



HAL
open science

Extraction de données topographiques pertinentes pour l'étude hydraulique d'une rivière à partir d'un nuage de points LiDAR

M. Morel

► **To cite this version:**

M. Morel. Extraction de données topographiques pertinentes pour l'étude hydraulique d'une rivière à partir d'un nuage de points LiDAR. Sciences de l'environnement. 2011. hal-02595651

HAL Id: hal-02595651

<https://hal.inrae.fr/hal-02595651v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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

Extraction de données topographiques pertinentes pour l'étude hydraulique d'une rivière à partir d'un nuage de points LiDAR

Maxime Morel

Encadrant : Lionel Pénard

Tuteur Pédagogique : Behzad Shariat

Rapport de stage Master 2 Image

1^{er} mars – 31 août 2011

Table des matières

Introduction	4
1 Contexte	6
2 Données LiDAR	8
2.1 Introduction	8
2.2 Capteur LiDAR	8
2.3 Les données de Sintégra	10
2.4 Bilan	11
3 Outils de base	14
3.1 Introduction	14
3.2 Choix techniques	14
3.3 Mise en place des outils	15
3.3.1 Lecture des données LiDAR	15
3.3.2 Visualisation des données	16
3.3.3 Filtres	18
3.3.4 Morphologie Mathématique	19
3.4 Application des outils	20
3.4.1 Vérification de l'écart entre les deux relevés LiDAR	20
3.5 Bilan	22
4 Segmentation	24
4.1 Introduction	24
4.2 Indicateurs	24
4.2.1 Normale au pixel	24
4.2.2 Variance au pixel	25
4.3 Croissance de région	26
4.3.1 Algorithme et paramètres	26
4.3.2 Sensibilité aux paramètres	27
4.3.3 Bilan et résultats	30
4.4 Post-traitements	31
4.4.1 Introduction	31
4.4.2 Morphologie Mathématique	31
4.4.3 Seuillage par plan	31
4.4.4 Analyse des résultats	34
4.5 Bilan	35
5 Conclusion	36
5.1 Bilan général	36
5.2 Perspectives	36

A Images	38
Table des figures	66
Abréviations	68
Bibliographie	70

Introduction

Ce document constitue le rapport de mon stage de 6 mois effectué au Cemagref de Lyon, du 1 mars 2011 au 31 août 2011. Ce stage conclut ma deuxième année de Master Professionnel Image.

Présentation du Cemagref

Le Cemagref¹ est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement (le Cemagref va changer de nom pour devenir IRSTEA²). Les équipes pluridisciplinaires de chercheurs et d'ingénieurs du Cemagref travaillent sur l'adaptation au changement global, associant les sciences expérimentales, les sciences économiques et sociales et la science informatique (modélisation, intégration de données). Voici ses différentes missions :

- Risques environnementaux : crues, inondations, avalanches, feux de forêt, pollutions diffuses
- Surveillance des milieux aquatiques continentaux, ressources en eau, usages de l'eau
- Technologies propres : écotechnologies, éco-évaluation, écotoxicologie, traitement et valorisation énergétique des déchets organiques.
- Aménagement du territoire
- Économie et sociologie de l'environnement : observatoire de la biodiversité, télé-détection, trames verte et bleue

Quelques chiffres à propos du Cemagref :

- Budget annuel 2010 : 110 millions d'euros, dont 27% de ressources propres
- 9 centres
- 3 départements de recherche : eaux, écotechnologies, territoires
- 20 unités de recherche, 5 unités mixtes
- 1600 personnes, statutaires et contractuelles
- 500 chercheurs
- 200 doctorants
- 40 post-doctorants
- 400 publications par an
- 10 000 heures d'enseignement supérieur par an
- 300 contrats de recherche

La stratégie scientifique du Cemagref est focalisée autour de trois grands défis porteurs d'enjeux environnementaux majeurs :

- La qualité environnementale : « coupler méthodes et technologies pour comprendre et agir »,

1. Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts

2. Institut de recherche en sciences et technologies de l'environnement et de l'agriculture

- La gestion durable des eaux et des territoires : « généraliser les approches multisectorielles pour mieux intégrer eaux et territoires »,
- La gestion des risques naturels : « élargir l’approche des risques par l’étude de la viabilité des systèmes environnementaux ».

Le Cemagref se forme de différentes unités de recherches dont l’unité hydrologie-hydraulique situé à Lyon. Cette unité mène des recherches et des activités d’appui technique sur les bassins versants, pour mieux gérer les ressources en eau et les risques liés aux inondations et aux sécheresses. Ces recherches privilégient la connaissance quantitative et qualitative des eaux superficielles à partir de la modélisation couplée des régimes hydrologiques et de l’hydraulique des écoulements en rivières, et d’études expérimentales en laboratoire et in situ. Elles s’intéressent par ailleurs à une modélisation des pluies et des processus hydrologiques à petite échelle pour une représentation spatialisée des transferts d’eaux, de sédiments et de solutés. Les méthodes et les outils élaborés apportent des réponses aux demandes sociales parfois contradictoires, liées aux usages de l’eau, à la protection contre les événements extrêmes et à la qualité des hydrosystèmes. Les différentes questions traitées concernent la lutte contre les crues, inondations et sécheresses ; le dimensionnement des aménagements ; l’entretien et la gestion du lit des rivières ; l’impact des activités humaines et du changement climatique sur la quantité et la qualité des ressources en eaux. L’unité de recherche est composée de 18 chercheurs ou ingénieurs, 6 personnes à l’assistance technique (4) ou administrative (2).

Cette unité est divisée trois équipes :

- L’équipe « Métrologie » oriente, définit et met en œuvre les moyens techniques nécessaires pour réaliser les différents projets de recherche sur les réseaux de mesure. Ses activités axées sur la métrologie environnementale spécifique aux laboratoires de terrain font appel à des compétences variées : hydrométrie, hydraulique, hydrologie, granulométrie, topographie, mesures physiques, imagerie...
- L’équipe « Hydrologie des bassins versants » s’intéresse à la manière dont les flux hydrologiques se répartissent dans son espace géographique et dans le temps, au travers des différentes composantes du cycle hydrologique d’un bassin versant. Elle vise à mieux comprendre la climatologie des précipitations, et à déterminer dans quelle mesure le régime des cours d’eau peut être modifié par des interventions humaines dans le but de prévenir les risques d’inondations.
- L’équipe « Hydraulique des rivières » axe ses recherches sur les écoulements dans le réseau hydrographique et leurs effets. L’objectif étant de contribuer à une meilleure gestion des réseaux hydrographiques. Dans ce domaine, nous étudions le fonctionnement physique des cours d’eau. L’effort porte sur la compréhension et la modélisation des écoulements ainsi que sur les matières transportées : polluants et sédiments. Dans le cadre de cours d’eau naturels, cette étude passe par la description de la morphologie des différents lits et de leur évolution liée principalement au régime hydrologique et aux interventions humaines.

Présentation du stage et plan du rapport

Le chapitre 1 est consacré à la présentation du contexte. Le chapitre 2 présente les données à notre disposition ainsi que le fonctionnement du capteur LiDAR. Le chapitre 3 présente les outils de base nécessaires à la manipulation des données ainsi qu’une première utilisation de ces outils pour faire des vérifications sur les données. Le chapitre 4 présente les différentes techniques mises en place afin d’atteindre l’objectif. Et enfin le chapitre 5 donnera une conclusion de ces travaux et proposera quelques perspectives.

Chapitre 1

Contexte

Comme nous l'avons vu dans ses domaines d'activités, l'équipe « Hydraulique des rivières » s'intéresse à la morphologie des rivières avec des bancs de graviers alternés. Voici un exemple de ce type de rivière dans la figure 1.1. Les techniques actuelles pour ce genre d'études se basent sur des relevés topographiques faits à la main en allant directement sur le site d'étude, comme dans la figure 1.2.



FIGURE 1.1 – Banc de gravier alterné



FIGURE 1.2 – Relevé topographique manuel (CEMAGREF / WEINGERTNER F.)

Généralement ce travail consiste à relever des points sur une section transversale de la rivière, les mesures pouvant être espacées de plusieurs mètres. Le volume de données obtenu

suite à ces mesures est acceptable et il sera alors possible de les traiter manuellement. Cela se fait dans le cadre d'un projet dont l'objectif est de prévenir les risques d'inondations. C'est pourquoi le Cemagref s'intéresse au couple de rivières Arc-en-Maurienne et Isère, car celui-ci est un cas d'étude représentatif autant sur le plan géographique que social. L'enjeu est important car en France, les inondations constituent un risque majeur. En effet, 160 000 km de cours d'eau sont exposés à ces risques, ce qui représente 80% des couts liés aux catastrophes naturelles soit 250 M d'euros par an. Pour évaluer ces risques, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement des rivières au niveau de leurs morphologies, qui est liées aux événements hydrauliques qui s'y produisent. Il faudra donc modéliser le transport de sédiments, l'évolution de la végétation et la morphologie des éléments topographiques de la rivières, tels que les bancs et les berges.

On voit ainsi apparaître d'autres moyens de mesures. Il existe des moyens automatiques pour faire l'acquisition d'un grand nombre de points : la télédétection. Dans notre cas, il s'agit des capteurs LiDAR¹. Ce système peut être installé dans un hélicoptère. Il faut ensuite survoler la zone d'étude pour faire l'acquisition d'un grand nombre de points 3D. Le nuage de point 3D obtenu peut être dense, beaucoup plus que les relevés manuels. Il se pose alors le problème de la gestion de toute cette quantité de données. Les personnes travaillant habituellement avec des données topographiques peu denses utilisent des logiciels spécialisés dans lesquels ils indiquent manuellement ou se trouve les différents éléments topographiques qui sont l'eau, les bancs, les berges. Avec des données denses de type nuage de points LiDAR, il devient difficile gérer tant de données sans les outils nécessaires. Alors comment traiter automatiquement ces données pour extraire les éléments topographiques pertinents ?

Dans cette problématique, le Cemagref s'intéresse plus particulièrement à la géomorphologie des bancs de graviers sur l'Arc-en-Maurienne. C'est un site d'étude depuis de nombreuses années [6] et il est notamment étudié par Mohamed Jaballah au cours de sa thèse au Cemagref [7].

L'objectif du stage est donc de proposer une solution à la problématique suivante : comment à partir d'un MNT² LiDAR segmenter la scène pour séparer l'eau, les bancs et les berges.

1. Light Detection And Ranging
2. Modèle Numérique de Terrain

Chapitre 2

Données LiDAR

2.1 Introduction

Dans cette partie nous allons voir comment fonctionne un capteur LiDAR et comment il permet de faire l'acquisition de nuages de points de grandes tailles. Ensuite nous allons détailler le processus de traitement du nuage de points 3D acquis par une société extérieure, Sintégra [4], et faire un inventaire des données à notre disposition.

2.2 Capteur LiDAR

Un système LiDAR permet de mesurer la distance du capteur à l'obstacle rencontré par le laser émis. Nous allons détailler son fonctionnement grâce à la figure 2.1.

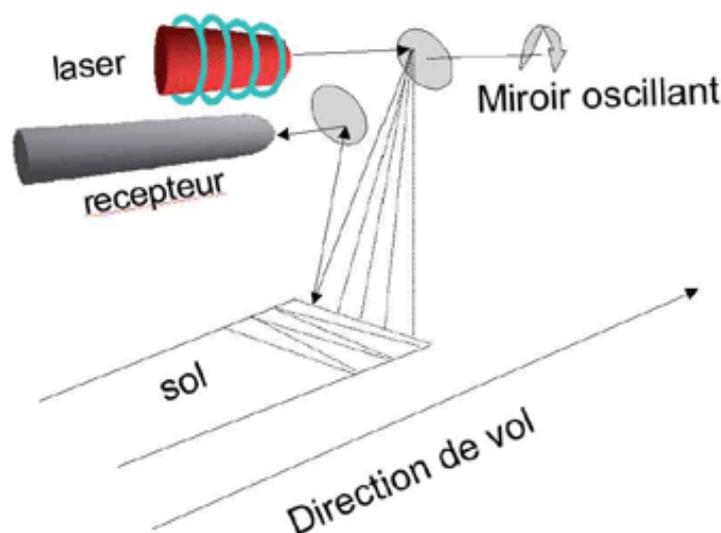


FIGURE 2.1 – Schémas du capteur LiDAR à balayage

Le système est d'abord composé d'un émetteur laser qui envoie un rayon vers le sol après réflexion sur un miroir oscillant. Pour ce genre d'équipement, la longueur d'onde utilisée est souvent dans le domaine proche infrarouge. Lorsque le rayon frappe le sol, il est rétro-diffusé puis revient vers le capteur. C'est ce temps aller-retour qui est mesuré et qui permet de donner la distance du point au capteur. Ensuite, grâce au miroir oscillant, il est possible de balayer une ligne. C'est pourquoi ce système est utilisé en vol, dans un hélicoptère par exemple, comme dans la figure 2.2.

Avec la conjonction du mouvement de l'hélicoptère (figure 2.2) et du balayage du capteur LiDAR, l'acquisition d'un couloir de données est possible. L'hélicoptère est équipé

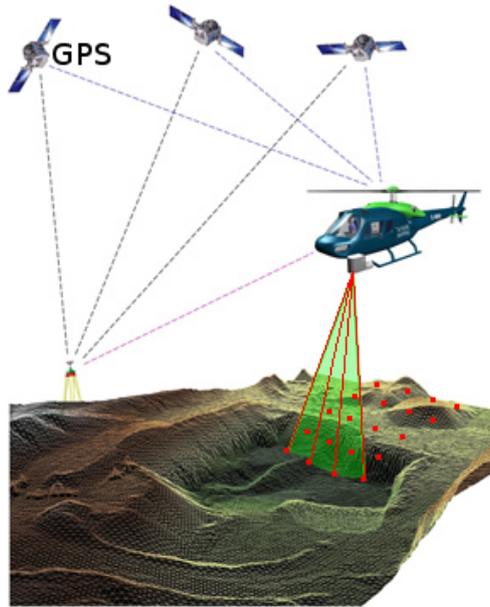


FIGURE 2.2 – Schémas d'un vol LiDAR

d'appareils permettant le géoréférencement des points acquis. D'abord on connaît la position relative du point par rapport au capteur : grâce à la distance du point et l'angle d'émission du rayon. Ensuite on utilise un système de GPS¹ différentiel, qui est formé d'un récepteur GPS à bord de l'hélicoptère et de l'utilisation d'une station de base au sol. On ajoute à ce système une centrale inertielle qui permet de donner les mouvements de l'hélicoptère. Ces deux éléments permettent de donner la position avec une précision de l'ordre du centimètre, ainsi que l'orientation. Avec la position absolue de l'hélicoptère, nous pouvons retrouver la position absolue du point au sol et ainsi le géoréférencer.

Il faut apporter une précision au niveau de la rétro-diffusion du rayon : sur le sol, les rayons dans le domaine du proche infrarouge offrent en général un bon retour d'intensité. Or, sur l'eau, il n'y a en théorie aucun retour car l'eau absorbe cette longueur d'onde. En réalité, dans notre cas, avec une rivière de montagne fortement chargée en sédiments, nous obtenons des points sur l'eau grâce à un phénomène de rétro-diffusion du rayon au niveau des matières en suspension présentes dans l'eau. La figure 2.3 montre un schéma de ce phénomène.

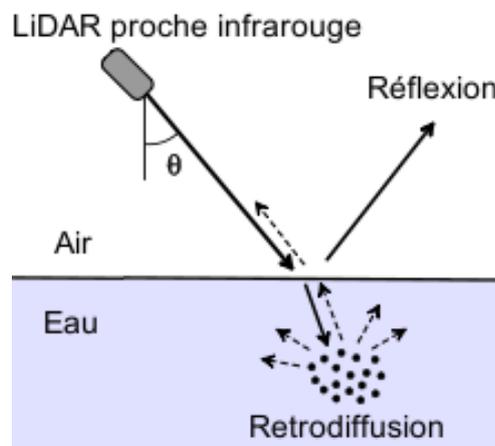


FIGURE 2.3 – Schéma de la rétro-diffusion du signal dans l'eau

1. Global Positioning System

Ceci s’observe sur les données réelles. Sur la figure 2.4a, nous pouvons voir deux zones où se trouve de l’eau. La partie centrale est une rivière où l’eau contient beaucoup de matières en suspension, ce qui explique sa couleur. L’autre zone contenant de l’eau se trouve au bas de l’image. La couleur est différente car l’eau est stagnante. Cette eau est très claire, contenant très peu de matières en suspension. La figure 2.4b donne l’intensité du retour du signal LiDAR. Dans l’eau stagnante, il n’y a aucun retour. Nous pouvons alors conclure que dans une eau chargée en matières en suspension, le système LiDAR donnera des points à sa surface.

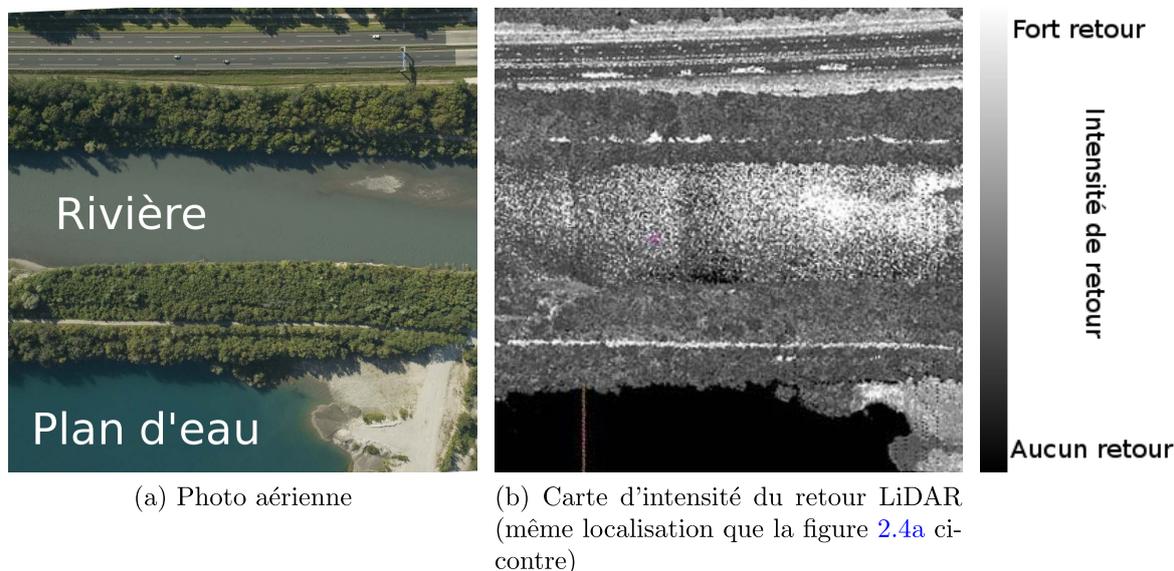


FIGURE 2.4 – Illustration du retour du signal dans l’eau

2.3 Les données de Sintégra

Les données à notre disposition proviennent de deux vols LiDAR réalisés par Sintégra [4] pour le compte d’EDF. Les vols ont été fait en mai et septembre 2010. Les zones survolées comprennent une partie de l’Arc-en-Maurienne et de l’Isère. Entre les deux dates, il y a eu une chasse de barrage, c’est-à-dire un relâchement soudain mais contrôlé d’une grande quantité d’eau présente dans un barrage à l’amont, afin de libérer les sédiments piégés dans la retenue, ce qui entraîne des changements au niveau de la morphologie de la rivière. Cela est dû à des phénomènes d’érosion et de dépôt.

Le capteur utilisé pendant les vols est un Scanner laser RIEGL LMS-Q560 [3]. Il possède les caractéristiques suivantes :

- Longueur d’onde : 1064 nm (proche infrarouge)
- Divergence du faisceau : 0,3 mrad
- Densité de points en zone dégagé : 10 à 15 points par m^2
- Densité de points en zone couverte par la végétation : 1 à 4 points par m^2

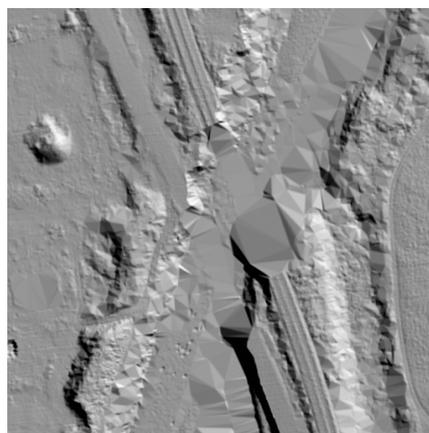
Ce capteur LiDAR est placé sous l’hélicoptère et vise en direction du sol. Avec un champ de vision de 30° et une altitude moyenne de 600 m, nous obtenons une largeur d’acquisition de 300 m. C’est suffisant pour couvrir la largeur de l’Arc-en-Maurienne.

Après l’acquisition du nuage de points 3D, Sintégra a appliqué des pré-traitements sur les données. En effet, les données comportent des points appartenant au sur-sol par exemple issus de la végétation ou des ponts. Ces points peuvent être problématiques car

ils masquent les données pertinentes, comme le sol ou la surface de l'eau. C'est le cas pour les arbres au feuillage dense présents sur les berges, au bord de l'eau. Évidemment le problème se pose encore plus avec les ponts qui peuvent masquer toute une section de la rivière. C'est pourquoi des outils logiciels tels que la suite *TERRA SOLID* (plus précisément *TERRA SCAN*) [5] sont appliqués sur les données pour supprimer ces deux éléments. Les algorithmes se basent sur une classification des points, permettant de séparer les points du sol des points du sur-sol. Les points qui sont sur le sol selon l'algorithme sont conservés, les autres supprimés. L'étape suivante consiste à interpoler les points sur une grille régulière, ici une grille de $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ (voir figure 2.5). Puis toutes les données obtenues sont regroupées en dalles de taille $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$. Les données de chaque dalle sont placées dans un fichier texte, avec pour chaque point un triplet $x \ y \ altitude$. Chaque campagne de vol a fourni plus de 350 M de points, soit plus 700 M de points pour les deux vols.



(a) Photos aérienne (Sintégra)



(b) Visualisation du MNT après application des pré-traitements par Sintégra

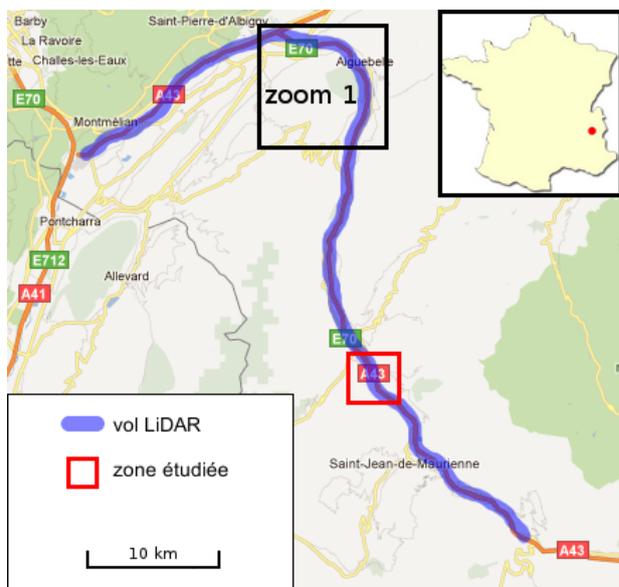
FIGURE 2.5 – Illustration des pré-traitements : suppression de ponts et de végétation

Voici dans la figure 2.6 une vue globale des données ainsi qu'un schéma du découpage des données.

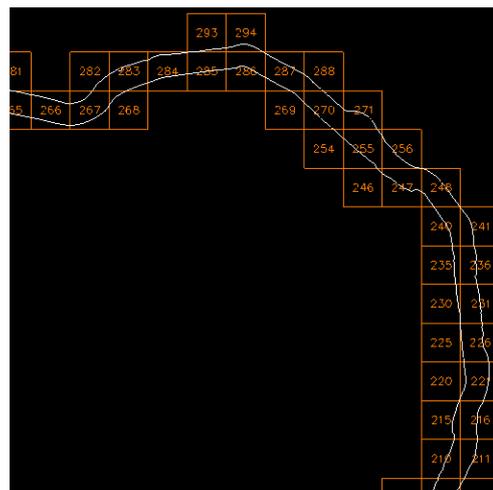
Je souligne dès à présent que la majeure partie des tests seront effectués sur la portion de rivière que l'on peut voir sur la figure 2.7 (visible en grande résolution figure A.1). Cela correspond à la zone étudiée encadrée en rouge dans la figure 2.6a qui se situe à Sainte-Marie-de-Cuines. Cette portion, qui présente un banc de gravier, est étudiée par le Cemagref depuis plusieurs années [6].

