente } x) \cdot \cos(\text{pente } y)} \quad (4.7)$$

Cette formulation offre l'avantage de mieux dégénérer correctement vers le 1D lorsqu'une des 2 pentes est nulle puisqu'à ce moment la discréétisation de la section transversale est bien représentée par des segments de droites entre centres des mailles.



Figure 101 :Dégénérescence correcte vers le 1D.

Un cas test visant à vérifier l'impact des différentes modifications envisagées est présenté ci-après. Celui-ci est constitué d'un canal de section trapézoïdale, d'une pente de 5 mm par mètre et de 400 mètres de long. Une condition limite de hauteur d'eau aval est imposée alors qu'un débit de 300m³/s est injecté en amont. Ces dimensions exacerbées ont été choisies de façon à obtenir un effet marquant entre des surfaces frottantes horizontales ou projetées selon les pentes latérales mais aussi de manière à obtenir un nombre de froude assez important qui assure une dissipation par frottement importante.

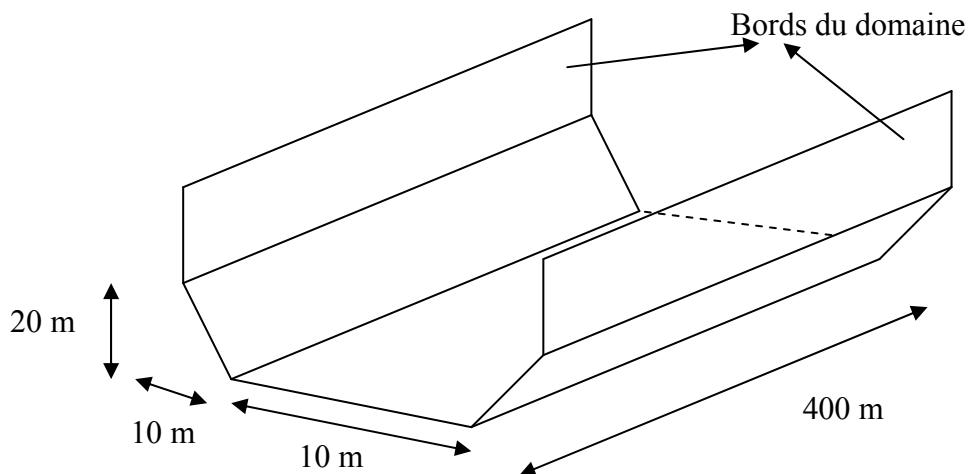


Figure 102 : Schéma du cas test.

Dans le but de valider le concept de surfaces frottantes, nous allons comparer les caractéristiques de l'écoulement obtenues par l'utilisation de concepts théoriques avec celles obtenues par le code de calcul. L'évolution du profil de vitesse transversal suite aux modifications entreprises est un point intéressant.

Dans le contexte du calage d'une ligne d'eau dans un modèle de prédition de zones d'inondations, il convient de tester l'influence de la modification des surfaces frottantes pour une ligne d'eau à emprise spatiale constante. Dès lors, puisque nous augmentons les pertes par frottement sur les bords du domaine, la surface libre remonte. Pour conserver la ligne d'eau de départ, la seule solution est de diminuer le coefficient de frottement. Par la même occasion, on constate une redistribution des vitesses avec une augmentation de celles-ci au centre du canal. Ce phénomène est tout à fait physique puisque l'écoulement tend à minimiser son énergie pour évacuer le débit passant et par conséquence il concentre ses vitesses au centre du canal, endroit qui est le moins frottant.

Dans un premier temps, nous allons décrire le concept théorique qui permet de calculer le profil de vitesse escompté. Dans le cas du canal rectiligne envisagé, une solution stabilisée et ayant atteint l'écoulement uniforme doit avoir une pente de surface identique sur toute la largeur et de même valeur que la pente de fond. Dès lors, pour chacune des n mailles de la section transversale, on calcule la pente de frottement en fonction de la surface libre, de la topographie et de la vitesse sur la maille.

$$S_{f_i} = \frac{u_i^2 \cdot n^2 \cdot S_i^{4/3}}{(H - Z_i)^{4/3}} \quad (4.8)$$

où u_i est la vitesse sur la maille considérée,

n est le coefficient de Manning,

S_i est la surface frottante,

H est la surface libre, constante sur la largeur,

Z_i est le niveau local du fond.

