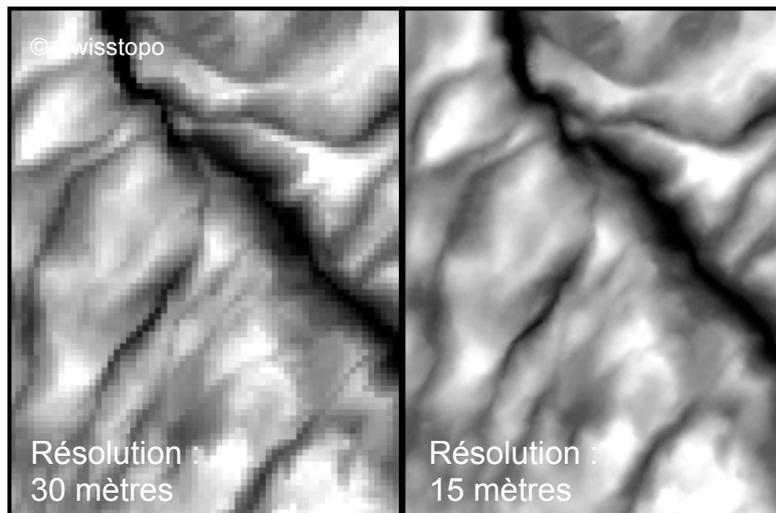


Downscaling de modèle numérique de terrain à partir de l'algorithme  
Direct Sampling (DS)

---

Romain Udry

Sous la direction du Prof. Grégoire Mariéthoz  
Expert : Mathieu Gravey





## Résumé

La résolution des modèles numériques de terrain (MNT) en libre accès peut être insuffisante pour créer des modèles en sciences de la terre. En effet, les phénomènes physiques se déroulent souvent à une échelle plus fine que celle qu'il est possible d'obtenir.

Parmi les nombreuses méthodes qui existent pour améliorer la résolution, ce mémoire utilise l'algorithme Direct Sampling (DS). Pour utiliser cet algorithme, il n'est pas nécessaire de créer ou de trouver une image d'entraînement. Il part de l'hypothèse que la topographie possède des caractéristiques fractales et qu'elles se retrouvent à plus petite échelle, donc il utilise l'image de base comme image d'entraînement. Afin d'améliorer la résolution, il utilise la géostatistique du multipoint, plus précisément l'échantillonnage direct afin de propager les statistiques spatiales d'une échelle à une autre.

Le principal objectif de ce mémoire est de tester deux méthodologies à partir de l'algorithme DS afin de déterminer la meilleure façon d'obtenir une amélioration de la résolution de MNT. Les avantages et les limitations de ces méthodes sont illustrés par des essais menés sur quatre zones d'étude en Suisse.

**Mots-clés :** Algorithme Direct Sampling / Résolution / Downscaling / Géostatistiques / Multipoint / Echantillonnage direct / Fractale

## Abstract

The resolution of open-access digital elevation models (DEMs) can be insufficient to create models in the Earth sciences. Indeed, physical phenomena often occur at a finer scale than it can be achieved.

Among the many methods available to improve resolution, this thesis uses the Direct Sampling (DS) algorithm. To use this algorithm, you do not need to create or find a training image. It assumes that the topography has fractal characteristics, which are found at a finer scale, so it uses the basic image as a training image. For downscaling, multipoint geostatistics is used, more specifically direct sampling, to propagate spatial statistics from one scale to another.

The main objective of this thesis is to test two methodologies of the Direct Sampling algorithm to determine the best way to obtain an refinement of the DEM resolution. The advantages and limitations of these methods are illustrated by trials in four study areas in Switzerland.

**Keywords :** Direct Sampling algorithm / Resolution / Downscaling / Geostatistics / Multiple-point / Direct Sampling / Fractal

## Table des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	II
<b>I<sup>ère</sup> PARTIE : INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1. Introduction .....	1
2. Problématique.....	3
2.1. Plan de la recherche.....	4
<b>II<sup>ème</sup> PARTIE : CADRE THEORIQUE .....</b>	<b>5</b>
3. Géostatistique .....	5
3.1. Multipoint.....	6
3.2. Echantillonnage direct .....	8
4. Fractale.....	9
4.1. Définition .....	9
4.2. Dimension fractale .....	10
5. <i>Downscaling</i> .....	12
6. Présentation des zones d'étude .....	14
6.1. Zone 1.....	15
6.2. Zone 2.....	16
6.3. Zone 3.....	17
6.4. Zone 4.....	18
6.5. Synthèse des zones d'étude .....	19
<b>III<sup>ème</sup> PARTIE : METHODOLOGIE .....</b>	<b>20</b>
7. Préparation des données de base .....	20
8. Algorithme Direct Sampling (DS).....	22
8.1. Fonctionnement.....	23
8.2. Paramètres.....	25
9. Méthode pour l'acquisition des données.....	27
10. Dimension fractale.....	28
10.1. Dimension fractale des zones.....	30
<b>IV<sup>ème</sup> PARTIE : PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS..</b>	<b>31</b>
11. Résultats.....	31
11.1. Zone 1 .....	31
11.1.1. MNT en entier .....	31
11.1.2. Fluctuations .....	34
11.2. Zone 2 .....	37
11.2.1. MNT en entier .....	37
11.2.2. Fluctuations.....	39
11.3. Zone 3 .....	41
11.3.1. MNT en entier .....	41
11.3.2. Fluctuations.....	43
11.4. Zone 4 .....	45
11.4.1. MNT en entier .....	45
11.4.2. Fluctuations.....	47

