

# Construction de MNE adaptés à la simulation d'inondations

Jérémy KALSRON  
Master 1 Géographies Numériques  
2018-2019

Structure d'accueil :  
Laboratoire en Sciences et Technologies de l'Information Géographique  
Institut national de l'information géographique et forestière

Stage encadré par  
Laurence JOLIVET (LaSTIG, IGN) et Olivier PAYRASTRE (LEE, IFSTTAR)





# Table des matières

Remerciements.....	5
Liste des acronymes.....	6
Introduction.....	7
I — Contexte et objectifs du stage.....	9
I.1 — Modélisations hydrauliques et données nécessaires.....	9
I.1.1 — Modèles 1-D.....	10
.....	10
I.1.2 — Modèles 2-D.....	11
I.2 — Objectifs du stage.....	12
I.3 — Description des cas d'étude.....	13
II - État de l'art sur les MNT et leurs utilisations.....	16
II.1 - Caractéristiques des MNT existants.....	16
II.2 - Traitements des MNT selon les cas d'utilisation.....	17
III — Approche générale.....	18
IV — Délimitation des berges.....	19
IV.1 — Définitions d'une berge.....	19
IV.2 — Approche par l'indicateur de profondeur hydraulique.....	20
IV.2.1 — L'indicateur de profondeur hydraulique.....	20
IV.2.2 — Description de l'algorithme Bankfull Width Detection.....	21
IV.2.3 — Améliorations apportées à l'algorithme Bankfull width detection.....	23
IV.3 — Résultats.....	24
IV.3.1 - Étude des profondeurs hydrauliques sélectionnées par lissage aléatoire.....	24
IV.3.2 - Prise en compte des terrasses dans le lit mineur.....	26
IV.3.3 - Retours sur la qualité des résultats.....	28
V — Rétablissement de l'écoulement.....	30
V.1 — Types des obstacles.....	30
V.1.1 — Ouvrages de franchissement.....	30
V.1.2 — Cours d'eau souterrains ou absence du cours d'eau.....	31
V.1.3 — Artefacts d'interpolation.....	32
V.2 — Détection des obstacles à l'écoulement.....	33
V.2.1 — Détection vectorielle.....	33
V.2.2 — Détection combinée vectorielle et MNT.....	34
V.3 — Suppression des ponts par interpolation.....	36
V.3.1 — Description de la méthode.....	36
V.3.2 — Résultats et validation.....	36
V.4 — Rétablissement des cours d'eau souterrains par interpolations linéaire et TIN.....	39
V.4.1 — Description de la méthode.....	39
V.4.2 — Résultats et validation.....	41
VI — Ajout d'obstacles en lit majeur.....	43
VI.1 — Description de l'approche par rasterisation.....	43
VI.2 — Typologie des limites possibles.....	45
VI.3 — Proposition de solutions.....	46
Conclusion.....	47
Bibliographie.....	48
Annexes.....	51

## Table des figures

Figure 1: Entrées et sorties d'une modélisation mécaniste.....	9
Figure 2: Profils en travers perpendiculaires à la géométrie linéaire d'un cours d'eau.....	10
Figure 3: Directions et vitesses d'écoulement résultant d'une simulation 2-D.....	11
Figure 4: Site du cas d'étude du Gardon d'Alès.....	13
Figure 5: Site du cas d'étude de la Cagne.....	14
Figure 6: Description d'une section transversale de cours d'eau.....	19
Figure 7: Mesures mobilisées pour l'indicateur de profondeur hydraulique.....	20
Figure 8: Détection de la berge : section transversale.....	21
Figure 9: Exemple de résultat de berges obtenu sur une portion de cours d'eau.....	22
Figure 10: Algorithme de détection de berge modifié.....	23
Figure 11: Détection de berge sur un cours d'eau large.....	24
Figure 12: Détection de berge sur un cours d'eau large présentant une terrasse.....	25
Figure 13: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme – profondeur 50 cm.....	25
Figure 14: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme – profondeur 2 m.....	26
Figure 15: Détection de berge pour un petit cours d'eau étroit.....	27
Figure 16: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme sur un cours d'eau fin.....	27
Figure 17: Exemple de profils croisés.....	28
Figure 18: Exemple d'obstruction par un pont sur le Gardon d'Alès.....	30
Figure 19: Exemple d'une portion souterraine d'un cours d'eau dans la ville de Cagnes-sur-mer.....	31
Figure 20: Exemple d'artefacts du MNT.....	32
Figure 21: Exemple de pont vectoriel décalé par rapport au MNT.....	33
Figure 22: Fonctionnement de l'algorithme de détection combinée vectorielle et MNT profil par profil.....	34
Figure 23: Exemple de tronçon problématique pour la détection des parties souterraines.....	35
Figure 24: Exemple de pont supprimé du MNT initial sur le Gardon d'Alès.....	37
Figure 25: Profils construits par rapport au pont pour la validation de la méthode de suppression.....	37
Figure 26: Exemple de sortie du script de validation de suppression des ponts.....	38
Figure 27: Logigramme correspondant au fonctionnement de r.carve.....	39
Figure 28: Exemple de MNT traité par r.carve.....	40
Figure 29: Trois étapes de l'exécution de l'algorithme pour rétablir un tronçon de cours d'eau souterrain..	41
Figure 30: Exemple de cours d'eau souterrain rétablis sur le Malvan.....	42
Figure 31: Logigramme de la chaîne de traitements pour l'ajout des bâtiments.....	43
Figure 32: Exemple de bâtiments ajoutés au MNT initial.....	44
Figure 33: Exemple de bâtiment non-rastérisé.....	45

# Remerciements

Je tiens à remercier mes deux encadrants de stage, Laurence Jolivet et Olivier Payrastre pour m'avoir guidé tout au long de ces cinq mois, pour leur disponibilité et leurs retours.

Je remercie également Octave Perrin de Brichambaut, stagiaire de géovisualisation sur la même thématique, avec lequel j'ai beaucoup échangé sur nos sujets.

Ce stage fut pour moi l'occasion de découvrir le monde de la recherche, qui m'était jusqu'alors pleinement inconnu. J'ai beaucoup apprécié les échanges avec l'équipe du LaSTIG, que je remercie pour son accueil.

# Liste des acronymes

**CCR** - Caisse centrale de réassurance

**CEREMA** - Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

**GERS** - Géotechnique, environnement, risques naturels et sciences de la terre

**IFSTTAR** - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

**IGN** - Institut national de l'information géographique et forestière

**LaSTIG** - Laboratoire en sciences et technologies de l'information géographique

**LEE** - Laboratoire eau et environnement

**MNE** - Modèle numérique d'élévation

**MNS** - Modèle numérique de surface

**MNT** - Modèle numérique de terrain

**PICS** - Prévision immédiate intégrée de l'impact des crues soudaines

**SCHAPI** - Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations

**SRTM** - Shuttle radar topography mission

# Introduction

L'inondation est l'aléa naturel concernant le plus de personnes en France, où il est également le plus destructeur (ecologie-solidaire.gouv.fr, 2019). La prévision des crues est donc une démarche essentielle à la sécurité nationale. Ces prévisions sont majoritairement assurées au sein des services de prévision des crues du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, et localement par certaines collectivités territoriales. Elles sont effectuées par bassin hydrographique, et sont réalisées grâce au suivi des précipitations. Elles peuvent également être complétées par l'étude de simulations numériques s'appuyant sur des modèles hydrauliques pour identifier les zones inondées prévues. L'enjeu est de pouvoir identifier les zones vulnérables et de protéger les populations. Ces modèles devraient notamment permettre de simuler des phénomènes de crues-éclair qui sont particulièrement dévastateurs du fait de leur imprévisibilité.

Il s'agit d'un des objectifs du projet ANR PICS<sup>1</sup>, pour Prévision Immédiate Intégrée de l'Impact des Crues Soudaines, qui vise à anticiper de quelques heures l'impact des crues-éclair sur les zones peuplées en se reposant sur des modélisations hydrauliques. Coordonné par le département Géotechnique, Environnement, Risques et Sciences de la Terre (GERS) de l'IFSTTAR, il compte entre autres comme partenaires le SCHAPI, le CEREMA, et la CCR qui apportent leur expertise en matières de modélisation et de prévision. Par ailleurs, UrbaRiskLab est un projet sur plusieurs années (2018-2023) sous forme d'incubateur de recherches rassemblant des membres de l'UPEM et des acteurs publics et privés pouvant ainsi mettre en commun leurs problématiques et leurs compétences sur le thème des risques en milieu urbain.

Les travaux de recherche récents portent sur la possibilité d'utiliser ces modélisations hydrauliques pour d'une part lancer des prédictions de phénomènes rapides, et d'autre part effectuer ces prédictions à grande échelle, c'est-à-dire ici sur une large emprise géographique. Ces modélisations sont par contre soumises à la disponibilité des données de description du terrain sur le territoire. Les modélisations hydrauliques s'appuient sur des représentations du terrain, sous forme soit de profils transversaux aux cours d'eau soit de modèles numériques de terrain (MNT). Ces représentations doivent être fidèles à la topographie des cours d'eau et des bassins versants pour assurer la continuité de l'écoulement et pour simuler correctement la montée de l'eau. La problématique dans laquelle s'inscrit ce stage est alors de fournir une description adaptée du terrain en entrée des modèles hydrauliques. Plusieurs bases de données topographiques et altimétriques qui décrivent les constructions humaines et le terrain sont disponibles sur une couverture nationale voire mondiale comme la BD TOPO, le RGE Alti et le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) produit par la NASA. Cependant ces données ont généralement une précision trop faible pour décrire le cours d'eau de manière adaptée à une exploitation au sein d'une modélisation. Des informations plus précises en temps, en localisation et en mesures existent mais sont discrètes spatialement, réparties irrégulièrement selon les zones géographiques, et souvent imparfaites pour l'utilisation souhaitée. Il est donc intéressant d'étudier l'opportunité d'adapter les données disponibles sur une couverture nationale aux besoins en entrée des modélisations hydrauliques pour permettre à la fois la simulation d'inondation à grande échelle, mais également la documentation de nouveaux tronçons de cours d'eau non couverts par les scénarios actuels.

L'IGN et l'IFSTTAR participent à UrbaRiskLab et ont donc proposé dans ce cadre deux sujets de stages liés aux cas d'étude du projet PICS. L'un se concentre sur l'étude la qualité du MNT en entrée de la modélisation hydraulique alors que le second sujet porte sur la proposition de visualisations des résultats de simulation. Ce mémoire décrit les réalisations du stage sur le premier sujet des possibilités d'amélioration des données altimétriques disponibles pour permettre une représentation fidèle des écoulements. Il s'est déroulé sur 5 mois et a été réalisé au sein du Laboratoire de Sciences et Technologies de l'Information Géographique (LaSTIG) de l'IGN et co-encadré avec le LEE de l'IFSTTAR.

<sup>1</sup> <http://pics.ifstar.fr/>



# I — Contexte et objectifs du stage

Nous souhaitons adapter la qualité d'un MNT à une modélisation hydraulique. Cette partie définit les types de modélisation utilisées par le projet PICS, en incluant notamment la description des données entrantes, sortantes, et leurs limites, puis aborde les objectifs du stage.

## I.1 — Modélisations hydrauliques et données nécessaires

Une modélisation est une « opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe, afin d'étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de tel ou tel de ses éléments composants » (Giraud et al., 1974). Il est ainsi entendu que la finalité d'une modélisation est l'observation de la variation des résultats selon un ou plusieurs paramètres. Les modélisations s'appliquent par exemple à l'étude de phénomènes d'origines et de manifestations complexes tels que le climat, l'activité sismique ou encore les écoulements en rivière. Elles peuvent être mécaniques (maquettes) ou numériques (programmes informatiques).

On distingue deux catégories de modèles hydrauliques numériques : les modèles mécanistes, qui reposent notamment sur des concepts physiques de mécanique des fluides, et les modèles empiriques qui ne considèrent que les relations observées entre les entrées et les sorties du système (Roux, 2004). Les modèles mécanistes, plus génériques, vont donc permettre d'apprécier les effets de conditions climatiques particulières sur la propagation et la vitesse de l'eau dans une certaine configuration de terrain. La Figure 1 illustre les principales entrées et sorties d'une modélisation mécaniste ayant l'objectif de représenter les flux d'eau.

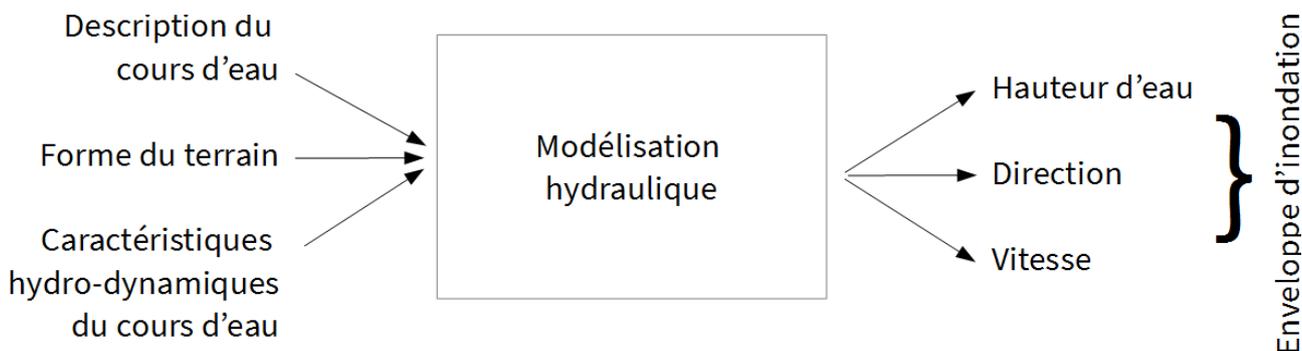


Figure 1: Entrées et sorties d'une modélisation mécaniste (source : d'après XPSolution)

Les concepts mobilisés par les modèles mécanistes qui étudient les écoulements à surface libre reposent principalement sur la résolution des équations de Barré de Saint-Venant qui calculent les caractéristiques de l'écoulement comme la hauteur d'eau, la direction, et la vitesse.

Cependant, la géométrie du cours d'eau prise en compte en entrée varie selon le type de modélisation, 1-D ou 2-D. Ce mémoire s'appuie sur ces représentations géométriques, nous les définissons donc dans les deux parties suivantes.

### I.1.1 — Modèles 1-D

Dans le cas d'une modélisation 1-D, la topographie du cours d'eau et du terrain avoisinant est représentée par une succession de profils en travers positionnés le long de la géométrie linéaire de ce cours d'eau, comme illustré en Figure 2. La prise en compte de la topographie à l'intérieur et autour du cours d'eau se limitant à ces profils est donc spatialement discrète et la distance entre ces profils peut être régulière ou irrégulière. Ceci permet de sélectionner les endroits représentatifs de la topographie du cours d'eau et par conséquent de ne pas prendre en compte selon les données, certains artefacts ou éléments non pertinents tels que des ponts qui seraient représentés. L'emprise des résultats se limitant à la largeur des profils, le modèle 1-D se prête davantage aux cours d'eau dont les débordements sont peu étendus et qui sont entourés de peu d'obstacles à l'écoulement pour proposer des résultats de simulation cohérents (Roux, 2004).

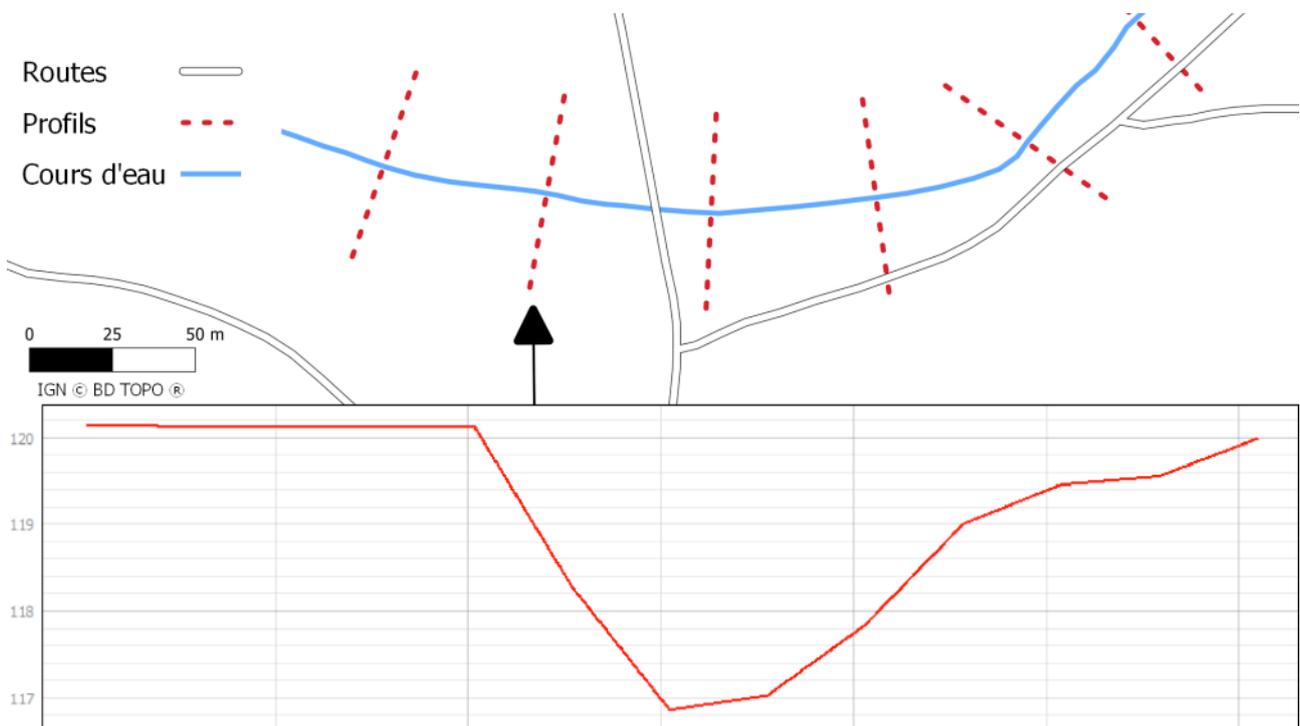


Figure 2: Profils en travers centrés et perpendiculaires à la géométrie linéaire d'un cours d'eau et section transversale de ce cours d'eau estimées à partir d'un MNT. Si les routes sont également représentées dans le MNT correspondant, celles-ci peuvent ainsi ne pas être prises en compte au niveau des ponts.

Plusieurs modèles, libres comme propriétaires, sont disponibles pour réaliser des modélisations hydrauliques 1-D. Parmi les logiciels libres il est possible de citer HEC-RAS<sup>2</sup> et GRASS GIS<sup>3</sup>, qui trouvent leur origine dans le corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis, ou encore CARTINO (Pons, 2014) conçu par le CEREMA. Le modèle le plus utilisé en prévision des crues est le modèle Mascaret d'EDF (Goutal et al., 2012).

<sup>2</sup> <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

<sup>3</sup> r.inund. fluv : [https://grasswiki.osgeo.org/wiki/AddOns/GRASS\\_6](https://grasswiki.osgeo.org/wiki/AddOns/GRASS_6)

## I.1.2 — Modèles 2-D

La modélisation 2-D prend en compte l'ensemble de la topographie de manière continue et s'appuie sur un modèle numérique de terrain (MNT). Les simulations s'appuyant sur ce type de modèle s'exécutent sur l'intégralité des cellules du MNT d'un site d'étude sélectionné. Cette modélisation s'adapte par conséquent à la représentation de débordements dans des zones contenant beaucoup d'obstacles à l'écoulement telles que les zones urbaines. Elle est en contrepartie sensible aux imperfections du MNT comme la simplification du terrain en fonction de la résolution du MNT (ex. contour flou du lit), des approximations d'interpolation (sur-élevations et sous-élevations locales), la présence d'éléments du terrain non retirés au sein du lit du cours d'eau et qui pourraient faire obstacle de manière irréaliste à l'écoulement (ex. ponts).

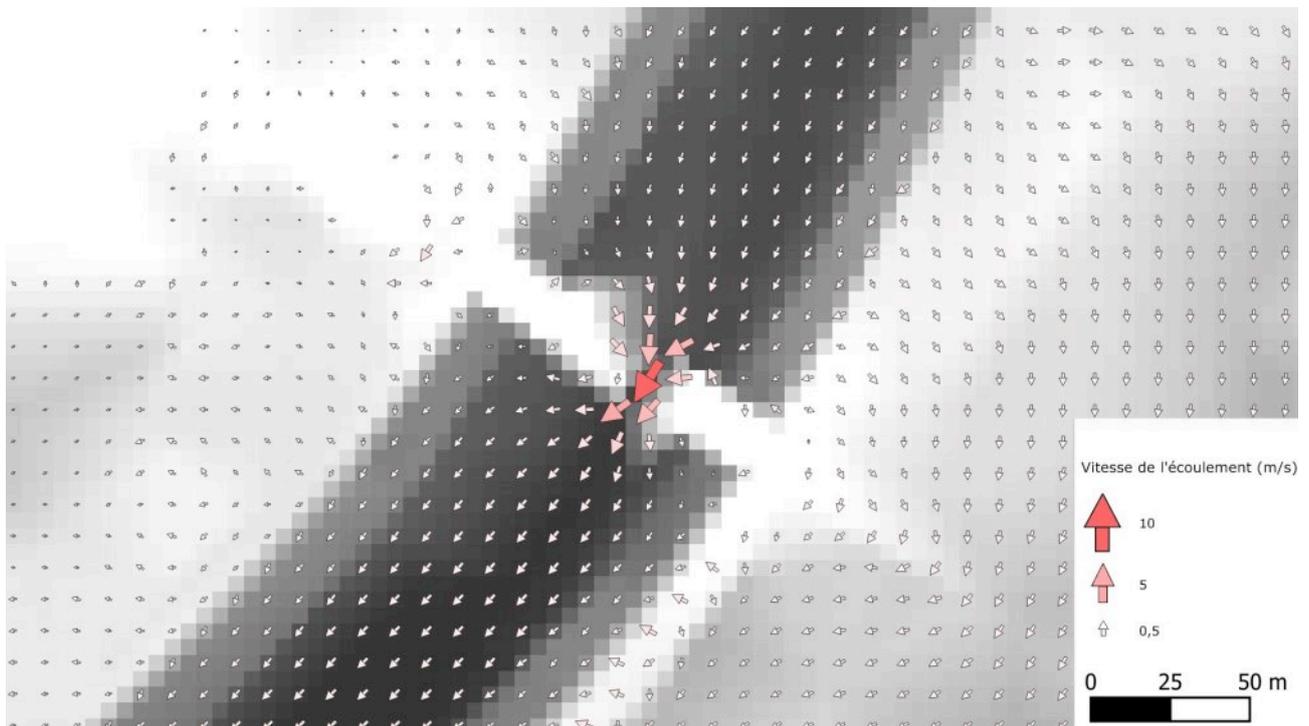


Figure 3: Directions et vitesses d'écoulement résultant d'une simulation s'appuyant sur une modélisation 2-D du terrain (Perrin de Brichambaut, 2019). On remarque un pont partiellement supprimé dont le goulot d'étranglement se traduit dans de plus fortes valeurs de vitesses.

Évoqué précédemment, HEC-RAS permet la modélisation 2-D en plus de la 1-D. L'UMR Géosciences Rennes développe par ailleurs le modèle Floodos (Davy et al., 2017). Le résultat de la Figure 3 a été obtenu à l'aide de ce dernier.

## I.2 — Objectifs du stage

Les objectifs de ce stage s'incluent dans ceux d'UrbaRiskLab et en particulier de ceux amenés par le projet PICS. Le projet PICS vise à automatiser la modélisation d'inondations à partir de MNT haute résolution sur les tronçons pouvant être sujets à des crues soudaines afin de documenter leur impact potentiel. La visée finale, comme précisé en introduction, est de permettre une anticipation de quelques heures des phénomènes de crues dommageables ou dangereux. L'enjeu est donc d'obtenir des résultats pertinents, dans un temps restreint et sur potentiellement l'ensemble du territoire.

Cependant, les modélisations hydrauliques mécanistes et notamment 2-D sont gourmandes en temps de calcul et ne se prêtent donc pas à un lancement en temps réel. Une réactivité efficace nécessite la réalisation d'une base de scénarios en amont d'un épisode pouvant amener à des inondations (Guinot, 2003). Ces scénarios sont basés sur les périodes de retour d'inondation, qui correspondent à la fréquence probable d'occurrence d'un phénomène, ici une quantité de précipitations pluvieuses sur une zone donnée, et impliquent de disposer de données topographiques sur l'ensemble du territoire. Or, les MNT disponibles sur le territoire et qui représentent fidèlement les cours d'eau et les obstacles dans les zones d'inondation potentielle sont issus de campagnes ponctuelles de relevés et non de données disponibles au niveau national.

L'objectif est donc de proposer des méthodes d'amélioration et d'adaptation aux modèles hydrauliques des informations altimétriques comprises dans les MNT existants en s'appuyant sur des données de référence et disponibles à l'échelle du territoire telles la BD TOPO. La disponibilité des données mobilisées pour cette étude est une contrainte forte mais elle permet ainsi d'assurer au maximum une reproductibilité et une automatisation à grande échelle. Cette amélioration consiste en plusieurs axes qui seront développés au sein de ce mémoire. Les produits finaux attendus seront des MNE issus des MNT initiaux dans lesquels les obstacles au sein du lit du cours d'eau ont été supprimés et les bâtiments issus de la BD TOPO ajoutés.

## I.3 — Description des cas d'étude

Les deux cas d'étude du stage sont issus du projet PICS et ont été fournis par l'IFSTTAR. Nous les nommerons d'après le nom du cours d'eau principal correspondant : le Gardon d'Alès et la Cagne. Chaque cas correspond à un site d'étude particulier à risque potentiel, sur lequel sont disponibles un MNT et des résultats de simulation d'inondations obtenus par le modèle 2D Floodos. Ces cas d'étude ont été choisis pour la qualité de leur représentation du cours d'eau dans chacun des deux MNT, ce qui est une donnée rare parmi les référentiels dont ce n'était pas l'objectif initial. Les recherches de l'IFSTTAR explorent les méthodes de modélisation hydraulique en utilisant entre autres ces cas d'étude, parmi lesquelles la thèse de Guillaume Le Bihan (Le Bihan, 2016) et le stage de Nabil Hocini (Hocini, 2018) actuellement poursuivi en thèse.