En égalant ces pentes entre les n mailles immergées, on obtient $n-1$ relations.

Ensuite, en imposant que ces pentes de surface soient égales à la pente de fond, on obtient une équation supplémentaire.

$$\forall S_{f_i} : S_{f_i} = S_{fond} \quad (4.9)$$

Finalement, la sommation du produit des largeurs locales par le débit spécifique sur toutes les mailles doit rendre le débit de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ injecté.

$$\sum_{i=1}^n u_i \cdot l_i \cdot (H - Z_i) = Q \quad (4.10)$$

On possède ainsi $n + 1$ relations qui permettent de calculer n vitesses et une valeur de surface libre.

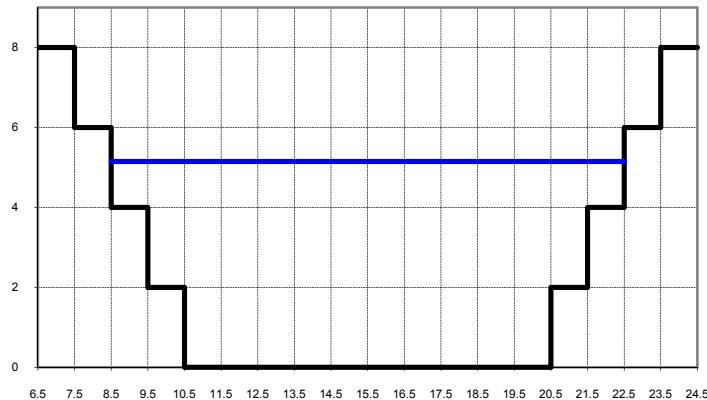


Figure 103 : Représentation de la topographie discrétisée et de la surface libre.

Au final, on obtient les résultats proposés en figure 104. Le coefficient de frottement passe d'une valeur de 25 dans le cas de surfaces frottantes non modifiées vers 27 lorsque l'aire corrigée est prise en compte pour une hauteur uniforme de surface libre de 5,15 m. On s'aperçoit que la courbe de vitesse calculée par Wolf 2D surestime légèrement la vitesse sur les bords et la sous-estime légèrement au centre du canal par rapport à la solution théorique. Néanmoins, la comparaison est tout à fait satisfaisante et le résultat obtenu sur base des surfaces frottantes modifiées permet de valider l'implémentation faite.

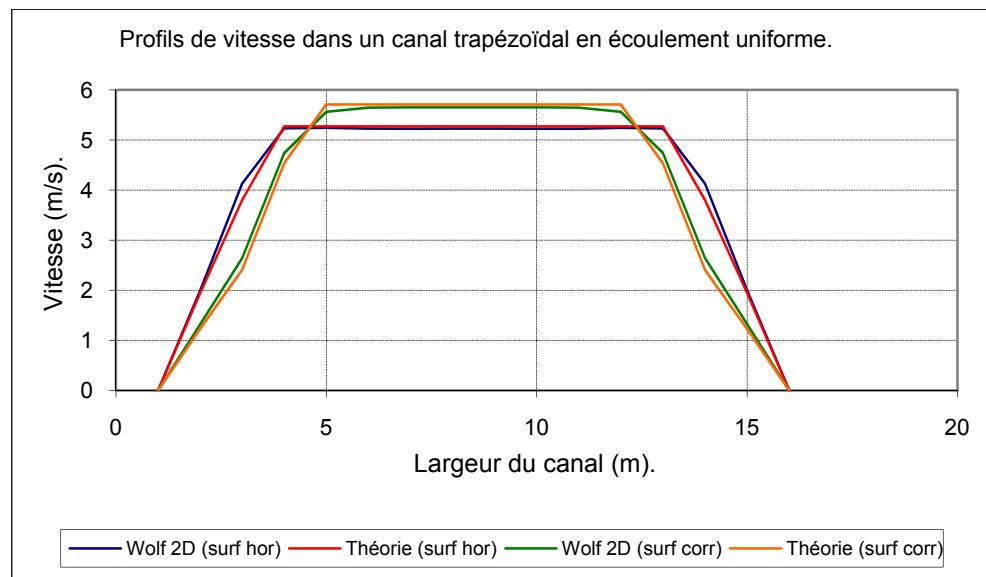


Figure 104 : Comparaison des distributions de vitesse sur la section transversale.