2.4 Bilan

Dans cette introduction sur les données qui sont à notre disposition, nous avons vu le fonctionnement et les caractéristiques du capteur LiDAR. Les données dont nous disposons ont subi plusieurs traitements. Le capteur LiDAR fournit d'abord un nuage de points 3D. Malgré l'utilisation de rayon dans le domaine proche infrarouge, nous avons des points à la surface de l'eau de la rivière grâce à un mécanisme de rétro-diffusion à cause des matières en suspension présentes dans l'eau. Un post-traitement est appliqué à ces données pour supprimer la végétation et les ponts. Puis le nuage de points 3D est interpolé sur une grille de $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$, ce qui nous donne un MNT grille. Au final, les données sont découpées en un ensemble de dalles de taille $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$. Nous avons alors directement à notre

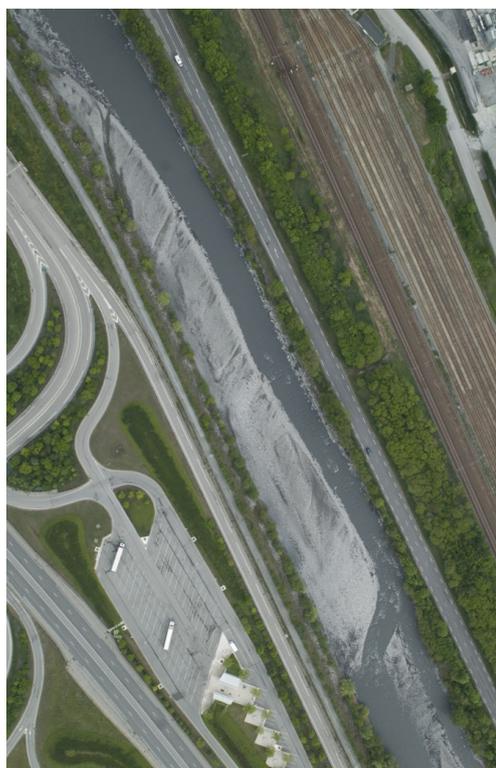


(a) Carte des données

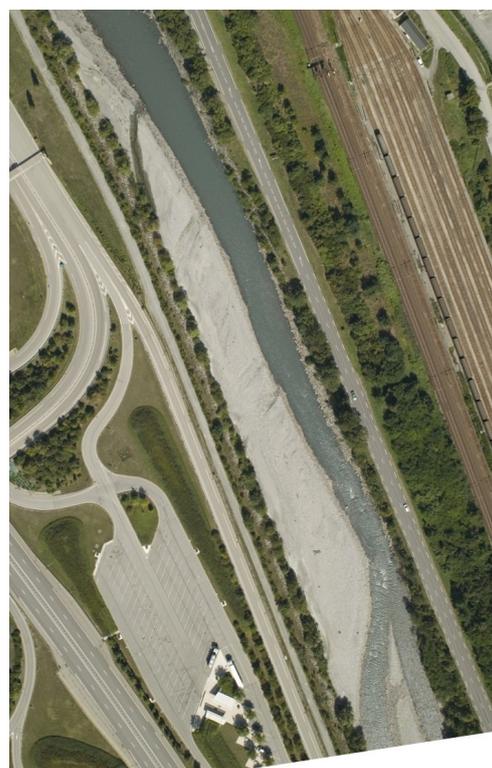


(b) Agrandissement de la zone zoom 1

FIGURE 2.6 – Carte de l'emprise des données



(a) mai 2010



(b) septembre 2010

FIGURE 2.7 – Photos aériennes de la portion de rivière témoin (source : Sintegra)

disposition des fichiers textes – chacun correspondant à une dalle – avec un triplet par ligne : x y $altitude$. Les données couvrent l'Arc-en-Maurienne et une partie de l'Isère pour deux dates : mai 2010 et septembre 2010.

Chapitre 3

Outils de base

3.1 Introduction

Nous allons présenter dans cette section la mise en place du projet et des premiers travaux réalisés au cours du stage. Tout d’abord, nous développons une application de toute pièce, sans utiliser de base de code existante. Nous allons donc détailler les choix faits au niveau du langage de programmation, des bibliothèques utilisées et des outils nécessaires. Nous verrons ensuite les modules de base que j’ai développés qui permettent de manipuler les données. Et nous monterons quelques exemples de manipulation des données LiDAR et d’application des outils.

3.2 Choix techniques

Le début du stage consiste à faire les choix nécessaires au bon démarrage du projet. Le Cemagref n’ayant pas voulu se baser sur des alternatives payantes, nous avons décidé de créer entièrement l’application, sans se baser sur du code déjà existant. Nous étions alors libres à propos des technologies utilisables. Le premier élément à choisir est le langage informatique utilisé pour écrire l’application. Notre choix s’est rapidement orienté vers le C++. En effet, c’est un langage assez proche du Java et qui est bien maîtrisé par un grand nombre de personnes au Cemagref. Ensuite ce langage permet d’écrire du code bas niveau et donc très rapide, ce qui est primordial pour les applications de traitement d’images. Et pour finir, c’est avant tout un langage que je maîtrise très bien qui permet une bonne structuration du code.

Ensuite nous avons besoin de choisir un format de stockage d’image. Parmi les nombreuses bibliothèques d’image, nous avons opté pour le format TIFF¹. Celui-ci à de nombreuses fonctionnalités :

- choix du nombre de canaux
- choix du type de valeur stocké : entier ou flottant
- choix du nombre de bits utilisés par valeur : simple ou double précision pour les valeurs flottantes

A ce format, nous couplons l’utilisation de la bibliothèque GeoTIFF. Celle-ci permet d’intégrer dans les images de nombreux éléments concernant le géoréférencement :

- la position de l’image dans le monde
- la taille du pixel au sol
- le système de coordonnées
- la projection utilisée

1. Tagged Image File Format

3.3 Mise en place des outils

Nous allons présenter les premiers outils mis en place pour manipuler les données, à savoir la conversion des données brutes sous format TIFF, les outils de visualisation et les outils utilisables sur les images comme l'application de filtres ou d'opérateurs morphologiques.

3.3.1 Lecture des données LiDAR

Le premier module que j'ai écrit permet de lire les données brutes au format texte. Cette opération est très simple car il suffit de lire le fichier texte qui contient un triplet de valeurs (x, y, z) par ligne. Ce triplet forme un point avec x et y les coordonnées dans le monde au sol et z l'altitude. La lecture complète du fichier donne un tableau de points. L'opération suivante consiste à créer une image. Nous calculons alors la taille de l'image de cette manière :

$$largeur = ((x_{max} - x_{min}) / Pas_{interpolation}) + 1;$$

$$hauteur = ((y_{max} - y_{min}) / Pas_{interpolation}) + 1;$$

Avec :

- x_{min} la valeur x minimale lue dans le fichier.
- x_{max} la valeur x maximale lue dans le fichier.
- y_{min} la valeur y minimale lue dans le fichier.
- y_{max} la valeur y maximale lue dans le fichier.
- $Pas_{interpolation}$ le pas d'interpolation utilisé lors des pré-traitements (pour les données à notre disposition : 0,25 cm).

Ensuite il faut placer chaque altitude dans le pixel correspondant, qui sera stocké sous forme flottante. Il faut convertir les coordonnées monde (x, y) en coordonnées image (i, j) :

$$i = (x - x_{min}) / Pas_{interpolation}$$

$$j = (hauteur - 1) - ((y - y_{min}) / Pas_{interpolation}) \quad (3.1)$$

Nous stockons alors l'altitude du point (x, y) dans le pixel (i, j) de l'image. Le repère image n'est pas orienté dans le sens direct, contrairement au repère des données. Ce qui explique qu'il faut soustraire la hauteur dans l'équation 3.1.

L'avantage de cette conversion en image est avant tout une consommation mémoire plus faible pour les données. En effet, dans l'image, les coordonnées x et y sont implicites et les altitudes sont stockées sous forme binaire. De plus le format TIFF permet de compresser les images sans perte. Il ne reste plus qu'à géoréférencer l'image avec GeoTIFF en donnant les coordonnées x, y de l'angle supérieur gauche de l'image ainsi que le pas spatial. Cela permet de conserver les informations nécessaires à la conversion des coordonnées images en coordonnées monde.

Nous avons maintenant un équivalent des données sous format TIFF. Les avantages sont nombreux :

- accès direct à la boîte englobante de l'image en coordonnées monde (grâce à GeoTIFF)
- données beaucoup plus compactes et donc plus rapides à lire
- possibilité d'ouverture dans un logiciel SIG² qui pourra utiliser les informations de géoréférencement.

2. Système d'Information Géographique

3.3.2 Visualisation des données

Nous avons implémenté plusieurs moyens de visualisation :

Niveaux de gris

Pour cela il faut utiliser la valeur d'altitude pour créer un niveau de gris. Nous réajustons linéairement les valeurs d'altitudes qui sont dans $[z_{min}; z_{max}]$ vers $[0; 255]$, avec z_{min} et z_{max} les valeurs minimales et maximales d'altitude présentes dans l'image. Nous obtenons alors une échelle de niveaux de gris linéaire visible dans la figure 3.1 (voir également figure A.2).

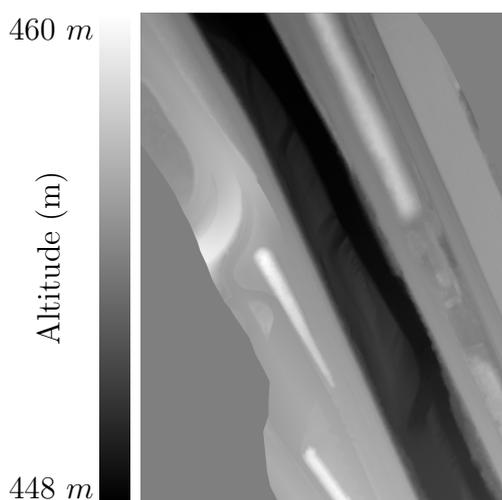


FIGURE 3.1 – Visualisation de l'altitude en niveaux de gris

Palette de couleurs

Ici, la méthode est équivalente à celle vue précédemment. Il faut simplement utiliser la valeur d'altitude normalisée du pixel (i, j) : $z_{normalisee_{i,j}} = \frac{z_{i,j} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}$ pour créer un triplet de valeurs (r, v, b) à l'aide des fonctions de transfert que l'on peut visualiser dans le graphe 3.2. La couleur au pixel (i, j) de l'image est donnée par :

$$Couleur(i, j) = (rouge(z_{normalisee_{i,j}}), vert(z_{normalisee_{i,j}}), bleu(z_{normalisee_{i,j}}))$$

Avec *rouge*, *vert* et *bleu* les fonctions de transfert pour chaque composante de la couleur. Un exemple de visualisation est donnée figure 3.3 (voir également figure A.3).

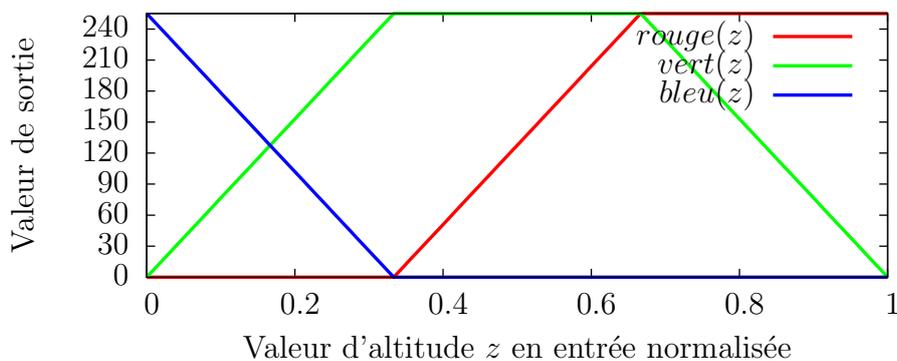


FIGURE 3.2 – Palette de couleur RVB en fonction de l'altitude

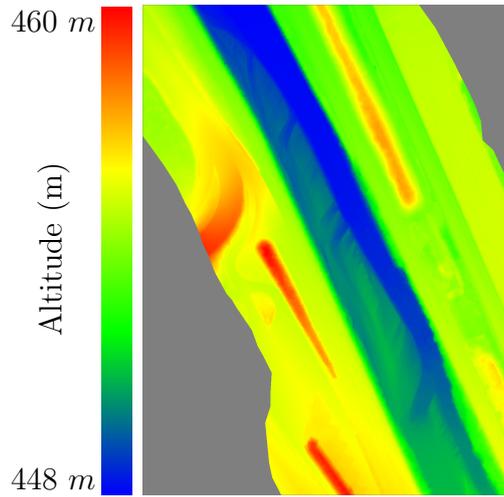


FIGURE 3.3 – Visualisation de l’altitude avec une palette de couleurs

Mode ombré

Dans la figure 3.4 (voir également figure A.4), nous pouvons voir un mode de visualisation permettant de faire ressortir le relief. Pour cela il est nécessaire de calculer la normale en chaque pixel (voir section 4.2.1). Ensuite j’utilise partiellement le modèle d’éclairage de Phong [8] : je calcule uniquement la composante diffuse. Nous avons besoin de la couleur et de la direction de la lumière.

Calcul de la couleur c en un pixel p de normale \vec{n} :

$$c = C \times \vec{L} \cdot \vec{n} \quad (3.2)$$

Avec \vec{L} la direction de la lumière. \vec{L} normé. C la couleur de la lumière.

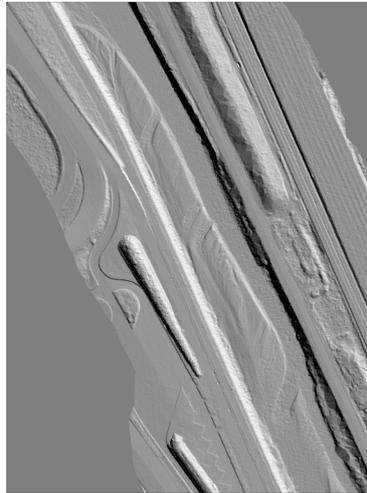


FIGURE 3.4 – Visualisation du MNT en mode ombré (avec un éclairage latéral)

Ce type de visualisation permet de faire ressortir le relief et met aussi en avant les endroits où il y a eu interpolation des points sur les triangles (voir pré-traitements LiDAR chapitre 2.3). En effet, on peut dans ces cas là distinguer très nettement les triangles, notamment lors de la suppression de la végétation et des ponts (voir figure 3.5).

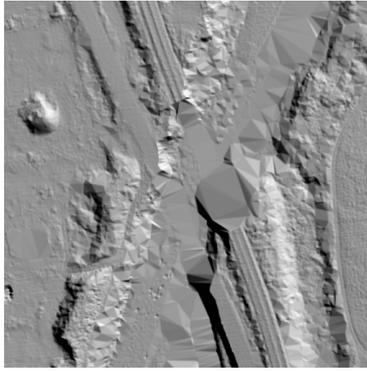


FIGURE 3.5 – Visualisation du MNT en mode ombré faisant apparaître des triangles suite à l’interpolation du nuage de points 3D

3.3.3 Filtres

J’ai aussi développé un module permettant d’appliquer des filtres. L’application de filtres est une opération courante dans le domaine du traitement de l’image. Plus généralement, on parle de convolution.

La formule 3.3 est utilisée pour l’application d’un filtre à une image.

I l’image, F le filtre et I_F l’image filtrée.

$$I_F(i, j) = \sum_u \sum_v I(i - u, j - v) \times F(u, v) \quad (3.3)$$

Une fois ces outils en place, il suffit de définir un filtre, c’est-à-dire la taille de sa matrice de convolution ainsi que les coefficients de la matrice. Il existe des filtres permettant de lisser l’image, d’extraire les contours ou encore de faire ressortir les ruptures de pentes.

Nous pouvons voir des exemples avec des filtres de Sobel et un filtre Laplacien dans la figure 3.6 (voir fig A.5). Les filtres sont données dans la table 3.1.

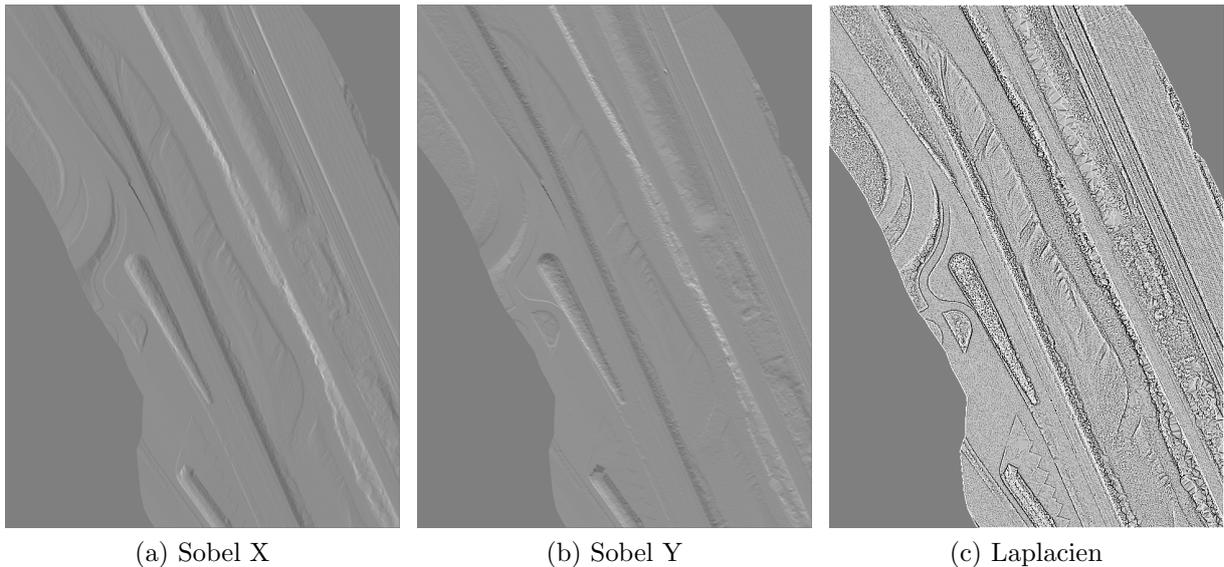


FIGURE 3.6 – Visualisation après application d’un filtre de Sobel X, Sobel Y et Laplacien

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(a) Sobel X

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

(b) Sobel Y

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

(c) Laplacien

TABLE 3.1 – Filtres de Sobel X, Sobel Y et Laplacien

3.3.4 Morphologie Mathématique

Nous avons développé des outils permettant d'appliquer des opérations morphologiques sur un ensemble de pixels. Les deux opérations de base sont la dilatation et l'érosion. Pour cela il nous faut un élément structurant, qui est une forme que l'on balaye sur l'image afin d'ajouter ou supprimer des pixels de l'ensemble de départ.

Dilatation d'une forme A par un élément structurant B :

$$\delta_B(A) = A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$$

Érosion d'une forme A par un élément structurant B :

$$\epsilon_B(A) = A \ominus B = \{a \mid a + b \subset A, b \in B\}$$

Nous pouvons combiner ces deux opérateurs pour en obtenir de nouveaux :

L'ouverture :

$$\gamma_B(A) = \delta_B \epsilon_B(A)$$

La fermeture :

$$\phi_B(A) = \epsilon_B \delta_B(A)$$

La fermeture permet de « boucher les trous » plus petits que l'élément structurant tout en conservant les contours de l'ensemble de pixels de départ.

À l'opposé, l'ouverture permet de supprimer les éléments trop fins mais en conservant comme précédemment les contours.

Les outils développés s'appliquent sur une image binaire. Voici un exemple dans la figure 3.7 :

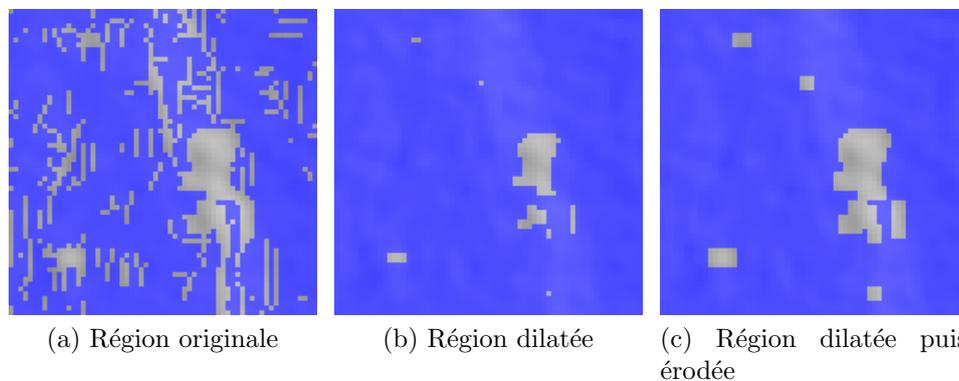


FIGURE 3.7 – Application de l'opérateur morphologique de fermeture avec un élément structurant carré 3×3 sur l'ensemble des pixels bleus

3.4 Application des outils

Maintenant, nous avons suffisamment d'outils de base pour manipuler et visualiser les données. Voici un premier exemple d'utilisation.

3.4.1 Vérification de l'écart entre les deux relevés LiDAR

Un premier exemple d'application qui consiste à calculer la différence entre les MNT aux deux dates acquises en faisant une simple soustraction d'images. Cette opération permet de mettre en évidence les zones de la rivière où il y a érosion ou dépôt de matériaux. Les zones hors de la rivière comme les routes n'ont pas changé et doivent donc être identiques pour les deux dates. Or nous avons remarqué qu'il y a un léger décalage entre les deux MNT (ex : bordure de trottoir). Nous avons alors voulu déterminer si cet écart se faisait selon la même direction pour toutes les données, pour savoir s'il y a un biais de géoréférencement. Nous avons alors fait des essais sur trois zones de la rivière. Ces trois zones seront nommées A, B et C et sont détaillées figure 3.8 et 3.9. Nous allons calculer le vecteur de déplacement horizontal pour chaque position.

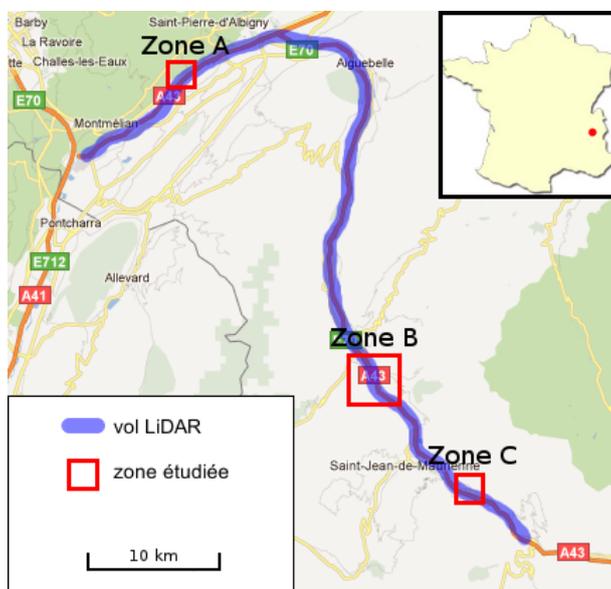


FIGURE 3.8 – Carte des emplacements utilisés pour la recherche de vecteur de déplacement

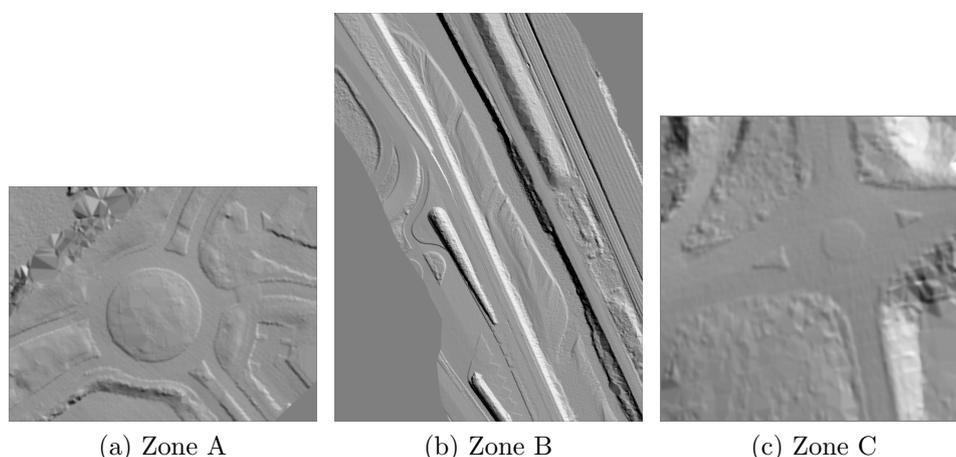


FIGURE 3.9 – Visualisation du MNT en trois zones A, B et C parmi les données

Pour cela, il faut faire la différence des MNT en décalant légèrement une des images. En pratique, nous cherchons un vecteur assez petit, avec des composantes comprises dans $[-5; 5]$. Nous allons donc faire ces soustractions avec un décalage qui varie en x et en y de -5 à 5 . L'objectif ici est de minimiser l'écart quadratique moyen. Nous calculons donc le score obtenu pour chaque vecteur de déplacement (i, j) avec la formule 3.4. Ce score est l'écart quadratique moyen de la soustraction des deux images. La figure 3.10 donne la valeur de ce score en fonction de (i, j) pour chacune des trois zones.