### Le Gardon d'Alès

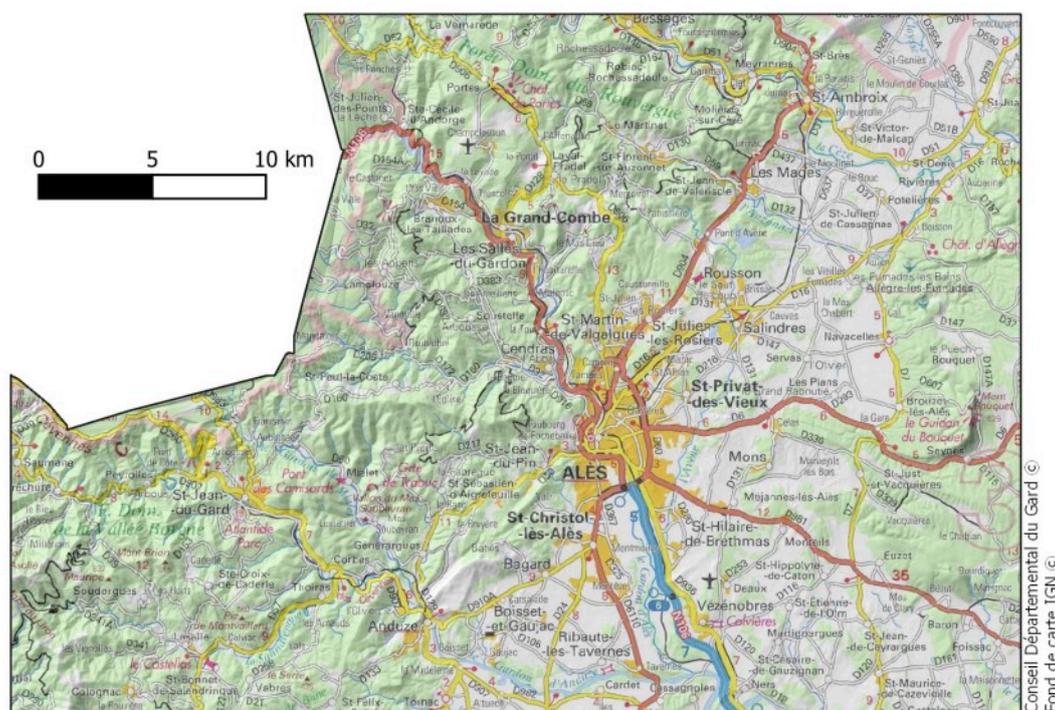


Figure 4: Site du cas d'étude du Gardon d'Alès comprenant la zone particulièrement vulnérable de la ville d'Alès et de ses environs (emprise correspondant à celle du MNT fourni).

Le premier cas d'étude (Figure 4), d'une superficie d'environ 1375 km<sup>2</sup>, couvre l'intégralité du Gardon d'Alès avec précision par sa résolution, et représente fidèlement une partie de ses affluents. Le MNT a été réalisé par le Conseil Départemental du Gard en 2008. Sa résolution est de 5 m et la qualité du MNT suppose une acquisition selon les secteurs par Lidar ou par radar, ce qui ne peut être confirmé car aucune métadonnée n'est associée au MNT. D'un point de vue des améliorations à apporter pour la modélisation hydraulique, les ponts sont encore présents en travers des lits de cours d'eau et les bâtiments ne sont logiquement pas représentés alors qu'ils peuvent avoir une influence sur l'écoulement et qui sont donc pertinents à inclure dans les élévations en entrée de la simulation.

# La Cagne

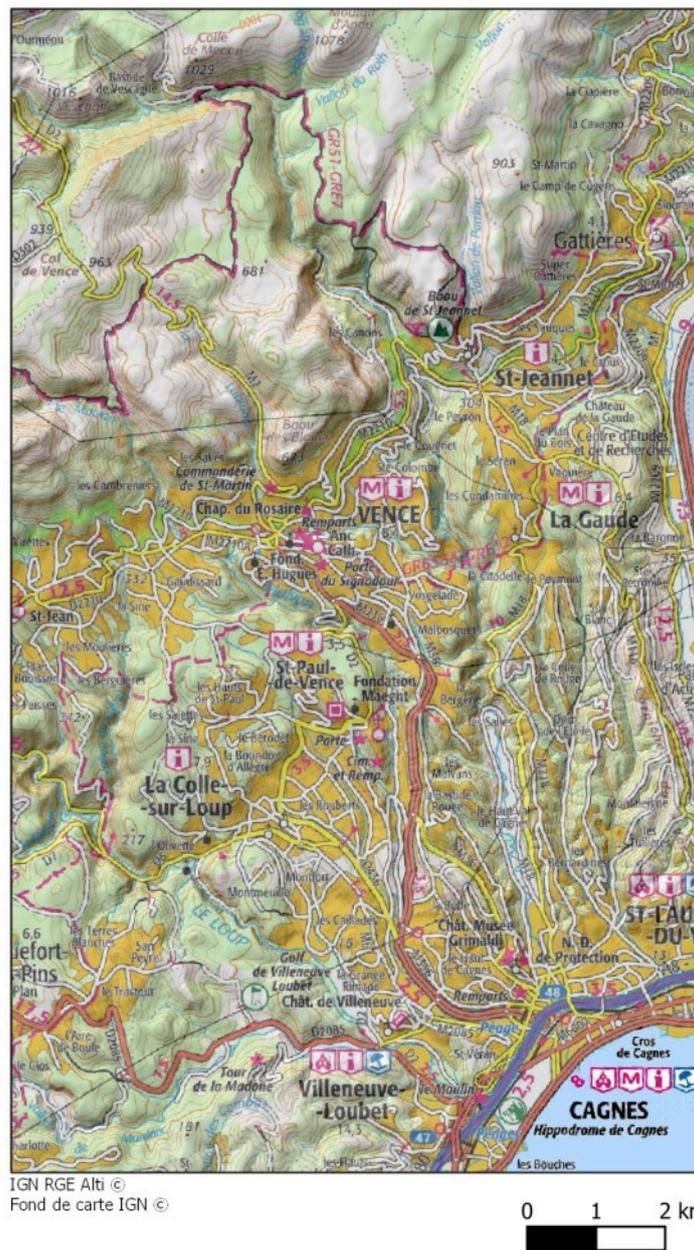


Figure 5: Site du cas d'étude de la Cagne dans le sud des Alpes-Maritimes.

Le site de la Cagne (Figure 5) s'étend sur 170 km<sup>2</sup> et est centré sur la ville de Cagnes-sur-Mer située sur le littoral méditerranéen. Il comprend la partie côtière, le fleuve de la Cagne ainsi que plusieurs cours d'eau affluents de la Cagne ou qui se jettent directement dans la mer. Le MNT fourni provient du RGE Alti de l'IGN de résolution initiale 1 m, ayant été rééchantillonné à 5 m pour alléger les calculs de simulation. Les ponts ne sont pas présents contrairement au cas du Gardon d'Alès. Les bâtiments sont de même absents. Conformément au terrain, le MNT comporte de larges portions de cours d'eau souterraines, ce qui ne permet pas de conserver une continuité dans l'écoulement de l'eau et constitue donc un obstacle majeur à des résultats de simulation hydraulique satisfaisants.

## **En résumé**

Les MNT des cas d'étude du Gardon d'Alès et de la Cagne représentent tous deux les cours d'eau avec fidélité, mais nécessitent chacun des adaptations pour permettre l'exécution d'une simulation hydraulique. Dans le premier cas, les ponts sont encore représentés et vont faire obstacle à l'écoulement, leur suppression est donc nécessaire. Dans le second cas, plusieurs portions de cours d'eau souterraines empêchent également l'écoulement et doivent apparaître comme étant à l'air libre. Enfin, les bâtiments sont absents des deux cas et doivent apparaître pour permettre une représentation fidèle de l'inondation en zone urbaine.

## II - État de l'art sur les MNT et leurs utilisations

Le stage porte sur la fourniture d'une description du terrain conforme aux besoins en entrée des modèles hydrauliques. Le modèle utilisé dans le contexte de nos cas d'étude est Floodos qui prend en entrée des MNT. Nous présentons dans cette partie les caractéristiques des MNT et les traitements qui leur sont appliqués afin d'améliorer la correspondance à la description du terrain souhaitée.

### II.1 - Caractéristiques des MNT existants

Un MNT, pour Modèle Numérique de Terrain, est une représentation du relief sous une forme numérique. Le terme est souvent employé de manière générique pour désigner toute représentation 2,5D d'une surface géographique, chacune ensuite à préciser par un terme propre :

- MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui représente la topographie au sens strict c'est-à-dire uniquement le terrain sans le sursol.
- MNS (Modèle Numérique de Surface) qui représente le terrain avec le sursol.

On rencontre également les termes Modèle Numérique d'Altitude ou Modèle Numérique d'Élévation comme synonymes de MNS ou d'hybrides entre MNT et MNS. La représentation est le plus souvent en format raster découpant l'espace selon une maille à pixels carrés et dans lequel un pixel a une valeur d'altitude unique.

Les caractéristiques des MNT dépendent de la méthode d'acquisition des informations altimétriques et de leur prise en compte (ex. interpolation). Plusieurs méthodes d'acquisition existent, permettant d'obtenir des points d'altitude connue et elles sont choisies selon les cas pour des questions de coût, de précisions spatiale, temporelle et de mesure, et d'emprise à couvrir. Les plus communément utilisées sont :

- La photogrammétrie : procédé qui consiste à mettre en corrélation deux images afin d'obtenir un volume par stéréoscopie. Les capteurs photographiques sont aéroportés ou satellitaires. Cette méthode peut être mise en œuvre quelle que soit l'emprise ciblée pour réaliser des MNS mais rend compte de l'intégralité des reliefs présents sur la photographie (végétation, bâti, etc.) et complique donc le passage à un MNT.
- La radargrammétrie : d'un fonctionnement similaire à la photogrammétrie par corrélation d'images d'amplitudes, le capteur peut être aéroporté ou satellitaire. La radargrammétrie est utilisée, à l'instar de la photogrammétrie, pour couvrir la Terre (ex. SRTM) mais est aussi adaptée sur des emprises plus restreintes pour des zones montagneuses.
- L'interférométrie laser : le capteur laser (Lidar) va émettre un faisceau lumineux en direction du sol et recevoir (ou non) un ou plusieurs échos qui vont permettre de catégoriser les relevés (par ex. en sol ou en végétation ou autre). Utilisé en aéroporté pour réaliser des MNT, il est généralement utilisé pour effectuer des relevés locaux.

Le passage du nuage de points acquis à une représentation de l'altitude en tout point de l'espace est réalisé par interpolation. Cette opération consiste à calculer des valeurs intermédiaires entre les points relevés pour obtenir une image et ainsi un MNT raster. Plusieurs algorithmes d'interpolation existent et s'appliquent selon la répartition et la densité des points. Deux exemples d'interpolation largement utilisées pour les MNT sont l'algorithme de pondération inverse à la distance (IDW) adapté à un nuage de points répartis uniformément, et celui de réseau irrégulier triangulé (TIN) pour des points à distribution spatiale irrégulière. L'interpolation peut également être source d'inexactitudes en faisant apparaître, par exemple, des zones parfaitement plates si la densité des points est insuffisante (Rousseaux, 2004). Les deux MNT que nous utilisons sont issus d'un assemblage de MNT de sources et de qualités diverses.

## II.2 - Traitements des MNT selon les cas d'utilisation

L'utilisation d'un MNT peut nécessiter, selon le domaine d'étude, que certaines caractéristiques topographiques soient représentées avec une précision plus ou moins grande. Par exemple, pour corriger géométriquement des orthophotographies de 25 cm de résolution, une grande précision est requise. La précision nécessaire lors de support à l'analyse du terrain peut être diminuée afin de pouvoir lancer rapidement des calculs sur de relativement grandes zones, par exemple de visibilité pour le secours en montagne (projet CHOUCAS<sup>4</sup>) ou d'analyse de risques (Rousseaux, 2004). Cette précision est encore amoindrie pour des représentations visuelles à petite échelle.

Cependant, selon la localisation et l'emprise de la zone d'étude, la donnée idéale peut ne pas être disponible ou si elle l'est, présente en plusieurs MNT d'emprise, de résolution, et d'acquisition variées. Il s'agit donc d'être capable de construire un MNT satisfaisant au cas d'utilisation afin d'éviter que le MNT ne soit source de trop d'imperfections pouvant conduire à des erreurs d'analyse. Un exemple de cet état de fait se trouve dans Ravanel (2010) qui considère l'utilisation des MNT pour déterminer le volume des écroulements rocheux sur le Mont-Blanc. La nature frontalière du massif a imposé un assemblage de MNT de sources diverses, dont la partie française proposait une résolution insuffisante à l'étude. Cette dernière a pu être améliorée par numérisation et interpolation des courbes de niveau et points cotés de cartes topographiques. Par ailleurs, une amélioration possible peut consister en une adaptation de l'interpolation des informations d'altitude. Charleux-Demargne (2001) et Rousseaux (2004) évoquent notamment les erreurs d'interpolation des acquisitions discrètes qui conduisent à la représentation de zones plates ou encore de dépressions sur quelques pixels, et dont la présence peut avoir un impact sur la représentation des écoulements pour les analyses en hydrologie. Le traitement de ces cas est aujourd'hui assuré par des algorithmes implémentés au sein des logiciels de SIG (Hentati et al., 2008).

Les sources ne se limitent donc pas aux MNT mais à toute donnée altimétrique disponible. Les besoins en représentation du relief peuvent également comprendre des éléments du sursol. Rousseaux (2004) s'intéresse à la complétion d'un MNT à l'aide de données 2,5D des routes et bâtiments de la BD TOPO, et dont la présence a un impact fort sur des études de vulnérabilité à l'inondation ou des calculs d'intervisibilité. Notre approche est similaire et s'appuie sur un croisement des sources de données pour permettre d'aboutir à un MNT correspondant à une représentation de l'espace satisfaisante et de conduire l'étude voulue.

<sup>4</sup> <http://choucas.ign.fr/>

### III — Approche générale

L'approche générale adoptée pour répondre à nos objectifs a consisté à croiser différentes sources de données afin d'adapter le MNT en format raster fourni par cas d'étude. Il est en effet plus facile de sélectionner et de sémantiser les pixels d'un raster en s'appuyant sur une base de données vectorielle existante qu'à partir du MNT seul. Cela nous a donc paru adapté pour catégoriser les pixels correspondant à des cours d'eau ou à des éléments du paysage comme des ponts. Toutefois, avoir recours à plusieurs bases de données signifie plusieurs dates de réalité terrain et plusieurs spécifications de contenu. En plus de cette différence de dates, la donnée vectorielle n'est pas forcément en accord spatialement avec le MNT. Il peut y avoir des décalages et des différences d'emprise. Pour répondre à la contrainte de PICS de permettre l'exécution des traitements à grande échelle, les données mobilisées pour les traitements d'adaptation des MNT proviendront de la BD TOPO de l'IGN. Leur disponibilité et leur homogénéité de spécification garantit une reproductibilité de traitements sur d'autres territoires que ceux des cas d'étude.

Les traitements ont été proposés par objectif du stage. La délimitation des berges est décrite en partie IV. Les traitements pour rétablir l'écoulement en supprimant les obstacles sont présentés en partie V. L'ajout d'obstacle comme les bâtiments est détaillé en partie VI. Pour tous les objectifs, nous nous sommes attachés à valider ou au moins qualifier les résultats obtenus par les traitements effectués. Cependant, ce fut l'une des difficultés car nous ne disposons d'une réalité terrain que partielle et à certaines dates, fournie par des bases de données existantes et l'imagerie. Il sera donc nécessaire de mettre en place des démarches qui permettront d'analyser les MNT modifiés et des indicateurs pour comparer les nouvelles valeurs à celles des MNT initiaux. Ces démarches seront détaillées par objectif dans chacune des parties suivantes.

La nécessité de réaliser ces différents traitements sur de larges emprises géographiques implique d'en permettre l'automatisation. Les développements lors de ce stage ont été effectués en Python sous QGIS 3 car ils offrent, couplés aux différentes bibliothèques disponibles, une couche d'abstraction performante et confortable, et permettent par le modèleur graphique de chaîner les traitements. Cela nous a conduit au développement de plusieurs scripts et modèles s'appuyant sur la bibliothèque Processing<sup>5</sup> indépendants les uns par rapport aux autres, permettant de compartimenter les différents traitements et de réaliser des briques logicielles modulaires et aisément réutilisables. Tous les développements réalisés sont sous licence libre GNU GPLv3 et se trouvent sur le site d'hébergement Github<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> [https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/training\\_manual/processing/index.html](https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/training_manual/processing/index.html)

<sup>6</sup> <https://github.com/jeremyk6/>

## IV — Délimitation des berges

Délimiter la berge représente un objectif transversal au sein de ce stage. Sa délimitation peut, d'une part faire partie de l'entrée de la modélisation hydraulique pour affiner ses paramètres qui diffèrent entre le lit mineur et la plaine d'inondation, soit le lit majeur, et d'autre part peut servir de donnée de référence pour reconstruire le cours d'eau lorsqu'il est absent du MNT ou présent de façon discontinue.

### IV.1 — Définitions d'une berge

La berge peut être complexe à définir et à déterminer. Elle dépend du domaine d'étude, l'hydrologie ayant un point de vue plus général ou différent de la limnologie, de l'écologie ou de la navigation. Elle dépend également du type de zone étudiée, une berge de rivière différant d'une berge de littoral maritime (aqua-portail.com, 2018). Le point de vue qui nous intéresse ici concerne la limnologie, une spécialisation de l'hydrologie qui s'intéresse à l'étude des eaux intérieures au territoire. Les berges correspondent aux bords du lit mineur d'un cours d'eau.

Selon le code de l'environnement français, Article L215-7-1, un cours d'eau est « *un écoulement d'eaux courantes dans un lit naturel* », qui peut être intermittent ou permanent selon ses caractéristiques hydrogéologiques. On distingue plusieurs lits d'écoulement définis en fonction du débit du cours d'eau, listés ici selon leur largeur croissante : le lit d'étiage, le lit mineur, le lit moyen, le lit de plein bord, et le lit majeur<sup>7</sup> (Figure 6).

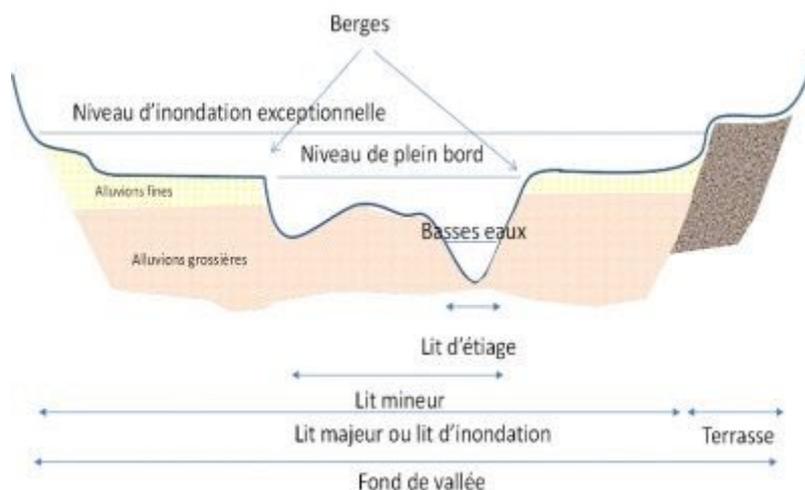


Figure 6: Description d'une section transversale de cours d'eau avec l'indication des différents types de lits d'écoulement (Source : [encyclopedie-environnement.org](http://encyclopedie-environnement.org))

La limite du lit mineur, et donc des berges, se trouve définie par le niveau de plein bord qui correspond au niveau limite de débordement vers le lit majeur.

<sup>7</sup> <http://www.glossaire-eau.fr>

## IV.2 — Approche par l'indicateur de profondeur hydraulique

Il est possible de trouver dans la littérature des exemples de télédétection de la berge par segmentation d'image (Aher et al., 2014), essentiellement pour étudier son érosion. La catégorisation de points lidar est également utilisée pour des études plus locales (Michez et al., 2013). L'approche choisie s'appuie sur celle de Cencetti et al. (2014) et repose sur leur algorithme Bankfull width detection. Celle-ci mobilise l'indicateur de profondeur hydraulique pour détecter la hauteur qui correspond au niveau de plein bord pour déterminer la berge. Un plugin QGIS correspondant est disponible. Nous avons utilisé le code existant implémentant l'algorithme. Nous l'avons passé en Python 3 et nous avons adapté certains paramètres, fonctions et affichages (voir IV.2.3).

### IV.2.1 — L'indicateur de profondeur hydraulique

L'indicateur de profondeur hydraulique, ou profondeur moyenne, qui se calcule sur une section transversale de cours d'eau, correspond au rapport entre la largeur au miroir et la surface mouillée (Figure 7). La formule est :

$$\text{Profondeur hydraulique} = \frac{\text{Largeur au miroir}}{\text{Surface mouillée}}$$

La profondeur hydraulique est à distinguer du tirant d'eau qui est la profondeur maximale d'une section, et à laquelle elle correspond uniquement dans le cas d'une section rectangulaire.

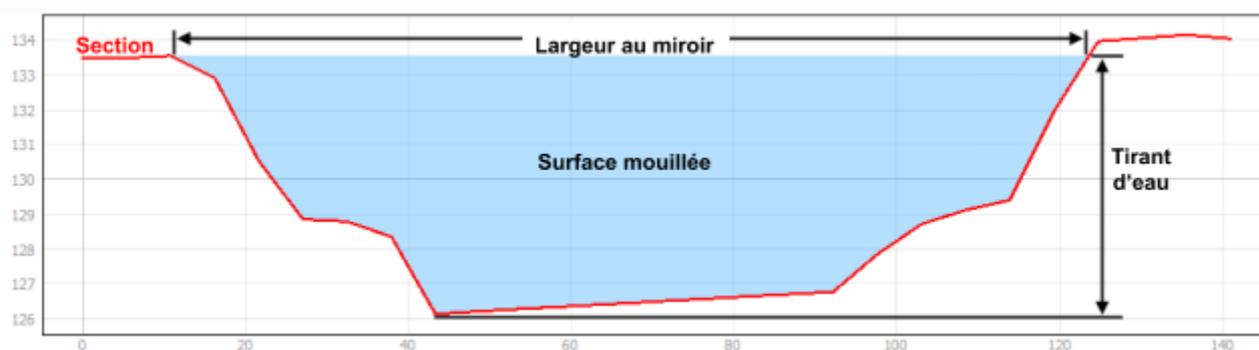


Figure 7: Mesures mobilisées pour l'indicateur de profondeur hydraulique calculé sur une section transversale.

Il est alors possible de visualiser l'intérêt de mobiliser cet indicateur pour détecter la berge. En effet, la surface mouillée de même que la largeur au miroir vont croître en fonction de la montée de l'eau. L'indicateur de profondeur hydraulique qui correspond à une profondeur moyenne de l'eau va évoluer selon la géométrie de la section. Il peut ainsi croître de manière linéaire sur une section transversale aux pentes rectilignes, mais il décroît en présence d'une terrasse alluviale horizontale qui abaisse cette profondeur moyenne car la surface mouillée augmente proportionnellement moins rapidement que la largeur au miroir (Williams, 1978).

## IV.2.2 — Description de l’algorithme Bankfull Width Detection

L’algorithme (dont le logigramme se trouve en Annexe 2) se base sur l’indicateur décrit en IV.2.1 : sur chaque section transversale, la hauteur d’eau est augmentée selon un pas défini et pour chaque hauteur est calculée la profondeur hydraulique. La courbe de la profondeur hydraulique par rapport à la hauteur d’eau est ensuite réalisée et lissée pour éliminer le bruit et les maximums locaux les moins significatifs à l’aide d’un paramètre de lissage (*smoothing parameter* nommé *spar*) choisi à chaque exécution et qui induit une part d’aléatoire (voir IV.3.1). La hauteur qui correspond au premier maximum local est ensuite considérée comme niveau de plein bord (Figure 8).

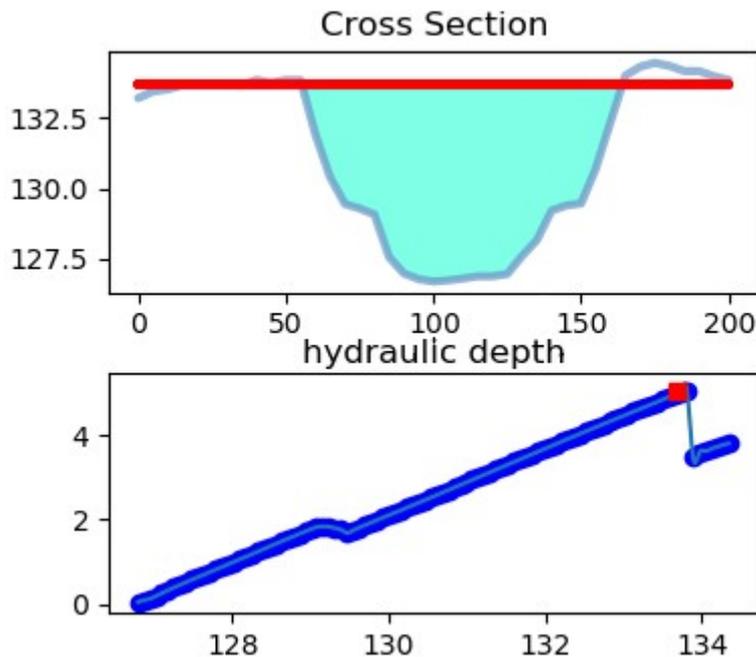


Figure 8: Détection de la berge : section transversale avec le polygone de berge et graphe correspondant de l’indicateur de profondeur hydraulique. Il s’agit d’une sortie permise par le plugin sur un profil isolé.

Plusieurs paramètres sont à définir en entrée de l’algorithme pour obtenir le résultat des deux points de limite de la berge : un nombre de pas de hauteur d’eau qui correspondra au nombre de points de la courbe, ainsi qu’une hauteur d’eau minimum. Le pas permet d’affiner la détection de la hauteur des terrasses. La hauteur minimum filtre les terrasses basses. Pour l’exemple en Figure 8, 100 pas et une hauteur d’eau minimum de 3 m ont été fournis en entrée pour permettre la détection du niveau de plein bord. Une hauteur moindre aurait mené à la détection de la berge au niveau de la première terrasse, visible sur le graphe autour de 129 m de hauteur.

Les deux points représentant les limites de la berge sont repérés sur la section transversale, puis la géométrie continue de la berge est reconstruite en reliant les géométries ponctuelles détectées pour chaque profil (Figure 9).

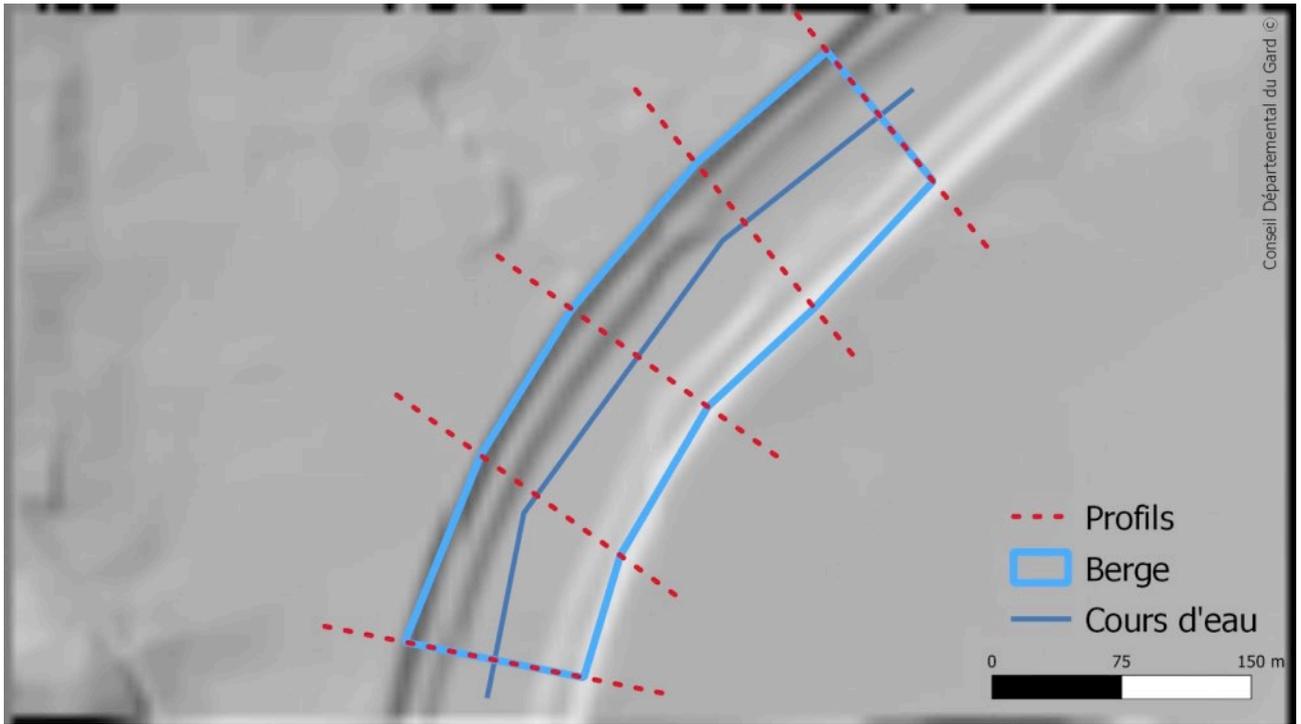


Figure 9: Exemple de résultat de berges obtenu sur une portion de cours d'eau.