Même si les formulations sont intrinsèquement différentes, un modèle de turbulence a été testé pour savoir si le profil de vitesse calculé modélise mieux la réalité. En effet, le développement de vitesses importantes sur les bords à faible hauteur d'eau dans les modèles simples est de nature à changer localement le régime d'écoulement. Le but de la turbulence est de prendre en compte le frottement interne existant entre couches de fluide provoquant ainsi une redistribution des vitesses de façon à obtenir un gradient plus faible entre chaque maille de la simulation. Sur les deux figures qui suivent, on peut voir la différence occasionnée par l'utilisation du modèle de turbulence sur une modélisation avec ou sans surface frottante majorée. On s'aperçoit que le profil de vitesse au centre du canal est plus proche du profil obtenu avec adjonction de turbulence dans le cas des surfaces frottantes majorées. En conclusion, l'effet global des surfaces frottantes est positif puisque c'est au centre du canal que la majorité du débit est concentrée et que le profil de vitesse obtenu grâce aux surfaces frottantes majorées s'approche d'un diagramme plus réaliste.

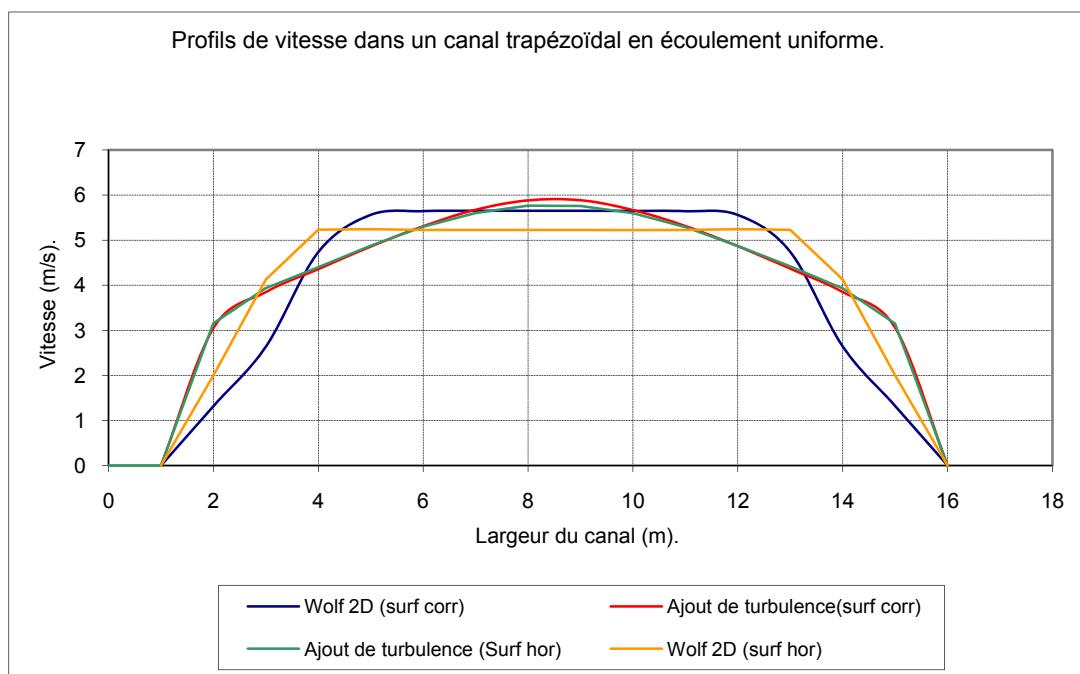


Figure 105 : Comparaison de profils de vitesse avec ajout de turbulence.