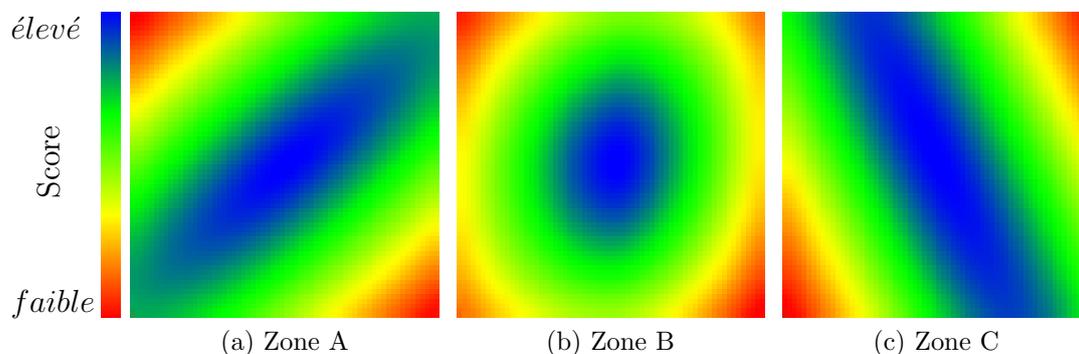


FIGURE 3.10 – Carte de l'écart quadratique moyen des deux images en fonction du vecteur déplacement compris dans $[-16; 16]^2$ (l'image est agrandie)

$$(i, j) \in [-5; 5]^2, \text{Score}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in Im_1 | (x+i,y+j) \in Im_2} [Im_1(x, y) - Im_2(x + i, y + j)]^2 \quad (3.4)$$

Le décalage planimétrique entre les deux dates sera ensuite donné par :

$$\underset{(i,j)}{\operatorname{argmin}} \text{Score}(i, j)$$

Une fois déterminé le pixel p_1 correspondant à ce minimum, nous cherchons sa position subpixelaire. Nous allons calculer les paramètres d'un paraboloïde passant par les valeurs minimales v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 , le minimum étant en v_1 . Voir table 3.2.

		v_4		
	v_2	v_1	v_3	
		v_5		

TABLE 3.2 – Zoom sur les valeurs autour du score minimum

Nous calculons les paramètres de la parabole $ax^2 + bx + c$ qui passe par les valeurs v_2, v_1 et v_3 . De même pour les valeurs v_4, v_1 et v_5 , nous trouvons une parabole $a'y^2 + b'y + c'$. Il nous reste à trouver les paramètres \hat{x} et \hat{y} permettant d'obtenir respectivement le minimum de $ax^2 + bx + c$ et $a'y^2 + b'y + c'$. Ces deux valeurs se calculent aisément :

$$\hat{x} = -b/2a \text{ et } \hat{y} = -b'/2a'$$

Sur les trois zones de test, nous obtenons les vecteurs de déplacement (\hat{x}, \hat{y}) suivants donnés en pixels :

- Zone A : (0, 15; 0, 09)
- Zone B : (0, 31; -0, 12)
- Zone C : (-0, 21; -0, 63)

Soit en mètres (rappel : la taille du pixel au sol est de 0,25 m) :

- Zone A : (0, 0375; 0, 0225) m
- Zone B : (0, 0775; -0, 03) m
- Zone C : (-0, 0525; -0, 1575) m

Le bilan de ces vérifications sur les données est que l'écart obtenu est très faible, moins de un pixel. Nous pouvons relier ce résultat à l'erreur planimétrique du système LiDAR. En effet, le vol ayant eu lieu à 600 m d'altitude et avec une divergence du faisceau de 0,3 mrad (voir les détails du vol section 2.3), nous obtenons une tache LiDAR au sol de l'ordre de 18 cm soit 0,72 pixel. Les écarts obtenus correspondent à l'erreur LiDAR planimétrique attendue. On peut donc conclure qu'il n'y a pas de biais de géoréférencement, ni global, ni local.

3.5 Bilan

J'ai présenté dans ce chapitre les premiers développements effectués lors du stage. Nous avons maintenant à notre disposition des outils pour lire les données LiDAR, les sauvegarder sous forme d'images TIFF géoréférencées grâce à l'utilisation de GeoTIFF. Nous avons aussi introduit les différents modes de visualisation. Nous pouvons aussi appliquer quelques opérations de base comme des filtres pour modifier globalement l'image, ou alors des opérateurs morphologiques pour agir sur un ensemble de pixels. Nous pouvons ajouter que ces outils sont manipulables grâce à une interface graphique créée avec la bibliothèque GTK [1].

Chapitre 4

Segmentation

4.1 Introduction

Nous allons aborder dans cette partie les algorithmes permettant de répondre à la problématique qui est de segmenter automatiquement l'image pour séparer l'eau, les bancs et les berges. Nous allons d'abord introduire de nouveaux indicateurs qui seront utiles pour l'algorithme principal de l'application : la croissance de région. Nous appliquerons ensuite différents post-traitements pour affiner les résultats. Puis nous ferons une analyse de la pertinence des résultats.

4.2 Indicateurs

Tout d'abord, nous avons besoin d'indicateurs qui pourraient nous indiquer la présence d'éléments topographique dans l'image. Nous avons déjà à notre disposition des outils pour appliquer un filtre. Et donc par exemple calculer un gradient avec un opérateur de Sobel. Mais nous avons choisi de nous intéresser à d'autres indicateurs. Nous cherchons un indicateur qui soit lié aux propriétés physiques de l'eau dans la rivière. Dans notre cas, l'eau est localement plane, car dans la portion de rivière survolée au cours du vol LiDAR est calme (peu de vagues). Nous nous orientons alors vers des indicateurs permettant de dire si l'espace est localement plan. Pour avoir une indication sur la pente en chaque pixel, nous pouvons calculer la normale des pixels ou calculer la variance des altitudes autour d'un pixel.

4.2.1 Normale au pixel

Pour cela, on se place sur un pixel et nous regardons son entourage. Nous avons choisi d'utiliser un voisinage 5×5 . Cela permet de filtrer le résultat obtenu et ainsi de ne pas avoir de trop fortes variations d'un pixel à l'autre. Ces variations pouvant être forte à cause du bruit des données. Nous calculons ensuite le plan moyen des ces 25 pixels avec une optimisation du type moindres carrés sur les paramètres a , b et c de l'équation 4.1 :

$$z = ax + by + c \quad (4.1)$$

Dans notre cas, cette équation de plan est valide car il n'est pas possible de trouver de plan vertical avec les données car il n'y a pas de pixels superposés. Ensuite, à partir de l'équation 4.1 précédente, nous formulons l'équation 4.2 qui nous permet d'obtenir directement la normale :

$$\vec{n} = \frac{(-a, -b, 1)}{\|(-a, -b, 1)\|} \quad (4.2)$$

Avec cet indicateur, nous pouvons calculer une carte de normales que nous pouvons voir figure 4.1 (voir également figure A.6).

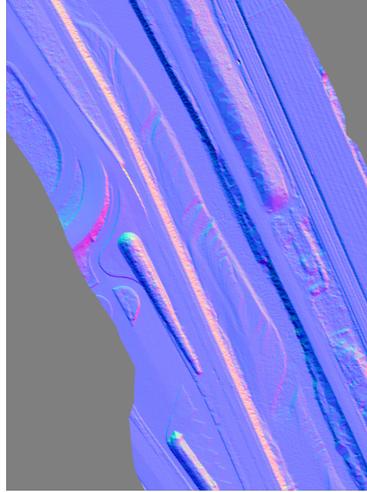


FIGURE 4.1 – Carte de normales

4.2.2 Variance au pixel

Celle-ci donne une indication sur la dispersion d'altitude autour d'un pixel.

Soit p le pixel courant et P les pixels de la fenêtrés 5×5 centrée en p . La variance au pixel p sera exprimée par la formule 4.3.

$$Var(p) = E[(P - E[P])^2] \quad (4.3)$$

Avec cet indicateur, nous pouvons calculer une carte de variance que nous pouvons voir figure 4.2 (voir également figure A.7).

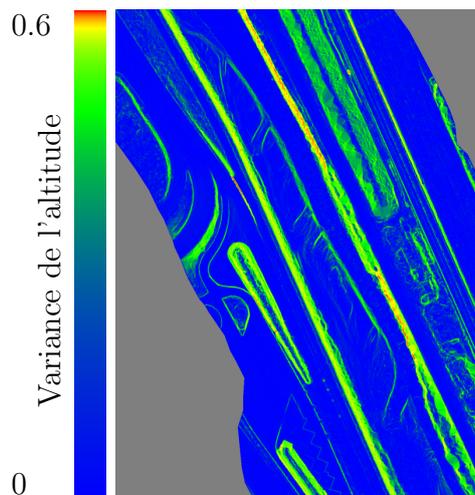


FIGURE 4.2 – Carte de variance de l'altitude (échelle logarithmique)

4.3 Croissance de région

Nous choisissons l'algorithme dit de croissance de région car il est bien adapté à notre problématique et nous avons les outils nécessaires à sa mise en œuvre.

4.3.1 Algorithme et paramètres

Nous allons détailler les paramètres de l'algorithme et ensuite l'algorithme lui-même.

Les paramètres de l'algorithme

L'algorithme de croissance de région nécessite des critères permettant de dire si la région peut continuer à croître. Pour cela, nous définissons deux paramètres qui se basent sur les indicateurs précédents. Le premier paramètre est l'écart de normale entre deux pixels adjacents, que nous nommons *seuilNormale*. Ce paramètre s'exprime en degrés. Le critère de croissance basé sur ce paramètre nous indiquera qu'un pixel peut être aggloméré si l'écart angulaire entre la normale de ce pixel et la normale de chacun de ses voisins est inférieure à *seuilNormale*.

Le second paramètre est la variance aux pixels, que nous nommons *seuilVariance*. Le critère de croissance associé dira qu'un pixel peut être aggloméré si sa variance est inférieure à *seuilVariance*.

Et ensuite, l'algorithme a besoin d'un point de départ qui s'appelle « graine » dans ce contexte. Ici, la graine est un pixel que nous choisissons automatiquement dans l'image. Ce choix est fait en trouvant le pixel le plus bas de l'image. Comme l'eau coule dans le sens de la pente, le point le plus bas sera dans l'eau, à l'aval de la rivière. Cela permet d'obtenir une graine qui se trouve dans l'eau, ce qui est idéal comme point de départ pour l'algorithme de croissance et pour tenter d'agglomérer les pixels de l'eau.

L'algorithme

Il démarre à partir du point de départ : la graine. Ensuite l'algorithme agglomère les pixels autour de cette graine s'il respecte les critères de croissance. La notion de pixel voisin est établie selon la formule de la 4-connexité.

L'algorithme :

Initialisation :

$F = \text{graine}$: on place la graine dans la frontière courante F

$F' = \emptyset$: frontière temporaire F' initialisée à vide

Boucle principale :

Pour tout pixel f dans la frontière courante F

Pour tout pixel voisin v du pixel $f, v \notin F, v \notin F'$

Si $Variance(v) < \text{seuilVariance}$ **Et** $\Delta_{normale}(v, f) < \text{seuilNormale}$

Alors on agglomère le pixel v dans la frontière temporaire F'

FinSi

$R+ = F$: ajout de la frontière courante F à la région R

$F = F'$: la frontière courante F devient la frontière temporaire F'

$F' = \emptyset$: on vide la frontière temporaire F'

FinPour

FinPour

Voici un schéma d'exécution dans la figure 4.3.

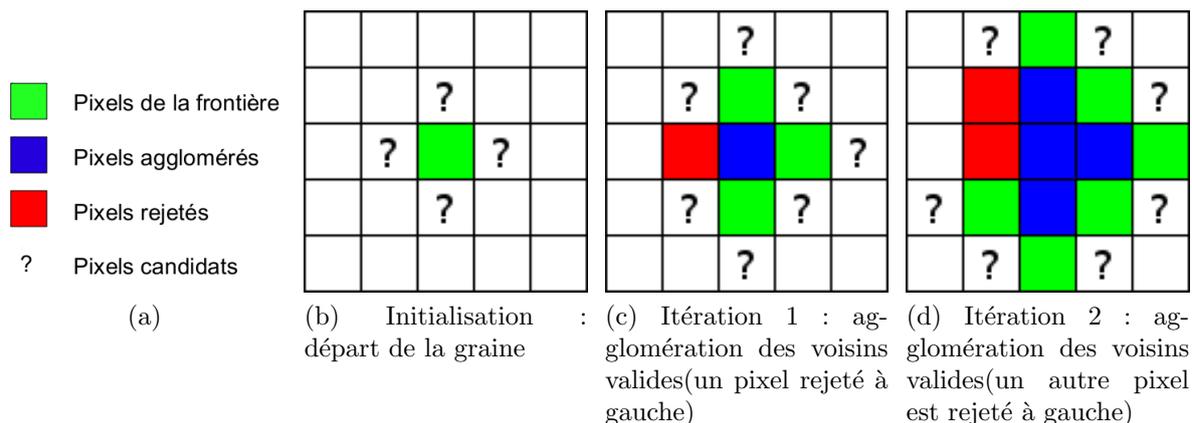


FIGURE 4.3 – Schéma d'exécution de l'algorithme de croissance

4.3.2 Sensibilité aux paramètres

Nous allons regarder l'influence des deux paramètres *seuilNormale* et *seuilVariance* indépendamment.

Sensibilité à l'écart de normale

Nous faisons d'abord une première analyse de sensibilité au niveau de *seuilNormale*. Pour ce test, nous désactivons le critère basé sur la variance. Voici des exemples de région obtenue en faisant varier *seuilNormale* dans la figure 4.4 (voir également figure A.8, figure A.9, figure A.10).

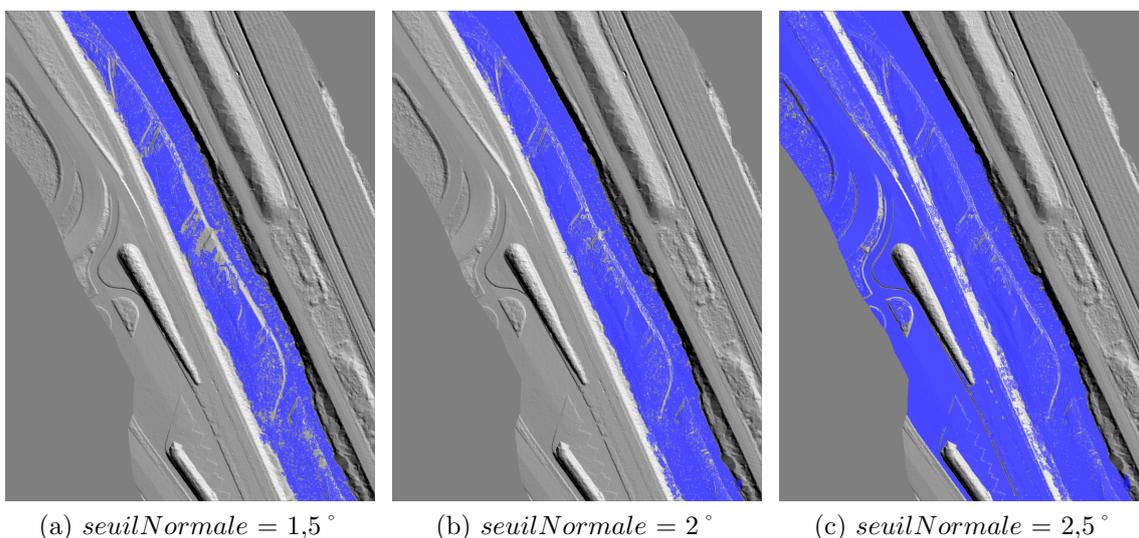


FIGURE 4.4 – Variation de *seuilNormale* (sans critère de variance), les pixels de la région obtenue sont bleus

Suite à ces résultats, nous remarquons qu'il est difficile d'obtenir uniquement l'eau, car l'algorithme pénètre rapidement dans les bancs. Avec *seuilNormale* < 1,5°, l'algorithme n'agglomère pas de pixel, à cause de ce seuil trop restrictif et du bruit des données LiDAR. Nous allons donc voir si la région obtenue est proche du lit mineur de la rivière (union

des bancs et de l'eau). Pour cela nous comparons les résultats obtenus avec la région de référence que l'on peut voir dans la figure 4.5. Les résultats de ces tests sont dans les figures 4.6 (voir également figure A.11, figure A.12, figure A.13) et 4.7.

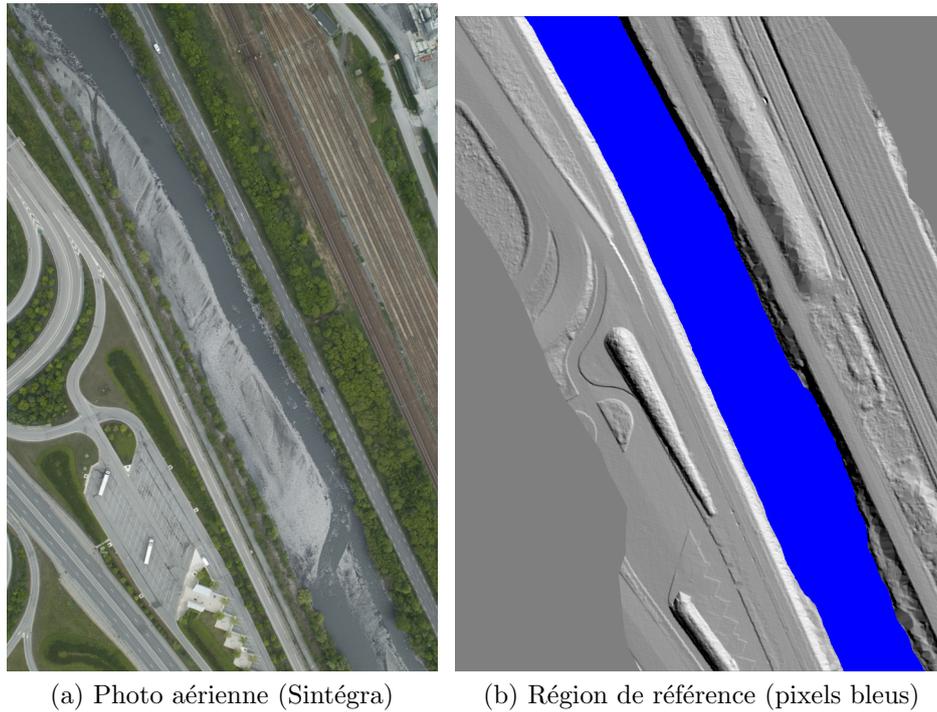


FIGURE 4.5 – Région de référence correspondant au lit mineur de la rivière

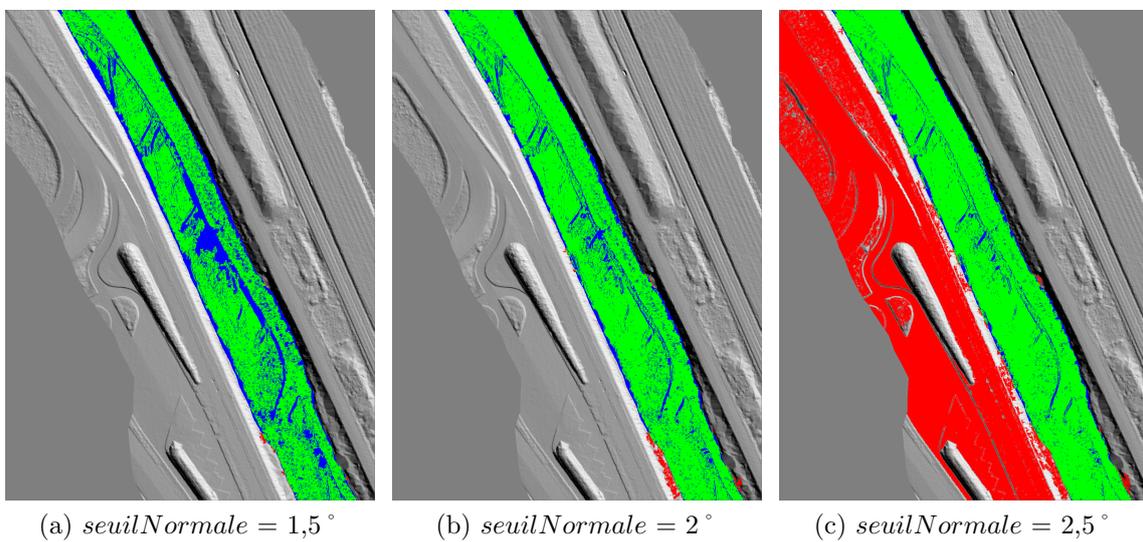


FIGURE 4.6 – Comparaison des résultats de la figure 4.4 à la région de référence figure 4.5b
 pixels verts : bonne détection
 pixels bleus : sous-détection
 pixels rouges : sur-détection

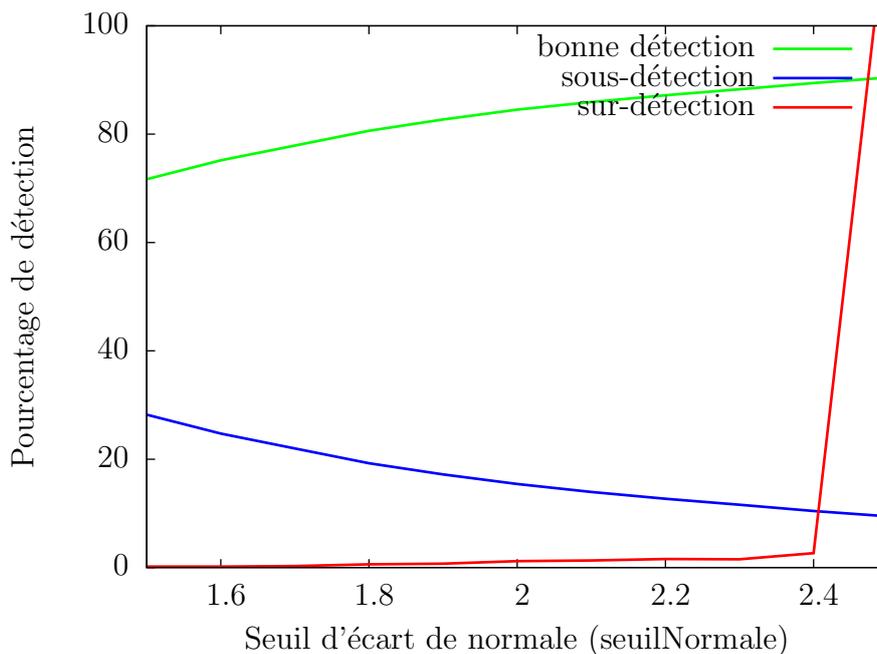


FIGURE 4.7 – Pourcentage de détection de la région en fonction de *seuilNormale*

Sensibilité à la variance

De la même manière nous désactivons le critère de normale et faisons varier *seuilVariance*. Voici de nouveau quelques exemples de régions obtenues figure 4.8 (voir également figure A.14, figure A.15, figure A.16).

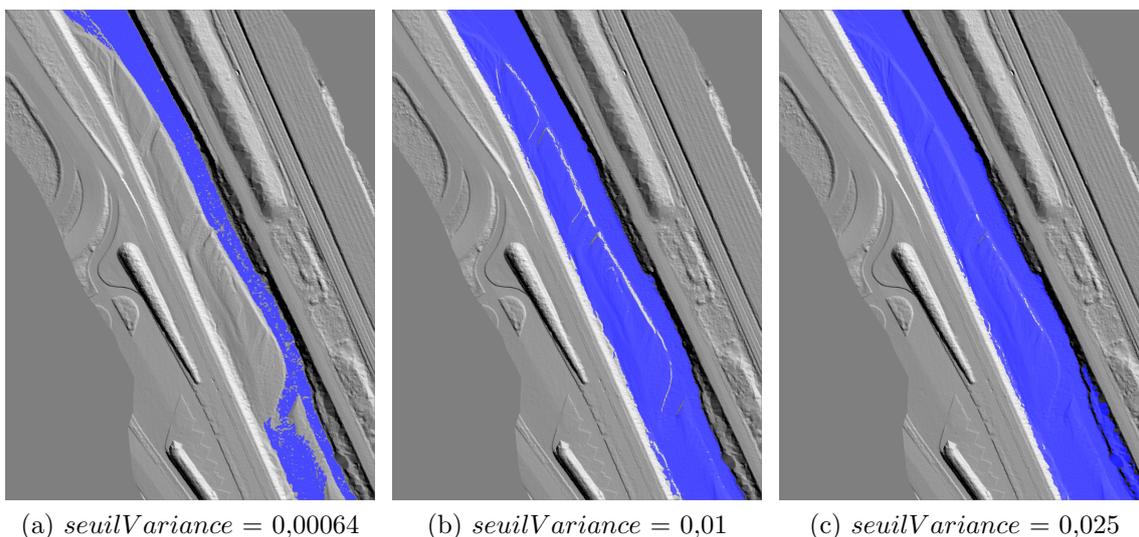


FIGURE 4.8 – Variation de *seuilVariance* (sans critère de normale)

Ensuite, nous comparons la région obtenu avec le lit mineur de référence dans la figure 4.9 (voir également figure A.17, figure A.18, figure A.19).