## IV.2.3 — Améliorations apportées à l’algorithme Bankfull width detection

Le plugin initial n’est disponible que pour QGIS 2 et n’a pas été mis à jour depuis 2016. Pour l’intégrer à nos environnement de travail et chaîne de traitement, nous l’avons tout d’abord porté en Python 3 sous QGIS 3<sup>8</sup>.

Nous avons ensuite changé la structure du code dans la gestion de la géométrie de la section transversale et la génération des sorties.

Concernant la section transversale, la détection des berges a été modifiée dans sa gestion des géométries multipolygones pour prendre en compte un cas particulier présent dans nos cas d’étude. Il s’agit de la présence de talus en bordure de cours d’eau qui entraîne la génération de plusieurs polygones dans la section transversale (Figure 10).

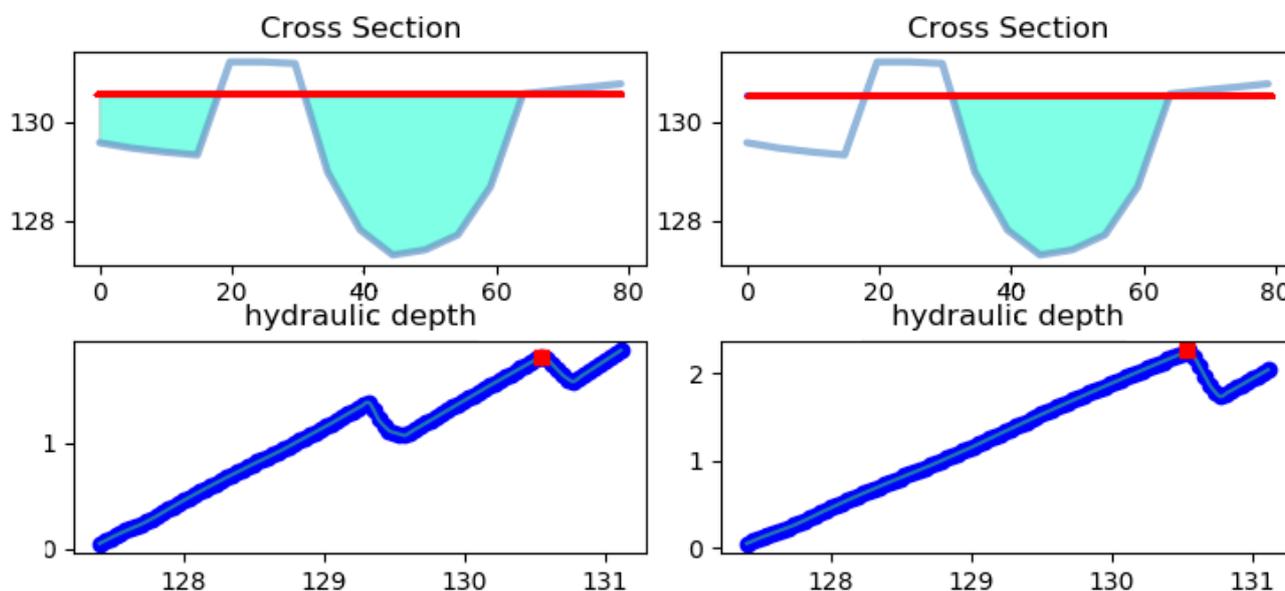


Figure 10: Algorithme initial (à gauche), algorithme modifié pour empêcher la détection d’un second polygone (à droite).

Dans l’algorithme initial, en cas de présence d’un talus, un second polygone est pris en compte, faisant apparaître un premier maximum local sur la courbe de la profondeur hydraulique et pouvant fausser le résultat de détermination de la géométrie des berges. Cette prise en compte est cependant intéressante pour les cours d’eau larges en limitant l’impact immédiat de seconds canaux sur la profondeur hydraulique. Nous avons donc proposé un troisième paramètre à l’algorithme correspondant à un seuil en hauteur pour limiter la prise en compte des polygones multiples à une profondeur donnée.

Concernant les sorties, nous avons modifié le code pour ne pas générer directement les deux points de berge pour chaque profil mais pour récupérer d’abord la valeur de hauteur d’eau détectée. Nous nous sommes appuyés sur cette valeur quantitative afin de conduire des tests sur l’influence de la dimension aléatoire à chaque exécution (détaillé en IV.3.1). Un nouvel onglet dédié à cet usage a été implémenté dans l’interface d’affichage des sorties et permet, sur un profil, d’exécuter l’algorithme plusieurs fois pour étudier la variation des résultats.

<sup>8</sup> <https://github.com/pierluigiderosa/BankFullDetection/pull/1>

## IV.3 — Résultats

Nous présentons les résultats obtenus pour les différents cours d'eau des sites d'étude. Nous commençons par étudier les hauteurs d'eau sélectionnées en sortie et l'intérêt d'un lissage aléatoire. Nous parcourons ensuite les résultats pour l'ensemble des cours d'eau des sites d'étude. Enfin les limites et perspectives de l'approche sont identifiées.

### IV.3.1 - Étude des profondeurs hydrauliques sélectionnées par lissage aléatoire

L'algorithme voit son paramètre de lissage spar de la courbe de profondeur hydraulique sélectionné entre 0 et 1 à chaque exécution à l'aide d'une fonction de validation croisée 10-fold. Cette fonction de validation permet de choisir le spar le plus adapté pour éliminer le bruit et les maximums locaux non-significatifs (Cencetti et al., 2014). Nous avons constaté que la sélection aléatoire des plis (fold) de validation influe sur le spar et par conséquent sur le résultat obtenu. Pour quantifier l'influence de cette variation, nous avons implémenté une fonction permettant de visualiser et d'obtenir les valeurs des hauteurs d'eau obtenues sur plusieurs exécutions. Les hauteurs d'eau variant essentiellement sur deux extrêmes de localisation de berges (nos cas d'études ne présentent pas de multiples terrasses candidates), l'indicateur de l'écart maximal entre les valeurs maximales et minimales est calculé. Cet indicateur permet d'estimer la qualité du résultat de l'algorithme : un écart faible indique une détection fiable alors qu'un écart important signifie une grande différence possible entre deux exécutions et donc une détection moins fiable. Les exemples de résultats issus de 30 exécutions sur deux cours d'eau larges sont illustrés en Figure 11 et Figure 12.

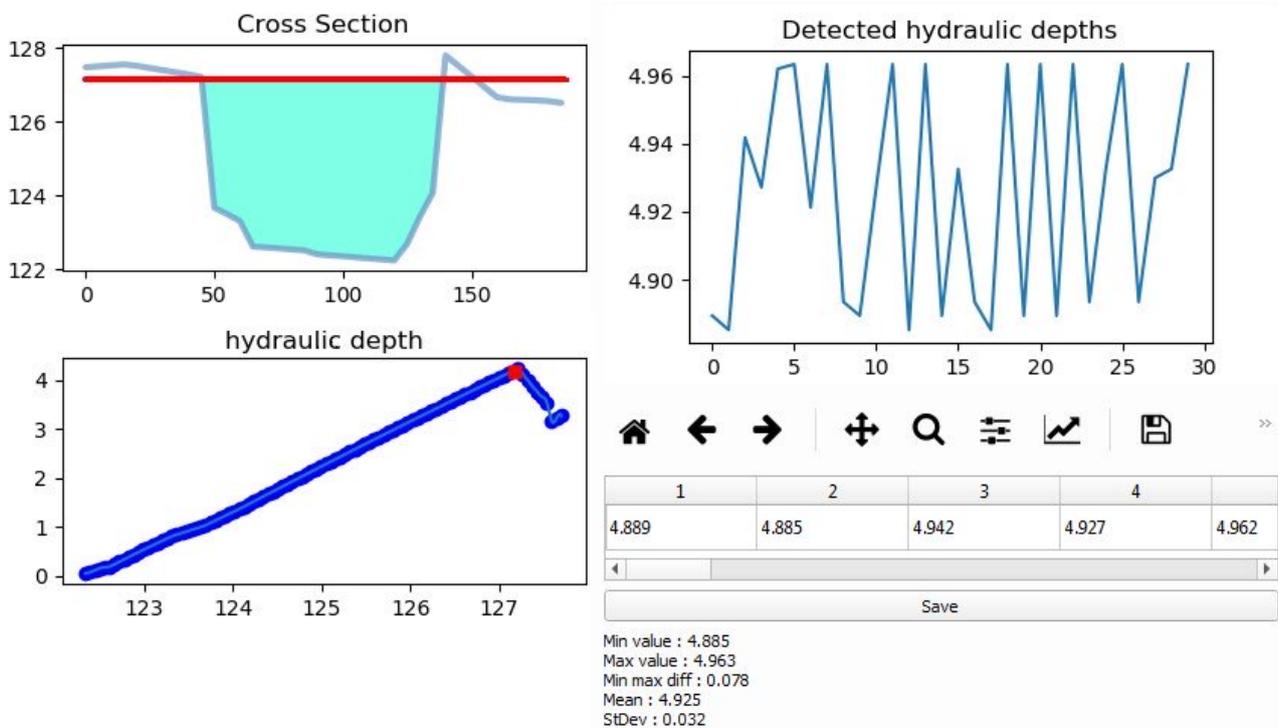


Figure 11: Détection de berge sur un cours d'eau large (100 m environ) : (à gauche) une section transversale et la profondeur hydraulique sélectionnée ; (à droite) profondeurs hydrauliques obtenues par 30 exécutions, affichage des 5 premières valeurs et synthèse des 30 valeurs.

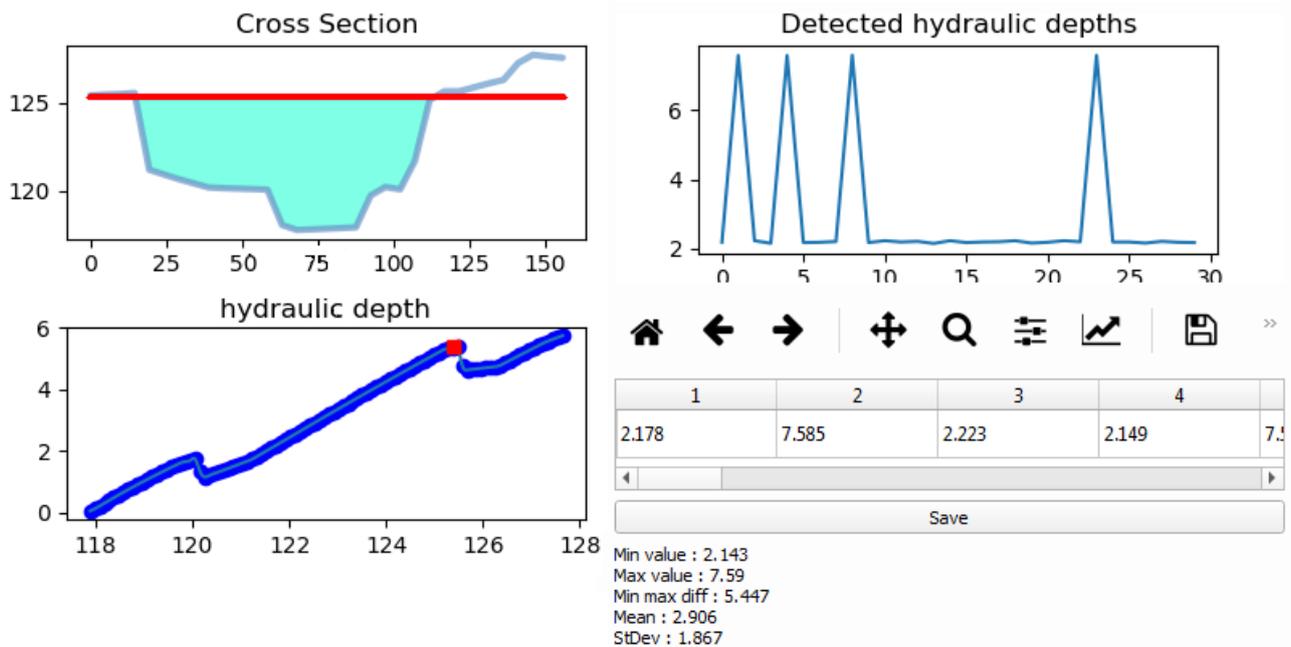


Figure 12: Détection de berge sur un cours d'eau large (100 m environ) avec une terrasse basse dans le lit mineur autour de 120 m d'altitude.

Bien que les géométries des deux profils en Figures 11 et 12 semblent proches, on remarque la différence de valeur de l'indicateur d'écart maximum, limitée à 7,8 cm dans le premier exemple et montant à 5,4 m dans le second. Cette différence s'explique par la présence d'une terrasse intermédiaire dans le deuxième exemple. Cette variation de hauteur d'eau agit sur la géométrie de la berge obtenue en sortie d'algorithme (Figure 13).

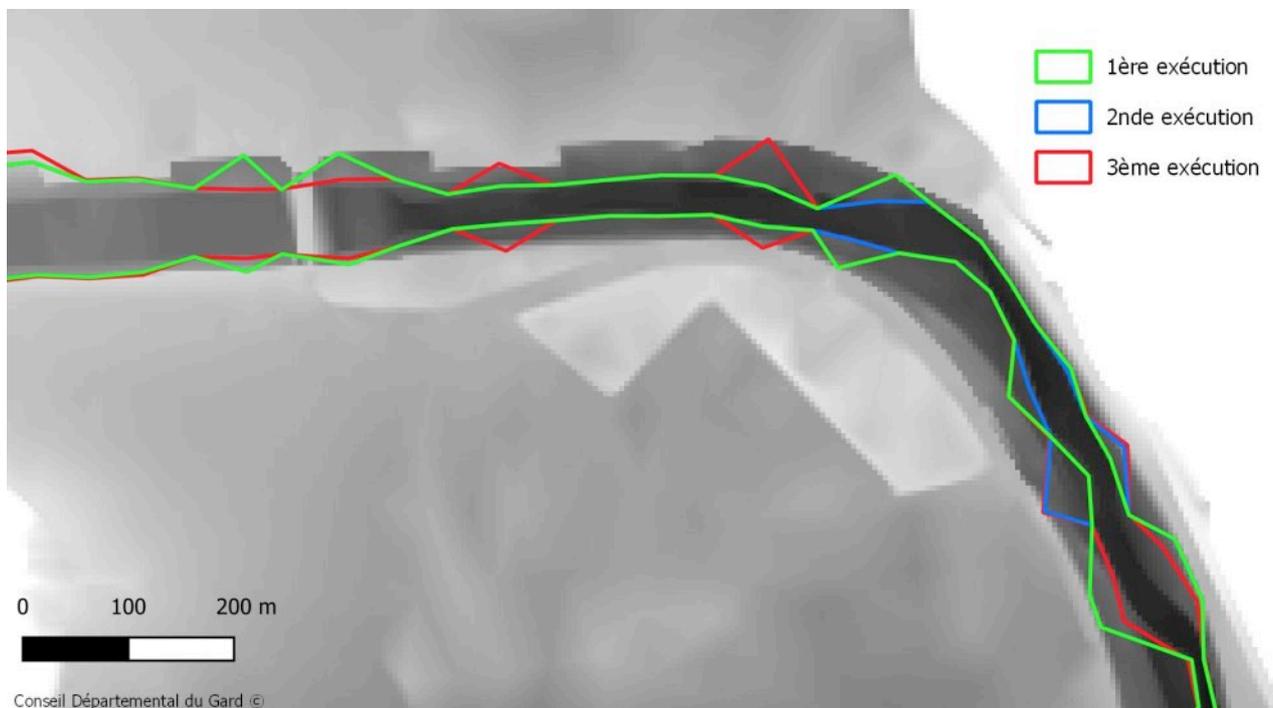


Figure 13: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme avec une profondeur minimum fixée à 50 cm.

Il apparaît visuellement que le résultat obtenu est cohérent en fonction du terrain : les bordures détectées correspondent à une terrasse mais pas systématiquement au plein bord. C'est notamment le cas lorsque le tracé linéaire interpolé de la berge a localement une forme de triangle.

### IV.3.2 - Prise en compte des terrasses dans le lit mineur

Afin de remédier à la détection d'une terrasse autre que celle de plein bord, l'algorithme permet d'indiquer en entrée une profondeur d'eau minimum, qui limite la recherche des résultats aux valeurs supérieures ou égales à celle-ci. Les résultats en Figure 13 correspondaient à une profondeur minimum de 50 cm. La Figure 14 montre les résultats pour une profondeur minimum de 2 m. En augmentant le seuil de profondeur minimum, les possibilités de résultats sont moins nombreuses et les variations des valeurs obtenues sont moindres.

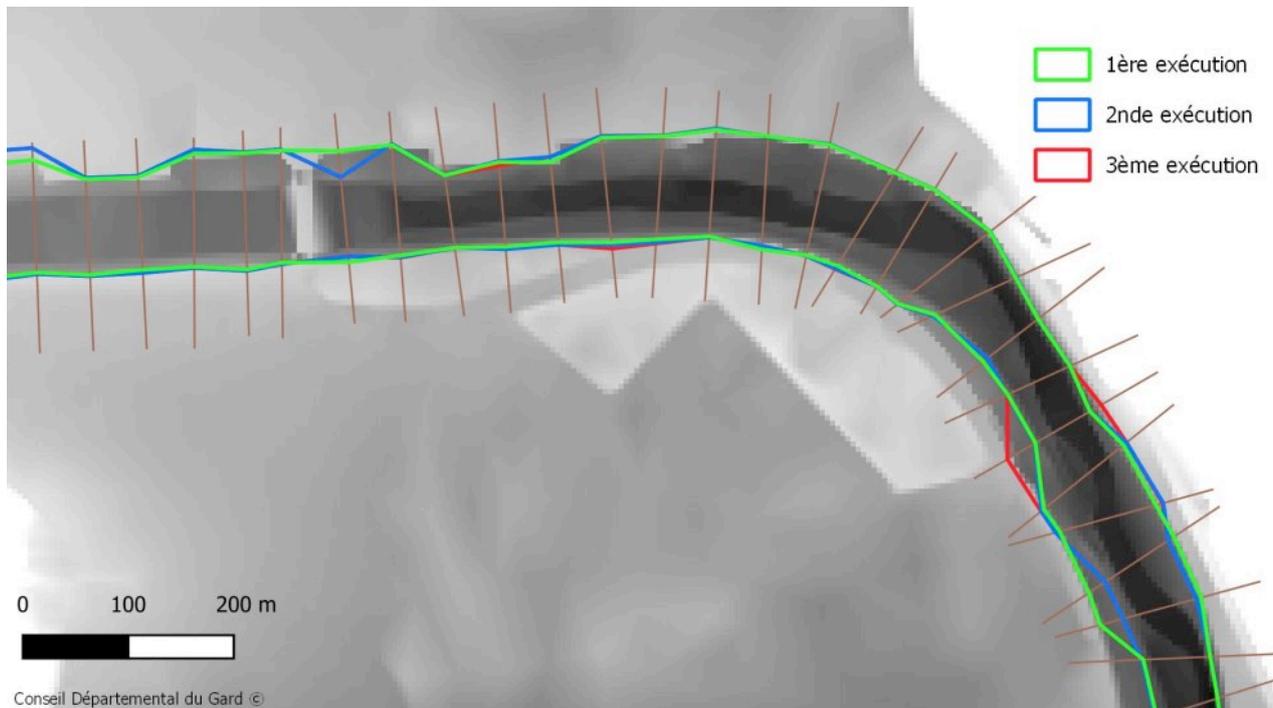


Figure 14: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme avec une profondeur minimum fixée à 2 m.

Il est en fait nécessaire en amont du lancement de l'algorithme, d'analyser la morphologie des cours d'eau pour estimer la profondeur minimum idéale. Pour les cours d'eau relativement larges contenant plusieurs terrasses basses dans leur lit mineur, la profondeur minimum doit correspondre à une valeur assez haute permettant d'éliminer ces terrasses basses. La profondeur minimum gagne au contraire à être réduite pour les cours d'eau peu larges, voire à être nulle pour les cours d'eau les plus étroits.

Pour nos cas d'étude, nous avons fixé le seuil de profondeur minimum de manière empirique en fonction de la largeur des cours d'eau. Nous pouvons considérer que les tronçons potentiellement concernés par les terrasses multiples dans le lit mineur sont ceux dont la largeur est supérieure à 15 m, ce qui représente plus de 3 pixels de largeur pour un MNT de résolution 5 m. Sur la zone d'Alès, seule une part de 149,39 km est concernée sur 2418,6 km de tronçons, soit 6,2 %. Le rapport est équivalent sur la Cagne : 5,9 % des tronçons sont concernés, 17,4 km pour 294 km de tronçons. Les tronçons d'une largeur inférieure à 15 m ont moins de terrasses dans leur lit mineur, du moins elles sont moins visibles sur le MNT du fait de sa résolution. La Figure 15 illustre le cas d'un cours d'eau étroit.

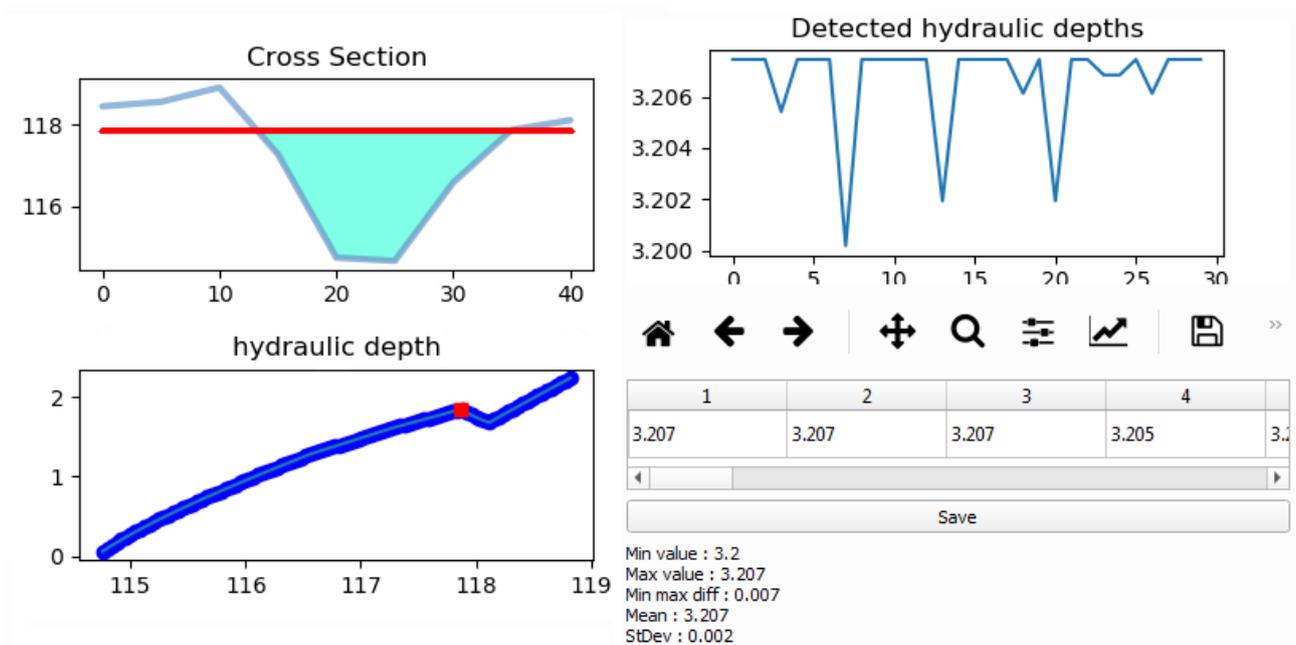


Figure 15: Détection de berge pour un petit cours d'eau étroit (moins de 15 m de largeur). Aucune terrasse dans le lit mineur n'est présente ou du moins représentée par le MNT.

Avec une profondeur minimum fixée à 0, l'écart maximum sur 30 exécutions est de 7 mm. La géométrie de la berge ne varie donc que très peu d'une exécution à l'autre (Figure 16).

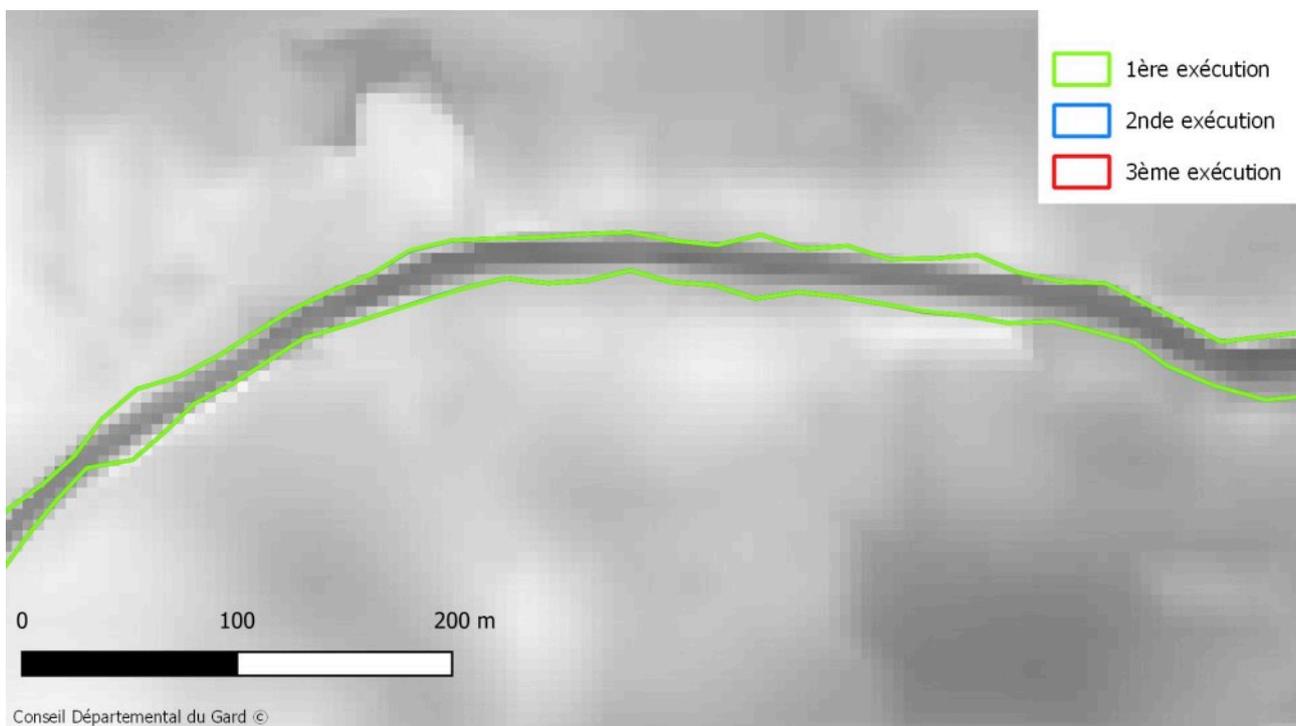


Figure 16: Géométries de berge obtenues par 3 exécutions de l'algorithme sur un cours d'eau fin avec une profondeur minimum fixée à 0 m.