<b>12. Interprétation et analyse des résultats .....</b>	<b>50</b>
12.1. MNT en entier .....	50
12.1.1. Zone 1 .....	50
12.1.2. Zone 2 .....	54
12.1.3. Zone 3 .....	57
12.1.4. Zone 4 .....	60
12.1.5. Synthèse pour l'entier du MNT.....	63
12.2. Fluctuations.....	64
12.2.1. Zone 1 .....	64
12.2.2. Zone 2 .....	67
12.2.3. Zone 3 .....	70
12.2.4. Zone 4 .....	73
12.2.5. Synthèse des fluctuations .....	76
12.3. Comparaison des approches.....	77
12.4. Influence de la dimension fractale .....	78
12.5. Comparaison avec une autre méthode.....	80
12.5.1. Brève présentation .....	80
12.5.2. Comparaison des résultats .....	80
<b>V<sup>ème</sup> PARTIE : CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE .....</b>	<b>82</b>
<b>13. Conclusion .....</b>	<b>82</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>84</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>84</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>91</b>
DS paramètres.....	91
DVD	

## Table des figures

Figure 1 : Distribution des données catégorielles, sable (noir) et eau (blanc) .....	6
Figure 2 : Utilisation de géostatistique multipoint sur deux images d'entraînement (a et c). (a) image d'entraînement d'une rivière en tresse. (b) résultat du multipoint avec (a) comme image d'entraînement. (c) image d'entraînement d'une rivière méandrée. (d) résultat du multipoint avec (c) comme image d'entraînement. ....	7
Figure 3 : Méthode d'échantillonnage direct. (a) Elément x à simuler en fonction de ses voisins connus (b) Elément x avec ses voisins (c) Tentative ratée de recherche de l'élément x (d) Résultat positif pour la simulation. (e) Valeur de l'élément y attribuée à l'élément x. ....	8
Figure 4 : Illustration de la réflexion de Mandelbrot sur la côte de la Grande Bretagne. Le tracé de la côte devient plus précis et le périmètre augmente (de gauche à droite).....	9
Figure 5 : Construction de la courbe de Koch.....	10
Figure 6 : illustration de l'amélioration de la résolution par un facteur deux. (a) les pixels de l'image d'origine vont migrer en (b) dans une grille [2X ; 2Y]. (c) Simulation des pixels vides en utilisant l'image d'origine comme image d'entraînement. ....	12
Figure 7 : Position des quatre zones d'étude .....	14
Figure 8 : Illustration de la première zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).....	15
Figure 9 : Histogramme de la distribution d'altitude de la première zone.....	15
Figure 10 : Illustration de la deuxième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).....	16
Figure 11 : Histogramme de la distribution d'altitude de la deuxième zone.....	16
Figure 12 : Illustration de la troisième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).....	17
Figure 13 : Histogramme de la distribution d'altitude de la troisième zone .....	17
Figure 14 : Illustration de la quatrième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).....	18
Figure 15 : Histogramme de la distribution d'altitude de la dernière zone. ....	18
Figure 16 :Présentation du MNT en 3D (en haut), de la moyenne lissée (à gauche) et des fluctuations (à droite) de la première zone .....	21
Figure 17 : Illustration de la méthode de comptage de boîtes tridimensionnelle, avec la taille du cube (s) 12 et la taille des boîtes (q) de 1 pour (A), de 2 pour (B), de 3 pour (C) et de 6 pour (D). ....	28
Figure 18 : Dimension fractale locale d'une ligne et d'un plan avec la taille du cube (s) 12 et la taille des boîtes (q) de 1, 2, 3 et 6. ....	29
Figure 19 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 30 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.....	51
Figure 20 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.....	52
Figure 21 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 30 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.....	53
Figure 22 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite) .....	53
Figure 23 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 20 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.....	54

Figure 24 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	55
Figure 25 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 20 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	56
Figure 26 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite)	56
Figure 27 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	57
Figure 28 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	58
Figure 29 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	59
Figure 30 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite)	59
Figure 31 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	60
Figure 32 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	61
Figure 33 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	62
Figure 34 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite)	62
Figure 35 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	64
Figure 36 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	65
Figure 37 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	66
Figure 38 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite)	66
Figure 39 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	67
Figure 40 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	68
Figure 41 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	68
Figure 42 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite)	69
Figure 43 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1	70
Figure 44 : Illustrations des endroits où les résultats du <i>downscaling</i> sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1	71

Figure 45 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.....	71
Figure 46 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite). .....	72
Figure 47 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.....	73
Figure 48 : Illustrations des endroits où les résultats du downscaling sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1 .....	74
Figure 49 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.....	75
Figure 50 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite). .....	75
Figure 51 : Illustration des moins bonnes valeurs simulés par l'algorithme de R. Luiz Gustavo (à gauche) et par l'algorithme DS (à droite). ....	81