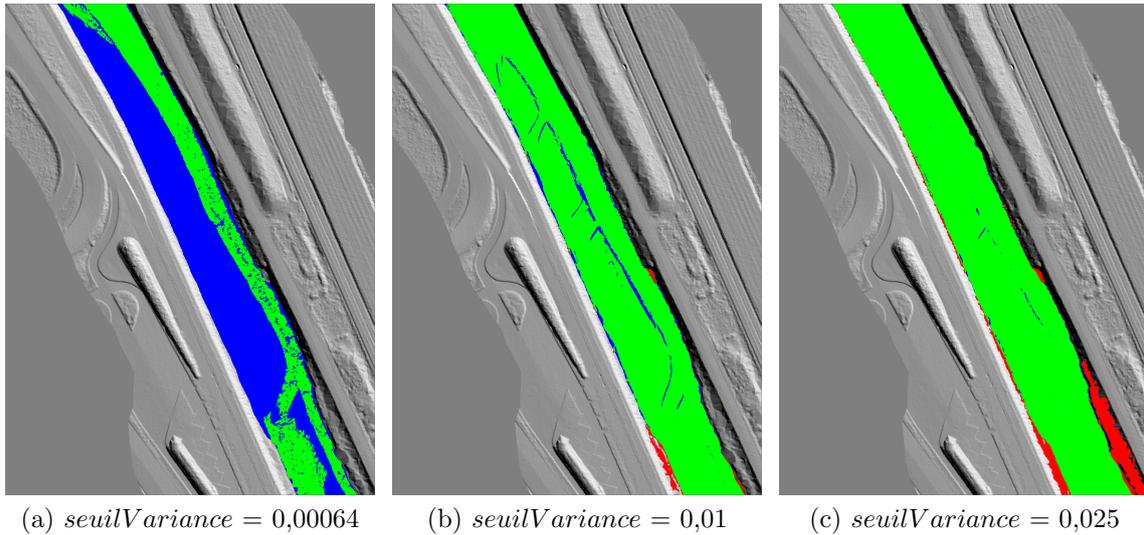


FIGURE 4.9 – Comparaison des résultats de la figure 4.8 à la région de référence figure 4.5b
 pixels verts : bonne détection
 pixels bleus : sous-détection
 pixels rouges : sur-détection

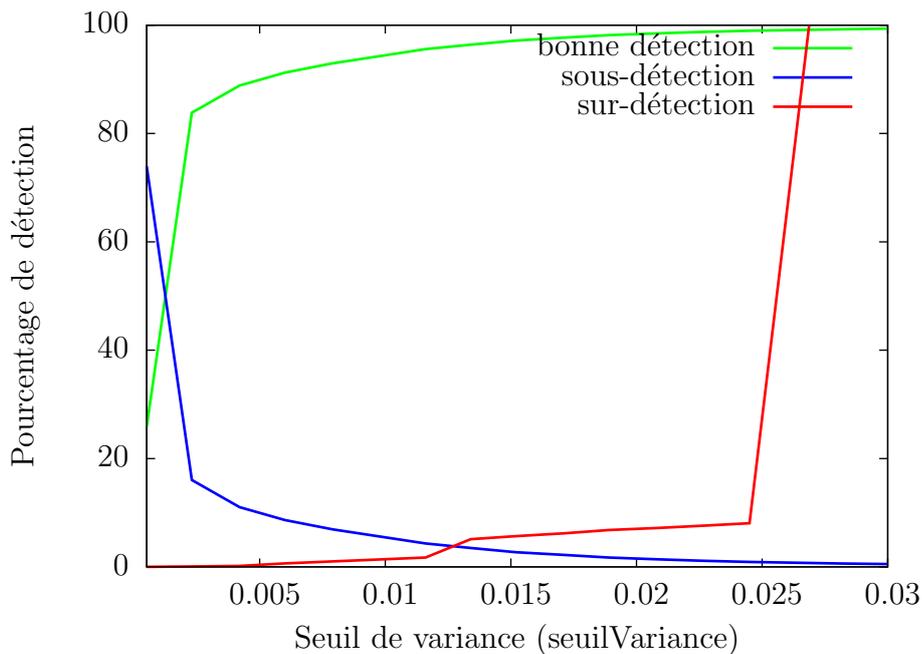


FIGURE 4.10 – Pourcentage de détection de la région en fonction de *seuilVariance*

4.3.3 Bilan et résultats

Penchons nous d'abord sur les résultats obtenus par la variation de *seuilNormale* à l'aide de la figure 4.6 et du graphe 4.7. La première observation à faire est que nous obtenons une région correspondant au lit mineur, malgré le fait que la graine soit dans l'eau. Cela signifie donc que l'algorithme de croissance de région pénètre dans les bancs et les agglomère en grande partie. Cela est dû à une absence de rupture de pente à l'amont et à l'aval du banc. Le critère d'écart angulaire entre les normales est donc valide à ces endroits et permet alors la croissance.

Si nous regardons le taux de détection du lit mineur, nous voyons qu'il faut utiliser une

valeur de *seuilNormale* proche de $2,4^\circ$ pour obtenir des résultats optimaux, c'est-à-dire un taux de bonne détection de l'ordre de 85% et un taux de sous-détection de l'ordre de 15%.

En revanche, les résultats obtenus par l'évolution de *seuilVariance* dans la figure 4.9 sont plus intéressants. En faisant augmenter ce paramètre, le taux de bonne détection augmente rapidement et à l'opposé, le taux de sous-détection diminue rapidement, tout en maintenant un taux de sur-détection très faible (voir graphe 4.10). Nous avons alors une plage de valeur dans $[0,005; 0,012]$ qui permet de maximiser une détection correcte tout en minimisant les défauts. Par exemple avec *seuilNormale* = 0,01, le taux de bonne détection est de l'ordre de 95% et le taux de sous-détection est de l'ordre de 5%. Ce résultat est bien meilleur comparé à celui obtenu avec le seuil d'écart angulaire de normale, nous avons amélioré environ 3 fois la qualité de la région.

Nous continuerons donc par la suite en omettant le critère d'écart de normale. Et suite aux résultats obtenus par l'analyse de sensibilité du paramètre *seuilVariance* dans le graphe 4.10, nous choisissons *seuilVariance* = 0,01 ce qui permet d'obtenir le lit de la rivière avec un bon compromis au niveau de la sous-détection et de la sur-détection. La région obtenue en utilisant ce seuil sera notre point de départ pour la suite.

4.4 Post-traitements

4.4.1 Introduction

Les résultats obtenus dans la section précédente ne sont pas pleinement satisfaisants. En effet, il est difficile de trouver des valeurs de seuils permettant d'obtenir une région qui ne comprend que l'eau et qui soit sans trous, c'est-à-dire sans sur-détection ni sous-détection. Nous allons alors utiliser d'autres outils supplémentaires pour améliorer les résultats précédents. Nous allons d'abord utiliser la morphologie mathématique pour fermer un maximum de trous. Puis nous allons séparer les pixels appartenant aux bancs de ceux appartenant à l'eau en se basant sur l'altitude de ces points.

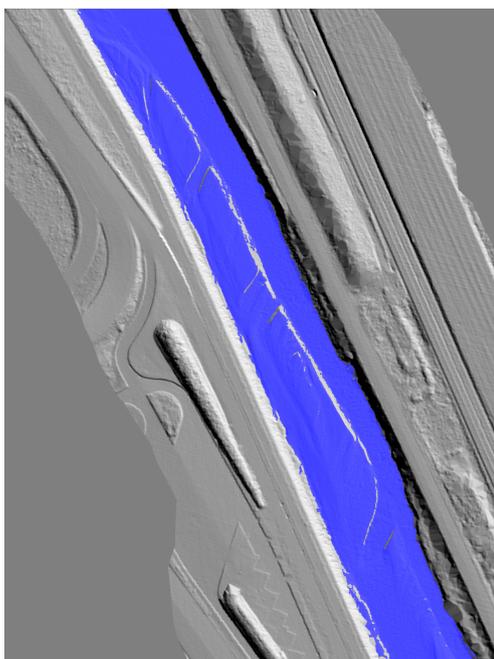
4.4.2 Morphologie Mathématique

Nous avons vu dans les résultats précédents que la région obtenue contient beaucoup de trous. Ils sont notamment causés par le bruit du capteur LiDAR, mais aussi par les vagues à la surface de l'eau. En utilisant l'opérateur morphologique de fermeture avec un élément structurant assez gros, nous obtenons une région avec beaucoup moins de trous. En pratique nous utilisons un élément structurant carré de taille 21×21 pour fermer tous les trous et obtenir le lit complet de la rivière, comme on peut le voir dans la figure 4.11. Grâce à cet outil, nous éliminons les problèmes de sous-détection à l'intérieur de la région tout en préservant les contours.

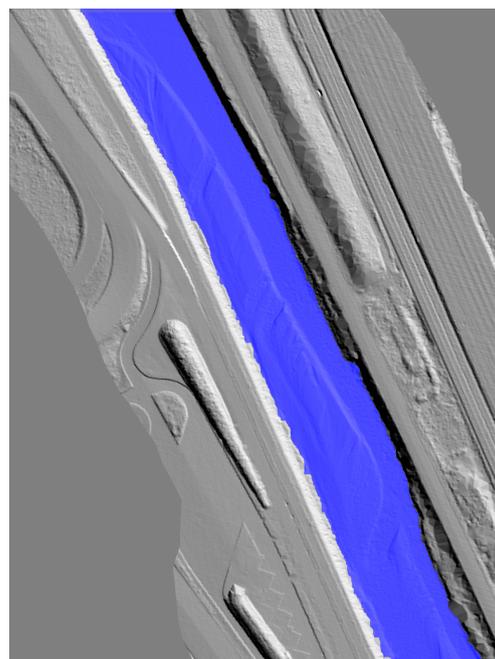
4.4.3 Seuillage par plan

A ce stade de l'algorithme, nous avons toujours les pixels de l'eau et des bancs dans la même région. Nous proposons ici une méthode qui se base sur les résultats précédents et qui permet de ne garder que les pixels de l'eau.

L'idée est de calculer le plan qui passe au mieux par les points de la région précédente correspondant au lit mineur de la rivière. Pour calculer ce plan, nous utilisons la même méthode que pour le calcul de normale vu dans la section 4.2.1. Nous utilisons une optimisation du type moindres carrés sur les paramètres a , b et c de l'équation de plan suivante :



(a) Région originale issue de l'algorithme de croissance avec seuil $Variance=0,01$



(b) Région après application de l'opérateur morphologique de fermeture

FIGURE 4.11 – Comparaison de la région avant et après fermeture morphologique avec un élément structurant carré de taille 21×21

$$z = ax + by + c$$

Ensuite nous utilisons ce plan pour seuiller l'image. Ce qui nous donne une région que nous pouvons observer figure 4.12 (voir fig A.20).

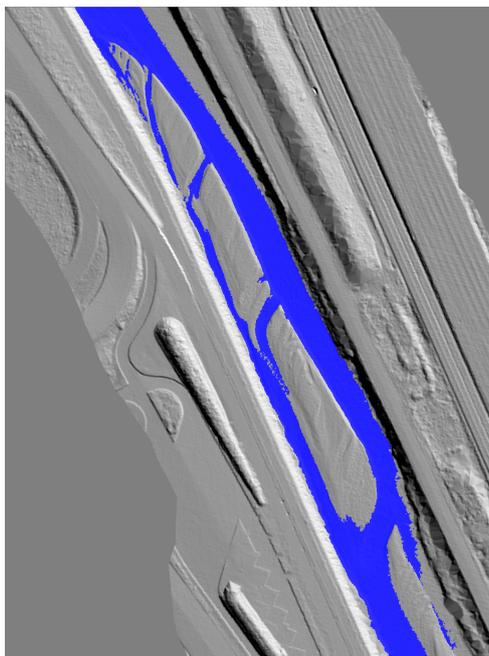


FIGURE 4.12 – Seuillage d'altitude avec le plan moyen du lit mineur. Les pixels bleus sont sous ce plan

Ce résultat nous fourni la région contenant l'eau. La prochaine étape est de faire la

différence entre la région du lit mineur et la région eau que l'on vient d'obtenir. Cette opération nous donne la région contenant les bancs, visible dans la figure 4.13 (voir fig A.22).

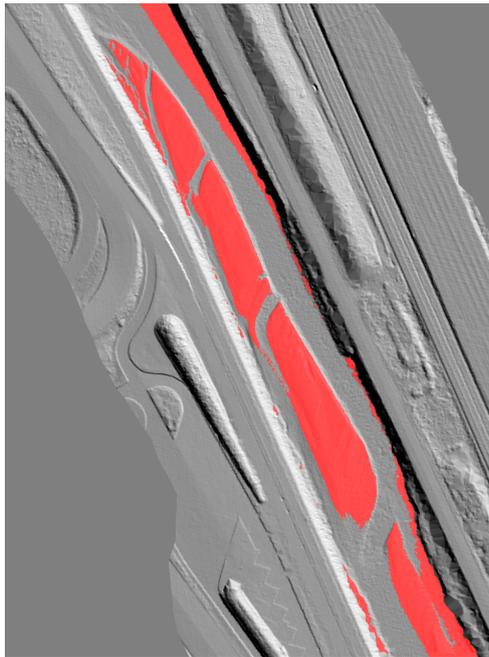


FIGURE 4.13 – Région contenant les bancs (pixels rouges)

La visualisation simultanée de ces deux dernières régions nous donne l'ensemble eau et bancs visible dans la figure 4.14 (voir fig A.24).

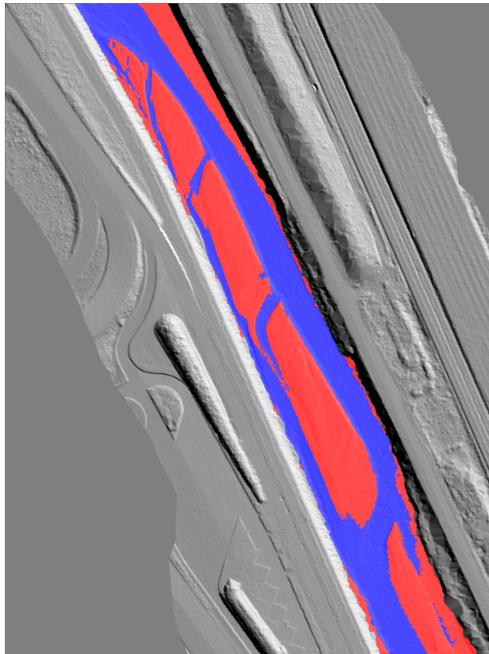


FIGURE 4.14 – Région eau et bancs ensemble.
pixels bleus : région eau
pixels rouges : région eau

4.4.4 Analyse des résultats

Nous allons procéder à l'analyse des résultats obtenus. Pour cela nous allons comparer le résultat obtenu figure 4.14 (voir aussi figure A.24) aux régions eau et bancs de référence montrées dans la figure 4.15.

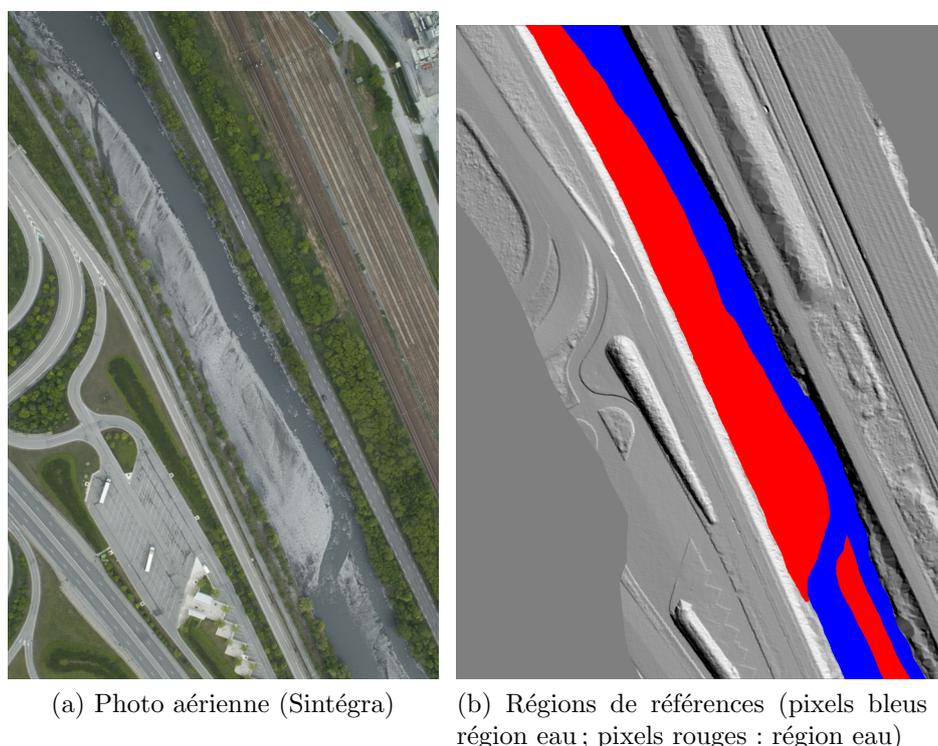


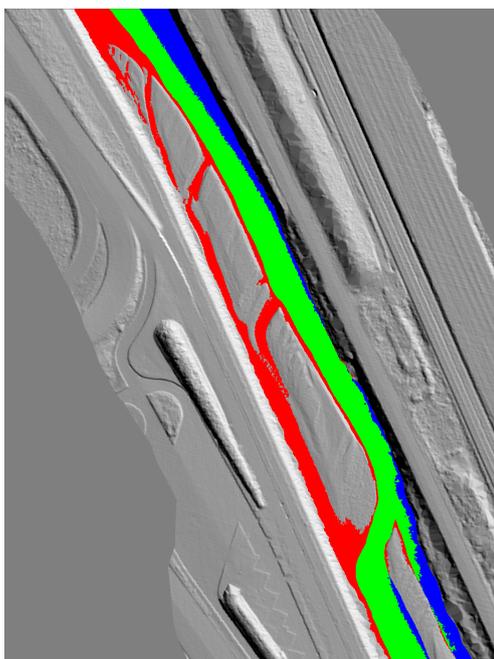
FIGURE 4.15 – Régions de référence

Les résultats visuels donnés par les figures 4.16 (voir aussi figure A.21 et figure A.23) sont synthétisés dans le tableau 4.1. Nous remarquons que les taux de détection sont de 74% et de 64% pour les régions eau et bancs. Une grande partie de l'erreur se situe à l'amont et à l'aval de la rivière. Des portions des régions eau et bancs ont été placées dans la mauvaise région. Cela est causé par l'étape de seuillage par le plan moyen du lit mineur et la morphologie de cette portion de rivière. En effet, à l'amont de la rivière (en bas à droite dans l'image), la rivière est séparé en deux chenaux. Il se trouve que dans le chenal de droite, le courant est plus fort à cause d'une pente plus forte. Dans le chenal de gauche, la pente est plus faible. Cette portion est donc légèrement plus élevée et se retrouve au dessus du plan mentionné précédemment. Cette erreur est aussi causée par la technique d'obtention du plan : tous pixels du lit mineur sont utilisés, y compris ceux des bancs qui sont plus haut. Les bancs étant tous d'un coté de la rivière, le plan obtenu penche aussi et se plonge dans l'eau.

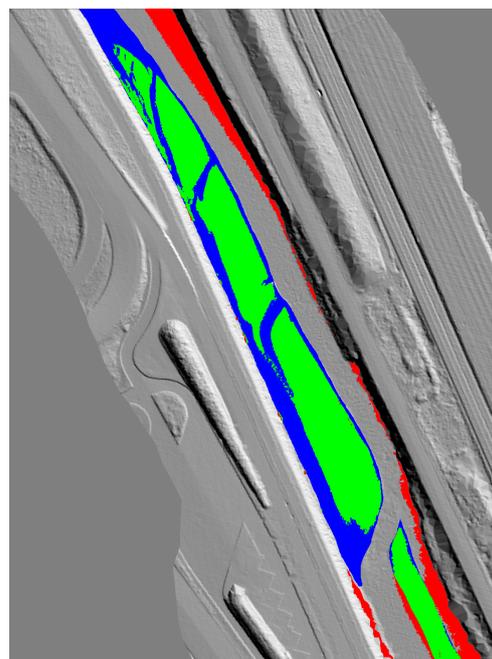
Il reste quelques zones de sur-détection au bord du lit mineur de la rivière, qui correspondent en fait aux berges.

		Classification		
		Eau	Banc	Berge
Terrain	Eau	74%	23%	3%
	Banc	34%	64%	2%

TABLE 4.1 – Résumé des résultats



(a) Comparaison de la région eau (figure 4.12) avec la région eau de référence (figure 4.15)



(b) Comparaison de la région bancs (figure 4.13) avec la région bancs de référence (figure 4.15)

FIGURE 4.16 – Comparaison des régions de la figures 4.14 avec les régions de références (figure 4.15)

4.5 Bilan

Dans cette partie nous avons vu l'algorithme de croissance qui nous a permis d'obtenir la région correspondant au lit mineur de la rivière. Cet algorithme n'étant pas capable de séparer l'eau des bancs à cause de l'absence de rupture de pente à l'amont et à l'aval du banc, nous avons appliqué des post-traitements. Tout d'abord une fermeture morphologique pour boucher des trous dans la région du lit mineur. Ensuite nous calculons le plan moyen qui est utilisé pour seuiller l'image. Ainsi les pixels obtenus par ce seuillage (qui sont sous le plan) nous ont donné la région eau. Nous avons ensuite directement la région banc qui est le complémentaire de la région par rapport à la région du lit mineur. Au final pour les régions eau et bancs obtenues, nous avons respectivement des taux de détection correctes de 74% et 64%.

Chapitre 5

Conclusion

5.1 Bilan général

Pour dresser un bilan de ce stage, nous pouvons rappeler qu'un programme a été créé à partir de zéro, ce qui comprend les fonctionnalités de lecture et écriture des données ainsi que les modules de traitements, en ajoutant une interface graphique en GTK [1].

Le programme développé a également montré sa robustesse lors de tests avec des données externes de résolution différente sur un cours d'eau en tresses.

Ensuite le programme est rapide. Il permet de traiter des données sur une portion de terrain de $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ en quelques dizaines de secondes. Certaines portions du programme ont été parallélisées grâce à l'utilisation d'OpenMP [2].

Le programme est automatique, il a besoin de deux paramètres : le seuil de variance *seuilVariance* et la taille de l'élément structurant pour l'étape de fermeture morphologique. Donc en utilisant les paramètres par défaut déterminés sur la base de l'étude de sensibilité de la section 4.3.2, il est possible de lancer la segmentation en un clic.

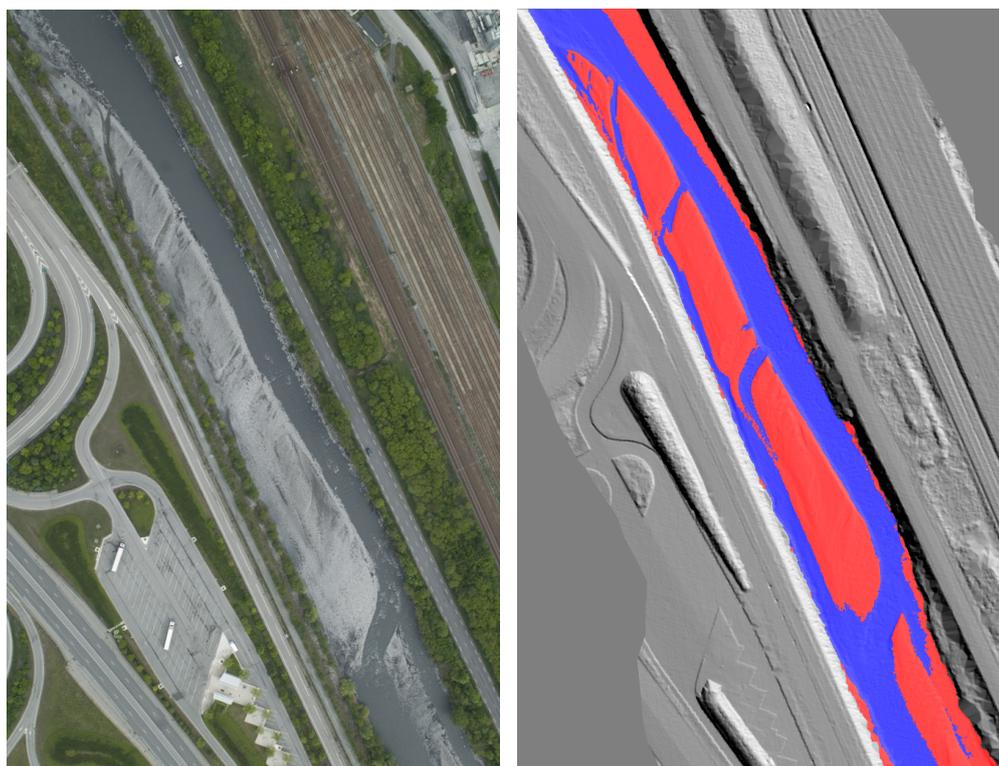
Et nous pouvons conclure sur les résultats du programme par rapport à la problématique du stage : segmenter automatiquement l'image pour extraire l'eau, les bancs et les berges. Nous obtenons au final de bons résultats. Le taux de détection est élevé malgré des données difficiles, car comportant uniquement des altitudes. Les données sont aussi bruitées suite à l'ensemble du processus d'acquisition. Le point le plus difficile à surmonter est le fait qu'il n'y ait pas de rupture de pente à l'amont et à l'aval du banc ce qui entraîne une agglomération de l'eau et des bancs par notre algorithme de croissance. Nous avons alors appliqué un second traitement qui consiste en un seuillage d'altitude de l'image par un plan passant au mieux par le lit mineur de la rivière. Voici les résultats finaux que nous pouvons comparer avec la photo aérienne en figure 5.1.