### IV.3.3 - Retours sur la qualité des résultats

Le paramétrage de l'algorithme de détection automatique de la géométrie des berges a dû être adapté à la morphologie des cours d'eau. Le type de morphologie dépend du site d'étude. L'algorithme initial a été conçu pour des cours d'eau n'étant a priori pas bordés par des talus ou des digues. La morphologie dépend aussi de la largeur des cours d'eau. Elle n'est également pas représentée de la manière toujours la plus adaptée par le MNT. Par exemple et selon la résolution du MNT, certains cours d'eau très étroits peuvent n'être représentés que par un pixel. Malgré les adaptations apportées de l'algorithme initial, il existe plusieurs limites à cette approche et son applicabilité :

- La réalisation des profils en travers implique de disposer d'un linéaire vectoriel localisant le cours d'eau de manière relativement fidèle, idéalement en son centre. Un décalage important entre le linéaire du cours d'eau et la dépression représentée sur le MNT peut nuire au résultat.
- La détection ne fonctionne pas pour les cours d'eau confinés au milieu d'un terrain vallonné : il est nécessaire que les berges soient marquées (Cencetti et al., 2014).
- La détection sur les cours d'eau très sinueux occasionne un croisement des profils (Figure 17). Des profils rapprochés seront extrêmement croisés et poseront problème lors de la reconstruction du polygone. Trop espacés, ils ne représenteront pas la berge avec fidélité.

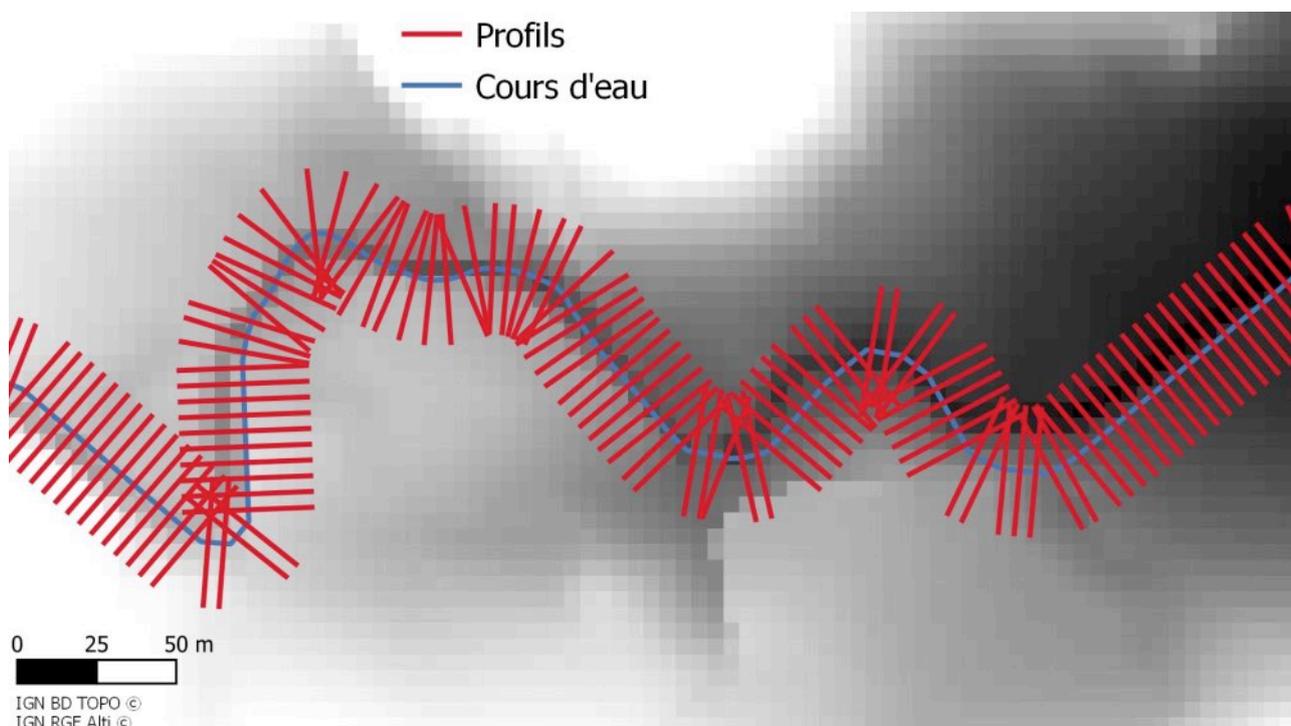


Figure 17: Exemple de profils de 20 m de longueur et espacés de 5 m sur un petit cours d'eau proche d'Alès.

La validation actuelle du résultat a été réalisée visuellement à partir du MNT. La qualité de la délimitation des berges semble meilleure pour les cours d'eau peu larges car ils ne représentent pas de multiples terrasses. La détection y est cependant plus sensible à la proximité des tronçons hydrographiques vectoriels avec le MNT et à la sinuosité du cours d'eau. La documentation de la BD TOPO nous apprend que la couche des tronçons hydrographiques dispose de l'attribut LARGEUR qui caractérise, par classes, la largeur de plein bord que l'on souhaite détecter. Cela pourrait être une piste à explorer pour qualifier le résultat de manière automatique, voire estimer une hauteur d'eau minimum pour les cours d'eau large. L'utilisation des parcelles fluviales du cadastre pourraient être une autre piste de qualification des résultats à explorer.

Actuellement, l'algorithme n'est implémenté que sous forme de plugin QGIS. Il ne gère la détection que d'une seule géométrie linéaire de cours d'eau par lancement. Pour l'appliquer sur un grand secteur et donc sur plusieurs cours d'eau, il serait intéressant de l'implémenter sous la forme d'un script Processing pour l'intégrer à la chaîne de traitements globale.

## **En résumé**

La profondeur hydraulique est un indicateur qui peut être mobilisé pour détecter les berges, comme le fait l'algorithme « Bankfull width detection ». Il présente l'avantage de dessiner la berge telle qu'elle apparaît sur le MNT en se limitant à l'usage d'une couche vectorielle pour créer les profils. Elle nécessite cependant de bien définir ses paramètres et n'est, en ce sens, qu'une méthode semi-automatique actuellement.

## V — Rétablissement de l'écoulement

Assurer l'écoulement au sein du cours d'eau est l'enjeu majeur du pré-traitement du MNT. Les obstacles représentés sur le MNT en travers de la dépression des cours d'eau peuvent en effet être la cause d'obstructions de l'eau et mener à des résultats anormaux lors de la réalisation d'opérations hydrauliques telles que des simulations d'inondation à partir du MNT (Poppenga et al., 2010). Toute absence de représentation du lit par l'altitude sur le MNT est préjudiciable à la conduite d'une simulation, et il est ainsi essentiel de rétablir ou de conserver cette représentation afin d'assurer la continuité de l'écoulement.

### V.1 — Types des obstacles

Trois grands types d'obstacles sont représentés sur les MNT des cas d'étude, détaillés ci-après. Ils nécessitent chacun une étude particulière et une prise en compte adaptée.

#### V.1.1 — Ouvrages de franchissement

Les ouvrages de franchissement sont notamment les ponts et les passerelles. Représentés sur le MNT, ils occasionnent une obstruction qui peut causer des barrages et donc des débordements lors de simulations d'inondations qui n'ont pas lieu d'être. Présents par défaut à l'acquisition des informations sur les altitudes (II.1), ils peuvent être supprimés par post-traitement par l'acquéreur ou le distributeur de la donnée. C'est notamment le cas du produit RGE Alti proposé par l'IGN. Le Conseil Départemental du Gard a cependant laissé les ouvrages de franchissement intacts. Ils sont donc particulièrement représentés sur le MNT de la région d'Alès (cas d'un pont en Figure 18). Ces obstacles sont pour la plupart présents dans la BD TOPO.

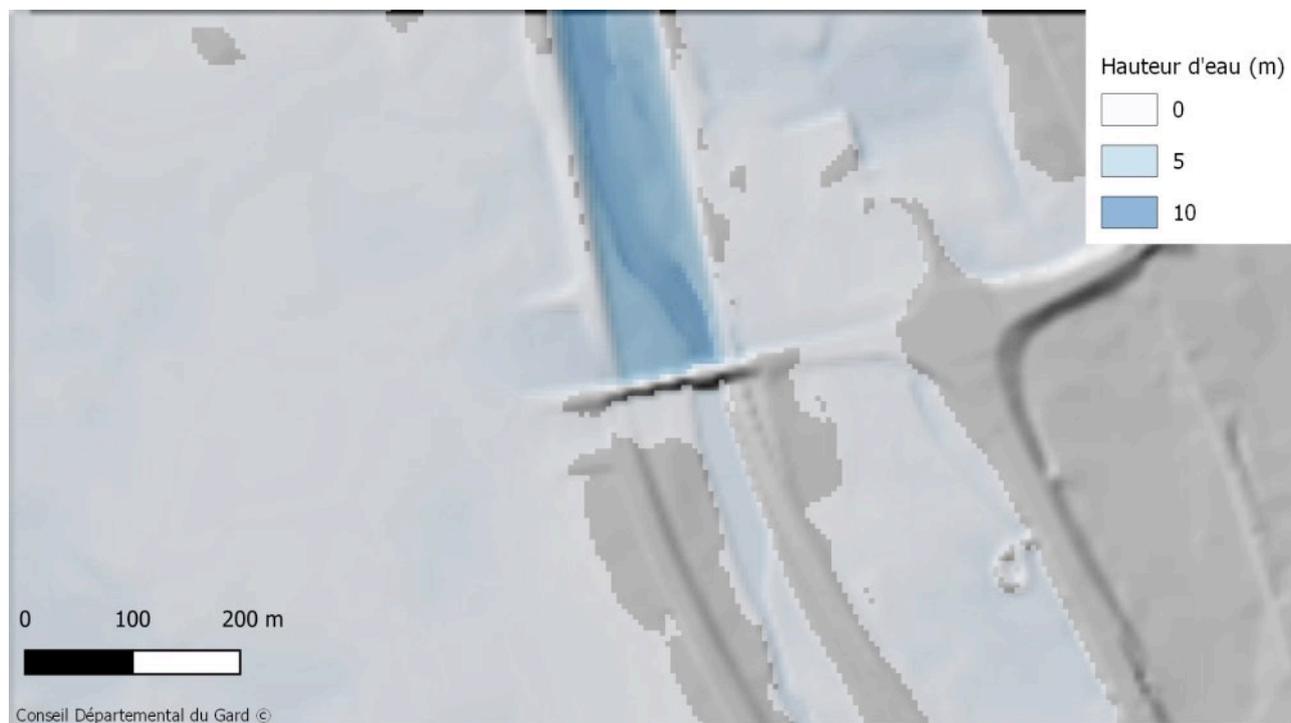


Figure 18: Exemple d'obstruction par un pont sur le Gardon d'Alès. Les hauteurs d'eau symbolisées sont celles résultantes d'une simulation à retour de 30 années.

## V.1.2 — Cours d'eau souterrains ou absence du cours d'eau

L'absence du lit du cours d'eau sur un MNT peut s'expliquer par la réalité du terrain, un cours d'eau pouvant effectivement être souterrain (Figure 19), mais également par d'autres facteurs : résolution du MNT, masque par une zone de végétation dense, etc. La couche des tronçons hydrographiques de la BD TOPO représente les cours d'eau souterrains et les repère à l'aide d'un l'attribut sur sa position par rapport au sol (POS\_SOL) dont la valeur est à -1 le cas échéant. Le cours d'eau n'est cependant pas repéré en souterrain de manière systématique.

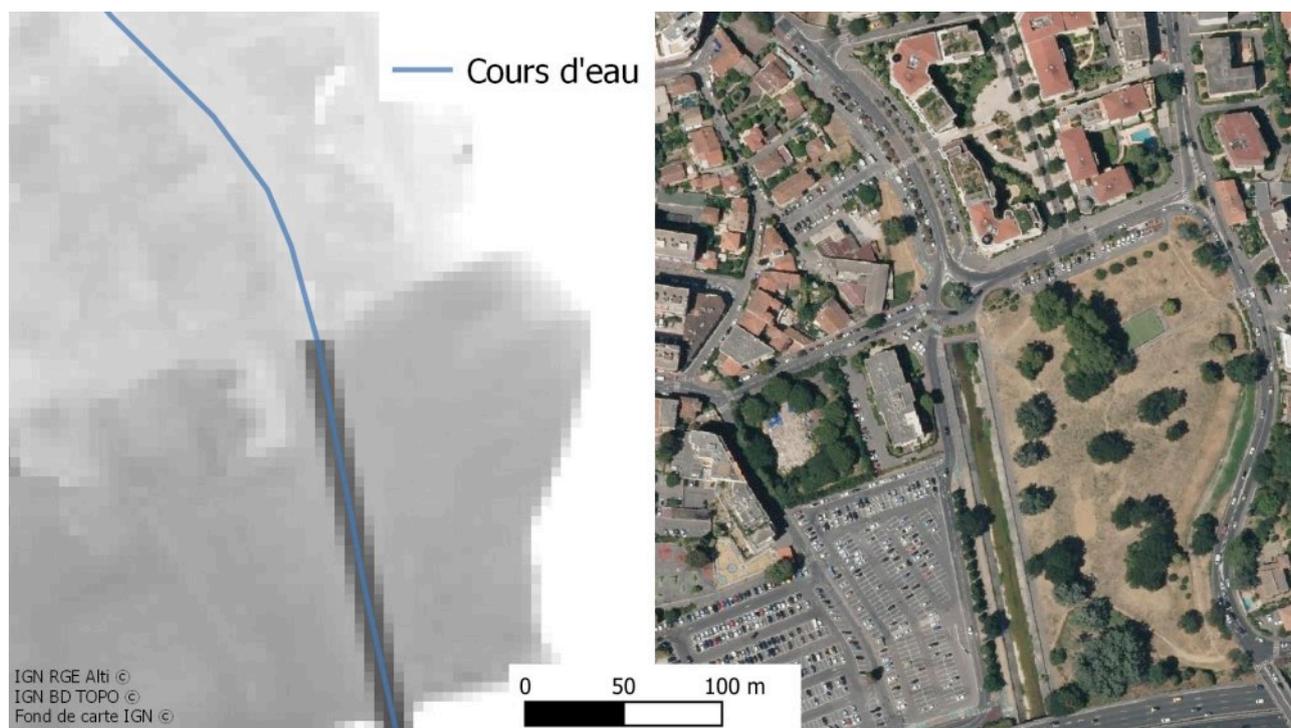


Figure 19: Exemple d'une portion souterraine d'un cours d'eau dans la ville de Cagnes-sur-mer.

### V.1.3 — Artefacts d'interpolation

La nature et la cause des artefacts ne sont pas toujours claires. Le recouplement avec d'autres sources de données permet cependant d'identifier avec certitude ces anomalies. Celles-ci sont, pour nos cas d'études, essentiellement situées dans la région d'Alès. Elles sont probablement causées par une faible densité de points lors de l'interpolation, très certainement TIN car les zones concernées sont caractérisées par une forme triangulaire et plane. L'absence de métadonnées et du nuage de points ne permet cependant pas de confirmer l'hypothèse. La Figure 20 permet de comparer trois zones entre le MNT à 5 m du Conseil Départemental et un MNE à 25 cm réalisé par l'IGN par corrélation automatique d'orthophotographies (de campagne de prise de vue d'été). On note sur le MNE l'absence de tout obstacle sur le terrain.



Figure 20: Comparaison entre MNT (en haut) et MNE sur la zone d'Alès (en bas). Entourés en rouge des artefacts du MNT.

Les artefacts vont altérer le lit du cours d'eau et faire obstacle à l'écoulement. Leur présence étant uniquement dépendante du MNT et de sa construction, leur détection ne peut se faire à l'aide d'une base par exemple vectorielle et leur suppression en devient plus complexe.

## V.2 — Détection des obstacles à l'écoulement

En amont de toute suppression d'obstacle, il est nécessaire de détecter ceux-ci. Nous avons implémenté deux approches utilisées selon les cas à traiter : une approche vectorielle utilisée notamment pour détecter les ponts à l'aide de la BD TOPO, et une approche combinée vectorielle et MNT utilisée pour détecter les cours d'eau souterrains.

### V.2.1 — Détection vectorielle

La détection vectorielle des obstacles s'est limitée, pour cette étude, à la détection des ponts. La BD TOPO repère les ponts au sein des couches de constructions linéaires et surfaciques, qui les représentent respectivement sous forme de géométries linéaires ou polygonales. La nature des ouvrages est déterminée par l'attribut nommé NATURE, dont la valeur est égale à "Pont" pour les entités qui nous intéressent. Pour repérer les ponts qui traversent les cours d'eau, nous effectuons une intersection entre la couche précédemment filtrée attributairement et la couche des tronçons hydrographiques. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide et conceptuellement simple : elle peut être réalisée à l'aide des outils intégrés à tout logiciel de SIG. Cependant, en se reposant uniquement sur une base de données vectorielle, elle est intégralement dépendante de sa fiabilité. Il est donc possible que certains ponts ne soient pas détectés du fait de leur absence de la base, mais également qu'un décalage important existe entre le MNT et l'entité vectorielle, que ce soit pour les entités du thème bâti ou celui de l'hydrographie (un exemple en Figure 21).

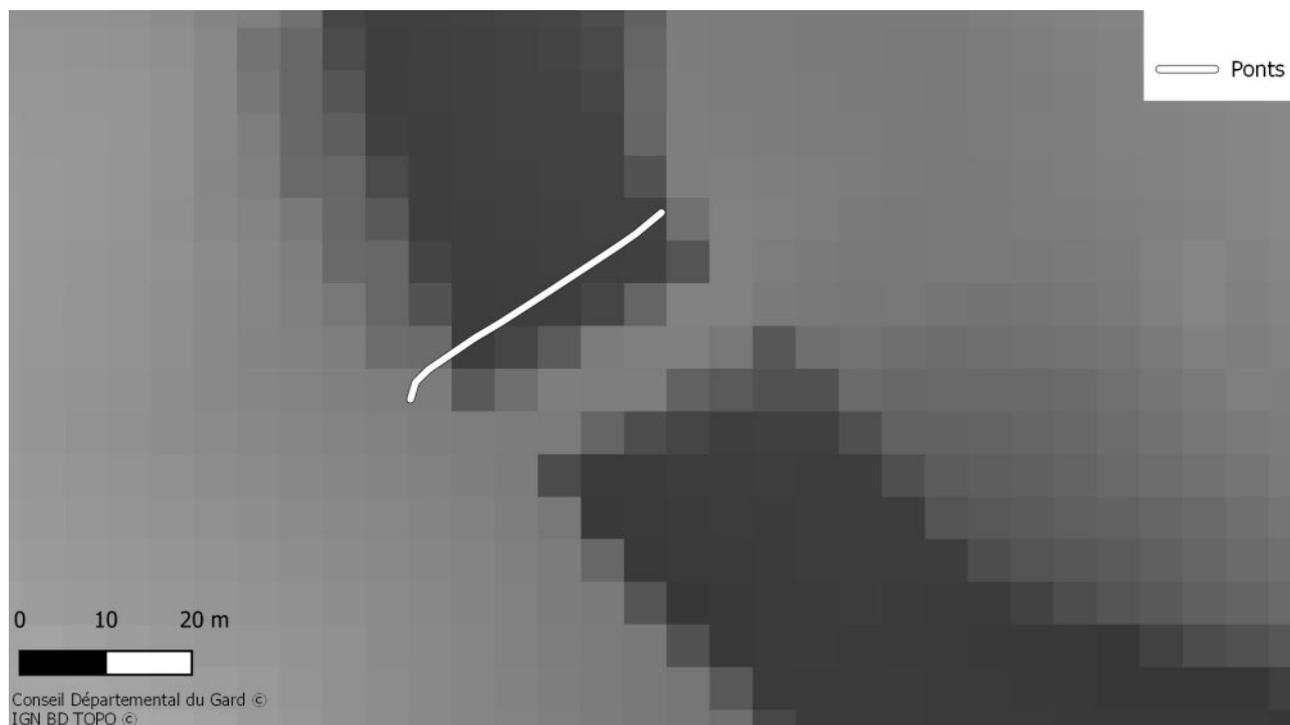


Figure 21: Exemple dans la zone d'Alès de pont de la BD TOPO de géométrie vectorielle, décalé par rapport à sa présence sur le MNT.

## V.2.2 — Détection combinée vectorielle et MNT

Cette approche a été abordée pour détecter les cours d'eau souterrains et repose sur la couche des tronçons hydrographiques et le MNT lui-même. La couche des tronçons hydrographiques découpant les cours d'eau par portions, leur continuité est tout d'abord rétablie en fusionnant les tronçons appartenant à un même cours d'eau à l'aide de l'attribut ID\_C\_EAU. Le traitement est ensuite réalisé par cours d'eau : des profils en travers sont disposés perpendiculairement le long du linéaire et les valeurs du MNT sont discrétisées à équidistance le long de ces profils. Nous regardons pour chaque profil, de l'amont vers l'aval, si la plus petite valeur du MNT sur le profil est inférieure à la plus petite valeur du MNT sur le dernier profil non-obstrué. Si ce n'est pas le cas, il y a obstacle à l'écoulement sur le profil (Figure 22).

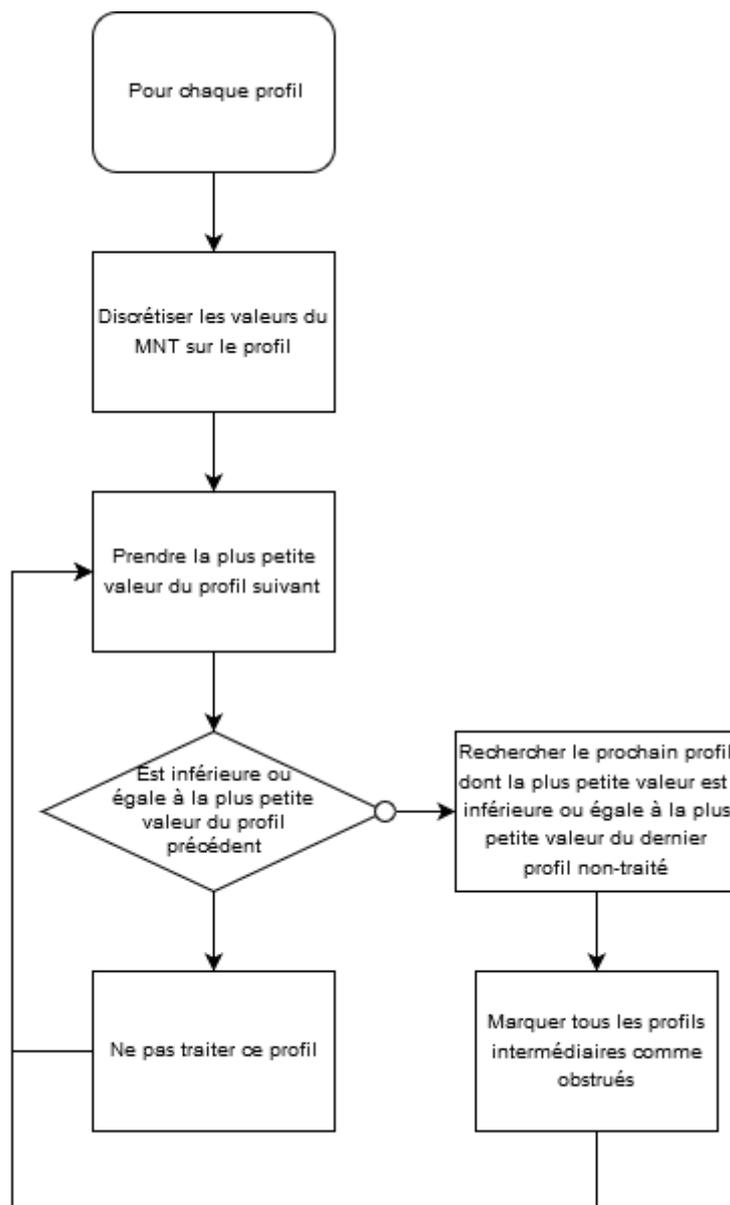


Figure 22: Fonctionnement de l'algorithme de détection combinée vectorielle et MNT profil par profil.

L'algorithme reposant sur le tout premier profil, si le second est détecté comme obstacle le cours d'eau n'est pas traité. Ce cas, qui n'arrive en général que sur les portions où le cours d'eau est pleinement inexistant sur le MNT, a été implémenté pour ne pas traiter par erreur des zones non concernées. Notre hypothèse initiale est qu'il est nécessaire, pour que l'algorithme fonctionne, qu'il y ait une distance suffisante entre les profils pour constater une baisse d'élévation de l'un à l'autre. Cela limite notamment la détection des disparitions très ponctuelles d'un linéaire telles que les ponts. La distance entre les profils relève donc d'un compromis. Sur la zone d'étude de la Cagne, l'algorithme permet la détection de la plupart des portions souterraines, mais ne détecte pas les portions non-apparentes de certains cours d'eau comme celui de la Figure 23 qui n'apparaît qu'en pointillés rapprochés sur le MNT.