## Tableaux

Tableau 1 : Présentation des différents paramètres de l'algorithme DS. ....	25
Tableau 2 : Résultats de la dimension fractale 3D globale et de la dimension fractale locale pour les différentes zones d'étude. ....	30
Tableau 3 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	32
Tableau 4 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	33
Tableau 5 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la première zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	34
Tableau 6 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	35
Tableau 7 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	37
Tableau 8 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	38
Tableau 9 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la deuxième zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	39
Tableau 10 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	40
Tableau 11 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	41
Tableau 12 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	42
Tableau 13 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la troisième zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	43
Tableau 14 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	44
Tableau 15 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	45
Tableau 16 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	46
Tableau 17 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la quatrième zone uniquement avec les fluctuation, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	47
Tableau 18 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du <i>downscaling</i> en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum. ....	48
Tableau 19 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour les quatre zones avec l'entier du MNT ainsi qu'avec uniquement les fluctuations, avec le seuil 0.01 et un nombre de voisin maximum variable. ....	78

# I<sup>ère</sup> PARTIE : INTRODUCTION

---

## 1. Introduction

Les modèles numériques de terrains (MNT) sont des représentations en trois dimensions de la topographie (Moussa & Bocquillon, 1993). Ils ne prennent pas en compte les bâtiments et la végétation présents sur le territoire étudié (Office fédéral de topographie, 2015). Ils sont importants pour les sciences de la terre car ils permettent de calculer de nombreux paramètres utiles à la conception de modèles, comme par exemple la pente et l'orientation, qui sont les paramètres les plus importants pour les modèles en hydrologie (Beven & Kirkby, 1979; Band, 1986; Morris & Heerdegen, 1988; Smith, Zhan & Gao, 1990; Montgomery & Foufoula-Georgiou, 1993; Zhang & Montgomery, 1994). Les informations issues des MNT sont utiles pour comprendre et prédire les phénomènes physiques à différentes échelles (Mariethoz, Renard & Straubhaar, 2011). C'est pourquoi il est important de générer des MNT le plus précis possible. Cependant, il faut faire attention, car les MNT ne sont pas la réalité, ils ne sont que des représentations de cette dernière. Ils comportent donc certaines erreurs, que la technologie tente de diminuer (Ouédraogo, Degré & Debouche, 2014). Actuellement, nous pouvons créer des MNT à très haute résolution, soit avec des résolutions inférieures au mètre (Puech & al., 2009). Néanmoins, une telle résolution ne couvre pas l'entier de notre planète.

Les MNT globaux les plus précis en libre accès n'ont qu'une résolution de 30 mètres (National Aeronautics and Space Administration, 2009). Ils proviennent des images satellites de l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), qui ont été recueillies par le ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie du Japon (METI) et de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Hayakawa, Oguchi & Lin, 2008), ainsi que du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration, 2016). Le coût de l'obtention de MNT à plus haute résolution que celle fournie par le METI et la NASA ne permet pas aux personnes ou aux institutions avec peu de moyens de bénéficier d'informations plus précises sur leur environnement (Ouédraogo & al., 2014). Même en possédant des MNT à haute

résolution, il existe toujours des phénomènes dont les informations utiles à la compréhension ne sont présentes qu'à une plus petite échelle (Zlotnik, Zurbuchen, Ptak & Teutsch. 2000).

De nombreuses méthodes de super-résolution ou de *downscaling* existent pour le traitement d'image (Frarsiu & al., 2004), tout comme pour les images de télédétection. Ce mémoire s'intéresse à améliorer la résolution de MNT existant en se basant sur la caractéristique fractale des surfaces topographiques naturelles (Turcotte, 1992). L'algorithme Direct Sampling (DS) est utilisé pour ce travail. Il utilise la géostatistique du multipoint, plus précisément l'échantillonnage direct (Mariethoz & Renard, 2010 ; Mariethoz, Renard & Straubhaar, 2010).

## 2. Problématique

Suite à l'introduction qui pose de manière générale le contexte de cette étude, il est nécessaire de préciser la problématique évoluant autour de la question générale :

**Est-il possible de faire un *downscaling* de MNT à partir de l'algorithme Direct Sampling (DS) ?**

La base théorique qui permet de répondre à cette question de recherche provient entre autre du rapport scientifique de Mariethoz & al. (2011), intitulé « Extrapolating the fractal characteristics of an image using scale-invariant multiple-point statistics ». Dans leur papier, ils démontrent que la dimension fractale du delta Lina en Russie est conservée à plus petite échelle, en particulier en procédant à une super-résolution d'un facteur deux avec l'algorithme DS. De plus, lorsqu'ils améliorent la résolution d'une image aérienne, aucun biais de distribution n'apparaît.

Ce travail se base sur l'hypothèse que la topographie de notre planète présente des caractéristiques fractales (Zhang, Drake, Wainwright & Mulligan, 1999) et que plus la dimension fractale est élevée, plus le résultat du *downscaling* à partir de l'algorithme DS est bon. Il doit donc y avoir une invariance d'échelle ainsi qu'une stationnarité (Mandelbrot, 1967) sur les zones d'étude pour obtenir les meilleurs résultats. Afin de vérifier l'hypothèse sur la dimension fractale, des tests sont effectués sur les différentes zones qui ont été normalisées par leur minimum et leur maximum, afin de pouvoir les comparer.