5.2 Perspectives

Suite à ces travaux, nous avons beaucoup de perspectives pour améliorer les précédents résultats.

Améliorer l'algorithme de croissance

Il serait aussi très intéressant de développer des outils permettant de trouver une graine valide dans tous les cas, conjointement à un mécanisme d'ajustement automatique des seuils. Car nous avons quelques rares portions de données qui sont difficiles à exploiter. Il est possible dans ces portions que la graine ne soit pas dans l'eau et que l'algorithme de croissance ne nous fournisse pas le lit mineur de la rivière. De même si les données sont



(a) Photo aérienne de la zone témoin

(b) Résultat final de l'algorithme

FIGURE 5.1 – Comparaison de la photo aérienne avec le résultat correspondant

trop bruitées (qui peut causer des ruptures de pentes), nous pouvons être bloqués lors de la croissance à cause de seuils trop restrictifs.

Apporter des informations colorimétriques

La grande difficulté de la problématique vient du fait que l'on se base uniquement sur l'information d'altitude. Mais conjointement aux données LiDAR, nous avons des photos du sol prises pendant le vol. Il faudrait mettre en correspondance ces photos avec les dalles LiDAR. Ainsi, pour chaque pixel, nous avons l'altitude et la couleur du pixel. Nous pourrions alors élaborer toute une nouvelle gamme d'outils se basant sur la couleur. Par exemple, un nouvel indicateur basé sur la couleur que nous utiliserions pendant la croissance de région. L'information de géoréférencement manquante n'a pas permis de l'envisager pendant ce stage.

Automatiser le traitement de la rivière entière

Suite à ces perspectives, nous pourrions généraliser la méthode sur tout le linéaire de la rivière, de manière à extraire automatiquement tous les éléments en un clic.

Autres perspectives

Nous pourrions aussi développer des outils qui s'écartent de la problématique, mais qui seraient très utiles pour le Cemagref. En utilisant les outils de base précédemment développés, nous pourrions calculer la ligne d'eau (altitude longitudinale) de la rivière ou encore la fréquence d'alternance des bancs sur la rivière.

Annexe A

Images

Dans cette annexe sont regroupées les images montrant les données et les résultats principaux du stage en pleine page.

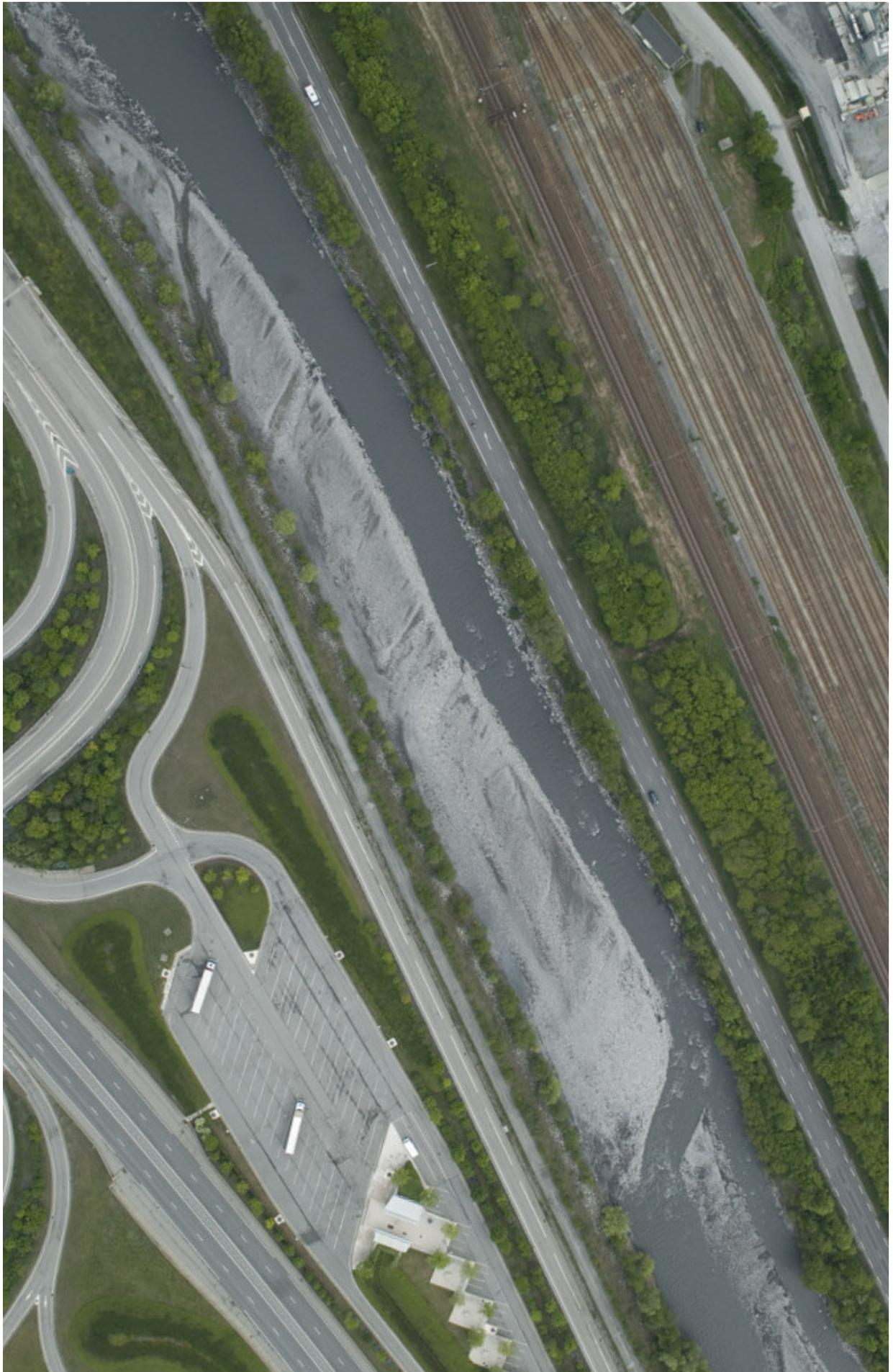


FIGURE A.1 – Photos aériennes de la portion de rivière témoin (source : Sintegra)

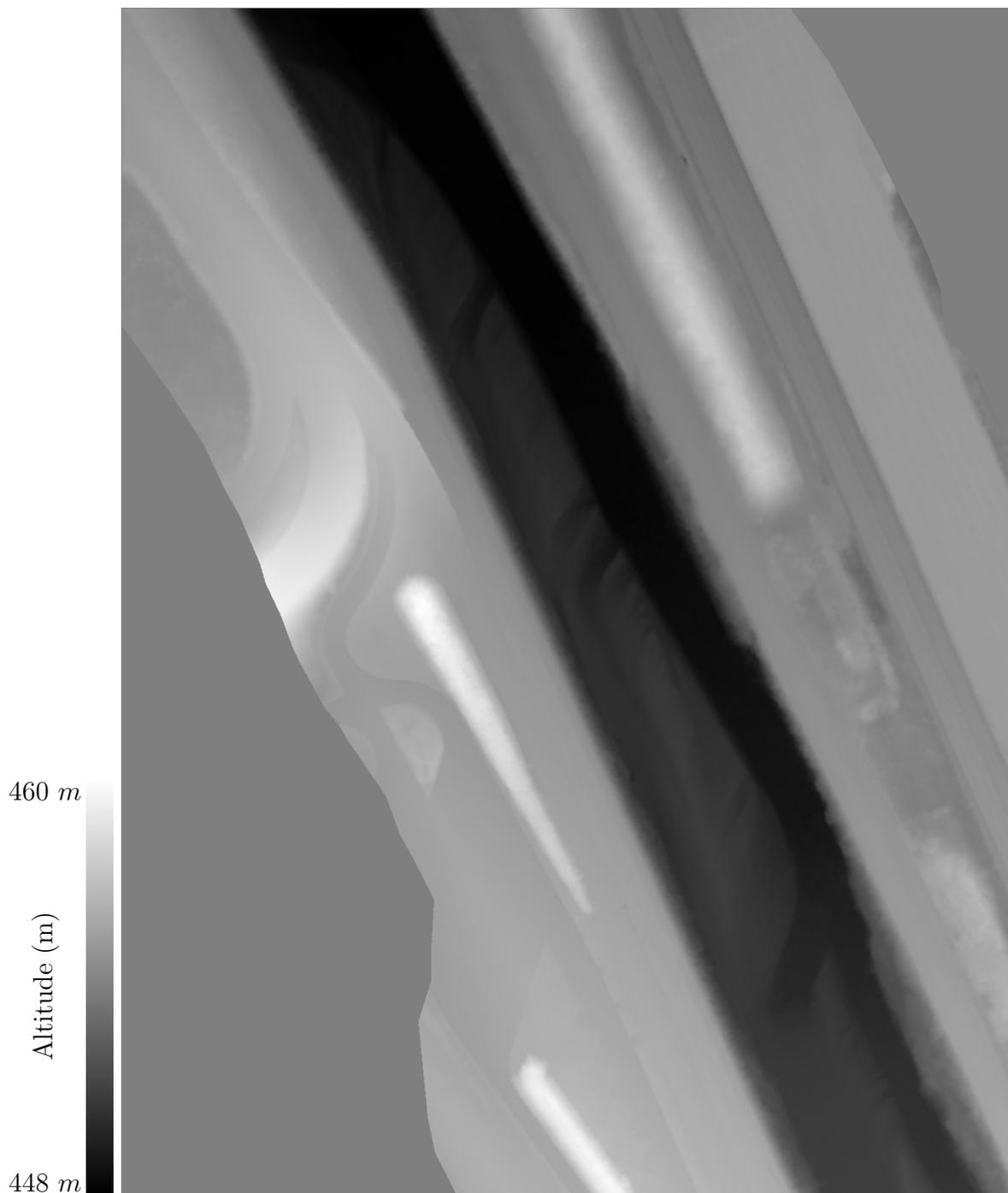


FIGURE A.2 – Visualisation de l'altitude en niveaux de gris

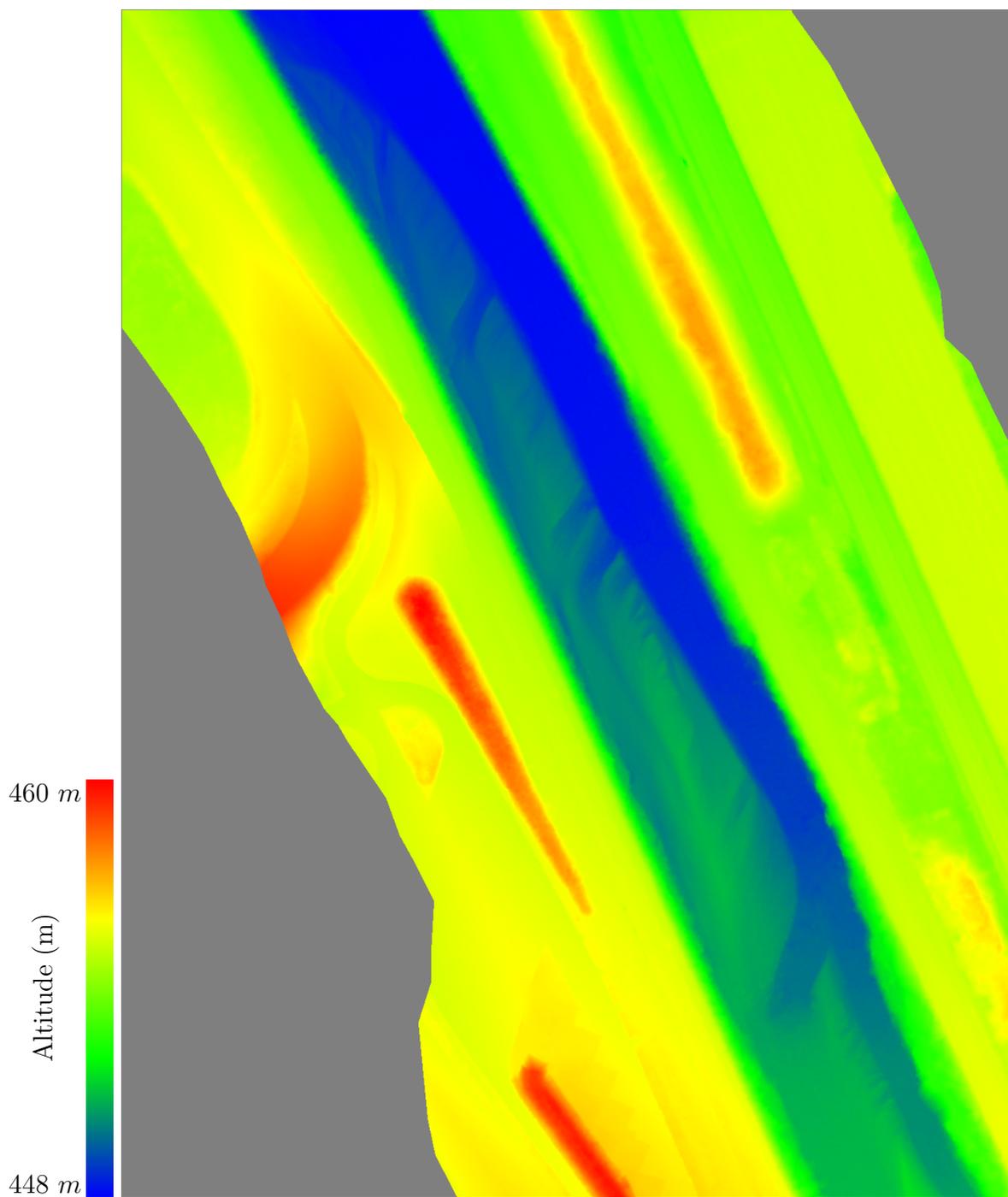


FIGURE A.3 – Visualisation de l'altitude avec une palette de couleurs

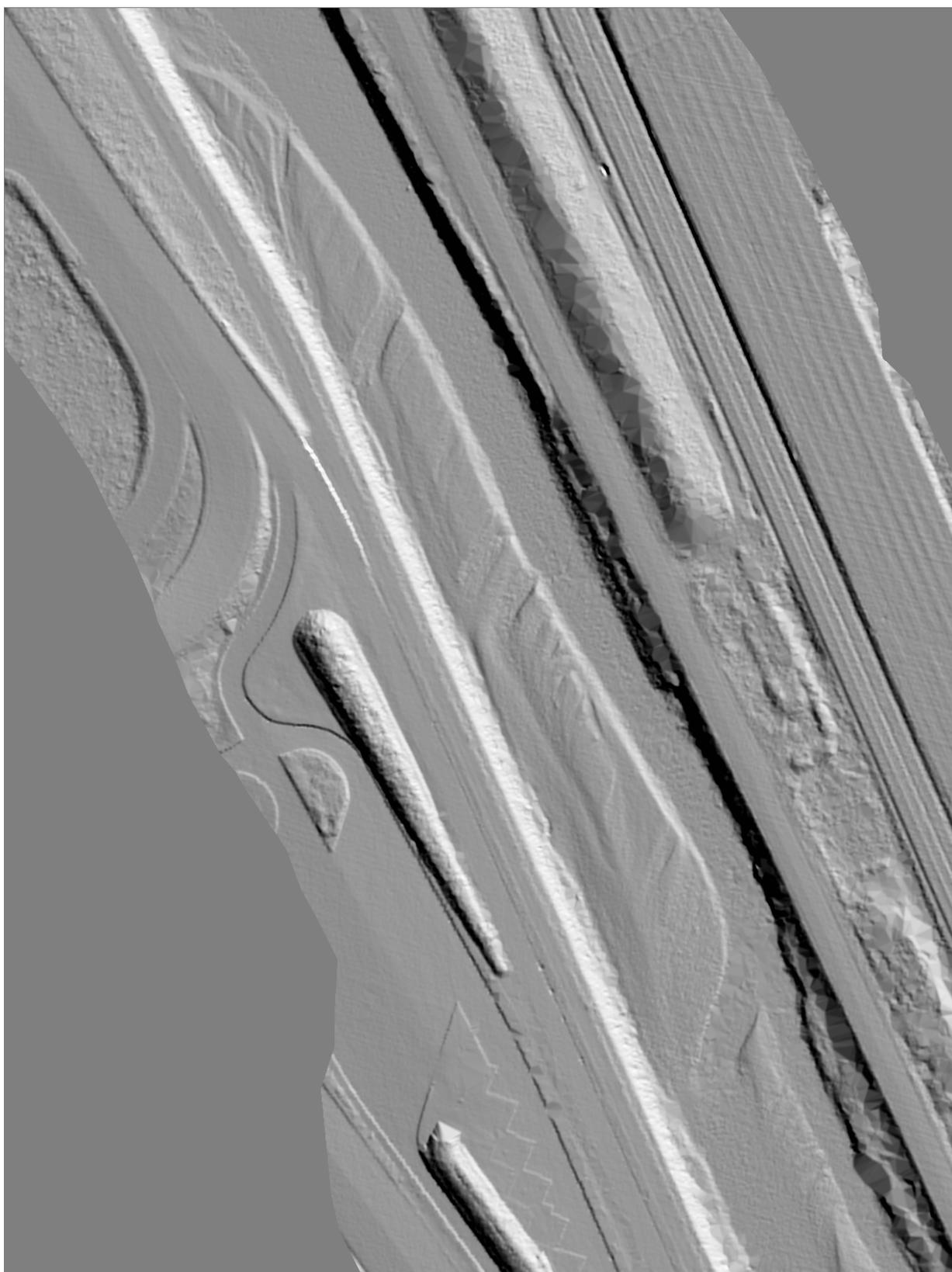


FIGURE A.4 – Visualisation du MNT en mode ombré (avec un éclairage latéral)



FIGURE A.5 – Visualisation après application d'un filtre Laplacien

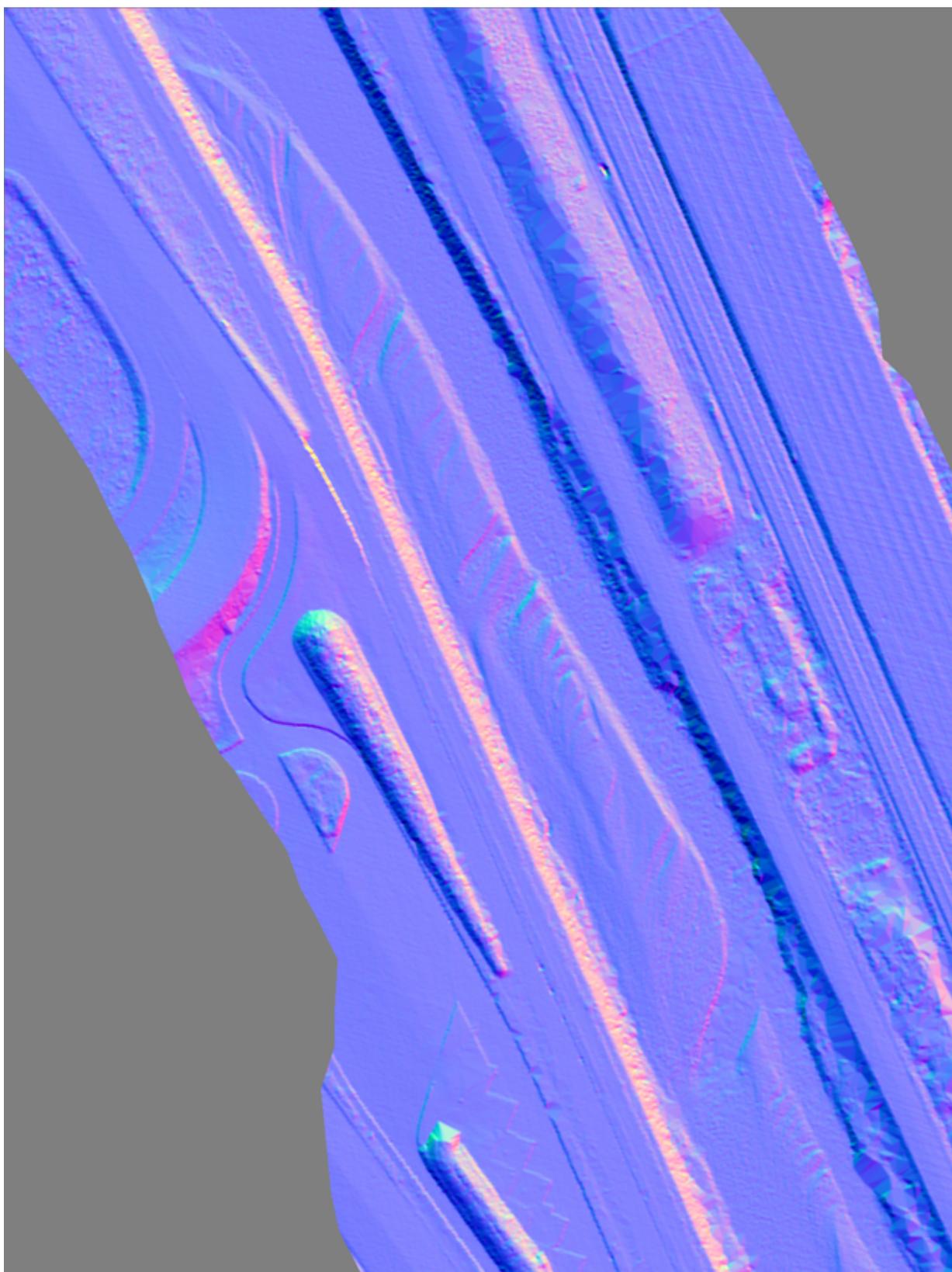


FIGURE A.6 – Carte de normales

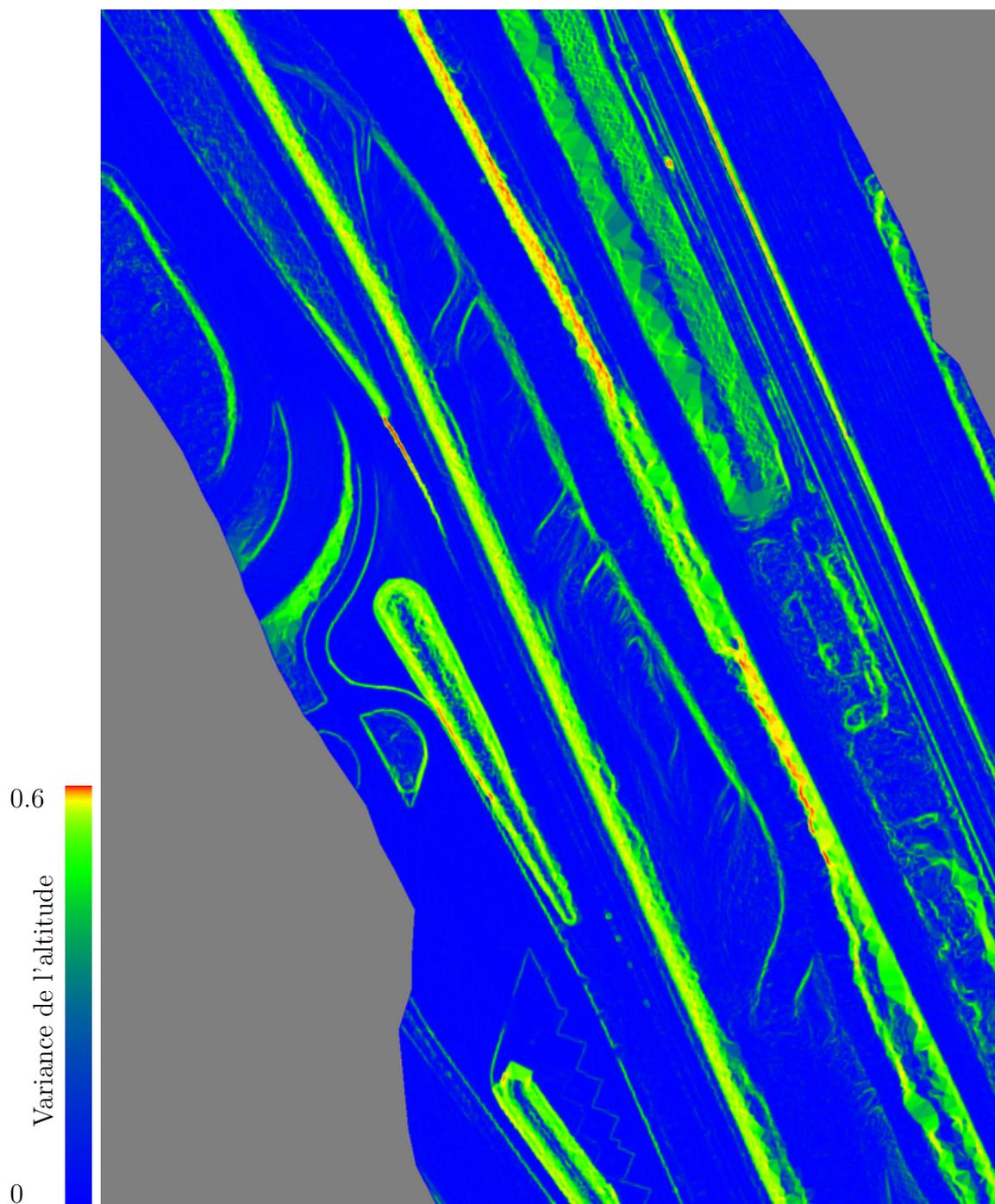


FIGURE A.7 – Carte de variance de l'altitude (échelle logarithmique)