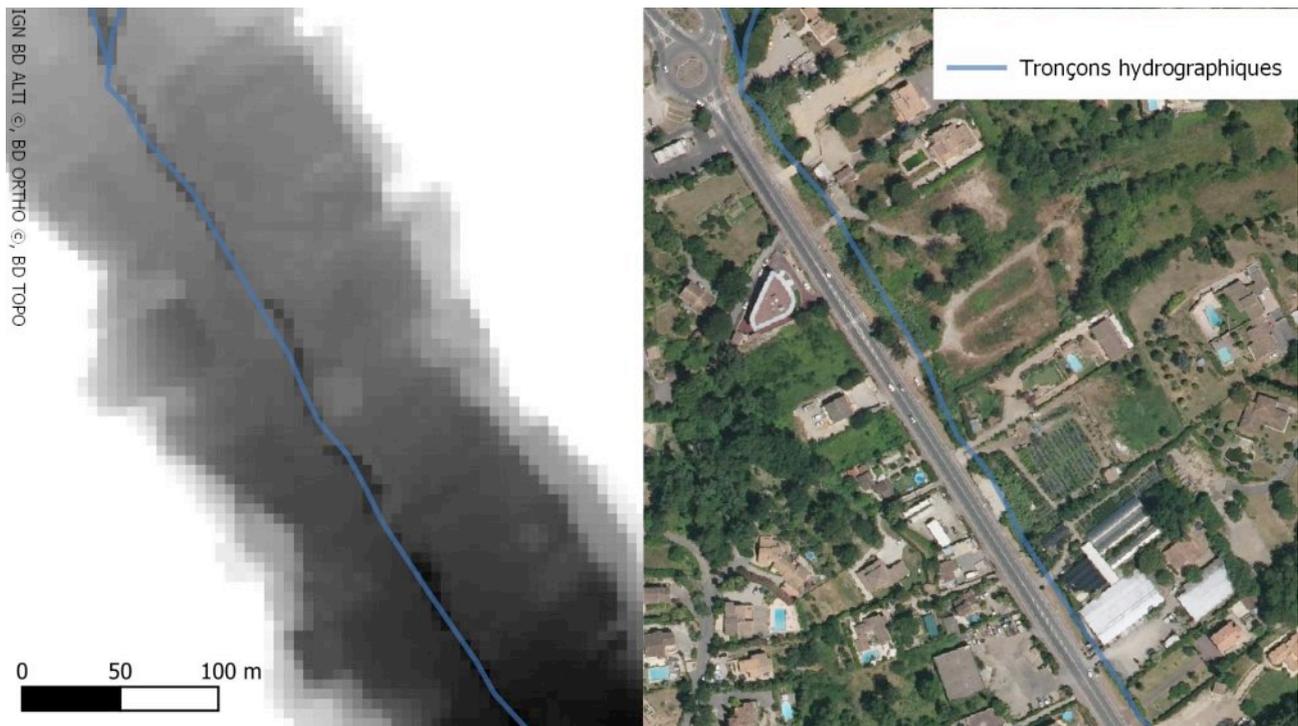


Figure 23: Exemple de tronçon problématique pour la détection des parties souterraines, ici un fossé en zone périurbaine qui n'apparaît qu'en pointillé sur le MNT.

## V.3 — Suppression des ponts par interpolation

### V.3.1 — Description de la méthode

L'interpolation spatiale, appliquée aux modèles numériques de terrain va permettre de passer d'un modèle discret (nuage de points) à un modèle continu et donc d'un format vectoriel à un format raster. Elle peut aussi permettre de compléter le MNT en interpolant une zone absente selon les valeurs qui l'entourent. Cette méthode est notamment utilisée pour compléter les données SRTM. La méthode que nous avons implémentée repose sur une approche similaire pour supprimer les ponts sur un MNT. Après détection des ponts par la méthode vectorielle détaillée en V.3.1, un tampon est créé autour de ceux-ci, puis les pixels qui correspondent aux tampons sur le MNT sont supprimés puis leurs valeurs à nouveau interpolées.

La largeur des tampons est déterminée selon la géométrie et la longueur du pont. Les ponts surfaciques couvrent déjà partiellement l'ouvrage qu'ils représentent, un tampon de 10 m est donc appliqué comme marge. Pour les ponts linéaires, seule la longueur du pont est prise en compte et permet, une fois mesurée, de catégoriser ceux-ci. Sur la région d'Alès, deux catégories ont été définies à l'aide d'une discrétisation des longueurs par rupture naturelle : inférieure ou égale à 60 m, et supérieure à 60 m. Cette catégorisation est sans doute à adapter selon le terrain. Elle est particulièrement importante pour les ponts les plus petits en longueur afin de ne pas supprimer une région trop importante et de ne pas supprimer une trop grande partie des berges.

L'interpolation des zones supprimées est réalisée par un algorithme de pondération inverse à la distance fourni par la bibliothèque GDAL<sup>9</sup>. Celui-ci a été choisi après avoir effectué des tests de sensibilité sur plusieurs algorithmes fournis par GDAL, GRASS et SAGA parmi lesquels les interpolations bilinéaires, bicubiques, splines et plus proches voisins (voir V.4.3 et Annexe 3).

### V.3.2 — Résultats et validation

En Figure 24, le résultat de la suppression d'un pont est illustré. Il est issu de la chaîne de traitements implémentée et décrite en V.4.1. Nous constatons une reconstruction du terrain sur le MNT visuellement satisfaisante dans le lit mineur du cours d'eau. Les berges sont par contre un peu plus floues. L'exécution d'une simulation sur le nouveau MNT offre un résultat bien différent et meilleur par rapport à l'exécution initiale: l'eau pouvant s'écouler sans obstacle majeur au sein du lit et limitant par conséquent le débordement.

<sup>9</sup> [https://gdal.org/gdal\\_alg\\_8h.html#a0a079afef61968f224b159d48423d1c6](https://gdal.org/gdal_alg_8h.html#a0a079afef61968f224b159d48423d1c6)

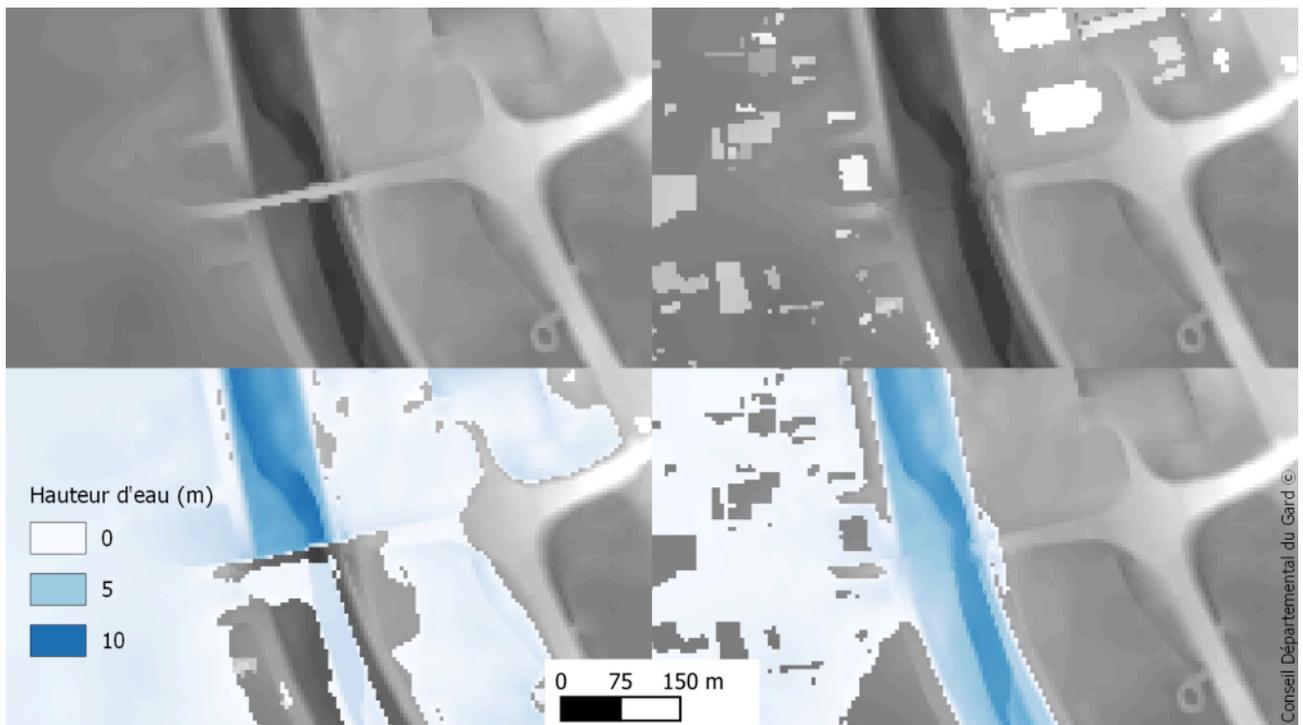


Figure 24: Exemple de pont supprimé du MNT initial sur le Gardon d'Alès et résultats de simulation avant et après suppression pour une période de retour de 30 ans.

Nous ne disposons pas de réalité terrain pouvant servir de référence pour valider les résultats. Nous avons émis l'hypothèse que les valeurs d'élévation du terrain de part et d'autre du pont devaient être similaires aux valeurs du MNT sur le pont après interpolation. Une validation est proposée sous forme d'un script Python dédié. Elle crée des profils à ces trois emplacements par rapport au pont et en utilisant une couche de berge comme référence de longueur de ces profils (Figure 25, berge tracée manuellement).

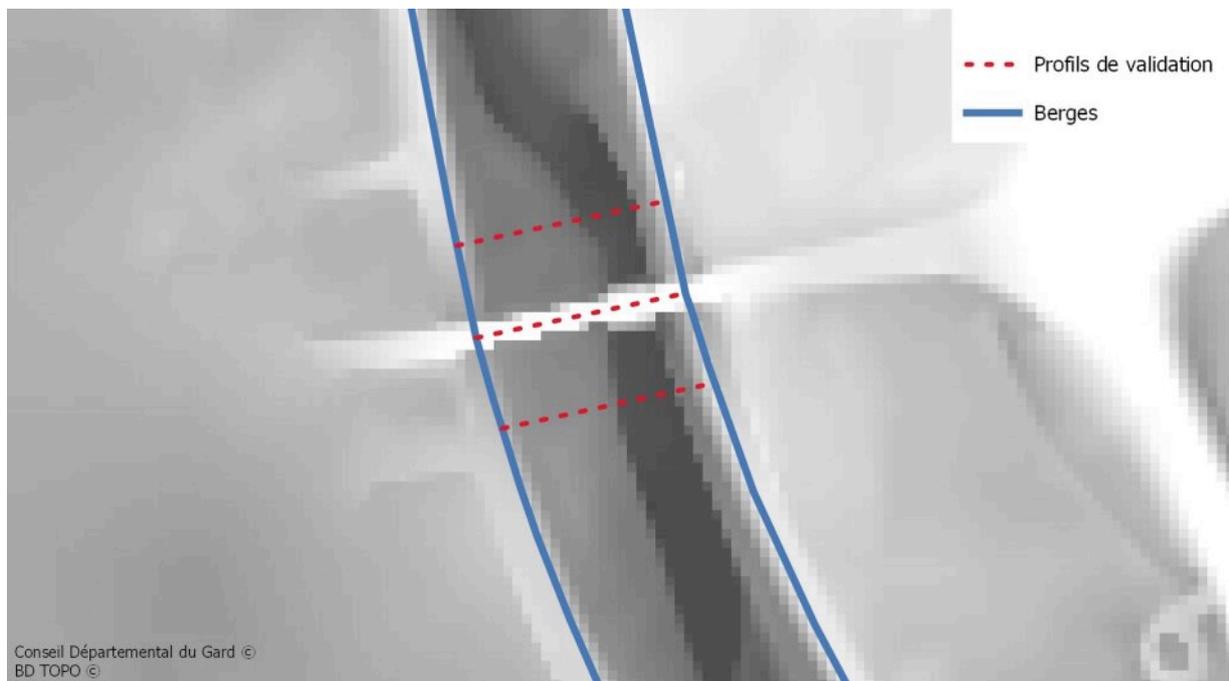
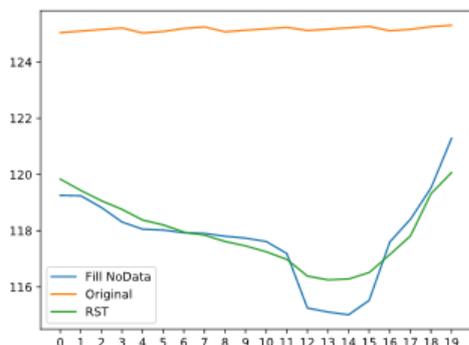


Figure 25: Profils construits par rapport au pont pour la validation de la méthode de suppression.

Les profils sont ensuite comparés pour estimer la qualité de la suppression, en calculant notamment la moyenne et l'écart-type des écarts entre les valeurs des profils amont et aval et celles du pont. L'écart le plus petit indique une meilleure suppression. Le résultat est édité en sortie de script sous forme de rapport HTML. Il affiche les valeurs des points échantillonnés dans un tableau ainsi que sur un graphique (voir Figure 26).



#### Fill NoData

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Moyenne	Ecart-type
Valeur du raster (point)	119.26	119.24	118.83	118.31	118.06	118.03	117.93	117.91	117.81	117.74	117.62	117.19	115.26	115.11	115.02	115.53	117.6	118.41	119.52	121.29		
Ecart profil 1 - pont	2.34	0.13	0.09	0.31	0.54	0.56	0.49	0.5	0.47	0.23	0.28	2.02	0.24	0.18	0.17	0.76	0.03	1.0	3.02	0.36	0.7	0.84
Ecart profil 2 - pont	1.97	0.01	1.07	0.79	0.73	0.62	0.34	0.22	0.37	0.43	0.55	0.38	0.14	0.04	0.01	0.62	2.45	0.02	2.19	1.0	0.68	0.74
Ecart profil 1 - profil 2	0.37	0.14	0.98	1.09	1.28	1.18	0.83	0.72	0.83	0.66	0.27	1.64	0.11	0.14	0.18	0.15	2.48	1.02	0.83	0.64	0.78	0.61

#### Original

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Moyenne	Ecart-type
Valeur du raster (point)	125.04	125.1	125.16	125.21	125.03	125.09	125.19	125.25	125.07	125.13	125.18	125.23	125.12	125.17	125.22	125.27	125.11	125.16	125.26	125.31		
Ecart profil 1 - pont	3.44	5.99	6.42	6.59	6.43	6.5	6.77	6.84	6.8	7.16	7.84	10.06	10.11	10.23	10.37	10.5	7.48	7.75	2.72	3.66	7.37	2.18
Ecart profil 2 - pont	3.81	5.85	7.4	7.68	7.71	7.68	7.6	7.56	7.63	7.82	8.11	8.42	10.0	10.1	10.19	10.35	9.96	6.73	3.54	3.02	7.8	1.93
Ecart profil 1 - profil 2	0.37	0.14	0.98	1.09	1.28	1.18	0.83	0.72	0.83	0.66	0.27	1.64	0.11	0.14	0.18	0.15	2.48	1.02	0.83	0.64	0.78	0.61

#### RST

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Moyenne	Ecart-type
Valeur du raster (point)	119.84	119.43	119.07	118.76	118.38	118.21	117.95	117.85	117.62	117.46	117.25	116.99	116.39	116.26	116.29	116.52	117.15	117.81	119.32	120.07		
Ecart profil 1 - pont	1.76	0.32	0.33	0.14	0.22	0.38	0.47	0.56	0.65	0.5	0.09	1.82	1.38	1.32	1.44	1.75	0.48	0.41	3.22	1.57	0.91	0.82
Ecart profil 2 - pont	1.39	0.18	1.31	1.24	1.06	0.81	0.36	0.16	0.18	0.16	0.18	0.17	1.27	1.18	1.27	1.6	2.0	0.61	2.4	2.22	0.92	0.68
Ecart profil 1 - profil 2	0.37	0.14	0.98	1.09	1.28	1.18	0.83	0.72	0.83	0.66	0.27	1.64	0.11	0.14	0.18	0.15	2.48	1.02	0.83	0.64	0.78	0.61

Figure 26: Exemple de sortie du script de validation lancé pour un pont représenté Figure 25. Comparaison les altitudes le long des profils du MNT initial (Original) avec le MNT résultat par interpolation IDW (Fill NoData par GDAL) et celui par interpolation spline (RST par GRASS). Le graphique représente les altitudes du profil correspondant au pont.

Le graphique et les tableaux de la Figure 26 permettent de constater que les résultats par l'interpolation IDW sont plus adaptés que l'interpolation spline pour la suppression des ponts. Le même constat est fait entre IDW et les autres méthodes d'interpolation (voir Annexe 3). Nous avons donc conclu suite à nos tests et aux sorties chiffrées de la validation que la chaîne de traitements proposée donne des résultats satisfaisants et que l'interpolation IDW est ici la plus adaptée.

## V.4 — Rétablissement des cours d'eau souterrains par interpolations linéaire et TIN

### V.4.1 — Description de la méthode

Pour le rétablissement des cours d'eau souterrains et donc de la continuité de la représentation des cours d'eau par dépression dans le MNT, nous avons d'abord étudié la littérature et testé les méthodes existantes dédiées. Nous avons ensuite proposé une méthode s'appuyant sur des principes similaires.

Faire apparaître un cours d'eau absent du MNT se fait habituellement par des méthodes de gravure de cours d'eau. Essentiellement présente dans la littérature sous le terme anglais de *stream burning*, elle consiste à intégrer une couche vectorielle de cours d'eau à un MNT en agissant sur l'élévation des cellules correspondantes (Lindsay, 2015). Plusieurs algorithmes ont été développés pour graver un cours d'eau au sein d'un MNT, comme par exemple l'algorithme FillBurn (Saunders, 1999). Ils présentent en général l'inconvénient de graver le cours d'eau avec une profondeur fixe et sont alors peu adaptés à une modélisation hydraulique qui accorde une grande importance à la bathymétrie. GRASS GIS propose un traitement nommé *r.carve*<sup>10</sup> de renforcement de l'écoulement lorsqu'une partie du cours d'eau est déjà représentée, qui au contraire de FillBurn prend en compte les valeurs du MNT pour la valeur à graver.

L'algorithme rasterise le cours d'eau vectoriel linéaire et traite chaque cours d'eau de pixel à pixel. Si le pixel courant est d'altitude supérieure à celle du pixel en amont, celui-ci est identifié comme obstrué et un obstacle est supposé présent. L'algorithme cherche alors le long du cours d'eau le prochain pixel d'altitude inférieure ou égale au dernier pixel non-obstrué et interpole linéairement les valeurs d'altitudes pour les pixels intermédiaires (Figure 27).

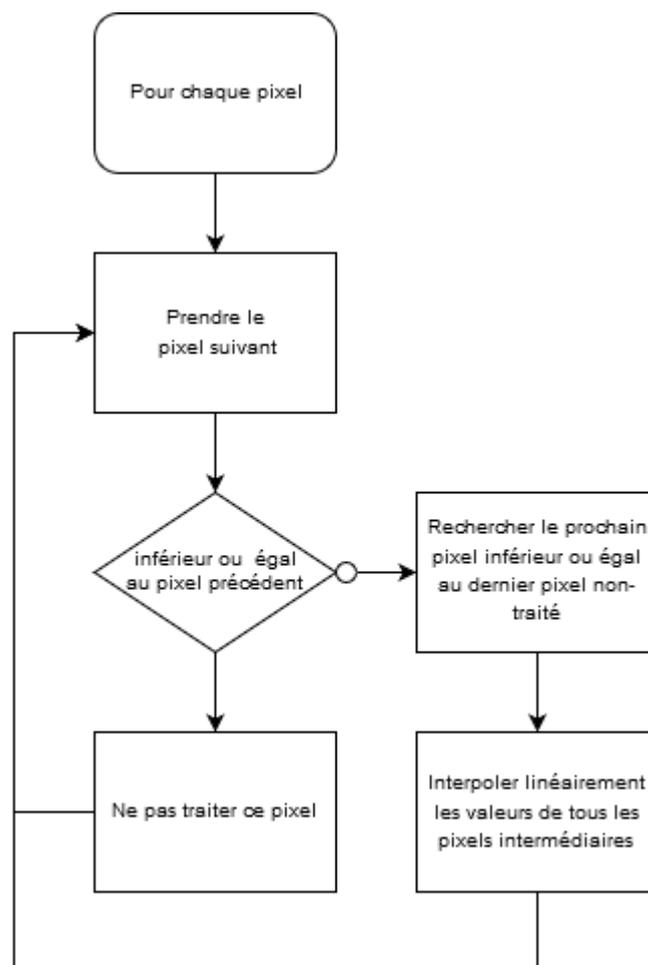


Figure 27: Logigramme correspondant au fonctionnement de *r.carve*

<sup>10</sup> Source : <https://github.com/OSGeo/grass/blob/master/raster/r.carve/main.c>. L'algorithme n'est détaillé ni par une publication, ni par une documentation, mais son fonctionnement est expliqué en en-tête du code source.

Contrairement aux algorithmes de gravure, *r.carve* ne peut pas faire réapparaître le cours d'eau là où celui-ci est déjà absent du MNT. En revanche, il va permettre de renforcer l'écoulement sur les portions existantes, supprimer les obstacles et faire réapparaître les cours d'eau en partie souterrains. Son fonctionnement au pixel permet d'éliminer les obstacles les plus petits. En revanche, il ne conserve pas la largeur du cours d'eau original (il est possible de préciser une largeur fixe en entrée) et son efficacité est limitée pour les cours d'eau peu profonds car il s'appuie sur les valeurs amont et aval. De plus, il est dépendant du tracé vectoriel et peut donc dédoubler un cours d'eau existant s'il ne suit pas le tracé présent par dépression dans le MNT (Figure 28).

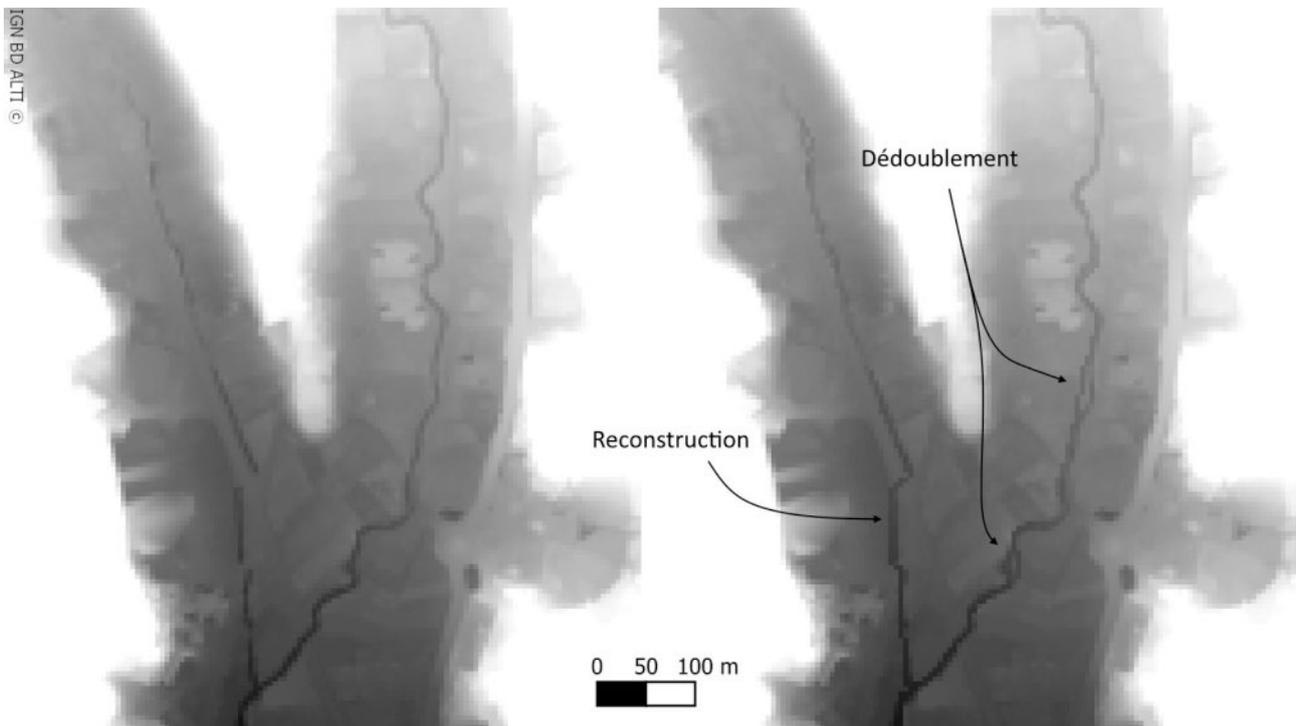


Figure 28: MNT initial (à gauche) et MNT traité par *r.carve* (à droite).

Notre approche est similaire à celle implémentée dans la fonction *r.carve*, pour la détection des cours d'eau puis pour l'attribution de nouvelles valeurs d'élévation. Le fonctionnement de notre algorithme de détection combinée vectorielle et MNT (voir V.3.2) est semblable, *r.carve* démontre cependant qu'il est possible de l'appliquer au pixel et pas seulement à des profils distants et s'avère donc plus précis. Les profils à la suite de ce traitement sont caractérisés comme obstrués ou non, et les profils obstrués spatialement successifs constituent des groupes à identifiant unique. Le traitement est alors réalisé pour chaque groupe : les valeurs du MNT sont discrétisées sur le premier et le dernier profil par des points équidistants. Le même nombre de points est créé sur les profils intermédiaires et leur valeur d'altitude est déterminée par interpolation linéaire à partir des valeurs des premiers et derniers profils de point à point. La distribution spatiale du nuage de points obtenu étant irrégulière, une interpolation TIN est effectuée à partir des points et de leur valeur d'élévation dans une emprise correspondant à l'enveloppe convexe de tous les points. Enfin, le raster est recalé puis intégré par remplacement des valeurs au MNT.

## V.4.2 — Résultats et validation

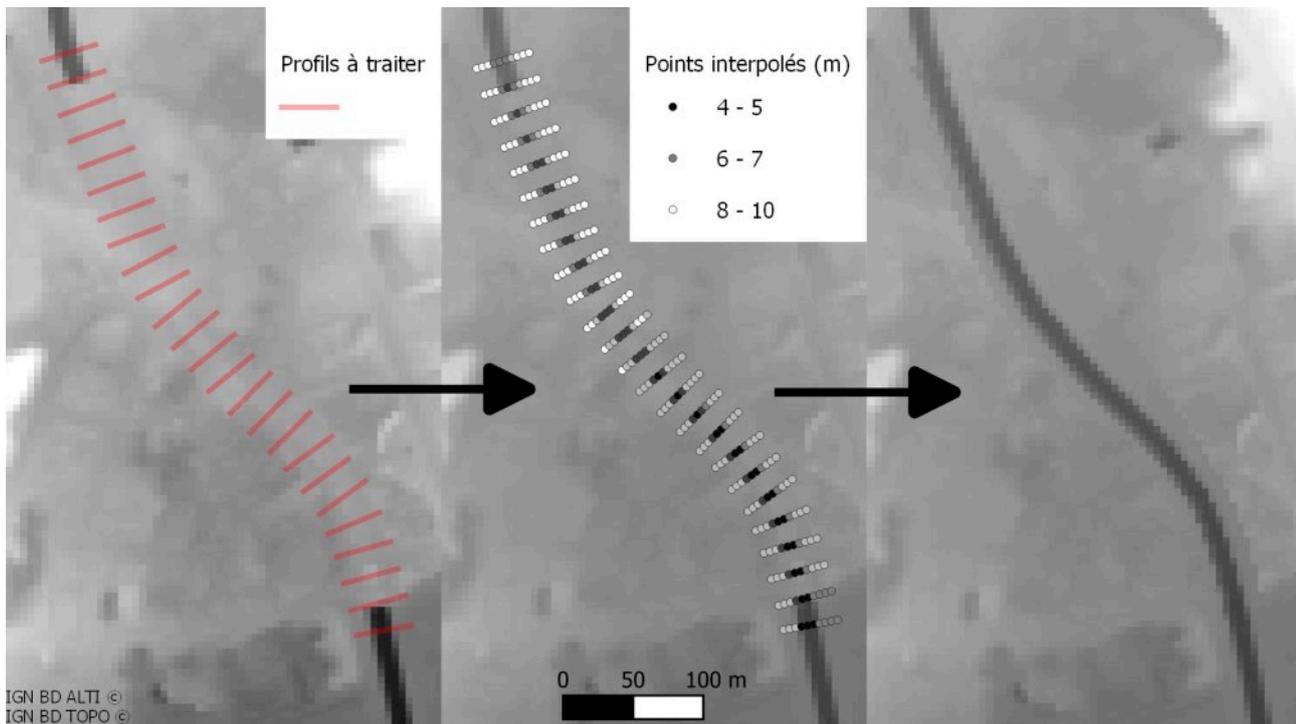


Figure 29: Trois étapes de l'exécution de l'algorithme pour rétablir un tronçon de cours d'eau souterrain : 1) sélection des profils souterrains, 2) discrétisation des profils par des points tous les 5 m, 3) intégration de l'interpolation TIN.