VI CONCLUSIONS

Le but de ce travail était de mettre au point une méthode automatisée permettant de reconstituer l'information topographique du lit mineur sur base de sections transversales et d'un modèle numérique de terrain et de suggérer une méthodologie ainsi que quelques aménagements théoriques et empiriques visant à améliorer la qualité des simulations de Wolf 2D.

Dans un premier temps, quelques mesures visant à endiguer les phénomènes d'inondations ont été décrites. Certaines d'entre elles doivent prouver leur influence favorable sur les dégâts occasionnés entraînant dans la foulée des études hydrauliques de vérification.

Ensuite, une description des systèmes de collecte des données disponibles actuellement a été présentée. Il est un fait que l'exactitude de ces valeurs, mais aussi la qualité des modifications qui y sont apportées, conditionnent fortement la qualité des résultats de modélisation.

C'est pourquoi un contre-exemple démontrant l'utilité d'une méthode d'interpolation du lit mineur entre sections transversales a été décrit. Le cheminement suivi lors de la modélisation de l'Eau d'Heure, fournissant certes un résultat plus que satisfaisant, a été semé de nombreuses embûches prouvant la nécessité de disposer d'un outil adapté.

Après avoir décrit en détail le processus d'élaboration des différentes étapes menant à une méthode aboutie, différents tests sur un court tronçon de l'Ourthe ont montré les différentes options disponibles et ont, par la même occasion, démontré la nécessité d'étudier physiquement les résultats que ces options pouvaient fournir. Pour suivre, une validation de la méthode implémentée a été envisagée sur l'Ourthe en aval de Tilff. Des travaux visant à

limiter l'ampleur des crues y ont été entrepris, ce qui a permis de comparer les résultats des zones inondées avant et après modifications et de valider la procédure d'interpolation.

Enfin, deux chapitres, traitent respectivement de l'influence des ouvrages d'art sur l'écoulement de crue et d'une modification de la loi de frottement ont été développés.

Le chapitre 4 a mis en évidence le fait que le phénomène local de mise en charge sous les ponts ne peut être représenté par les équations de l'hydraulique à surface libre qu'en incluant des termes de pertes de charge locales. Il a permis par conséquent de déboucher sur l'implémentation d'une loi de perte globale validée sur base d'essais en laboratoire et dans l'attente d'être vérifiée lors d'événements réels.

Le chapitre 5 , quant à lui, a attiré l'attention sur les modifications à apporter lors du traitement des surfaces frottantes en deux dimensions.

On peut finalement conclure que les développements entrepris ont très sensiblement amélioré la gestion de la masse de données topographiques disponibles et ont apporté plusieurs solutions de façon à obtenir une modélisation numérique plus fiable des cours d'eau. Dans le futur, au travers d'autres tronçons de rivière, des développements complémentaires seront poursuivis pour améliorer l'outil disponible et le rendre le plus général possible.

VII BIBLIOGRAPHIE

Livres :

- [1] PIROTON M., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S., DEWALS B., ERPICUM S., MOUZELARD Th., *Hydraulique Appliquée*, Département d'Hydraulique et de Transport, Université de Liège, 2002
- [2] PIROTON M., *Modélisation des discontinuités en écoulement instationnaire à surface libre : du ruissellement hydrologique en fine lame à la propagation d'ondes consécutives aux ruptures de barrages*, Editions L.H.C.N., Université de Liège, 1994
- [3] HAMIL L., *Bridge Hydraulics*, E & FN Spon, Londres, 1999.

Travail de fin d'études :

- [4] LIZIN S., **Etude des perturbations générées par la présence d'obstacles en rivière**, Travail de fin d'Etudes, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 2003

Rapport :

- [5] MARTINY A., **Contribution à la détermination du coefficient de rugosité des rivières**, Ministère de la région Wallonne, 1995

Site web :

- [6] Ministère de l'Equipement et des Transports, division des voies hydrauliques.
<http://voies-hydrauliques.wallonie.be/>.

Publication :

- [7] BRUFAU P., GARCIA-NAVARRO P., **Two-dimensional dam break flow simulation**, International Journal for Numerical Methods in Fluids 2000; 33 :42-44.