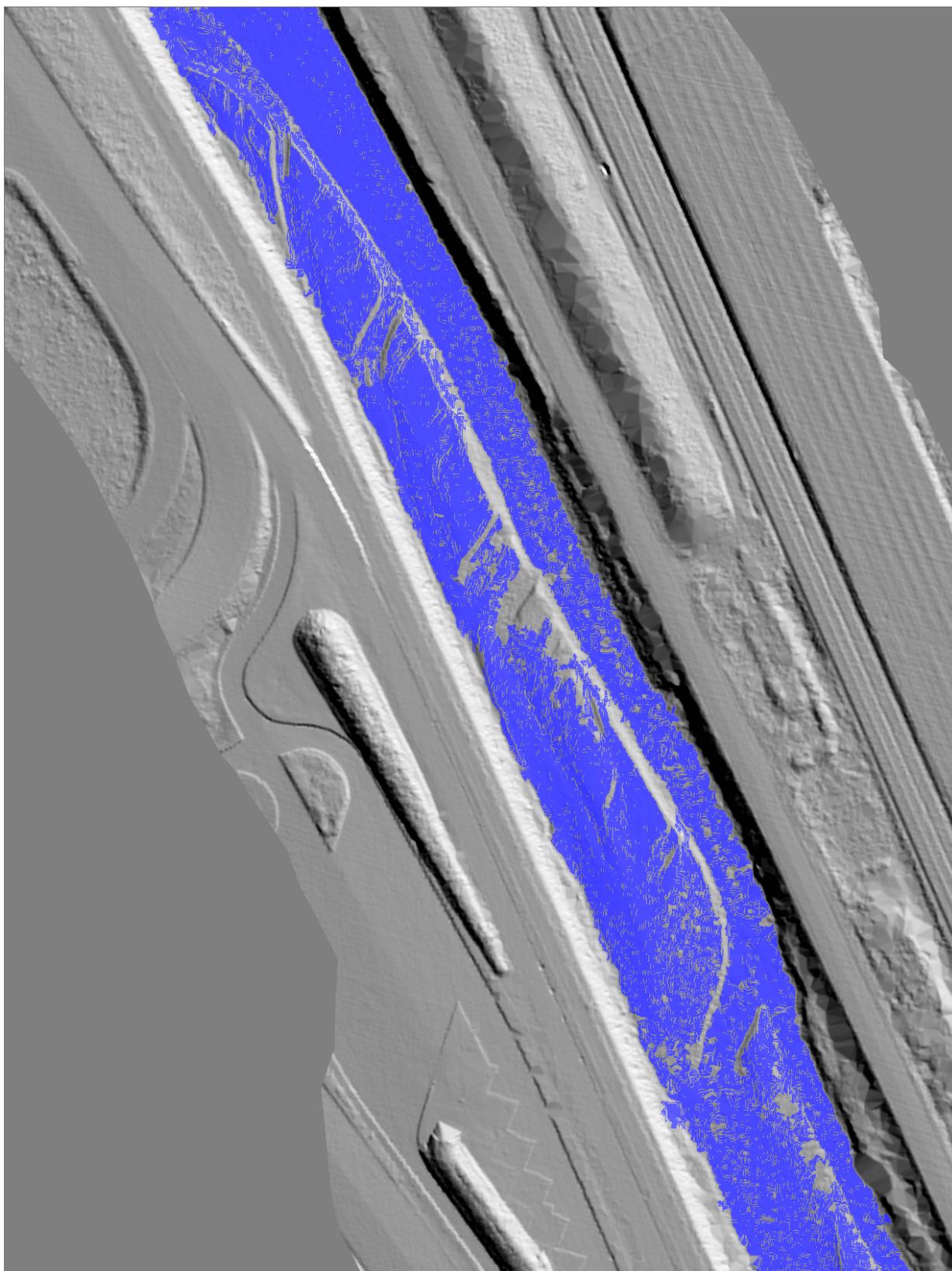


FIGURE A.8 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilNormale = 1,5^\circ$, les pixels de la région obtenue sont bleus

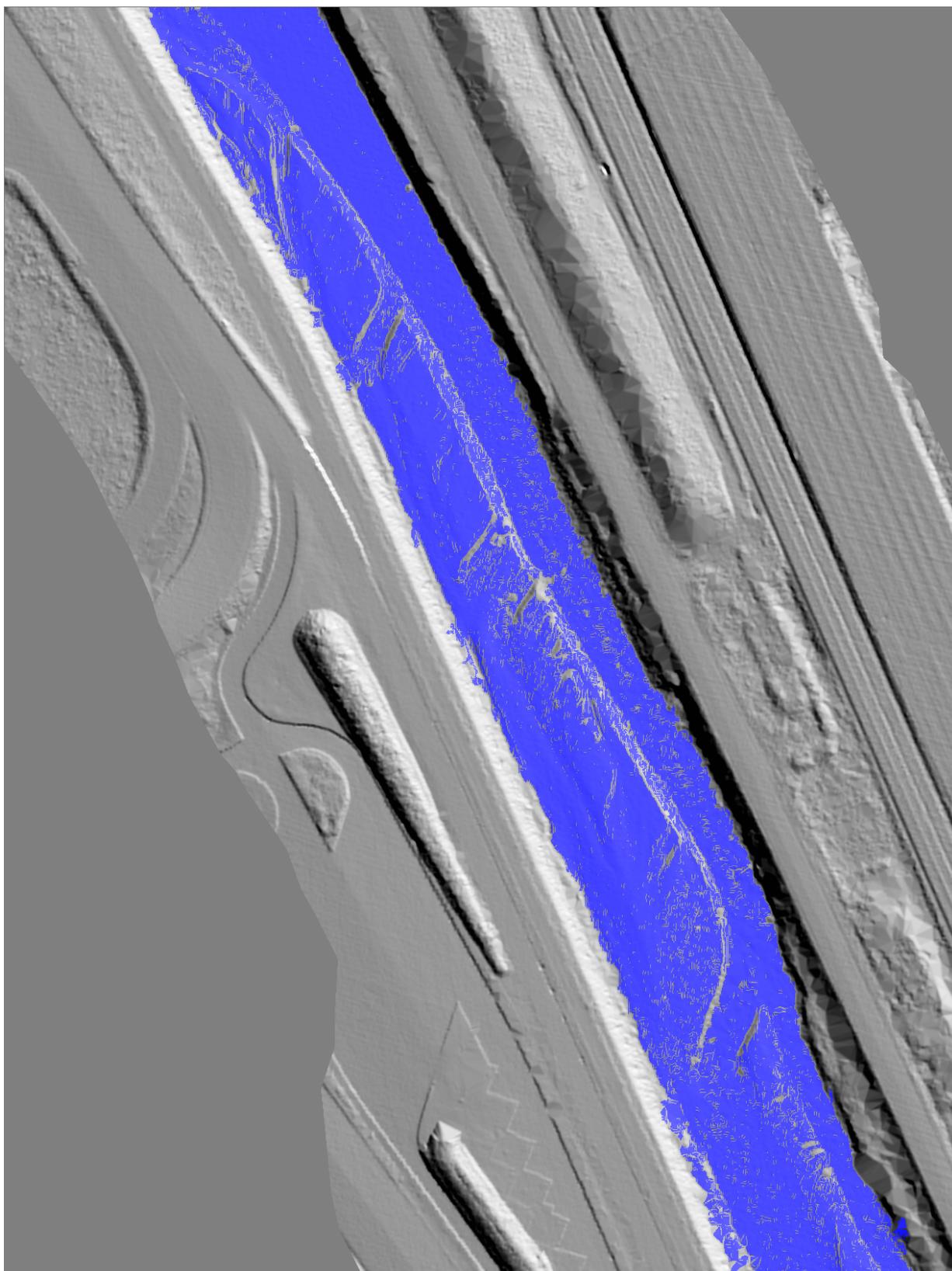


FIGURE A.9 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilNormale = 2^\circ$, les pixels de la région obtenue sont bleus

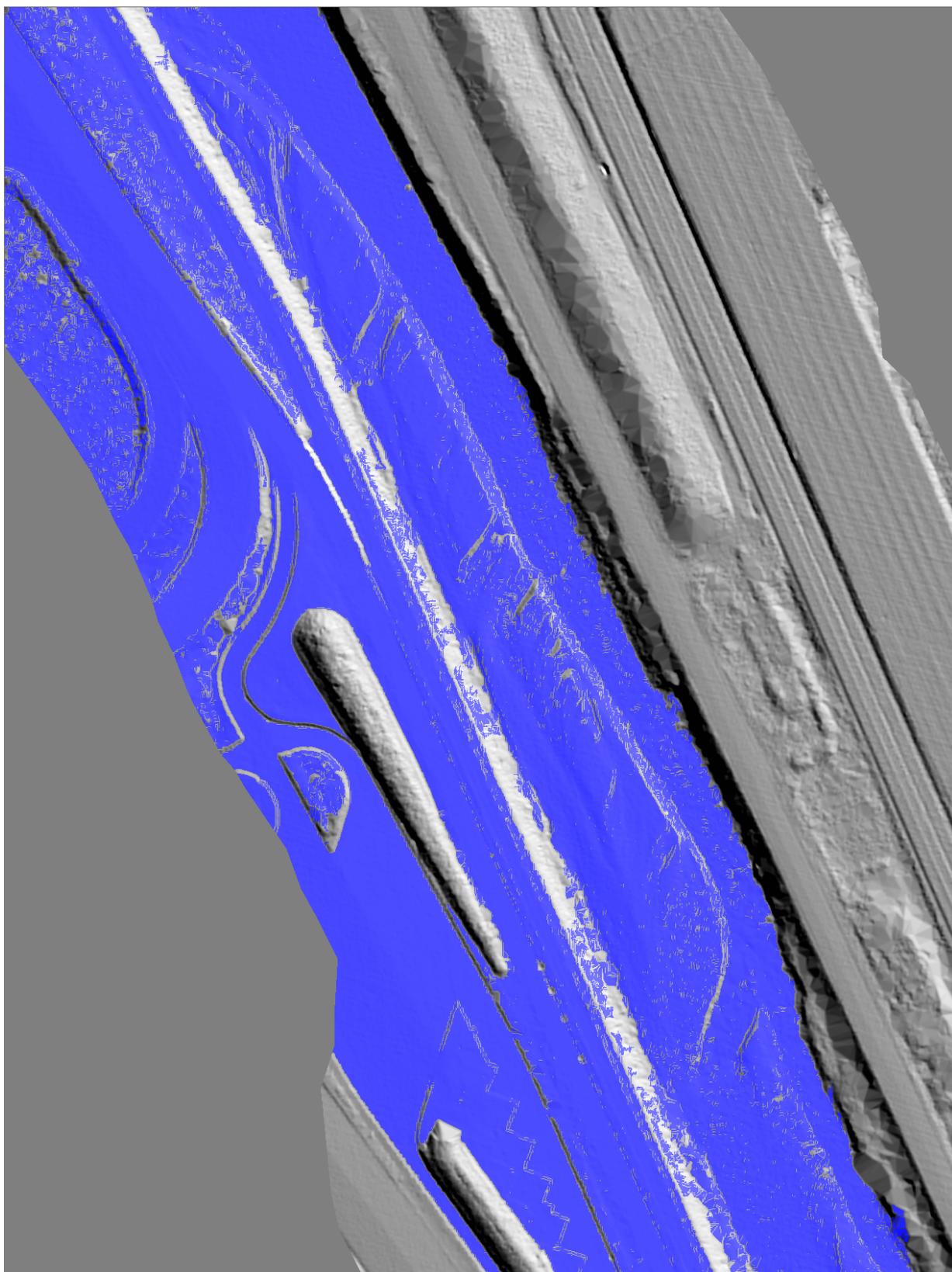


FIGURE A.10 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilNormale = 2,5^\circ$, les pixels de la région obtenue sont bleus

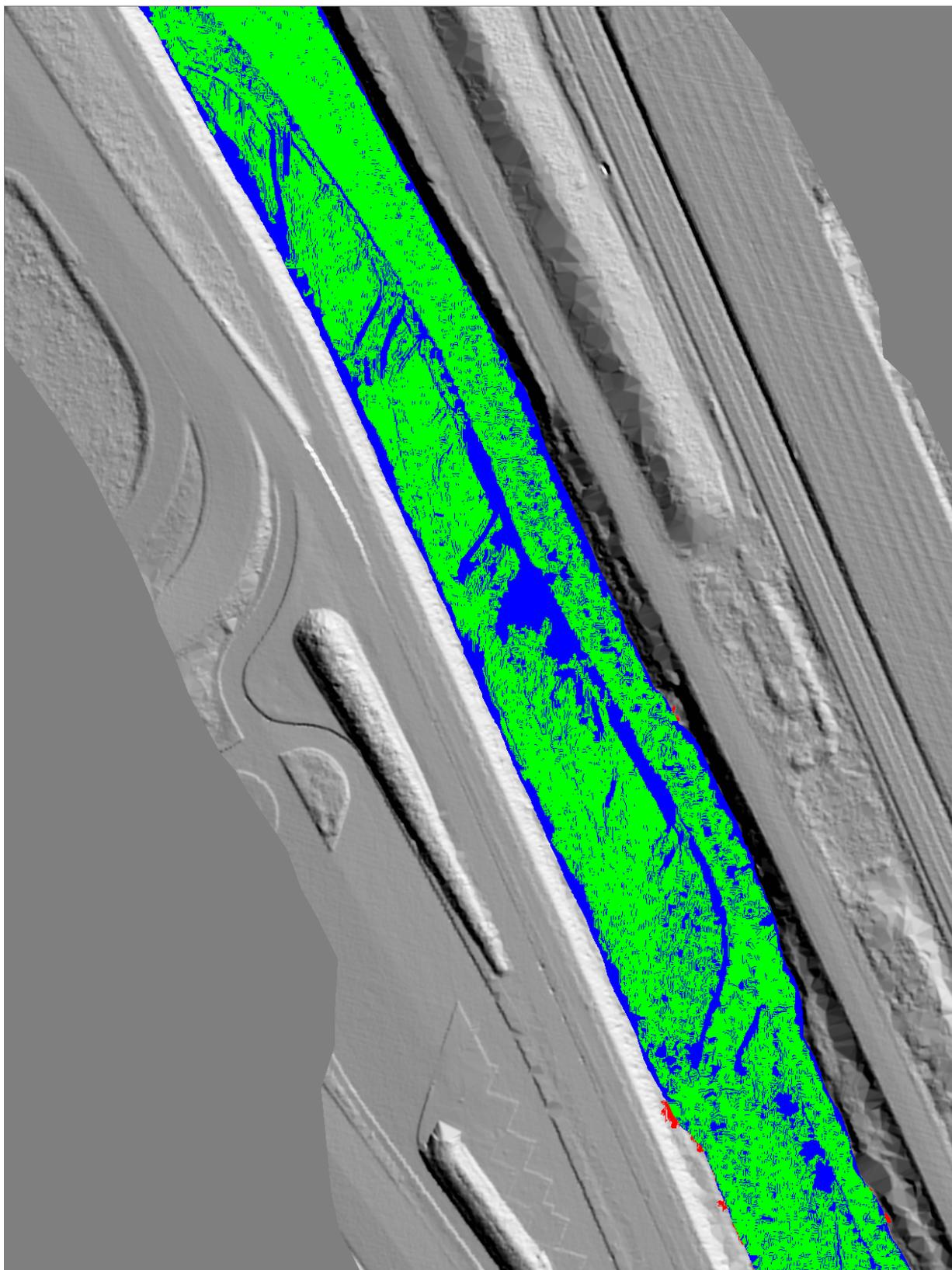


FIGURE A.11 – Comparaison des résultats de la figure A.8 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

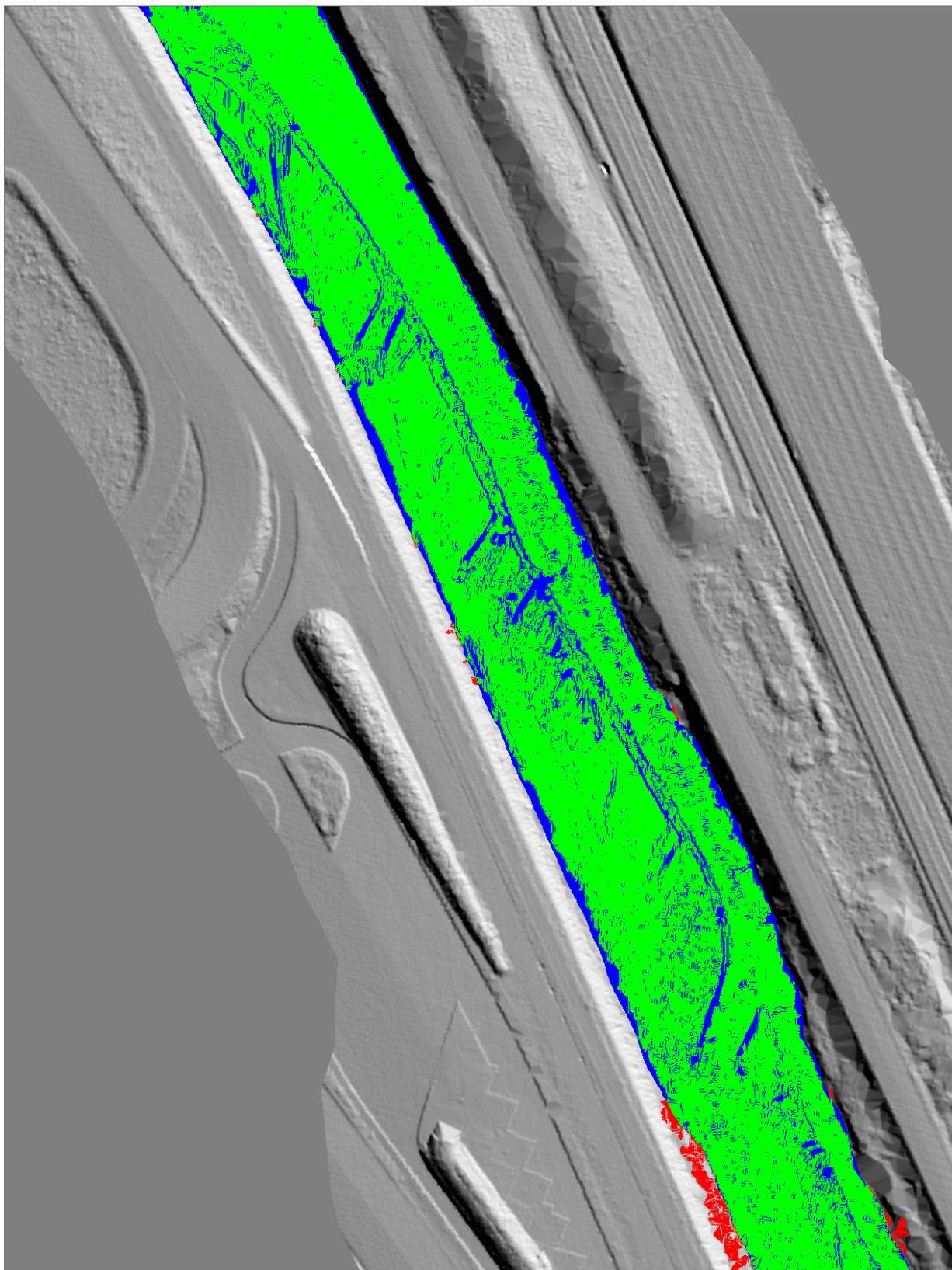


FIGURE A.12 – Comparaison des résultats de la figure A.9 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

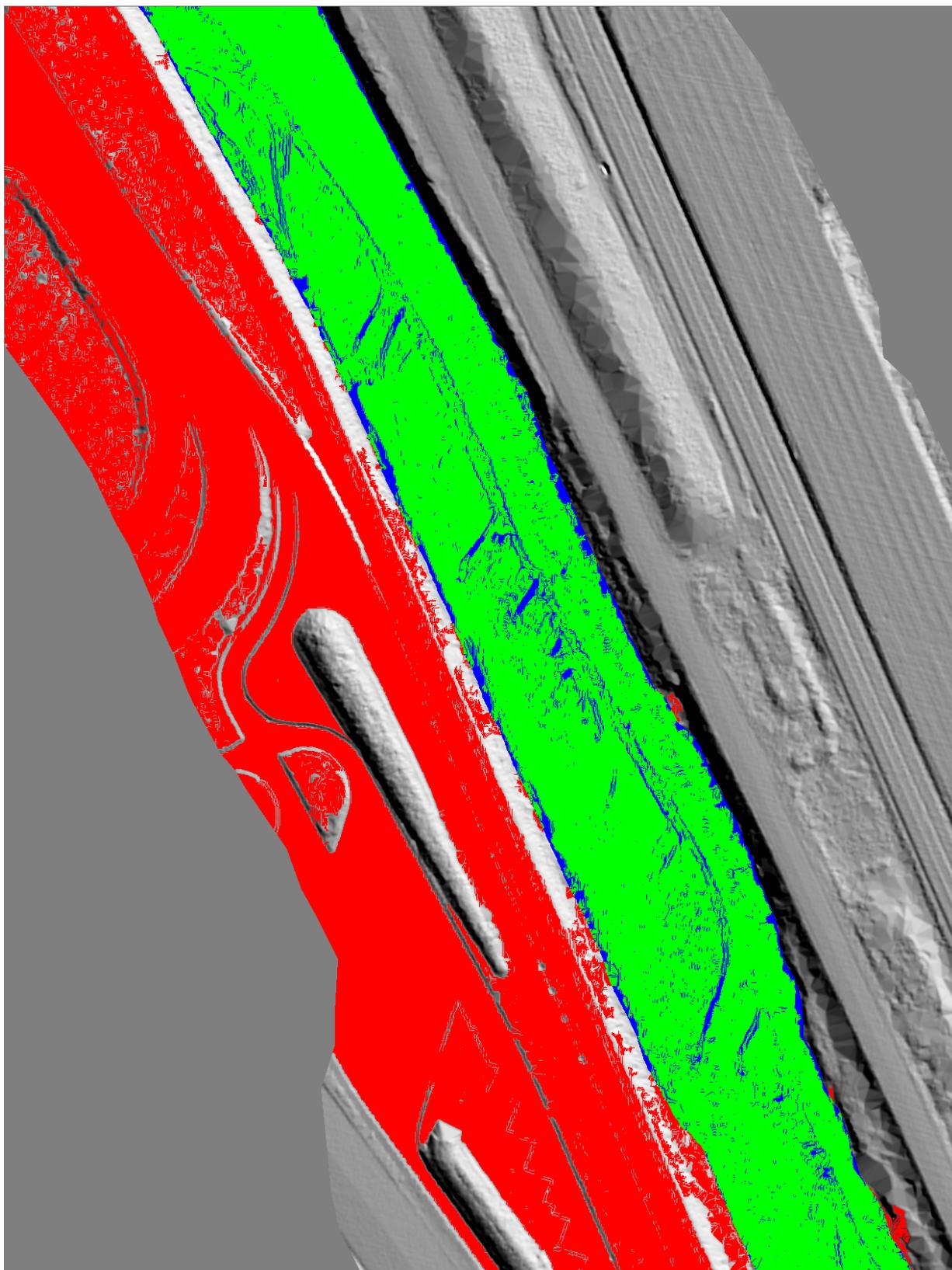


FIGURE A.13 – Comparaison des résultats de la figure A.10 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