Cette approche conserve bien la bathymétrie. Elle permet aussi de conserver la largeur du cours d'eau au contraire de r.carve. On remarque cependant qu'une part non-négligeable du terrain bordant le cours d'eau peut être fortement transformée par l'interpolation : les valeurs d'altitude sont lissées. Cet effet peut être limité par un seuil à l'intégration, par exemple en ne remplaçant que les valeurs inférieures de plus de 1 m au MNT original, mais ce qui nuirait aux cours d'eau les moins profonds.

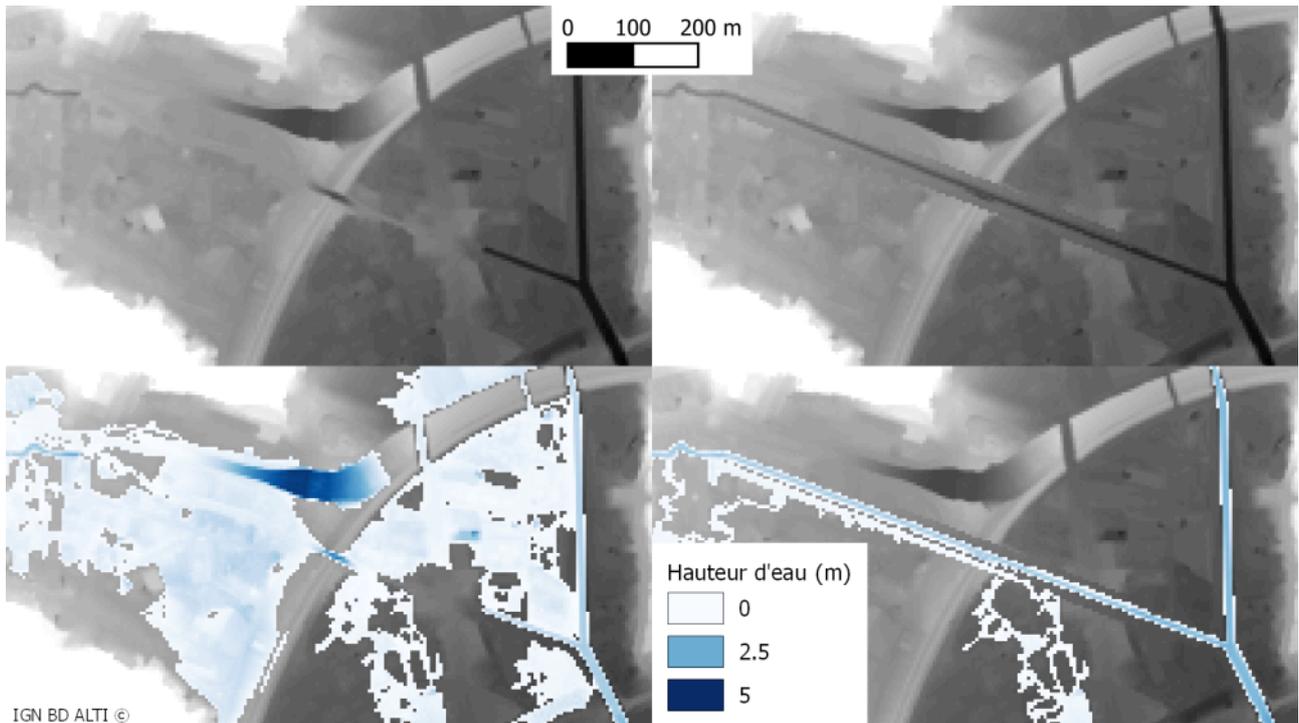


Figure 30: Exemple de cours d'eau souterrain rétabli sur le Malvan et résultats de simulation avant et après le traitement pour une période de retour de 2 ans.

Le résultat de la simulation Figure 30 nous permet de constater que le cours d'eau est effectivement rétabli et permet l'écoulement. On remarque cependant un débordement causé par l'impact de l'interpolation sur le terrain et qui semble créer un second canal parallèle.

## En résumé

Les deux algorithmes, r.carve et celui que nous avons proposé, sont donc complémentaires. Chacun est en fait adapté à des cas différents : r.carve permet un traitement des cours d'eau étroits et souterrains en pointillé, notre algorithme conserve la largeur pour les cours d'eau les plus importants en largeur et souterrains sur des portions relativement longues.

## VI — Ajout d'obstacles en lit majeur

Dans un cadre de simulation d'inondation, il est important de prendre en compte les effets potentiels sur les populations et notamment dans les zones habitées. Il est donc nécessaire de modéliser de manière appropriée le lit majeur. Le MNT ne prenant en compte que la forme du terrain, certains obstacles à l'écoulement de l'eau au-delà des berges ne sont pas pris en compte. Il faut les inclure dans un MNE ad hoc. Les obstacles les plus significatifs sont les bâtiments, qui vont, comme constaté lors d'inondations passées, jouer le rôle de barrière et dévier l'écoulement. Leur intégration est donc essentielle pour permettre une représentation fidèle de l'écoulement en lit majeur et déterminer avec une meilleure précision les zones à enjeux touchées. Nous nous sommes donc concentrés uniquement sur ce type d'obstacle afin d'obtenir un MNE ad hoc.

### VI.1 — Description de l'approche par rastérisation

Nous avons opté pour une addition des valeurs de hauteurs de bâtiments aux valeurs d'altitude du MNT. Ces traitements sont proposés pour des formats raster, ce qui implique une première étape de rastérisation puis une seconde étape d'addition raster (Figure 31). Pour obtenir un MNE raster avec une chaîne de traitements dans QGIS, il est nécessaire de disposer de deux rasters : celui du MNT et celui des valeurs de hauteur des bâtiments. Une couche vectorielle de bâtiments contenant une information de hauteur est disponible dans la BD TOPO. Il s'agit de la couche de bâtiments qui dispose de l'information de hauteur dans un champ attributaire et la géométrie 2,5D.

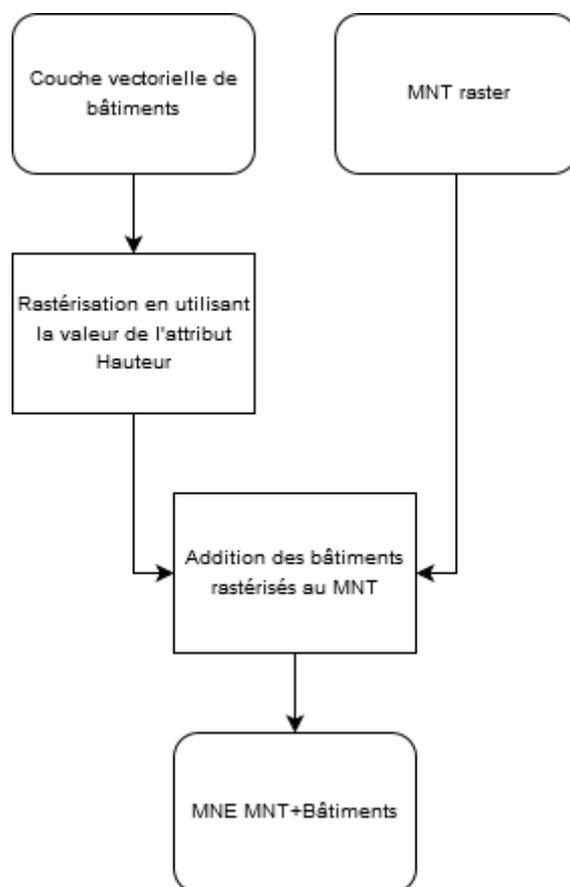


Figure 31: Logigramme de la chaîne de traitements pour l'ajout des bâtiments

La Figure 32 illustre un résultat de cette addition raster. Pour indication dans la ville d'Alès, les hauteurs de bâtiments vont jusqu'à 47 m avec une moyenne égale à 7m. L'ajout des bâtiments peut donc modifier les élévations et avoir une influence dans les simulations surtout en cas de longs bâtiments. Bien que la suppression des ponts ait déjà eu un impact sur l'écoulement, cet effet est visible au centre d'Alès où la concentration en bâtiments est forte.

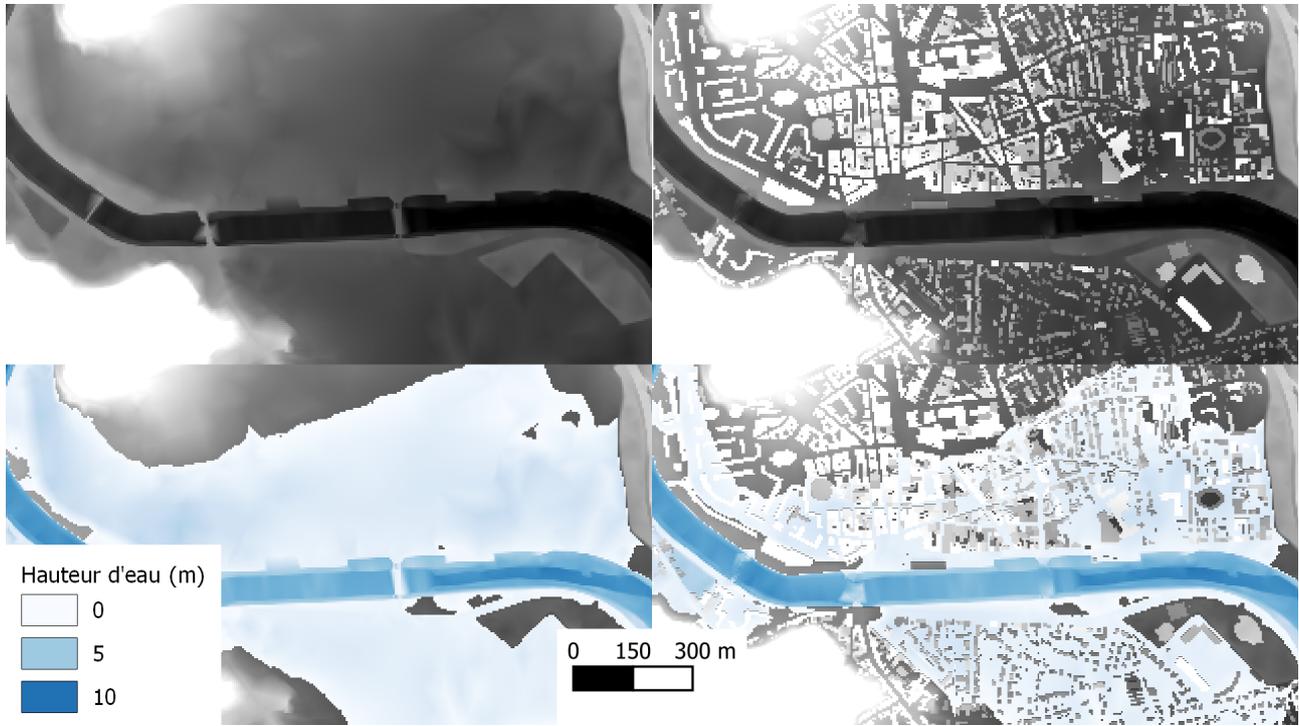


Figure 32: Exemple de bâtiments ajoutés au MNT initial sur Alès et résultats de simulation avant et après le traitement pour une période de retour de 300 ans.

## VI.2 — Typologie des limites possibles

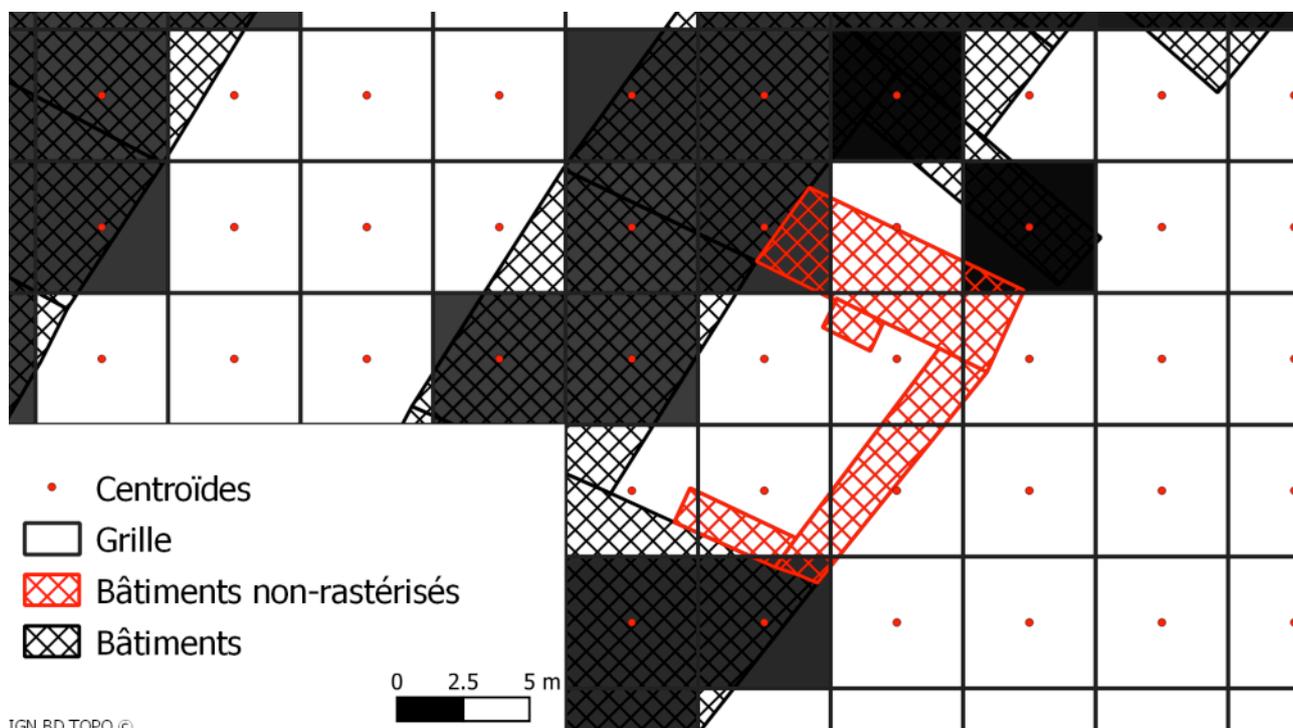
L'approche évoquée en VI.1 et mise en œuvre présente cependant des limites à la fois attributaires et topologiques qui peuvent empêcher la rastérisation ou nuire à l'adaptation du MNE au modèle de simulation d'inondations. Nous avons réalisé ci-dessous une typologie des limites engendrant des erreurs, quantifiées sur une zone centrée sur la ville d'Alès.

- L'absence d'information attributaire sur la hauteur

Si l'attribut HAUTEUR du bâtiment est absent ou égal à 0, le bâtiment n'est pas rastérisé. Dans la ville d'Alès, 5248 bâtiments sont dans cette situation, soit 3,7 % d'entre eux, et sont répartis dans toute la zone étudiée.

- Le seuil de rastérisation

La rastérisation par la fonction dédiée dans QGIS et qui repose sur GDAL n'affecte une cellule que si son centroïde intersecte le polygone du vecteur traité. Si un bâtiment n'intersecte aucun centroïde, il ne sera pas rastérisé.



IGN BD TOPO ©

Figure 33: Exemple de bâtiment non-rastérisé car n'intersectant aucun centre de cellule de la grille du raster généré.

Le problème est difficile à quantifier sur l'intégralité d'un MNT pour des questions de performances. Sur une étendue centrée sur la zone urbaine d'Alès (9425 bâtiments), 1941 bâtiments soit 20,6 % sont concernés et leur superficie est en moyenne de 10,5 m<sup>2</sup> contre 108,5 m<sup>2</sup> pour l'intégralité des bâtiments de la zone. Les bâtiments concernés couvrent donc principalement de petites surfaces.

- La résolution du raster généré

Les bâtiments sont rastérisés selon la résolution définie pour la grille générée. Nous avons fixé cette résolution à celle du MNT initial c'est-à-dire avec un pas de 5 m. Cependant, si un bâtiment est trop proche d'un cours d'eau, il peut recouvrir celui-ci à la rastérisation. Ce cas est particulièrement présent sur le MNT de la Cagne où certains bâtiments traversent le cours d'eau sur les tronçons souterrains ou se trouvent à une distance faible. Sur une partie urbanisée de 3,4 km autour du Malvan, qui est un cours d'eau peu large (entre 0 et 15 m), 45 bâtiments se trouvent dans cette situation.

## VI.3 — Proposition de solutions

Nous proposons quelques solutions pour les problèmes évoqués en VI.2. Cette partie a été peu traitée dans le temps imparti. La pertinence et l'efficacité resterait alors à évaluer. Les solutions implémentées et des idées de perspectives sont listées dans le même ordre que celui de la liste des limites en VI.2.

- Estimer la hauteur

L'absence de hauteur peut être compensée en estimant celle-ci. Dans une première solution, nous avons utilisé la même hauteur que celle du bâtiment le plus proche. En l'absence d'une valeur réelle, celle-ci peut permettre d'approximer la hauteur du bâtiment en émettant l'hypothèse qu'elle ne devrait pas varier trop fortement entre deux bâtiments proches. Une autre solution pourrait être d'estimer la hauteur du bâtiment en fonction de sa taille et de sa forme.

- Rendre possible la rastérisation

Les bâtiments non-rastérisés par GDAL sont relativement petits, ils pourraient être considérés comme négligeables. Toutefois certains peuvent représenter de véritables barrières notamment s'ils ont une forme longue. Une solution possible serait, à l'instar de Rousseaux (2004) qui prend en compte les différences de hauteur des murs d'un même bâtiment, de réaliser un tampon de quelques dizaines de centimètres sur les bâtiments en amont de la rastérisation pour permettre à plus de bâtiments d'intersecter avec les centroïdes de la grille. Il serait aussi envisageable de déplacer le bâtiment vers le centroïde le plus proche en limitant les collisions avec les bâtiments alentours.

- Prendre en compte les bâtiments recouvrant un cours d'eau

Le cas des bâtiments pouvant recouvrir un cours d'eau est plus problématique. Une solution possible pour les bâtiments intersectant le cours d'eau avant rastérisation est de le supprimer avant qu'il ne soit rastérisé. Pour les bâtiments proches d'un cours d'eau, le problème concerne essentiellement les plus petit cours d'eau. Exécuter la fonction `r.carve` peut permettre en cas de disparition de rétablir la dépression dans le MNT représentant le cours d'eau. Cela risque néanmoins de séparer le bâtiment en deux. Une autre perspective pourrait être de déplacer les bâtiments en amont de la rastérisation afin d'éviter une intersection. Cela demande par contre un déplacement en cohérence avec les autres bâtiments et éléments du paysage, et en particulier par rapport au cours d'eau lui-même (Ruas, 1998).

### En résumé

L'ajout des bâtiments est conceptuellement simple. Nous avons cependant mis en évidence qu'en fonction des cas d'utilisation, plusieurs limites peuvent se poser, notamment lors de la rastérisation des entités vectorielles. Pour une modélisation hydraulique, l'absence des longs bâtiments peut être préjudiciable à la qualité de son résultat, il est donc nécessaire de permettre leur apparition.

## Conclusion

Ce mémoire a été l'occasion de dresser un état de l'art des différentes problématiques liées à l'utilisation d'un MNT dans le cadre d'une simulation hydraulique, et de répondre à certaines d'entre elles. La qualité d'un MNT étant dépendante de sa conception, elle peut représenter ou non des éléments d'importance notable pour une étude spécifique.

Pour conduire une simulation hydraulique et représenter l'écoulement avec fidélité, nous avons vu qu'il était nécessaire de nettoyer le lit des cours d'eau de tout obstacle jouant le rôle de barrage, mais également d'ajouter les obstacles tels que les bâtiments dans la plaine d'inondation. Pour le premier cas, nous avons identifié et détectés deux types d'obstacles majeurs : les ponts en travers du cours d'eau, représentés comme un barrage sur le MNT, sont détectés à l'aide des données de la BD TOPO, et les portions de cours d'eau souterraines sont repérées sur le MNT lui-même en détectant les ruptures d'écoulement potentiel. Leur suppression se base sur des techniques d'interpolation, qui font appel aux données des pixels voisins pour les ponts, et à une interpolation TIN d'une reconstruction du cours d'eau souterrain sous la forme d'un nuage de points. À la marge de ces objectifs, nous avons également utilisé et amélioré un algorithme de détection de la berge, une donnée permettant d'affiner les paramètres de la modélisation.

L'obtention de cette dernière offre de nouvelles perspectives sur les traitements réalisés. Elle peut servir à améliorer chacun des résultats obtenus lors de nos travaux en limitant l'impact des modifications effectuées sur le terrain à l'intérieur de la berge. Par ailleurs, un second stage s'est déroulé en parallèle sur la même thématique, en s'intéressant à la visualisation des résultats de la simulation (dont la Figure 3 est une des productions). Cette nouvelle perspective s'est avérée complémentaire et a permis à la fois l'alimentation de nouvelles visualisations, mais également la mise en évidence d'impact des traitements sur les résultats de simulation. Cette nouvelle approche permet d'entrevoir d'autres manières de caractériser les résultats d'un traitement de données altimétriques pour une application en hydromorphologie fluviale.

# Bibliographie

- Aher, Sainath, Shashikant I Bairagi, Pragati Deshmukh, et Ravindra Gaikwad. « River Change Detection and Bank Erosion Identification using Topographical and Remote Sensing Data ». *international 2* (18 mars 2014).
- « Berge: définition et explications ». AquaPortail, 2018. <https://www.aquaportail.com/definition-5339-berge.html>. Consulté en juillet 2019
- Cencetti, Corrado, Pierluigi De Rosa, et Andrea Fredduzzi. « A toolkit for identifying and measuring physical streams features from high resolution DEMs and digital image », Vol. 5, 2014.
- Charleux-Demargne, Julie. « Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie : application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants ». Thesis, Université de Marne-la-Vallée, 2001. <http://www.theses.fr/2001MARN0102>.
- Code de l'environnement - Article L215-7-1
- Davy, Philippe, Thomas Croissant, et Dimitri Lague. « A Precipiton Method to Calculate River Hydrodynamics, with Applications to Flood Prediction, Landscape Evolution Models, and Braiding Instabilities: A Precipiton Method for River Dynamics ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 122, n° 8 (août 2017): 1491-1512. <https://doi.org/10.1002/2016JF004156>.
- Giraud, Jean, Pierre Pamart, et Jean Riverain. *Les nouveaux mots dans le vent*. Larousse, 1974.
- Goutal, N., J.-M. Lacombe, F. Zaoui and K. El-Kadi-Abderrezzak. « MASCARET : a 1-D Open-Source Software for Flow Hydrodynamic and Water Quality in Open Channel Networks ». *River Flow 2012 – Murillo* (Ed.), pp. 1169-1174
- Guinot, V. « Les modèles numériques en hydrologie et en hydraulique »
- Hentati, Imen, Moncef Zaïri, et Hamed Ben Dhia. « HydroTools : Outil pour la modélisation et l'extraction d'un réseau hydrologique », 2008. <https://www.esrifrance.fr/sig2008/SFAX.htm>.
- Hocini, Nabil. « Evaluation et de veloppementde la méthode CARTINO pour la cartographie du risque inondation lie aux crues soudaines », 2018.
- Le Bihan, Guillaume. « Modèles hydrologiques régionaux pour la prévision distribuée des crues rapides : vers une estimation des impacts et des dommages potentiels », 26 octobre 2016. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01461682>.
- Lindsay, John. « The practice of DEM stream burning revisited ». *Earth Surface Processes and Landforms* 2016 (15 décembre 2015): 658–668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>.
- Michez, Adrien, Frédéric Henrotay, et Hugues Claessens. « Potentialités de l'outil 'Analyse d'images' dans le cadre de la gestion intégrée des cours d'eau wallons : projet IMAGEAU ». Ulg, juin 2013. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/161438>.
- Perrin de Brichambaut, Octave. « Détection d'anomalies et visualisation de données de simulation de crues », 2019.
- Pons, Frédéric. « La méthode CARTINO PC : principes, évaluations, usages », 2014.
- Poppenga, Sandra K., Bruce B. Worstell, Jason M. Stoker, et Susan K. Greenlee. « Using Selective Drainage Methods to Extract Continuous Surface Flow from 1-Meter Lidar-Derived Digital Elevation Data ». USGS Numbered Series. Scientific Investigations Report. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2010. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20105059>.

- « Prévention des risques naturels ». Ministère de la Transition écologique et solidaire, <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/prevention-des-risques-naturels>. Consulté en juillet 2019
- Ravel, Ludovic. « Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc ». Thesis, Chambéry, 2010. <http://www.theses.fr/2010CHAMS042>.
- Rousseaux, Frédéric. « Étude des modèles numériques de terrains pour améliorer la fiabilité des calculs d'aléas et de vulnérabilité ». Thesis, Marne-la-Vallée, 2004. <http://www.theses.fr/2004MARN0207>.
- Roux, Hélène. « Estimation de paramètres en hydraulique fluviale, à partir de données caractéristiques de l'imagerie aérienne », 2004. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00000040/>.
- Ruas, Anne. « A method for building displacement in automated map generalisation ». *International Journal of Geographical Information Science* 12, n° 8 (1 décembre 1998): 789-803. <https://doi.org/10.1080/136588198241509>.
- Saunders, William. « Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis ». San Diego, California: ESRI UserConference, juillet 1999. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>.
- Williams, Garnett P. « Bank-Full Discharge of Rivers ». *Water Resources Research* 14, n° 6 (1978): 1141-54. <https://doi.org/10.1029/WR014i006p01141>.