En se basant sur cette hypothèse, ce rapport tente d'améliorer la résolution des MNT grâce à la géostatistique du multipoint, et plus précisément grâce à l'échantillonnage direct (Mariethoz & Renard, 2010 ). Etant donné que Mariethoz & al. (2011) ont démontré qu'une amélioration de la résolution d'un facteur deux conserve le mieux la dimension fractale, dans ce rapport, le *downscaling* se fera donc avec ce facteur.

Le but de cette recherche est de déterminer la meilleure méthode de faire du *downscaling* à partir de l'algorithme DS. Pour ce faire, des simulations sont effectuées sur quatre zones d'études avec pour chacune d'elle des simulations à partir de l'entier du MNT et seulement à partir des fluctuations. Seuls deux

paramètres de l'algorithme sont variables, car comme le montre l'étude de Meerschman et al. (2013), seuls le seuil et le nombre maximum de voisin ont une influence sur les résultats des simulations. Différentes combinaisons entre ces deux paramètres sont testés afin de vérifier si les résultats de ce rapport correspondent à ceux de Meerschman et al. (2013). Ces derniers affirment que les meilleurs simulations sont obtenues plus le seuil d'acceptation est petit et le nombre de voisin est grand.

## 2.1. Plan de la recherche

Ce mémoire se compose de cinq parties. La première est l'introduction qui indique le sujet de cette recherche, la problématique et les hypothèses de recherche. Elle se termine ici en présentant la structure de la suite du travail.

La deuxième partie présente le cadre théorique. Elle définit les différents concepts et éléments importants qui ont été utilisés pour ce rapport. Les différentes zones d'étude, sur lesquels la recherche a été faite, sont également présentées dans cette partie.

La méthodologie compose la troisième partie. Il s'agit donc d'une partie qui décrit comment les données ont été collectées et comment elles sont traitées afin d'obtenir les résultats qui sont commentés dans la quatrième partie. En plus de comparer les résultats du *downscaling* par l'algorithme DS, cette avant-dernière partie compare la méthode utilisée avec celle d'un autre algorithme qui utilise la géostatistique du multipoint.

La dernière partie fait une synthèse du travail sous forme de conclusion en présentant notamment les avantages et les limites de la méthode développée dans ce rapport.

## II<sup>ème</sup> PARTIE : CADRE THEORIQUE

---

### 3. Géostatistique

La géostatistique apparaît dans les années 1950, lorsque des ingénieurs des mines en Afrique du Sud tentent d'évaluer les ressources de gisement à partir de sondage (Guillot, 2004). La quantité de minerai est alors considérée comme une variable aléatoire. Etant donné que la ressource ne peut être uniforme sur l'ensemble du site d'étude, un poids supérieur est donné aux sites les plus proches (De Fouquet, 2006). La variable régionalisée peut ainsi être déterminée par des méthodes probabilistes (Wackernagel, 2004). Donc, comme le définit Wackernagel en 2004 : « La géostatistique est une application de la théorie des fonctions aléatoires à des données localisées dans un espace géographique ».

La géostatistique est née grâce à la géologie, mais elle s'est rapidement développée dans les autres branches des sciences de la terre (De Fouquet, 2006). La géostatistique à deux points, grâce aux relations spatiales, a permis de mieux comprendre certains problèmes en géosciences, notamment dans l'industrie minière (Rezaee & al., 2013). Néanmoins, elle ne permet pas de reproduire des phénomènes naturels compliqués et non-linéaires (Zinn & Harvey, 2003). Afin d'y parvenir, il faut utiliser la géostatistique du multipoint (Rezaee & al., 2013). En effet, les méthodes de simulation utilisant la géostatistique du multipoint ont un grand potentiel de reproduction des structures spatiales complexes (Mariethoz & Renard, 2010).

De nombreuses méthodes géostatistiques existent, mais pour ce mémoire seule la méthode de l'échantillonnage direct, qui est une méthode géostatistique elle-même basée sur le multipoint est utilisée (Mariethoz & Renard, 2010 ; Mariethoz, & al., 2010). Cette méthode a l'avantage de pouvoir autant bien traiter des données catégorielles que des données continues (Meerschmann & al., 2013 ; Mariethoz & al. 2010 ; Mariethoz & Renard 2010).

### 3.1. Multipoint

La géostatistique du multipoint est basée sur trois concepts (Guardiano & Srivastava, 1993). Le premier implique la possibilité que l'ensemble des données soit insuffisant pour en déduire toutes les caractéristiques statistiques. Le deuxième consiste à représenter l'hétérogénéité par le biais d'un cadre statistique non-paramétrique (Mariethoz & al., 2010). Le multipoint ne permet pas de faire des simulations satisfaisantes à partir des données de l'objet d'étude. C'est pourquoi une image d'entraînement qui correspond plus ou moins à la zone d'étude est nécessaire afin d'obtenir des résultats probants (Rezaee & al., 2013). Par conséquent, le multipoint se base sur des statistiques d'images et non pas sur des modèles (Guardiano & Srivastava, 1993). Le dernier concept est l'utilisation d'image d'entraînement afin d'évaluer les données statistiques (Mariethoz & al., 2011). Guardiano et Srivastava (1993) tirent les lois multivariées dont la géostatistique du multipoint a besoin pour fonctionner des images d'entraînement. Donc les données connues ne sont pas suffisantes pour obtenir des résultats probants lorsque la géostatistique du multipoint est utilisée. Il faut alors des données qui représentent la réalité du terrain, les images d'entraînement (Ling et al., 2016). Une limitation des méthodes utilisant le multipoint est la difficulté de trouver une bonne image d'entraînement (Mariethoz & Renard, 2010). Dans le début des années 2000, l'article de Strebelle (2002) a permis d'améliorer cette méthode.