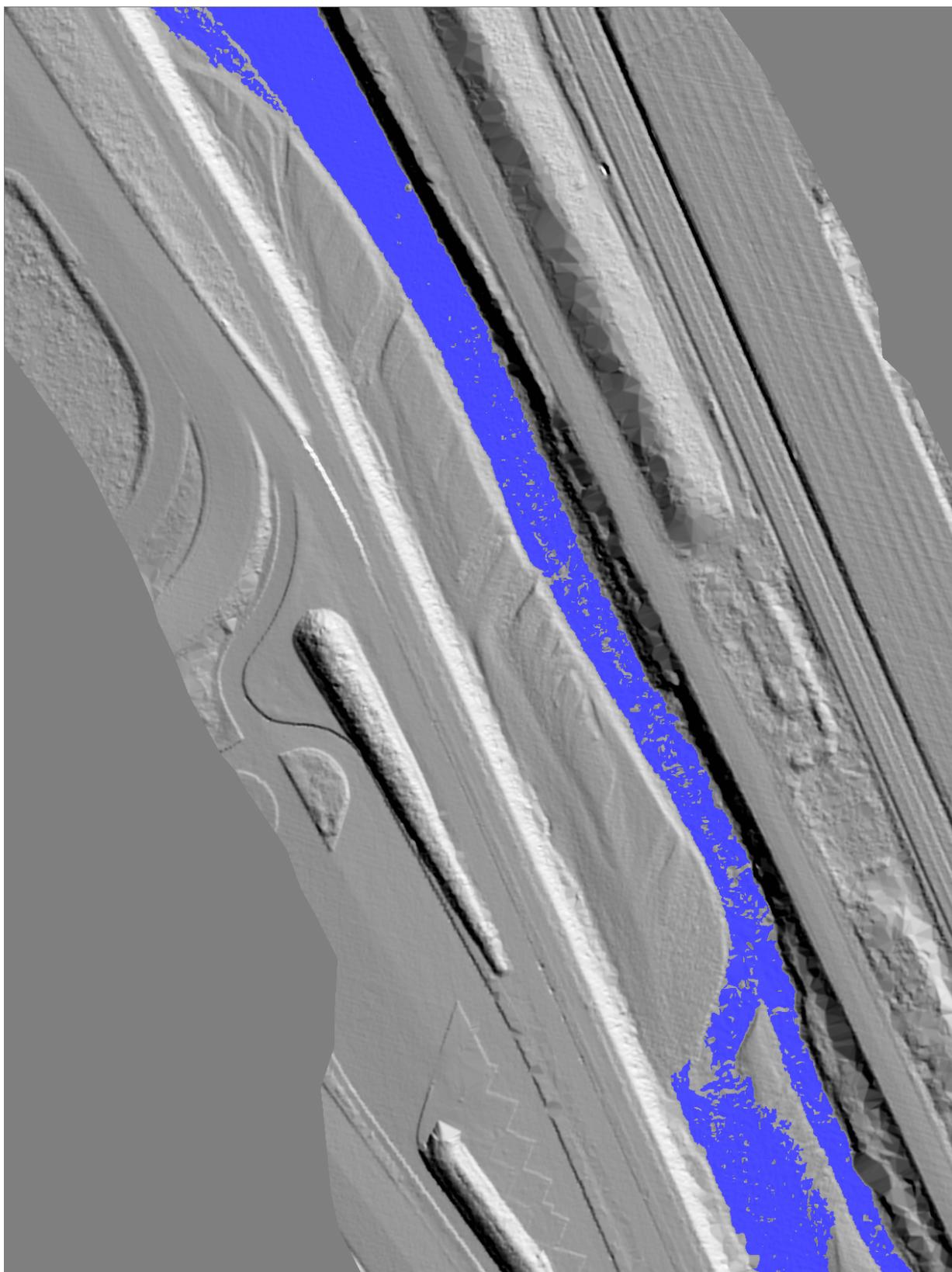


FIGURE A.14 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilVariance = 0,00064$, les pixels de la région obtenue sont bleus

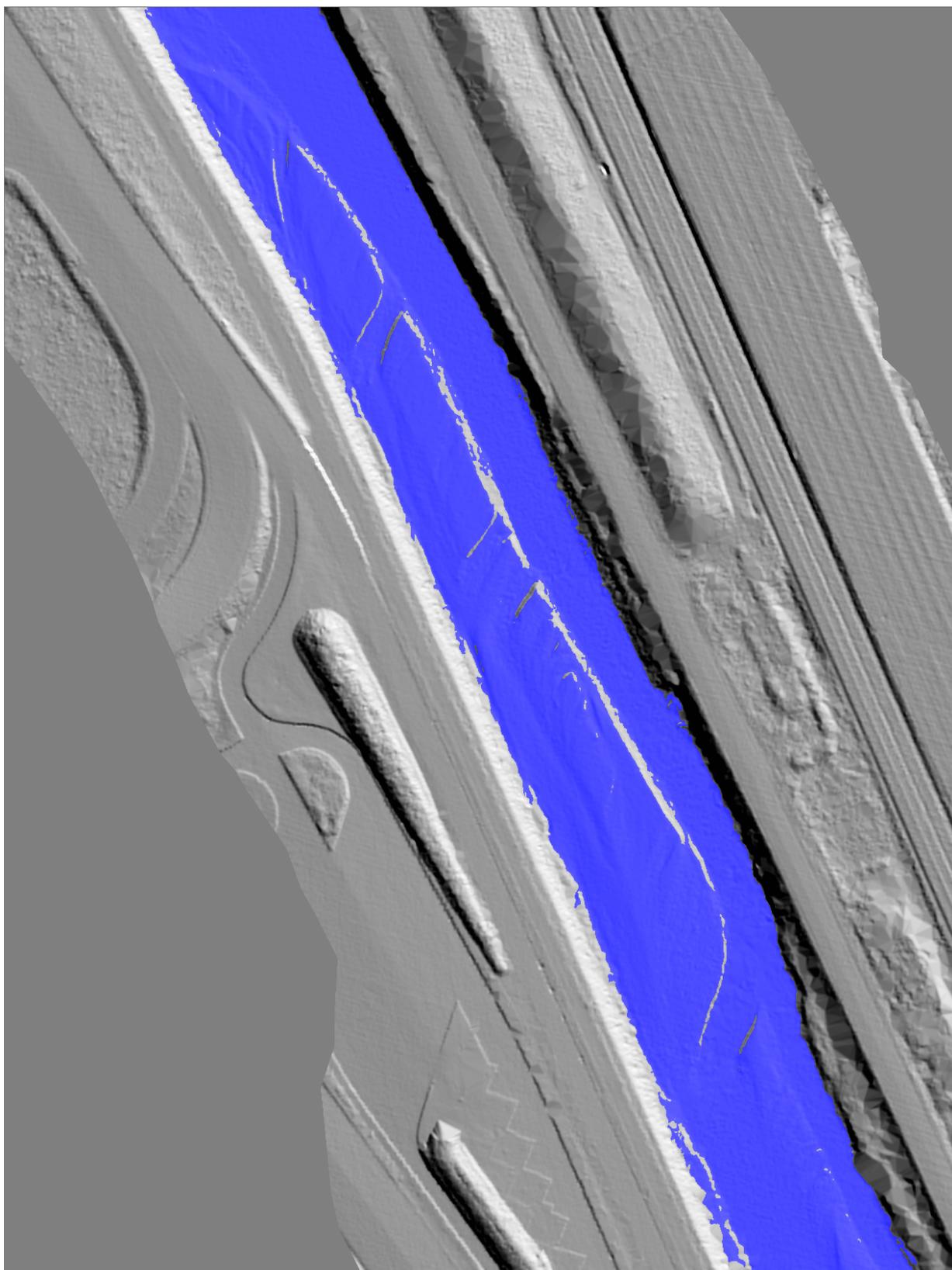


FIGURE A.15 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilVariance = 0,01$, les pixels de la région obtenue sont bleus

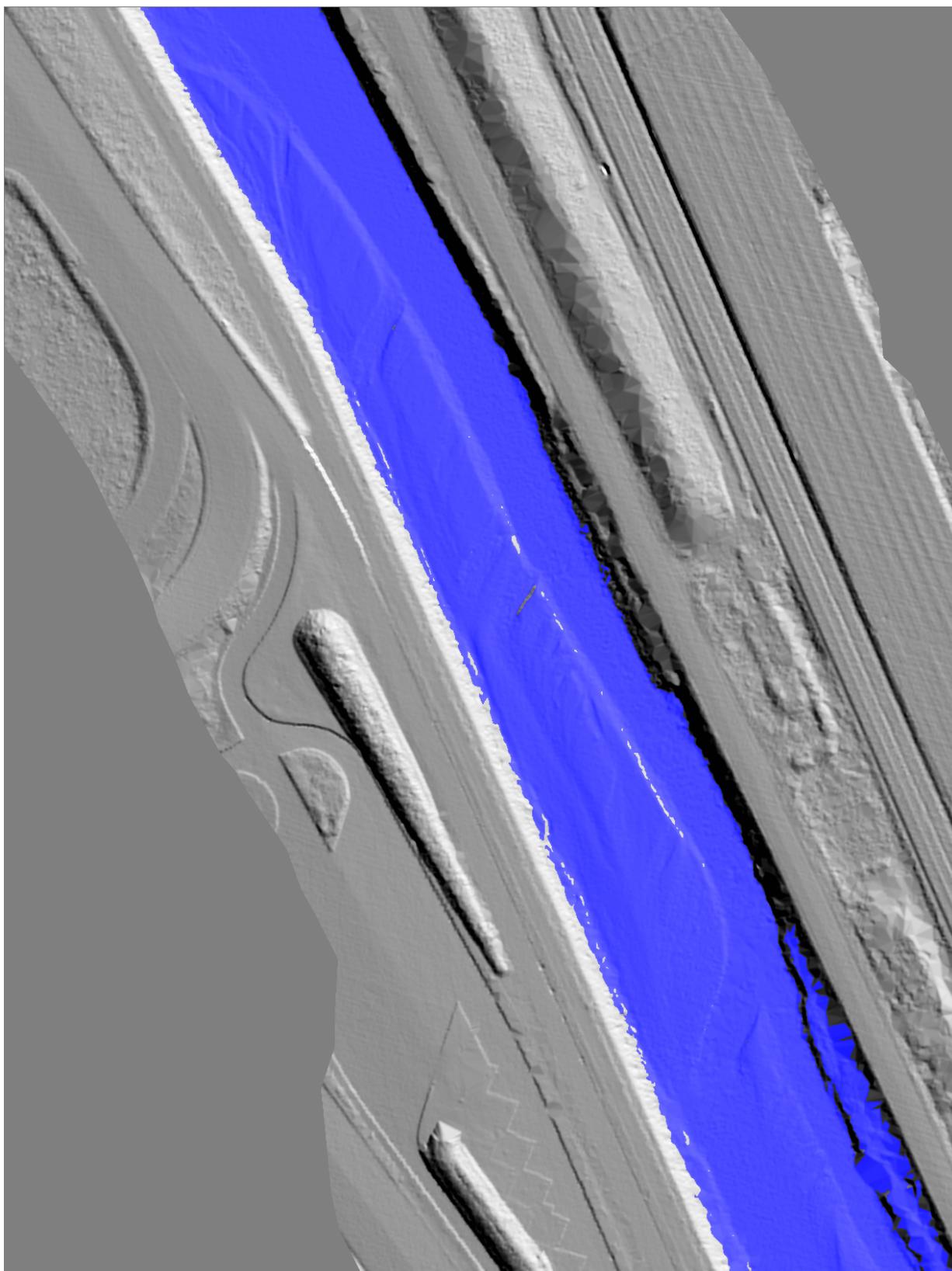


FIGURE A.16 – Région obtenu après la croissance de région avec $seuilVariance = 0,025$, les pixels de la région obtenue sont bleus

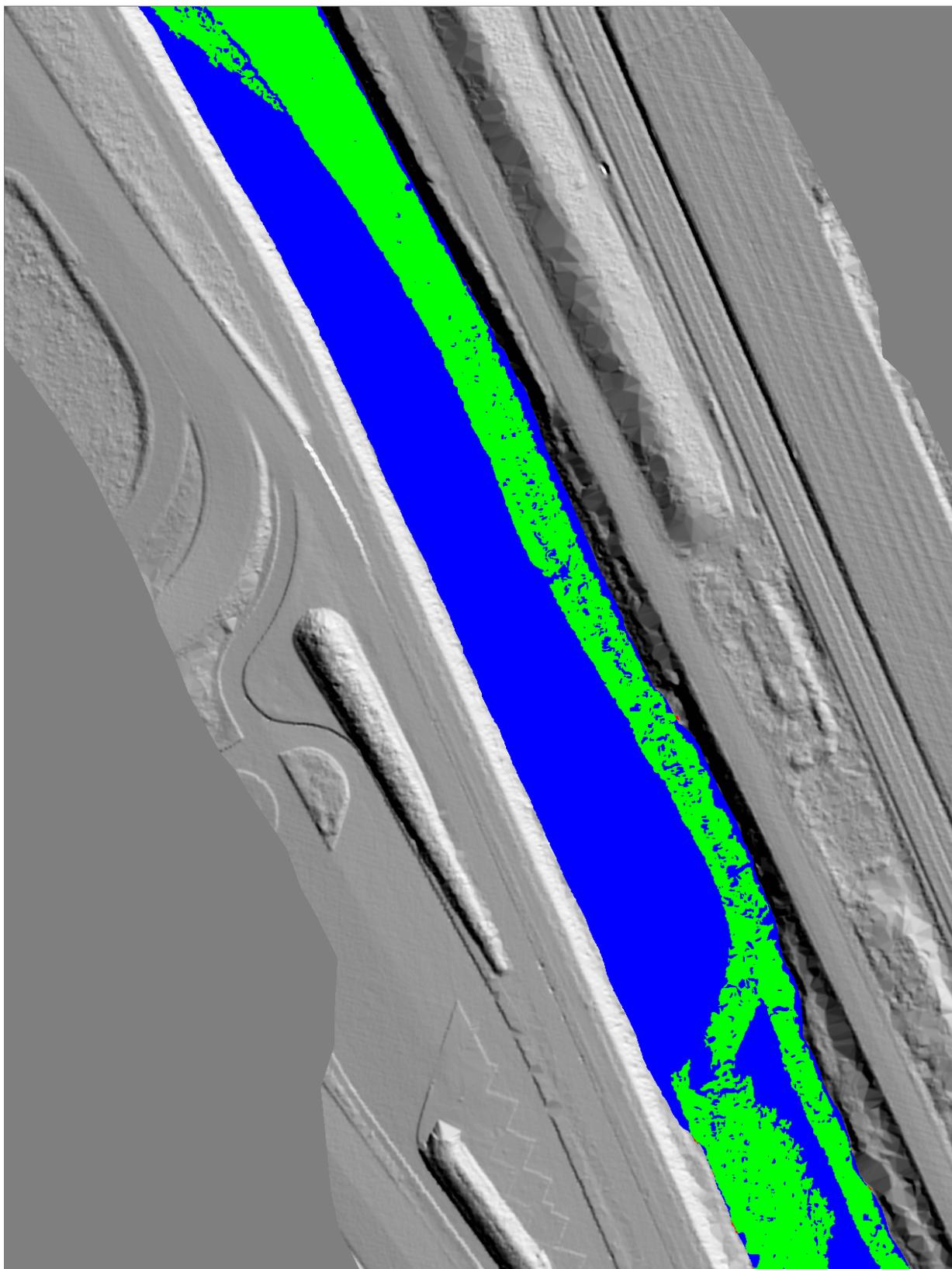


FIGURE A.17 – Comparaison des résultats de la figure A.14 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

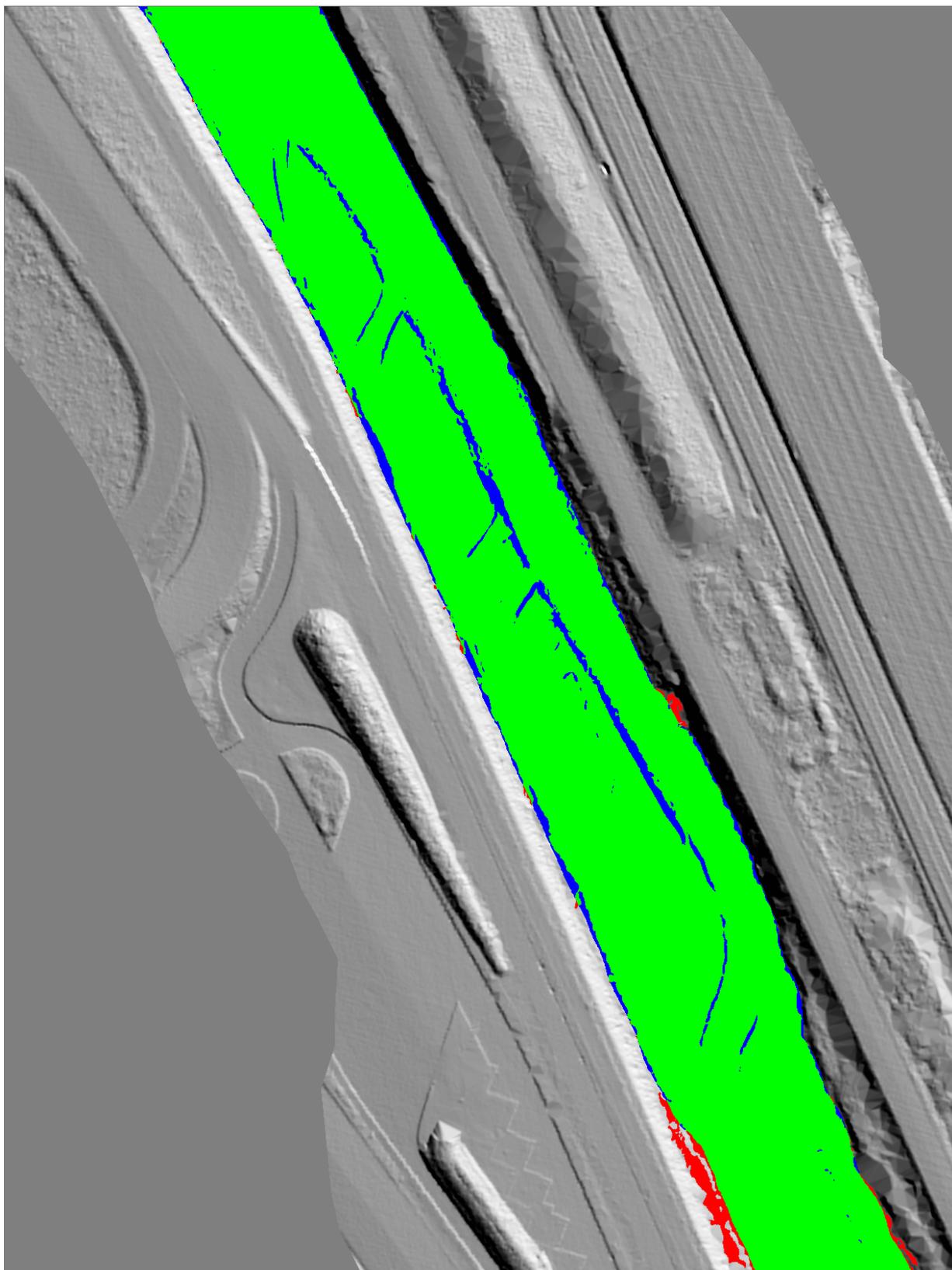


FIGURE A.18 – Comparaison des résultats de la figure A.15 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

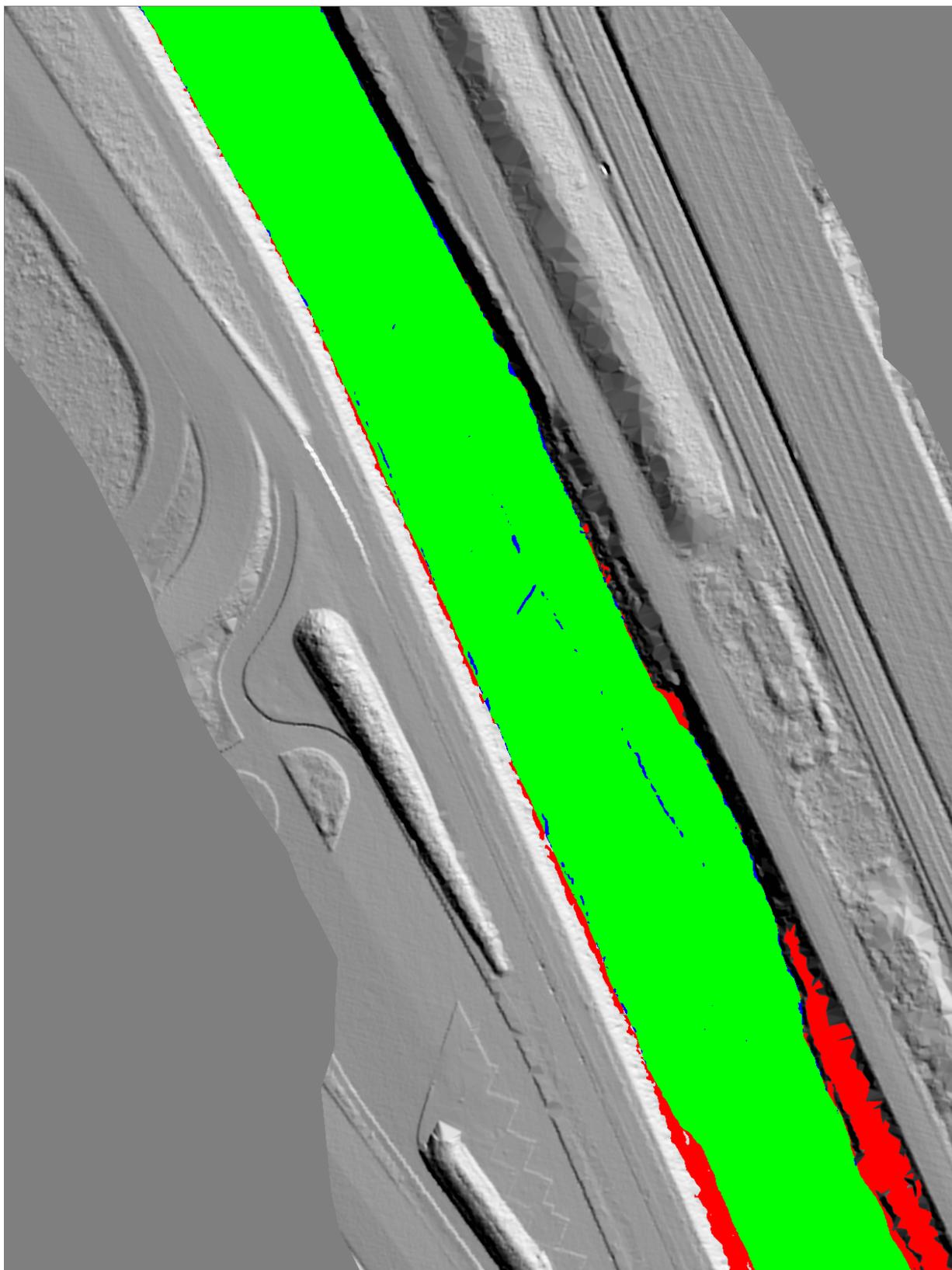


FIGURE A.19 – Comparaison des résultats de la figure A.16 à la région de référence
pixels verts : bonne détection
pixels bleus : sous-détection
pixels rouges : sur-détection