## **Annexes**

## Annexe 1 — Liste des ressources créées

Pull request du portage du plugin implémentant Bankfull detection width vers QGIS 3 sur Github :

<https://github.com/pierluigiderosa/BankFullDetection/pull/1>

Dépôt de la branche de développement du plugin utilisée pour les développements liés au stage :

<https://github.com/jeremyk6/BankFullDetection/tree/stage>

Dépôt des scripts et modèles réalisés lors du stage :

<https://github.com/jeremyk6/ProcessingEcoulement>

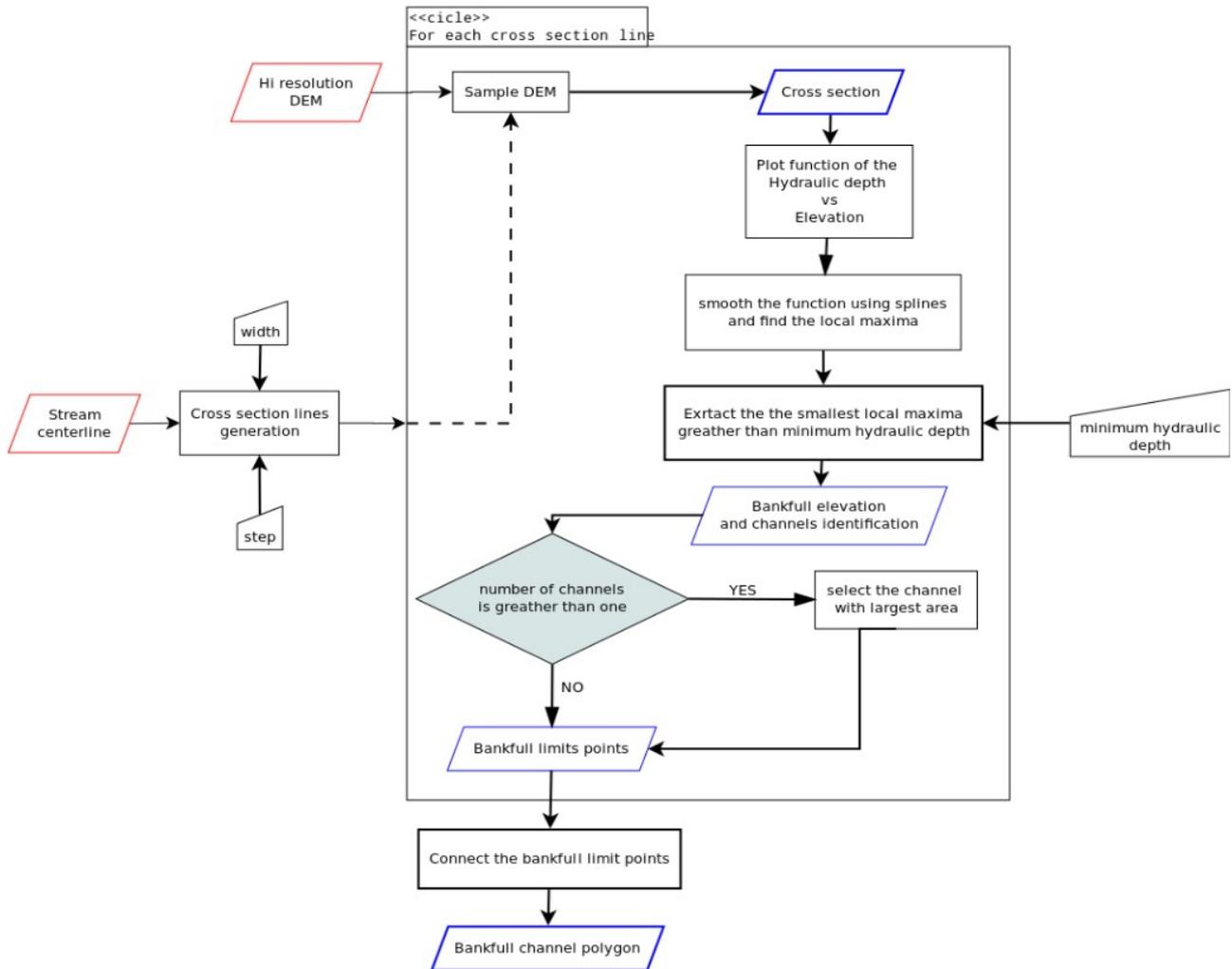
Liste et description des modèles Processing réalisés :

<https://github.com/jeremyk6/ProcessingEcoulement/blob/master/modeles/README.md>

Liste et description des scripts Processing réalisés :

<https://github.com/jeremyk6/ProcessingEcoulement/blob/master/scripts/README.md>

## Annexe 2 — Logigramme de la détection des berges



Logigramme de l’algorithme de détection des berges (Cencetti et al., 2014).

## **Annexe 3 — Tests de sensibilité sur la suppression des ponts**

Document réalisé en mai 2019

## Test de différents algorithmes :

### Présentation rapide des algorithmes:

#### **GDAL** – Fill No Data :

Documentation : [https://gdal.org/gdal\\_alg\\_8h.html#a0a079afef61968f224b159d48423d1c6](https://gdal.org/gdal_alg_8h.html#a0a079afef61968f224b159d48423d1c6)

Basé sur un algorithme de pondération inverse à la distance<sup>1</sup> (inverse distance weighting). La documentation de GDAL précise que l'algorithme se veut plus performant pour l'interpolation de zones manquantes sur les rasters réguliers (type MNT).

#### **GRASS** – r.fillnulls :

Documentation : <https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/r.fillnulls.html>

Propose trois algorithmes d'interpolation:

- Bilinéaire<sup>2</sup> : algorithme qui permet l'interpolation d'une valeur selon ses quatre plus proches voisins.
- Bicubique<sup>3</sup> : algorithme qui permet l'interpolation d'une valeur selon ses huit plus proches voisins. Lisse donc d'avantage par rapport au bilinéaire.
- Regularized Spline with Tension<sup>4</sup>

#### **SAGA** – Close gaps :

Documentation : [http://www.saga-gis.org/saga\\_tool\\_doc/2.2.6/grid\\_tools\\_7.html](http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.6/grid_tools_7.html)

La documentation ne précise pas l'algorithme utilisé (il pourrait s'agir d'un algorithme de plus proche voisin).

Les cinq algorithmes ont été testés sur les mêmes données : trois ponts, l'un (140m) traversant le Gardon d'Alès, au sud de la ville, les deux autres (15m et 35m) plus au sud traversent le Valat de Respéchas et l'Alzon. Les captures ci-dessous illustrent les régions supprimées puis interpolées. Elles sont relativement larges pour couvrir l'intégralité du pont ainsi qu'une partie de la berge.



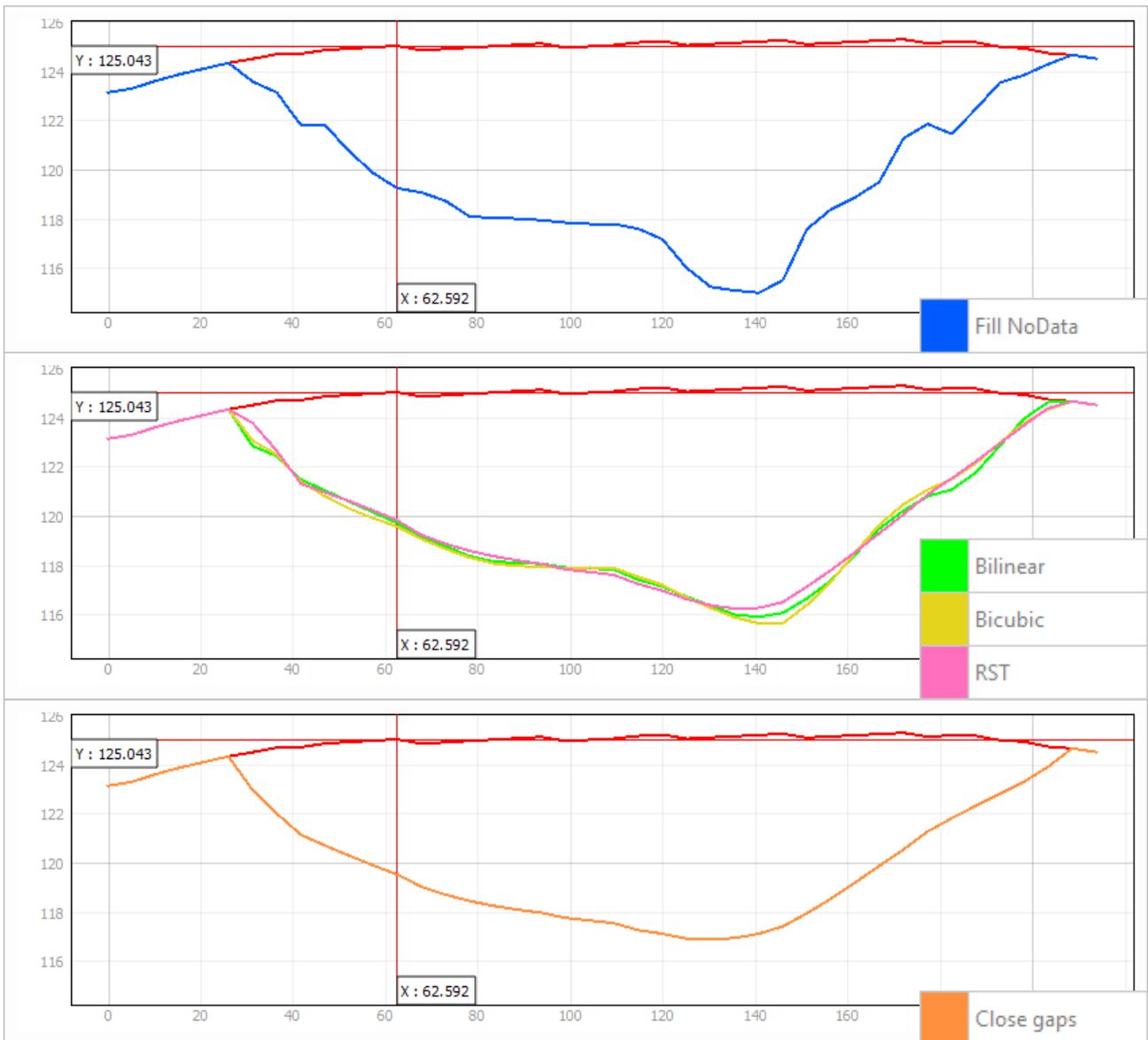
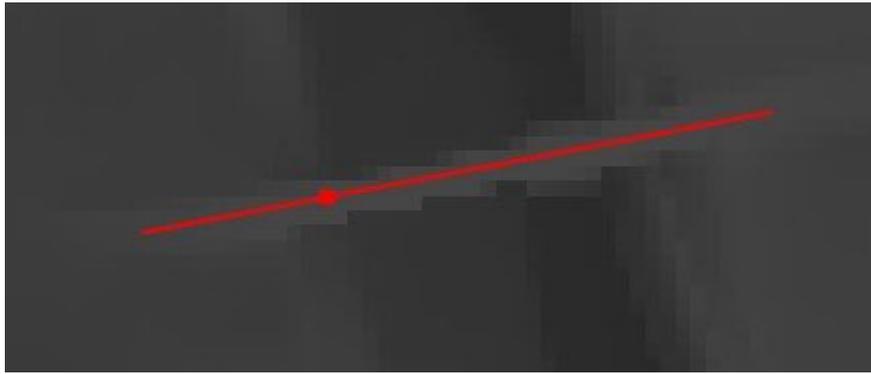
1 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pondération\\_inverse\\_à\\_la\\_distance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pond%C3%A9ration_inverse_%C3%A0_la_distance)

2 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Interpolation\\_bilinéaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Interpolation_bilin%C3%A9aire)

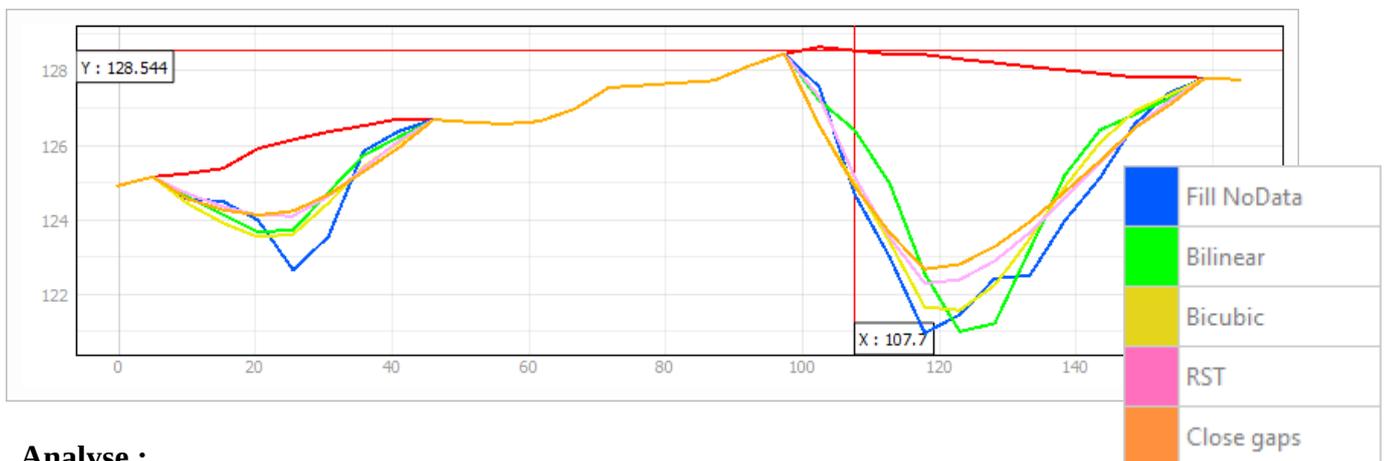
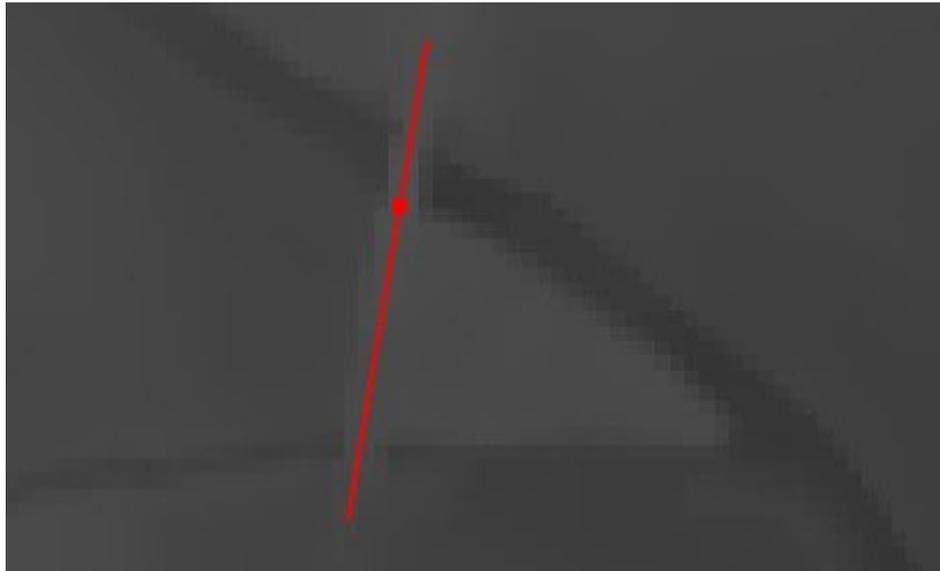
3 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Interpolation\\_bicubique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Interpolation_bicubique)

4 [http://solimserver.geography.wisc.edu/axing/teaching/geog579/lectures/references/Mitasova\\_Curvature\\_mathematicalGeology\\_2\\_1993.pdf](http://solimserver.geography.wisc.edu/axing/teaching/geog579/lectures/references/Mitasova_Curvature_mathematicalGeology_2_1993.pdf)

**Premier pont (140m) :**



## Deuxième et troisième ponts (15m et 35m) :



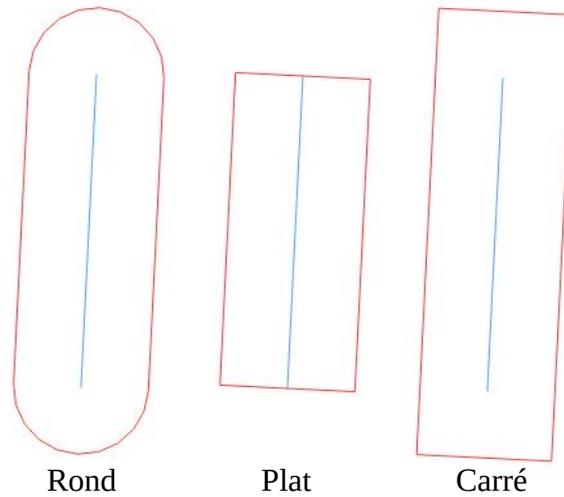
### Analyse :

On remarque, du premier au dernier algorithme, une augmentation progressive du lissage. L'algorithme de GDAL semble représenter la plus grande fidélité dans ce cas : l'altitude est similaire, au sein du lit, à l'amont et à l'aval de la zone interpolée. Généralement, on distingue encore légèrement la berge (effet "escalier" visible la courbe) au contraire des autres algorithmes qui lissent cette information. Il est cependant nécessaire de se questionner sur le résultat nécessaire à une simulation hydraulique, qui considérerait possiblement ce reste de berge comme un artefact altérant. Si cela est le cas, l'algorithme d'interpolation bilinéaire reste proche des valeurs originales et pourrait répondre au besoin. Au contraire, les algorithmes RST et SAGA font disparaître une grande partie de l'information et créent une rupture avec la continuité du cours d'eau qui pourrait altérer la simulation.

## Impact des tampons sur l'interpolation :

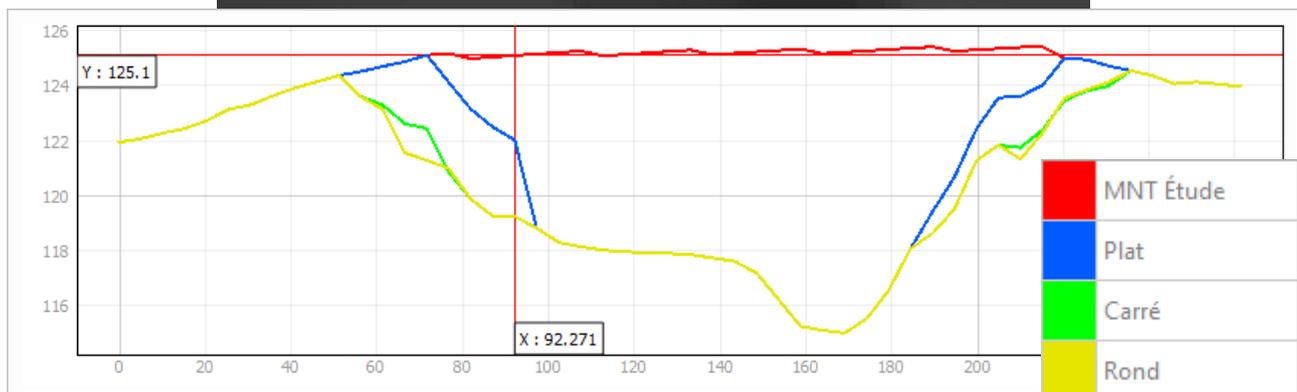
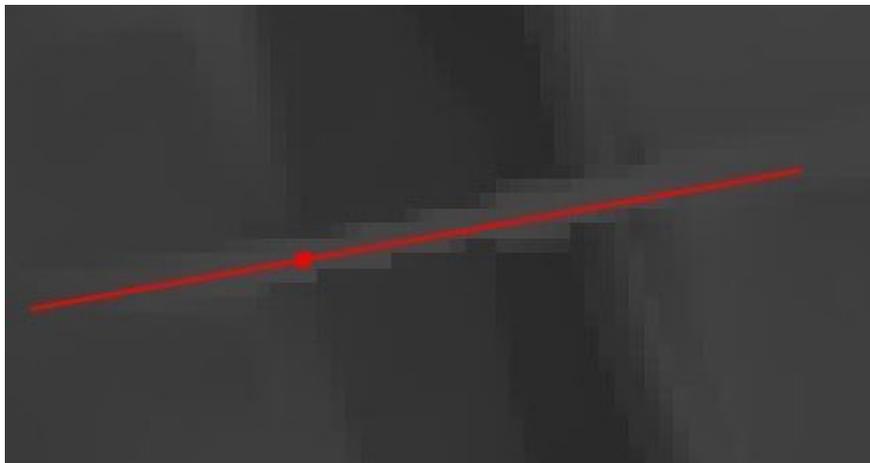
### 1. Forme des tampon :

QGIS propose plusieurs formes de tampons :

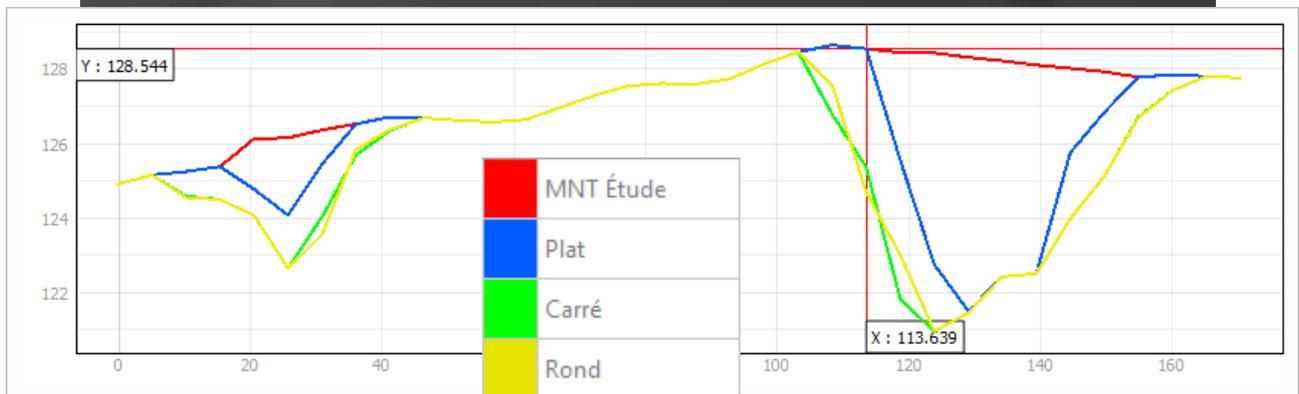


Sur l'illustration ci-dessus, pour chaque forme a été fournie la même distance. Le choix de la forme n'influe que dans le cas d'un objet linéaire. On remarque qu'agir sur ces paramètres joue de manière significative sur l'empreinte spatiale des tampons réalisés. Il est donc intéressant d'étudier leur impact sur l'interpolation. Les ponts choisis pour tester les algorithmes seront à nouveau utilisés ici.

### **Premier pont (140m) :**



## Deuxième et troisième ponts (15m et 35m) :

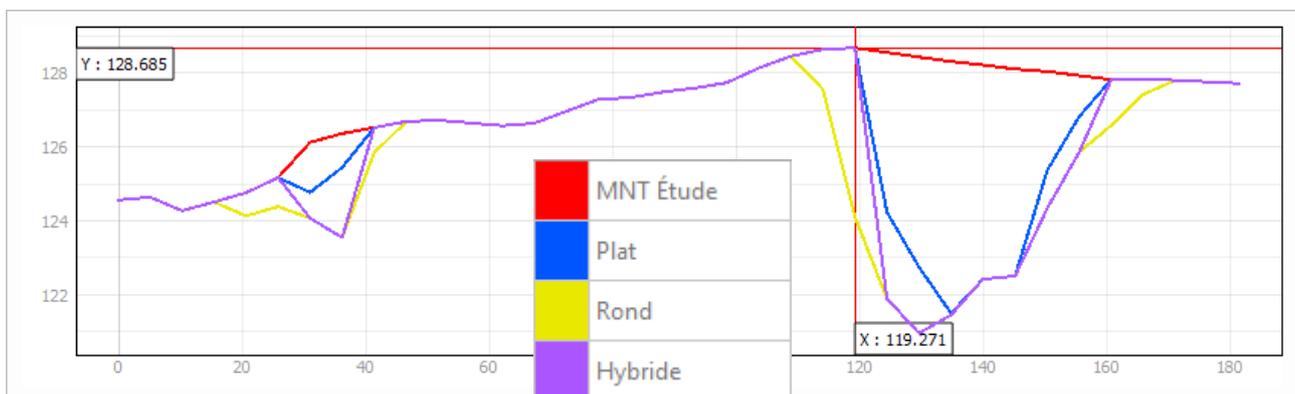


### Analyse :

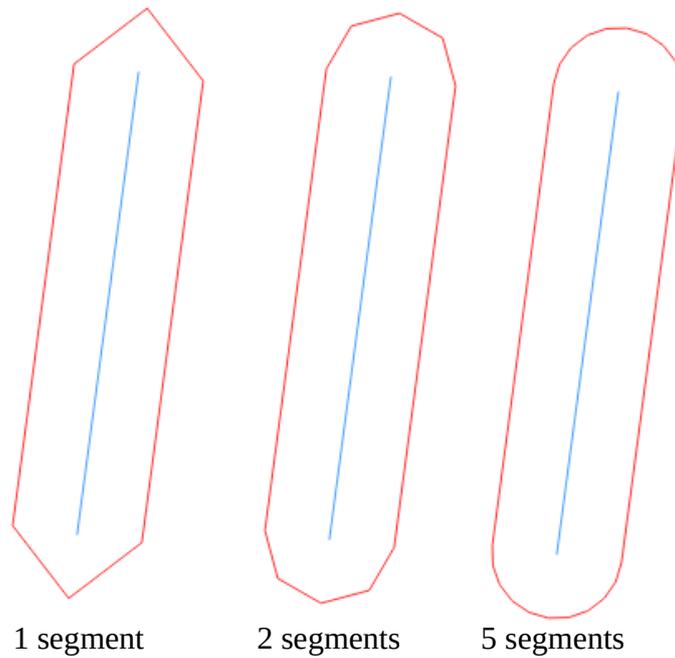
Le tampon plat, ayant l'empreinte la plus proche du pont, est celui qui altère le moins les berges. Sur les cours d'eau assez larges, il permet à l'interpolation d'en recouvrer la profondeur. En revanche, sur les cours d'eau plus fins, la suppression s'avère insuffisante. Les tampons carrés et plats permettent une interpolation équivalente. Une solution hybride, utilisant à la fois la détection des berges du tampon plat et la bathymétrie du tampon rond pourrait être envisageable.