Actuellement, de nombreux algorithmes utilisant le multipoint existent (Frarsiu & al., 2004). Ils sont divisés en deux catégories principales : ceux qui basent leur méthode sur la simulation point à point et ceux qui utilisent des patches (Rezaee & al., 2013).

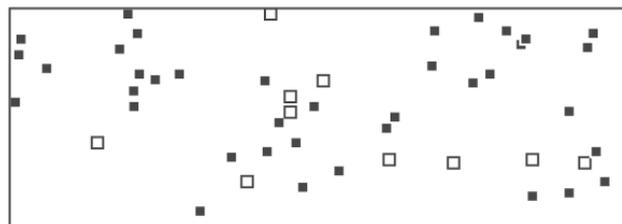
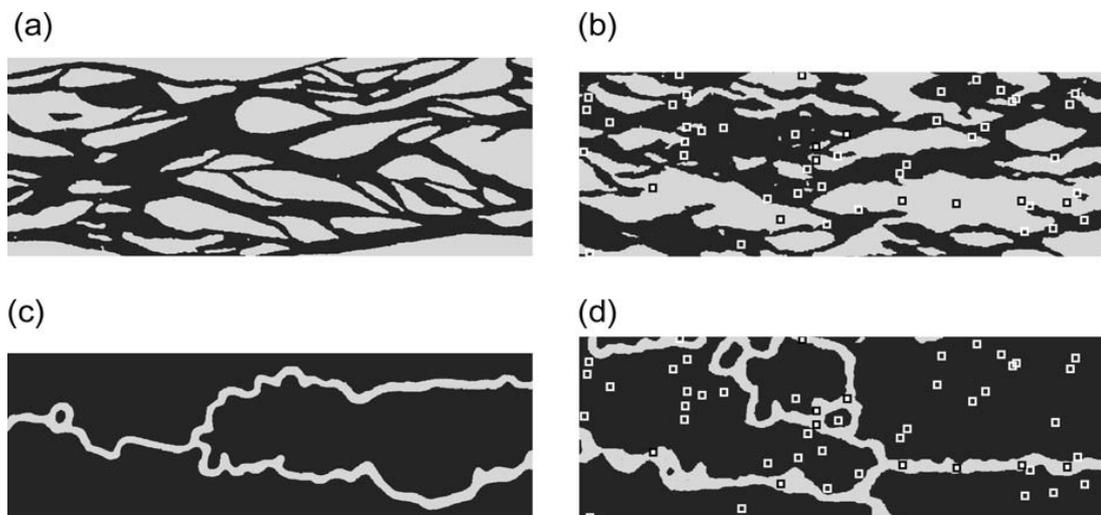


Figure 1 : Distribution des données catégorielles, sable (noir) et eau (blanc)

L'exemple suivant tiré de Renard (2007) permet de mieux comprendre comment la géostatistique du multipoint fonctionne. Des données catégorielles, sable et eau, provenant d'une partie d'un cours d'eau sont connues. Les données sont disposées aléatoirement sur la zone d'étude, comme le montre la figure 1.

Avant d'y faire des statistiques, il faut savoir comment le cours d'eau se comporte en général dans les mêmes conditions que les nôtres afin de trouver une bonne image d'entraînement (Alcolea & Renard, 2010). Si ce n'est pas le cas, les résultats varient en fonction des caractéristiques de l'image d'entraînement choisie. Dans l'exemple qui prend en compte des données catégorielles, sable et eau, il faut savoir si le cours d'eau est méandré ou en tresse. La figure 2 montre les images d'entraînement (a et c) qui ont été utilisées afin d'obtenir les résultats de la modélisation du cours d'eau (b et d) à partir de la géostatistique du multipoint en prenant en compte la distribution présente à la figure 1. Les deux modélisations sont complètement différentes : l'une représente un cours d'eau en tresse (b), tandis que l'autre présente un cours d'eau méandré (d).



**Figure 2 : Utilisation de géostatistique multipoint sur deux images d'entraînement (a et c). (a) image d'entraînement d'une rivière en tresse. (b) résultat du multipoint avec (a) comme image d'entraînement. (c) image d'entraînement d'une rivière méandree. (d) résultat du multipoint avec (c) comme image d'entraînement.**

Source : Renard (2007), modification Udry R.

Avant de faire de la géostatistique du multipoint, il est nécessaire de savoir comment l'objet de recherche réagit dans les conditions propres de la zone d'étude, afin de ne pas obtenir des résultats erronés (Mariethoz & Renard, 2010).