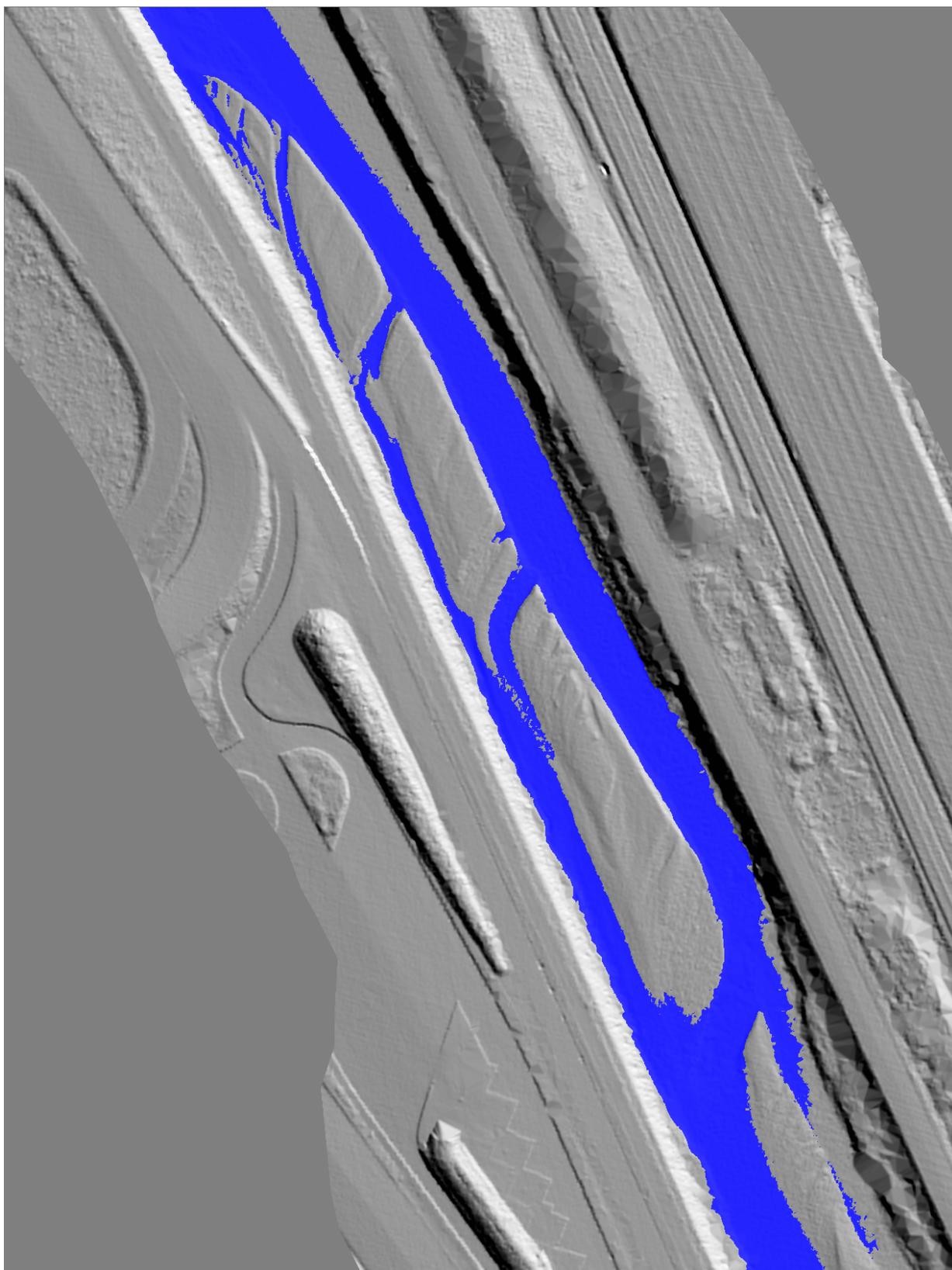


FIGURE A.20 – Seuillage d'altitude avec le plan moyen du lit mineur (région eau en bleu). Les pixels bleus sont sous ce plan

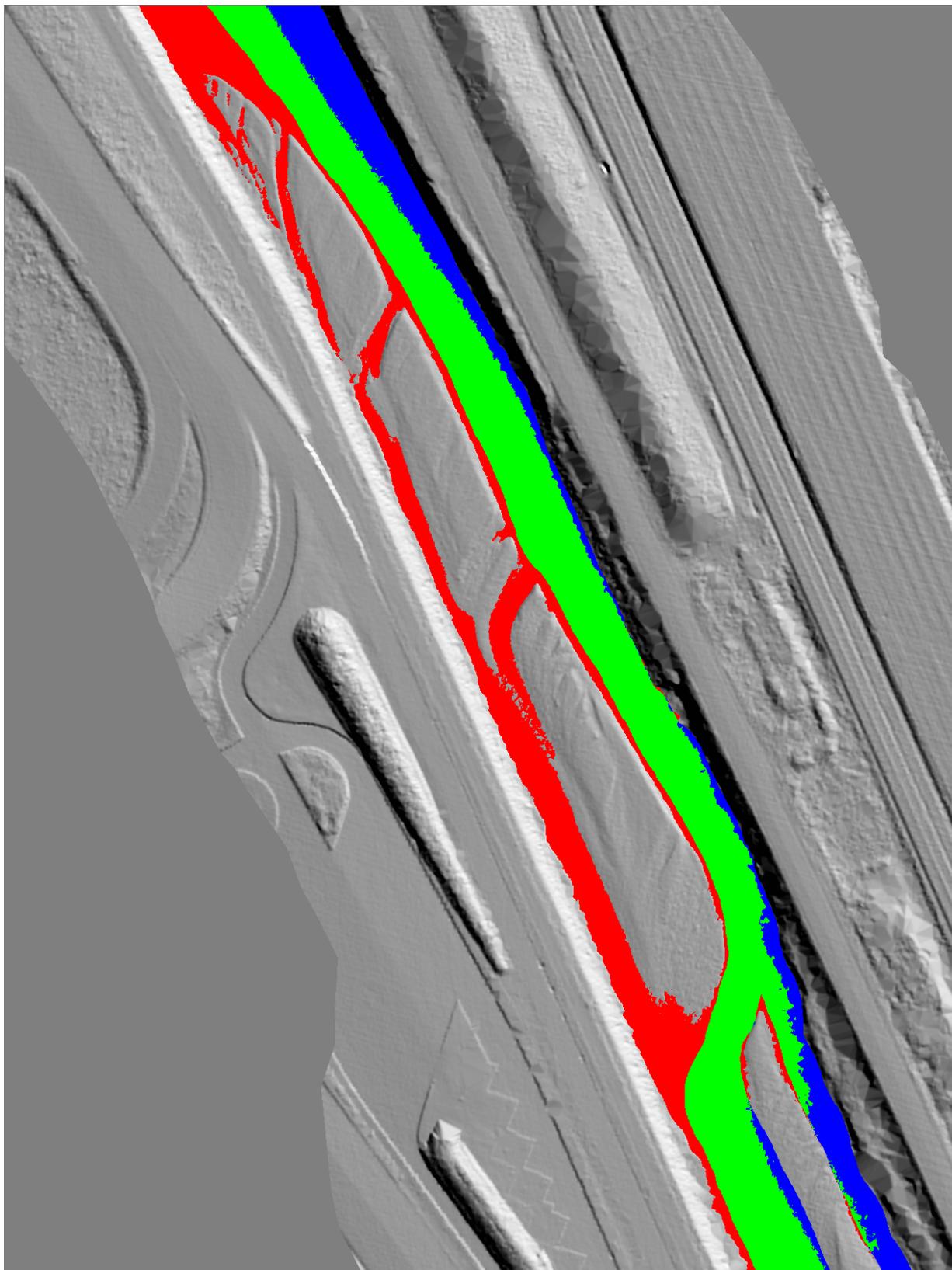


FIGURE A.21 – Comparaison de la région eau de la figure A.20 avec la région eau de référence (pixels verts : bonne détection, pixels bleus : sous-détection, pixels rouges : sur-détection)

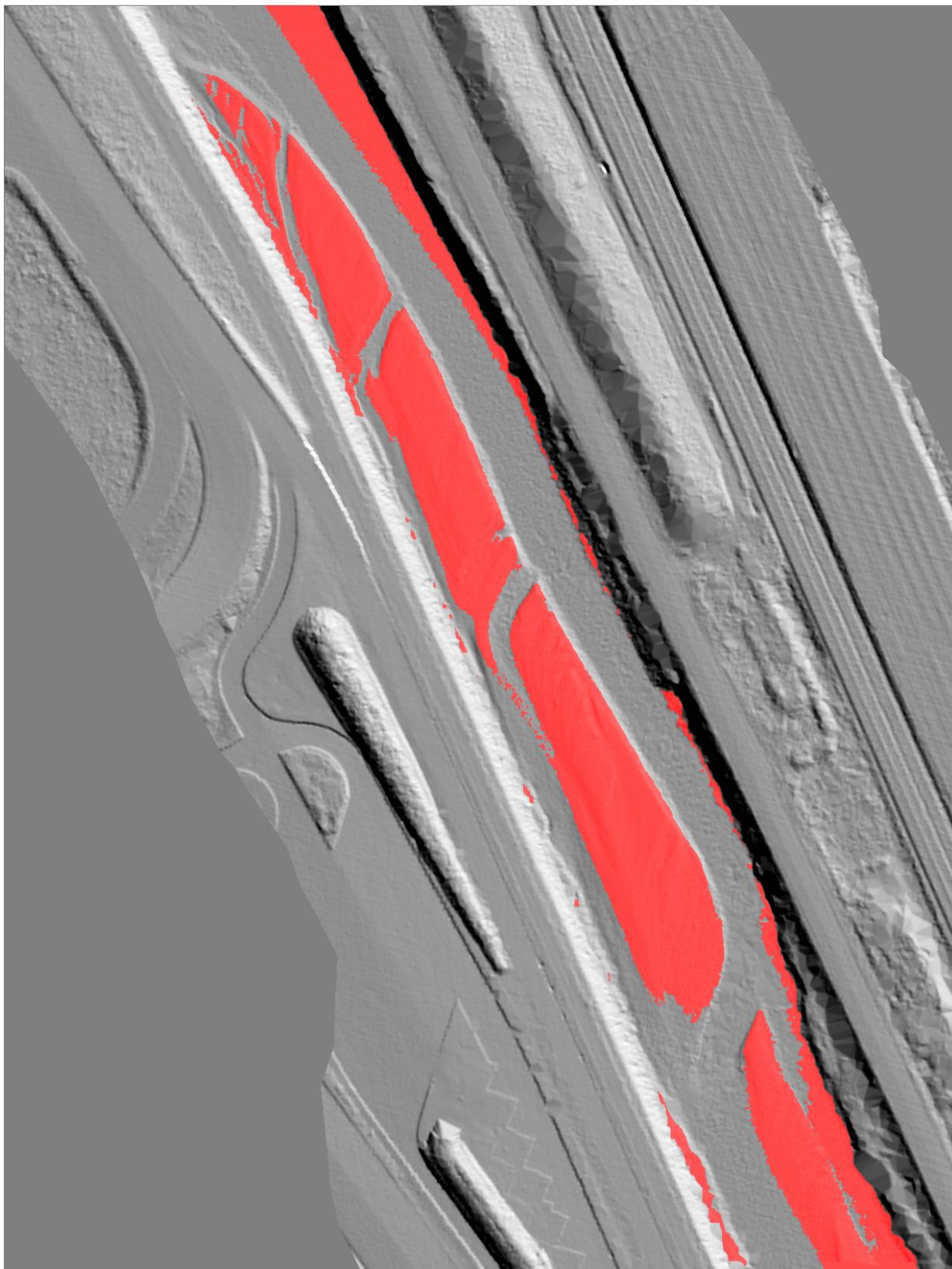


FIGURE A.22 – Région contenant les bancs (pixels rouges)

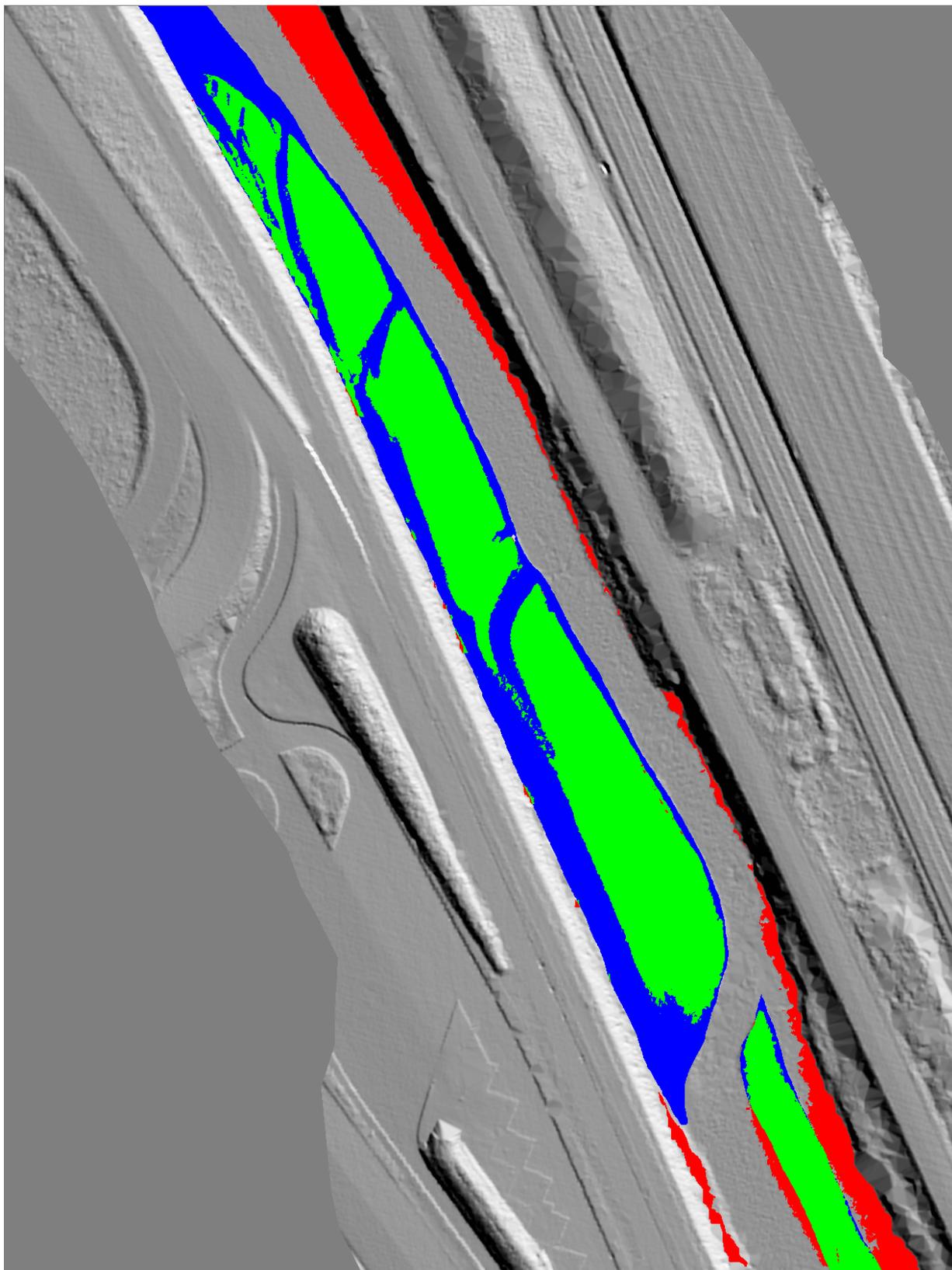


FIGURE A.23 – Comparaison de la région bancs de la figure A.22 avec la région bancs de référence (pixels verts : bonne détection, pixels bleus : sous-détection, pixels rouges : sur-détection)

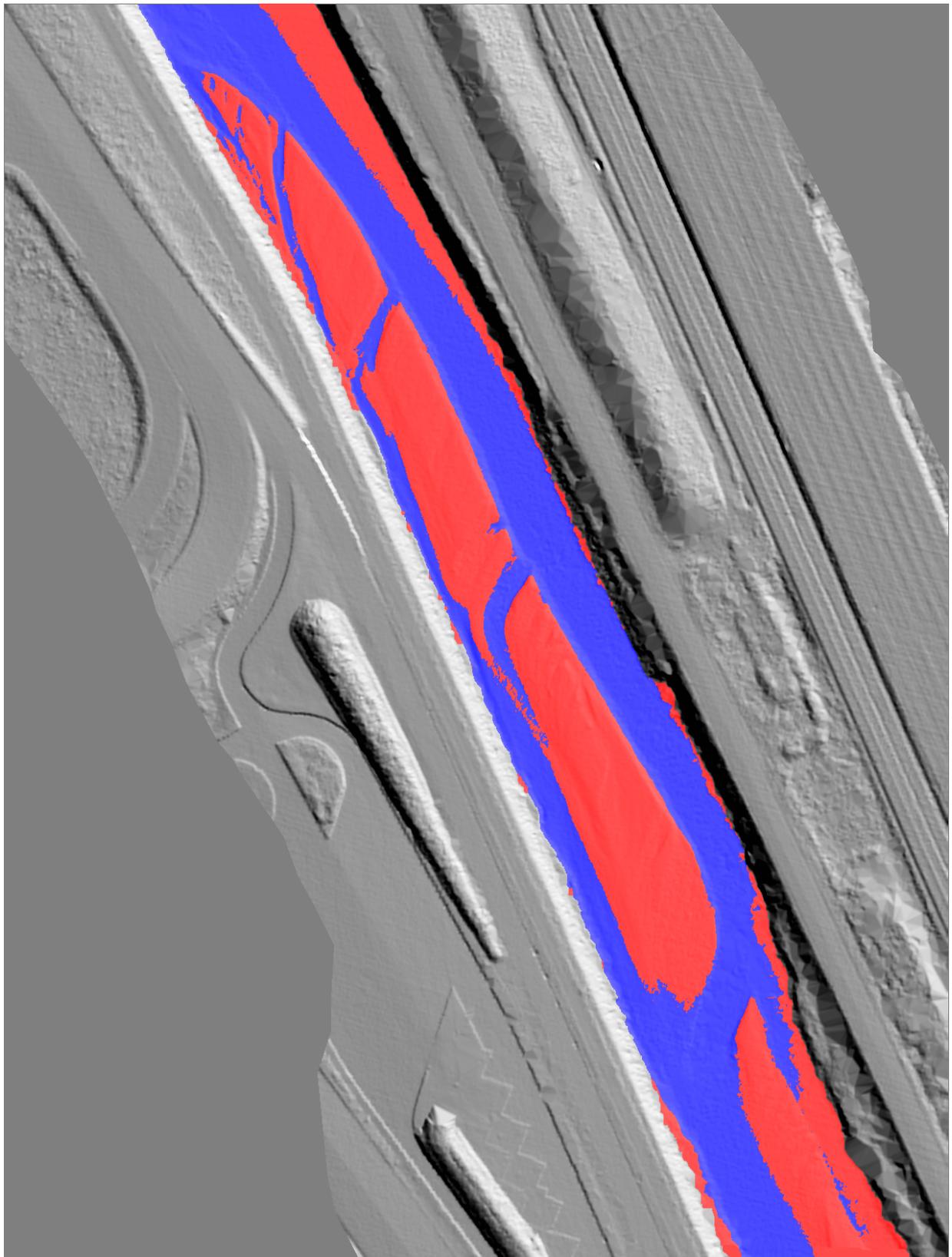


FIGURE A.24 – Région eau et bancs ensembles.
pixels bleus : région eau
pixels rouges : région bancs

Table des figures

1.1	Banc de gravier alterné	6
1.2	Relevé topographique manuel (CEMAGREF / WEINGERTNER F.)	6
2.1	Schémas du capteur LiDAR à balayage	8
2.2	Schémas d'un vol LiDAR	9
2.3	Schéma de la rétro-diffusion du signal dans l'eau	9
2.4	Illustration du retour du signal dans l'eau	10
2.5	Illustration des pré-traitements : suppression de ponts et de végétation	11
2.6	Carte de l'emprise des données	12
2.7	Photos aériennes de la portion de rivière témoin (source : Sintegra)	12
3.1	Visualisation de l'altitude en niveaux de gris	16
3.2	Palette de couleur RVB en fonction de l'altitude	16
3.3	Visualisation de l'altitude avec une palette de couleurs	17
3.4	Visualisation du MNT en mode ombré (avec un éclairage latéral)	17
3.5	Visualisation du MNT en mode ombré faisant apparaître des triangles suite à l'interpolation du nuage de points 3D	18
3.6	Visualisation après application d'un filtre de Sobel X, Sobel Y et Laplacien	18
3.7	Application de l'opérateur morphologique de fermeture avec un élément structurant carré 3×3 sur l'ensemble des pixels bleus	19
3.8	Carte des emplacements utilisés pour la recherche de vecteur de déplacement	20
3.9	Visualisation du MNT en trois zones A, B et C parmi les données	20
3.10	Carte de l'écart quadratique moyen des deux images en fonction du vecteur déplacement compris dans $[-16; 16]^2$ (l'image est agrandie)	21
4.1	Carte de normales	25
4.2	Carte de variance de l'altitude (échelle logarithmique)	25
4.3	Schéma d'exécution de l'algorithme de croissance	27
4.4	Variation de <i>seuilNormale</i> (sans critère de variance), les pixels de la région obtenue sont bleus	27
4.5	Région de référence correspondant au lit mineur de la rivière	28
4.6	Comparaison des résultats de la figure 4.4 à la région de référence figure 4.5b pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	28
4.7	Pourcentage de détection de la région en fonction de <i>seuilNormale</i>	29
4.8	Variation de <i>seuilVariance</i> (sans critère de normale)	29
4.9	Comparaison des résultats de la figure 4.8 à la région de référence figure 4.5b pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	30
4.10	Pourcentage de détection de la région en fonction de <i>seuilVariance</i>	30
4.11	Comparaison de la région avant et après fermeture morphologique avec un élément structurant carré de taille 21×21	32

4.12	Seuillage d'altitude avec le plan moyen du lit mineur. Les pixels bleus sont sous ce plan	32
4.13	Région contenant les bancs (pixels rouges)	33
4.14	Région eau et bancs ensemble. pixels bleus : région eau pixels rouges : région eau	33
4.15	Régions de référence	34
4.16	Comparaison des régions de la figures 4.14 avec les régions de références (figure 4.15)	35
5.1	Comparaison de la photo aérienne avec le résultat correspondant	37
A.1	Photos aériennes de la portion de rivière témoin (source : Sintegra)	39
A.2	Visualisation de l'altitude en niveaux de gris	40
A.3	Visualisation de l'altitude avec une palette de couleurs	41
A.4	Visualisation du MNT en mode ombré (avec un éclairage latéral)	42
A.5	Visualisation après application d'un filtre Laplacien	43
A.6	Carte de normales	44
A.7	Carte de variance de l'altitude (échelle logarithmique)	45
A.8	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilNormale</i> = 1,5°, les pixels de la région obtenue sont bleus	46
A.9	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilNormale</i> = 2°, les pixels de la région obtenue sont bleus	47
A.10	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilNormale</i> = 2,5°, les pixels de la région obtenue sont bleus	48
A.11	Comparaison des résultats de la figure A.8 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	49
A.12	Comparaison des résultats de la figure A.9 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	50
A.13	Comparaison des résultats de la figure A.10 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	51
A.14	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilVariance</i> = 0,00064, les pixels de la région obtenue sont bleus	52
A.15	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilVariance</i> = 0,01, les pixels de la région obtenue sont bleus	53
A.16	Région obtenu après la croissance de région avec <i>seuilVariance</i> = 0,025, les pixels de la région obtenue sont bleus	54
A.17	Comparaison des résultats de la figure A.14 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	55
A.18	Comparaison des résultats de la figure A.15 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	56
A.19	Comparaison des résultats de la figure A.16 à la région de référence pixels verts : bonne détection pixels bleus : sous-détection pixels rouges : sur-détection	57
A.20	Seuillage d'altitude avec le plan moyen du lit mineur (région eau en bleu). Les pixels bleus sont sous ce plan	58

A.21 Comparaison de la région eau de la figure A.20 avec la région eau de référence (pixels verts : bonne détection, pixels bleus : sous-détection, pixels rouges : sur-détection)	59
A.22 Région contenant les bancs (pixels rouges)	60
A.23 Comparaison de la région bancs de la figure A.22 avec la région bancs de référence (pixels verts : bonne détection, pixels bleus : sous-détection, pixels rouges : sur-détection)	61
A.24 Région eau et bancs ensembles. pixels bleus : région eau pixels rouges : région bancs	62

Abréviations

Cemagref : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts

IRSTEA : Institut de recherche en sciences et technologies de l'environnement et de l'agriculture

LiDAR : Light Detection and Ranging

GPS : Global Positioning System

PIR : Proche Infra-Rouge

MNT : Modèle Numérique de Terrain

TIFF : Tagged Image File Format

SIG : Système d'Information Géographique

Bibliographie

- [1] The gtk+ project. <http://www.gtk.org/>. Accédé le 24/08/2011.
- [2] Openmp. <http://openmp.org/>. Accédé le 24/08/2011.
- [3] Riegl lms-q560. <http://www.riegl.com/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/6/>. Accédé le 24/08/2011.
- [4] Sintégra. <http://www.sintegra.fr/>. Accédé le 24/08/2011.
- [5] Terrascan. <http://www.terrasolid.fi/en/products/terrascan>. Accédé le 24/08/2011.
- [6] B. Camenen, M. Jodeau, and J. Le Coz. Modélisation du flux sédimentaire pendant une chasse hydraulique (Arc en Maurienne). *La Houille Blanche*, 4 :p. 83 – p. 89, 2008.
- [7] M. Jaballah, B. Camenen, A. Paquier, and M. Jodeau. Field investigations on bar morphodynamics in an engineered alpine gravel-bed river : Arc en maurienne, france. In *RCEM*, 2011.
- [8] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18 :311–317, June 1975.