A = MNT Étude, B = Plat, C = Rond

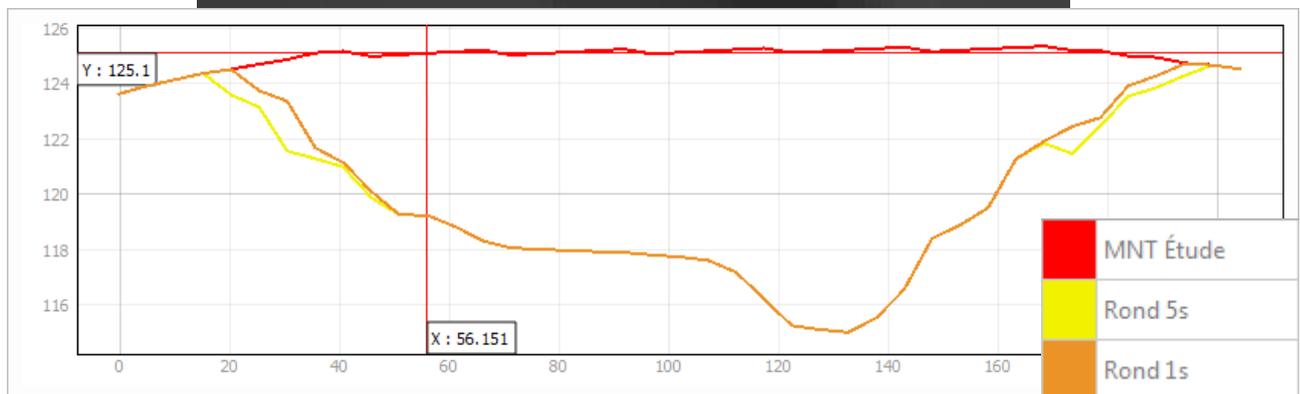
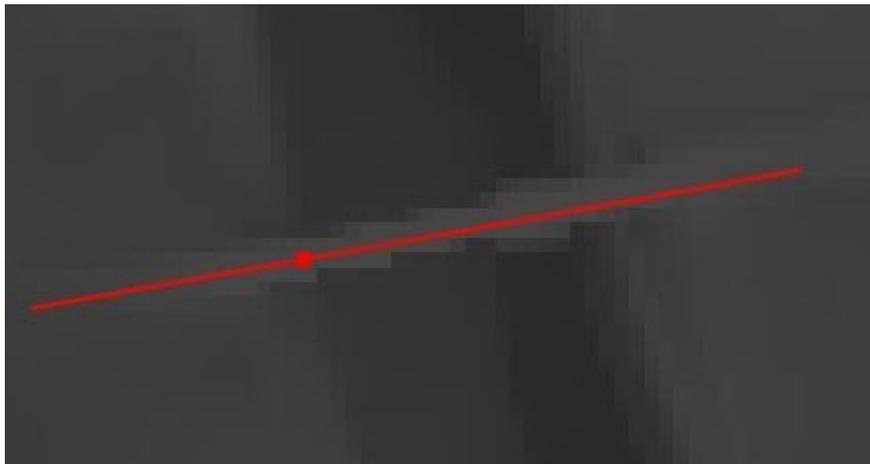
Hybride =  $((A \neq B) * C) + ((A = B) * A)$



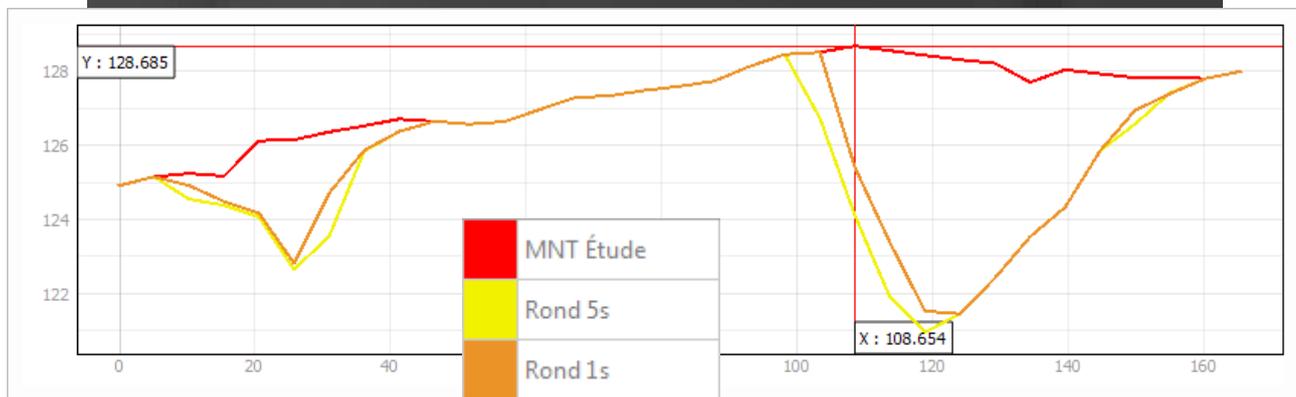
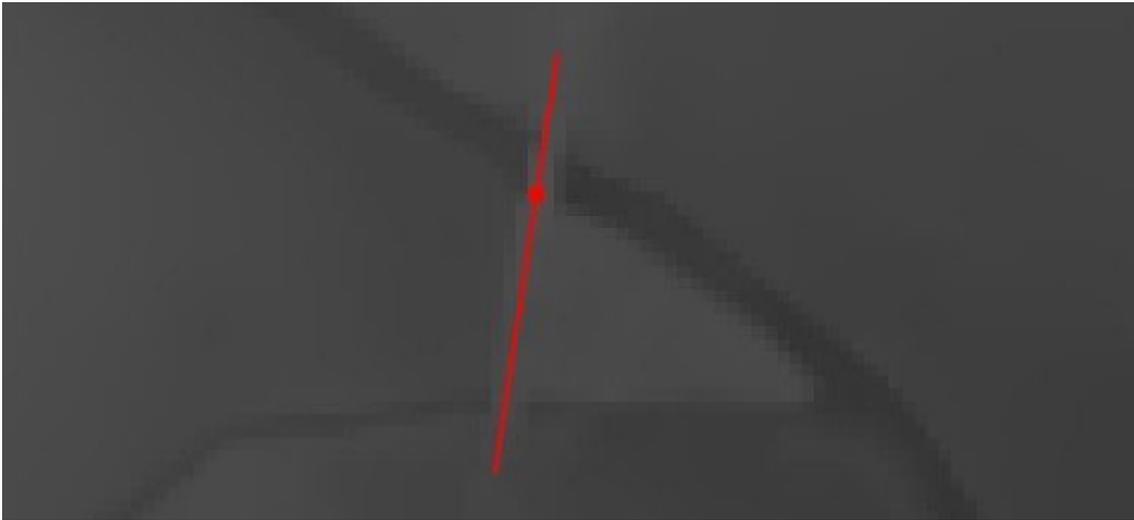
Il est également possible d'agir sur le nombre de segments qui composeront les quarts de cercle des décalages dans le cas des tampons arrondis :



**Premier pont (140m) :**



## Deuxième et troisième ponts (15m et 35m) :



### Analyse :

La différence d'empreinte entre l'approximation à un segment et à cinq segments est minime mais peut avoir un impact sur les berges. Les tests précédents vérifient cette hypothèse, la différence entre les deux résultats étant certainement négligeable cependant.

## **2. Distance des tampons :**

La distance choisie pour les tampons est une donnée essentielle : elle va permettre à la fois d'éradiquer au mieux le pont, mais également de limiter l'impact de l'interpolation sur les berges. Le champ LARGEUR présent dans les attributs des couches tronçon de route/voie ferrée peut répondre partiellement à cette problématique.

Sur la zone étudiée (MNT d'Alès), sur 1159 ponts détectées, 940 disposent d'une largeur indiquée par la route ou la voie ferrée, soit 81,10% . Cependant, le champ largeur des couches n'a pas nécessairement la même signification.

### **Champs largeur :**

#### **Tronçon de route :**

LARGEUR : "Représente la largeur de la chaussée, d'accotement à accotement, arrondie au demi-mètre. En ville, elle représente la largeur mesurée de trottoir à trottoir." (source : Documentation BD TOPO)

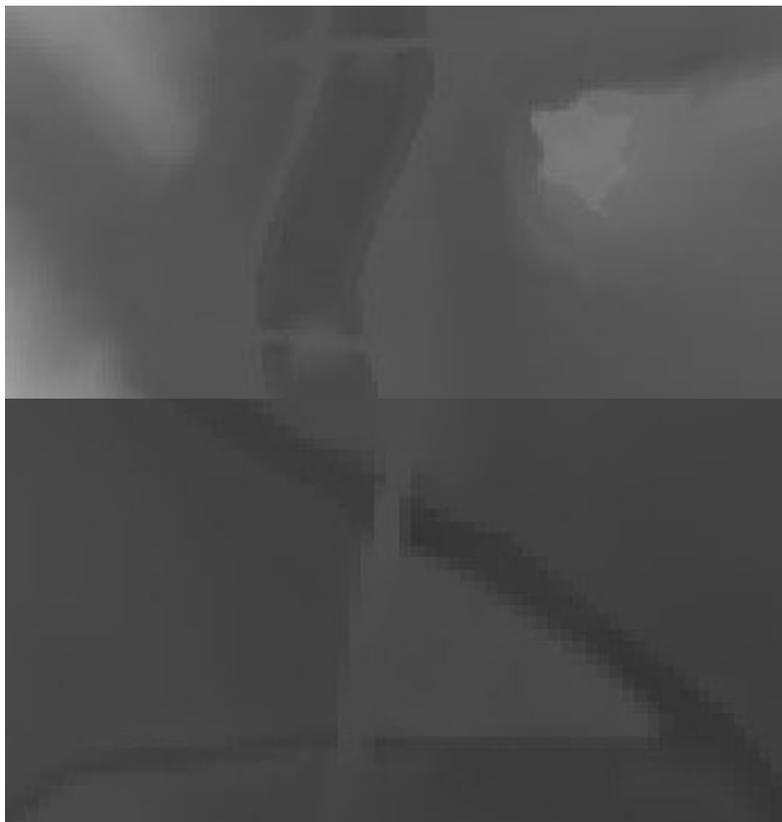
#### **Tronçon de voie ferrée :**

LARGEUR : "Attribut permettant de distinguer les voies ferrées de largeur standard pour la France (1,435 m), des voies ferrées plus larges ou plus étroites." (source : Documentation BD TOPO)

Trois attributs possibles : Etroite (< 1,435m), Normale (1,435 m), Large (> 1,435 m).

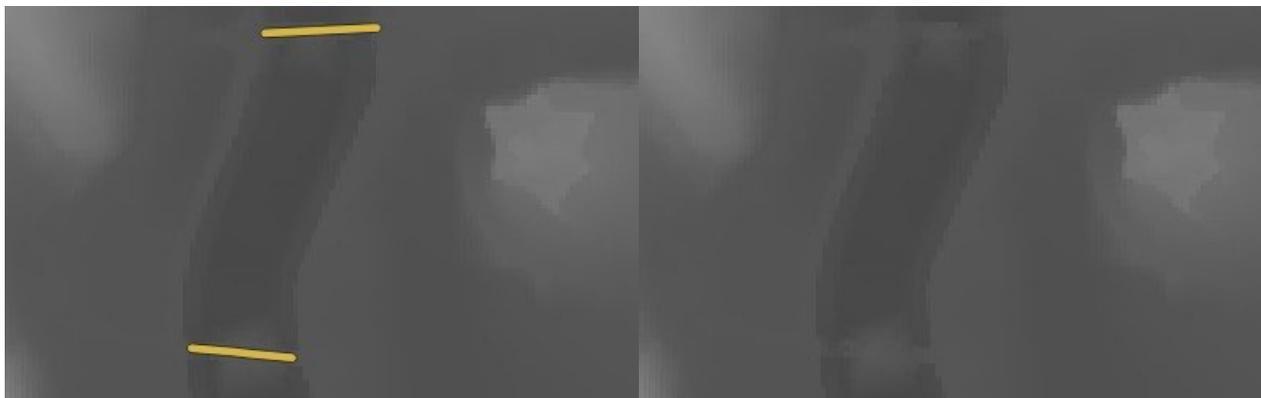
Problème : "L'écartement des rails est la distance séparant le flanc interne des deux files de rails d'une voie ferrée. L'écartement standard de 1 435 mm" (source : Wikipédia). La largeur représentée ici correspond donc à l'écartement des rails et non à la largeur de la voie.

Les zones de tests choisies ici sont deux ponts de 4 m de largeur situé sur le Gardon d'Alès et qui présentent des artefacts de numérisation forts (certainement dus aux piliers du pont), ainsi que les deux ponts utilisés précédemment, de 7 m de largeur, au sud d'Alès.



### Premier essai : largeur en attribut :

Pour le premier essai, j'ai choisi de visualiser le résultat avec pour tampon la valeur de largeur présente en attribut. Si aucune largeur n'est présente, la valeur sera 1. Les constructions surfaciques sont utilisées telle quelle.



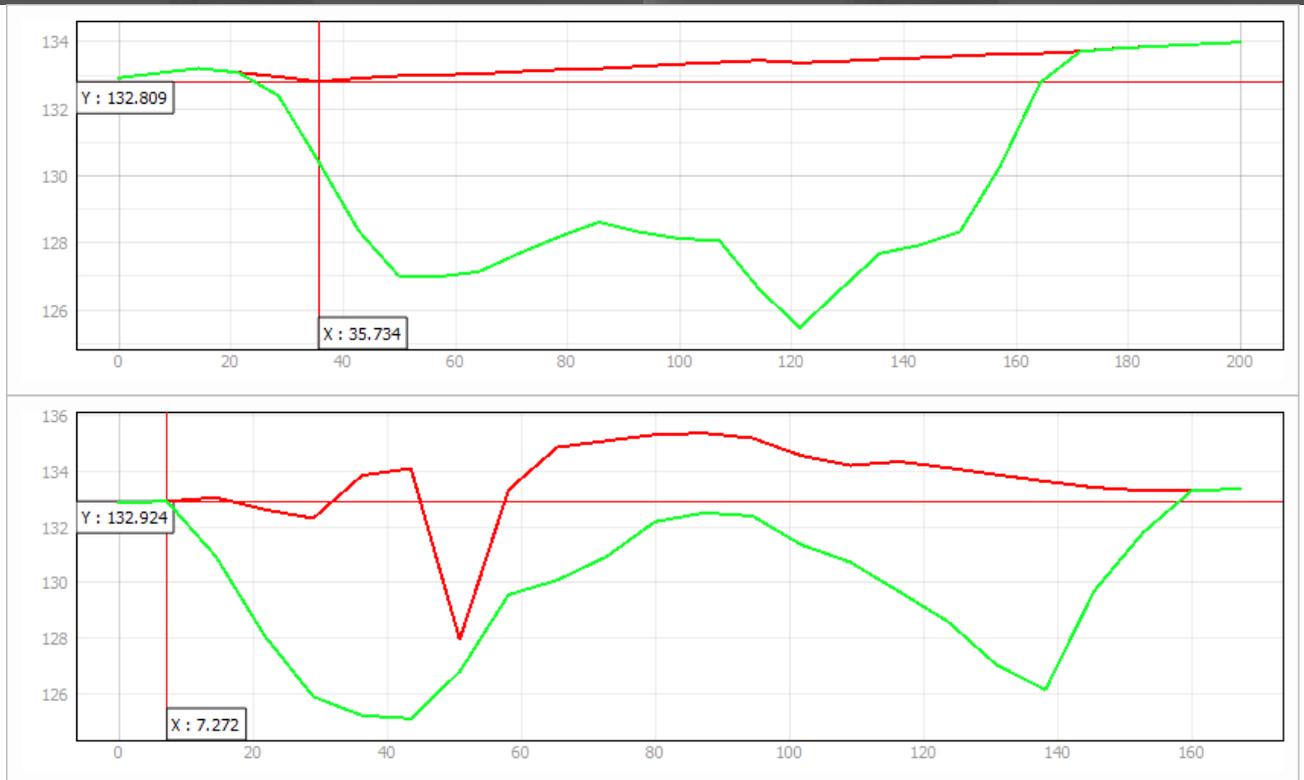
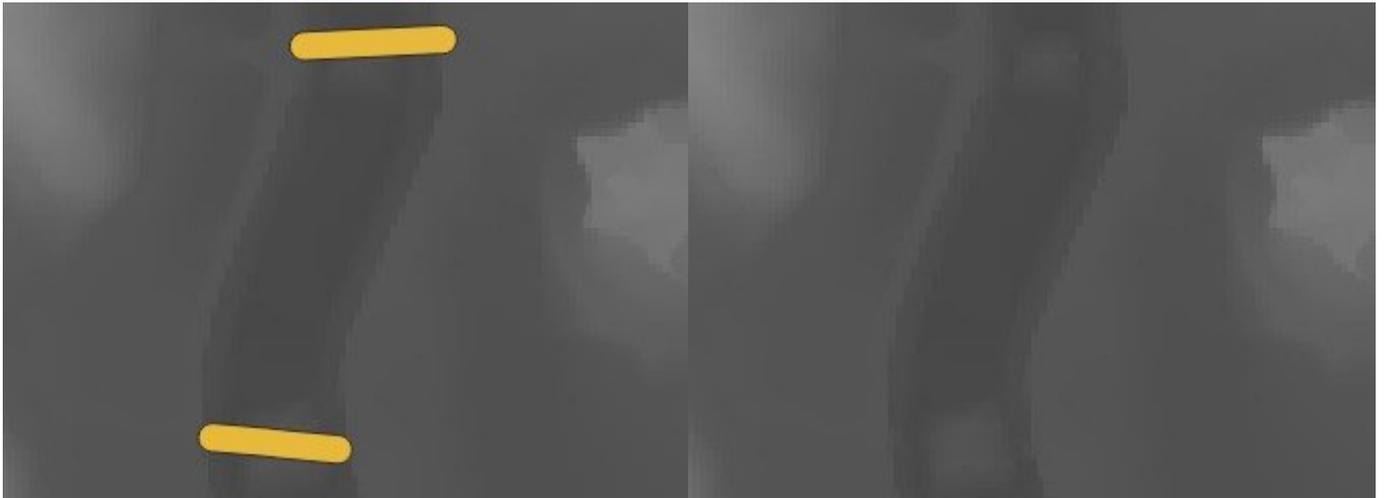
La valeur précisée est, ici, clairement insuffisante. Le pont est très légèrement estompé sur ses extrémités mais reste bien présent.



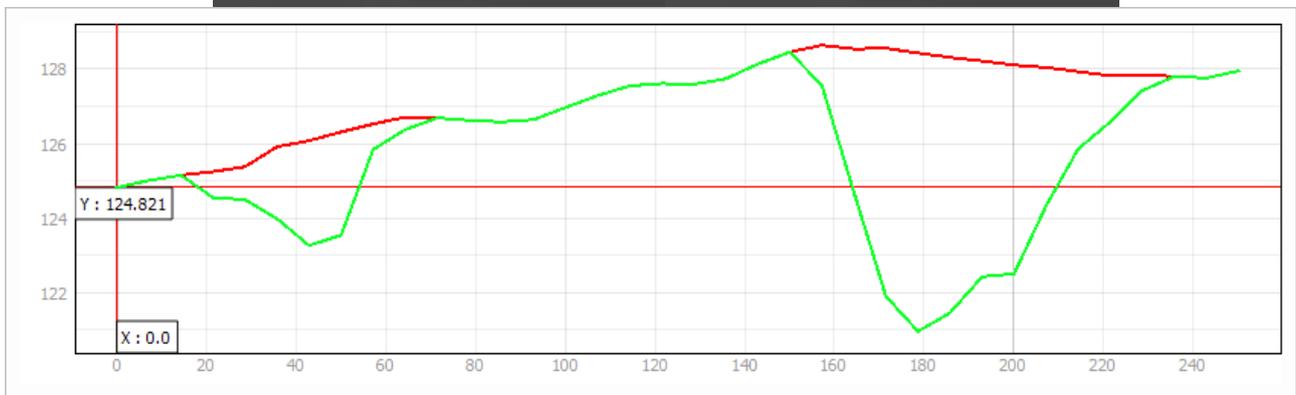
Le constat est un peu différent sur la seconde zone. Le premier pont est très partiellement supprimé (artefact visible sur l'image). Le second est en revanche intact.

Dans les deux cas, la largeur de tampon choisie semble insuffisante. De plus, les ponts les plus larges sont, ici, ceux traversant le cours d'eau le plus fin. L'impact sur la berge est donc inévitable. À ce titre, il peut ainsi être intéressant d'essayer un tampon fixe de valeur supérieure.

## Second essai – tampon de 10 m :

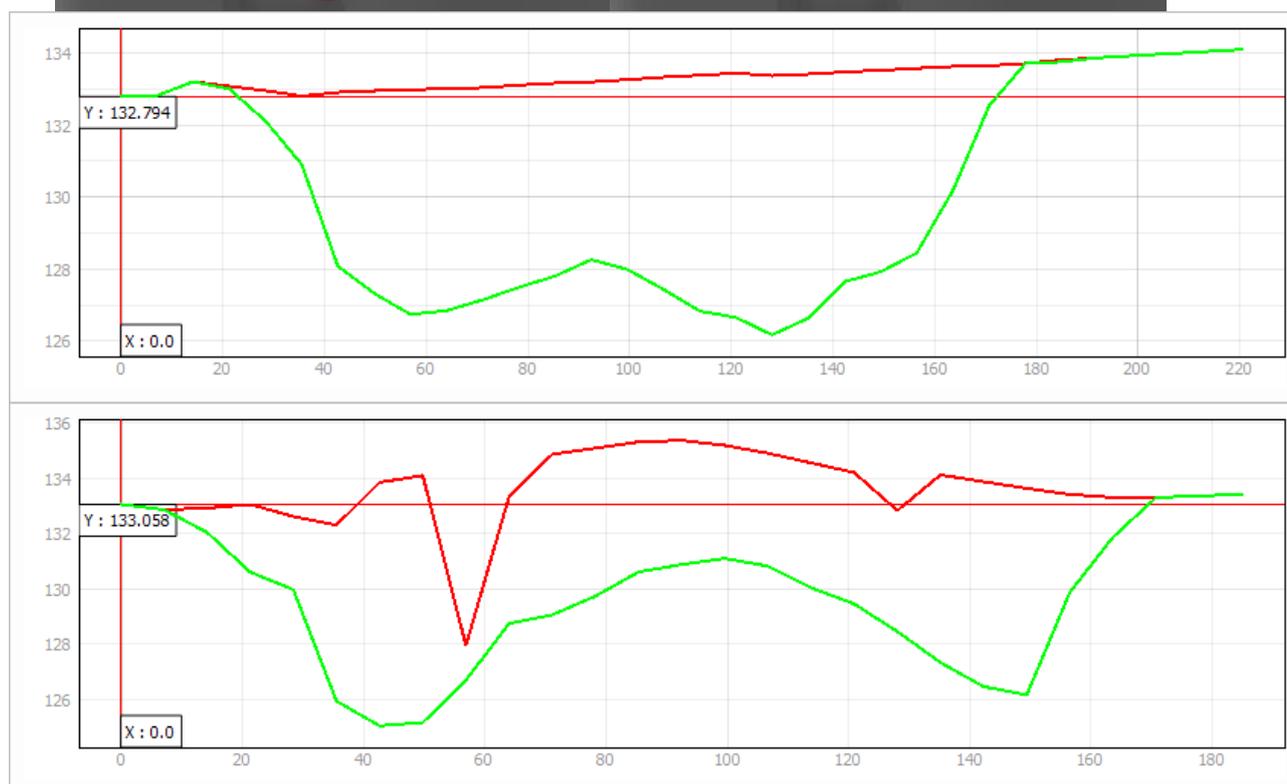
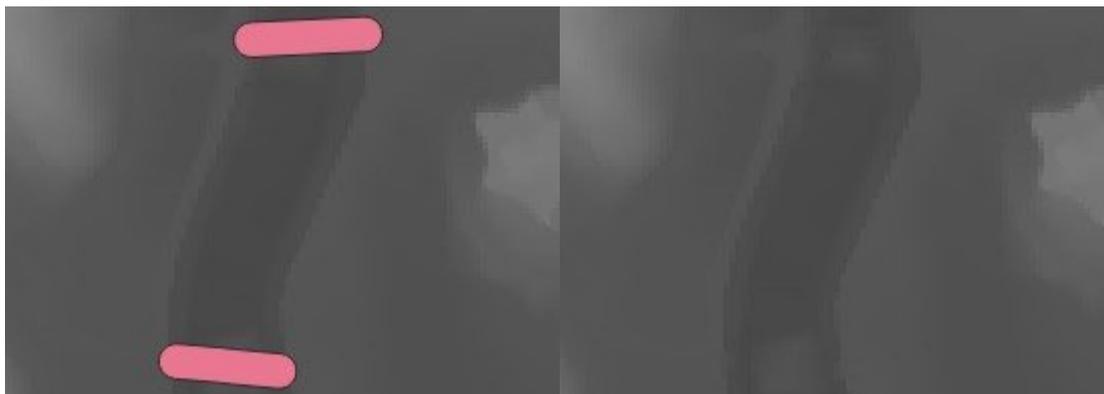


Pour une valeur de tampon de 10 m, le pont est globalement supprimé mais une forte élévation au centre reste présente.

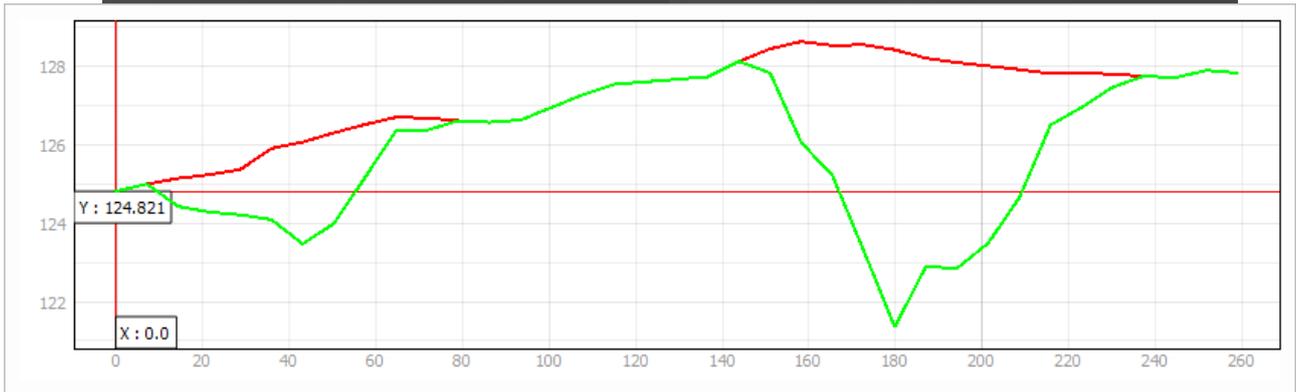
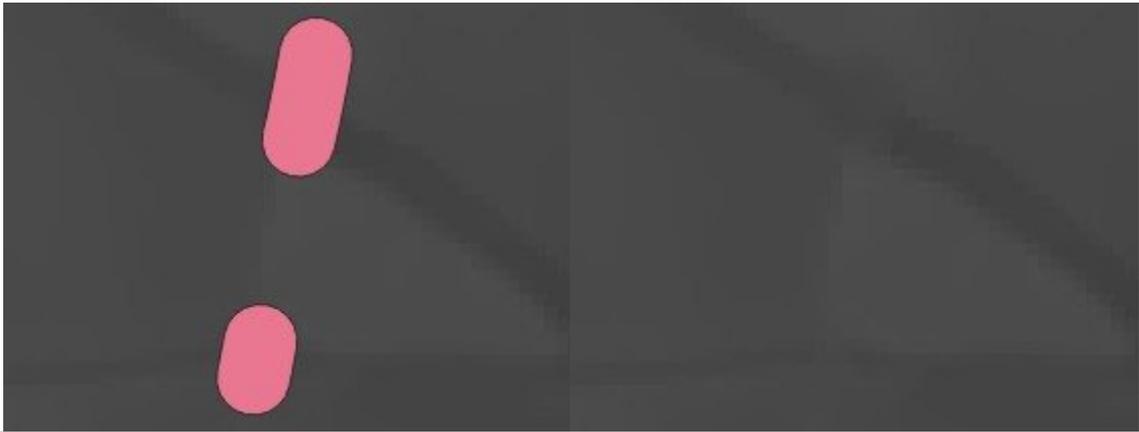


L'augmentation du tampon a également été bénéfique sur cette zone, et a permis la suppression intégrale des ponts..

### Troisième essai – tampon de 15 m :



Le résultat est légèrement meilleur qu'au palier précédent. Relativement similaire sur le premier pont, l'élévation centrale perd environ 1 m sur le second. Il sera donc impossible de supprimer cet artefact autrement qu'à l'aide d'un tampon bien plus important, ou par intervention manuelle.



Au contraire ici, l'augmentation du tampon a plutôt desservi l'interpolation qui perd en précision.