### 3.2. Echantillonnage direct

Comme décrit précédemment, le multipoint utilise une image d'entraînement, qui regroupe toutes les spécificités du terrain d'étude (Alcolea & Renard, 2010). Grâce à la méthode de l'échantillonnage direct, il n'est pas nécessaire de chercher ou de construire une telle image, car l'image de base prend la place de l'image d'entraînement (Mariethoz & al., 2010).

L'échantillonnage direct part de l'image d'entraînement afin de créer l'image finale (Mariethoz & al., 2011). Elle calcule la valeur des éléments manquants en fonction de ses voisins connus (Meerschmann & al., 2013). A partir de là, l'échantillonnage direct place de façon aléatoire les voisins de l'inconnu dans l'image d'entraînement en cherchant à les faire correspondre (Mariethoz & al., 2010). Une fois une valeur correspondante trouvée soit elle est stockée et la simulation continue pour le reste de l'image d'entraînement, soit elle est attribuée à la donnée recherchée (Meerschmann & al., 2013 ; Mariethoz, Renard & Straubhaar, 2010). Ensuite, la simulation continue pour une autre valeur manquante. La figure 3 présente le fonctionnement l'échantillonnage direct.

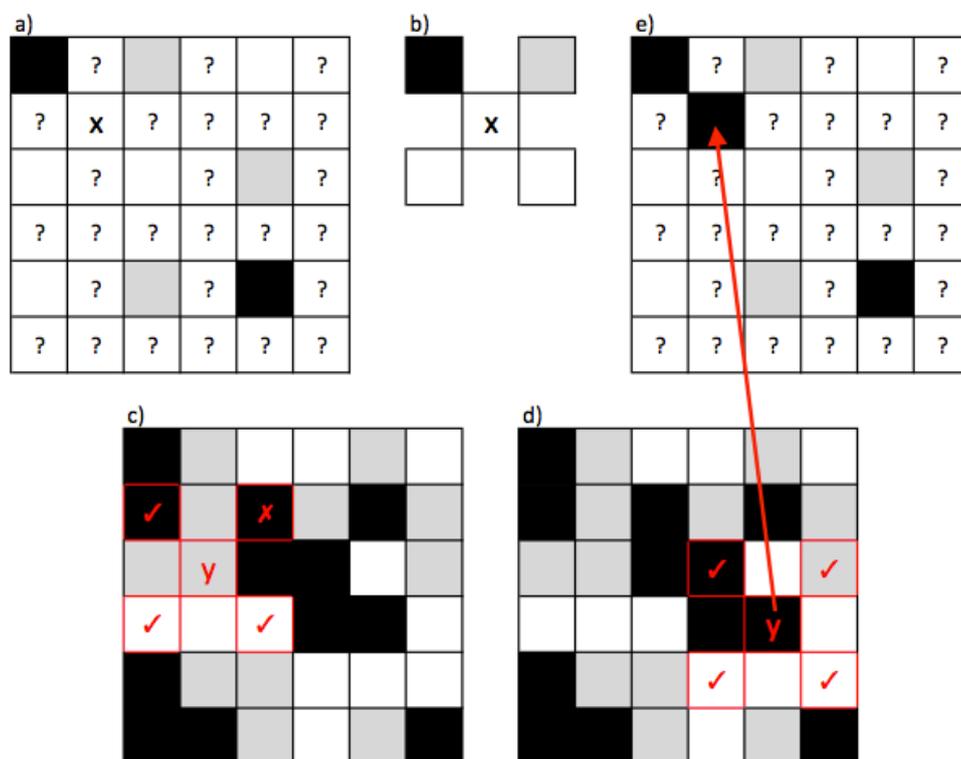


Figure 3 : Méthode d'échantillonnage direct. (a) Élément x à simuler en fonction de ses voisins connus (b) Élément x avec ses voisins (c) Tentative ratée de recherche de l'élément x (d) Résultat positif pour la simulation. (e) Valeur de l'élément y attribuée à l'élément x.

## 4. Fractale

### 4.1. Définition

Un objet est fractal si sa forme est indépendante de l'échelle d'observation (Turcotte, 1992; Abedini & Shaghaghian, 2009; Moussa & Bocquillon, 1993). Les caractéristiques fractales de notre planète ont été démontrées en premier lieu par Mandelbrot, notamment grâce à l'exemple du calcul de la longueur de la côte de la Grande Bretagne (Mandelbrot, 1967), qui est illustré par la figure 4. Il en a conclu que plus l'échelle est petite, plus le périmètre calculé grandit. Par conséquent, une des caractéristiques fondamentales des objets fractals est que les propriétés métriques qui sont mesurées, sont fonctions de l'échelle d'observations (Abedini & Shaghaghian, 2009). Dans le cas de l'exemple de la figure 4, la réduction d'échelle correspond à une plus grande précision pour délimiter la côte de la Grande Bretagne.

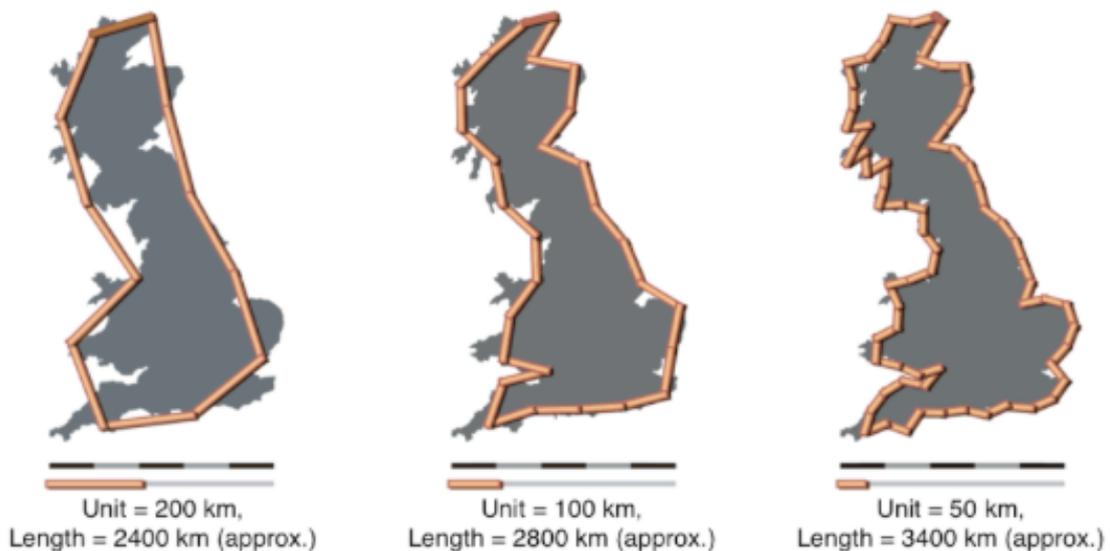


Figure 4 : Illustration de la réflexion de Mandelbrot sur la côte de la Grande Bretagne. Le tracé de la côte devient plus précis et le périmètre augmente (de gauche à droite).

Source : Katz (2010)

La figure 5 représente la courbe de Koch, qui explique de manière simplifiée ce phénomène. Cette courbe est construite en partant d'un triangle équilatéral, dont nous rajoutant à une distance d'un tiers de chaque côté un triangle trois fois plus petit (von Koch, 1906). Cette étape est répétée un nombre infini de fois. A chaque étape, le périmètre de la figure augmente : il est multiplié par  $4/3$ . La circonférence

de la figure grandit donc de plus en plus et tend vers l'infini. Nous obtenons de ce fait une illustration de ce que Mandelbrot a décrit en 1967 pour la côte de la Bretagne. En effet, chaque étape de la construction de la courbe de Koch peut correspondre à une augmentation de la précision pour calculer la longueur de la côte.



Figure 5 : Construction de la courbe de Koch

En 1982, Mandelbrot introduit le concept de fractal pour les objets qui présentent des tendances similaires à différentes échelles dans la nature. A partir de là, plusieurs auteurs se sont penchés sur les caractéristiques fractales de notre planète et ont découvert que la topographie présente de manière générale des caractéristiques fractales (Turcotte, 1992; Klinkenberg & Goodchild, 1992). Ces caractéristiques diminuent à très petites échelles (Zhang & al., 1999).

Pour pouvoir extraire les caractéristiques fractales d'une image, il faut une invariance d'échelle et une stationnarité (Mandelbrot, 1967). L'invariance d'échelle est le fait que des éléments se retrouvent à différentes échelles (Moussa & Bocquillon, 1993). Il existe donc une symétrie à toutes les échelles. L'hypothèse de stationnarité, dans un contexte spatial, traduit le fait que les variations statistiques sur une portion de terrain sont identiques aux variations sur le terrain en entier (Mariethoz & Caers, 2014).

#### 4.2. Dimension fractale

Le calcul de la dimension fractale fait intervenir des dimensions non entières (Moussa & Bocquillon, 1993). La dimension fractale s'apparente plus ou moins à la capacité d'un objet à remplir son espace (Abedini & Shaghaghian, 2009). Elle varie en fonction du degré d'irrégularité de l'objet. Plus l'objet est irrégulier, plus il remplit l'espace et donc plus sa dimension fractale est grande (Abedini & Shaghaghian, 2009). La dimension topologique est toujours inférieure à la dimension fractale (Fleurant, 2015).

Il existe de nombreuses méthodes pour calculer la dimension fractale (Klinkenberg & Goodchild, 1992 ; Mark & Goodchild, 1982 ; Kent & Wong, 1982 ; Mandelbrot, 1982 ; Shelberg & al., 1982). La plus répandue, car elle est la plus facile à calculer, est la dimension fractale d'homothétie interne (Fleurant, 2015). Elle peut être calculée par la formule :

$$Dimension\ fractale = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (1)$$

avec  $N$ , le nombre de fois que la fractale peut être décomposée pour correspondre au tout, mais avec un rapport de taille de  $r$  (Fleurant, 2015 ; Long & Peng, 2013). Dans le cas de la courbe de Koch, à chaque étape, deux segments trois fois plus petits que le précédent sont rajoutés.  $N$  vaut donc 4 et  $r^{1/3}$ . La dimension de la courbe équivaut alors à 1.26.

Pour ce travail, la dimension fractale a été calculée avec une méthode de comptage de boîtes. La formule du calcul s'apparente à celle de l'homothétie interne, mais la méthode pour y arriver est différente. Pour ce faire, il faut quadriller la zone d'étude avec des maillages de plus en plus fins (Taud & Parrot, 2005). Pour chaque maillage, il faut calculer le nombre de boîtes contenant au moins une partie de l'objet étudié (Abedini & Shaghaghian, 2009). Ensuite, il faut créer un graphique avec des axes en logarithme, correspondant à la taille des boîtes et au nombre de boîtes remplies (Long & Peng, 2013). L'inverse de la pente  $P = \ln(q) / \ln(N_s)$ , où  $N_s$  est le nombre de boîtes contenant au moins une partie de l'objet étudié et  $q$  est la taille des boîtes, donne la dimension fractale (Fleurant, 2015 ; Taud & Parrot, 2005).

## 5. Downscaling

Le *downscaling* correspond à une diminution d'échelle, dans notre cas cette diminution s'apparente plus ou moins à un zoom sur la zone d'étude, car le *downscaling* provoque une amélioration de la résolution.

De nombreuses méthodes de super-résolution ou de *downscaling* existent pour le traitement d'image (Frarsiu & al., 2004), dont certaines utilisent des images d'entraînement (Atkins, Bouman & Allebach, 1999 ; Freeman, Jone & Pasztor, 2002 ; Tsai & Huang 1984 ; Sroubek, Cristobal & Flusser, 2007). Pour le *downscaling* d'image de télédétection, certaines méthodes se basent sur la géostatistique du multipoint et utilisent également des images d'entraînement (Journel & Zhang 2006 ; Guardiano & Srivastava, 1993 ; Strebelle, 2002 ; Arpat & Caers, 2007 ; El Ouassini & al., 2008). Wu, Boucher & Zhang, 2008 ; Remy, Boucher & Wu, 2009 ; Mariethoz & al., 2010, Straubhaar & al., 2011). L'algorithme DS qui est utilisé dans cette étude utilise la géostatistique du multipoint sur l'image de base, qui est l'image d'entraînement, afin de recréer les structures spatiales à une échelle plus petite (Mariethoz & Renard, 2010).

Après avoir augmenté la résolution de leur image de base grâce au même algorithme qui est utilisé pour cette étude, Mariethoz et al. (2011) ont comparé les résultats et ont en conclu que lorsque le facteur de raffinement est supérieur à deux, des artefacts peuvent apparaître à cause de la faible densité de donnée. De plus, il en ressort que les caractéristiques fractales sont mieux conservées lors d'un *downscaling* d'un facteur deux.

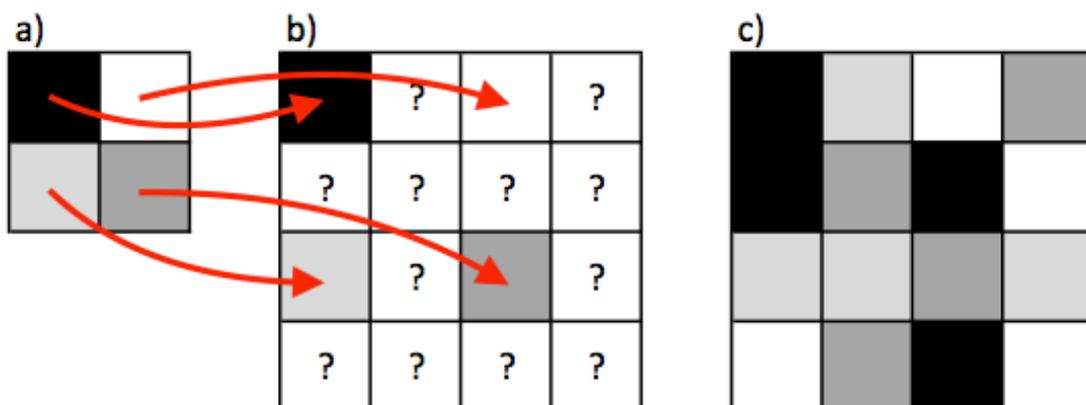


Figure 6 : illustration de l'amélioration de la résolution par un facteur deux. (a) les pixels de l'image d'origine vont migrer en (b) dans une grille [2X; 2Y]. (c) Simulation des pixels vides en utilisant l'image d'origine comme image d'entraînement.

Une amélioration de la résolution par un facteur deux signifie qu'un pixel de l'image de base se transforme en quatre pixels sur l'image finale. Les nombres de lignes et de colonnes sont donc doublés. La figure 6 illustre la méthode utilisée pour améliorer la résolution par un facteur deux.

Pour ce mémoire, chaque pixel de notre MNT est placé dans une grille deux fois plus grande afin de pouvoir augmenter la résolution par un facteur deux. A partir des pixels connus, l'algorithme DS va utiliser une méthode proche de celle décrite au point 3.2 Echantillonnage direct, afin de remplir les vides grâce aux voisins connus. L'algorithme est détaillé dans la suite du rapport.

## 6. Présentation des zones d'étude

Afin de déterminer la meilleure façon d'utiliser l'algorithme DS pour faire du *downscaling*, quatre zones d'étude ont été choisies. Chacune des zones se situe en Suisse, comme le montre la figure 7. Elles ont été choisies de sorte à avoir des caractéristiques différentes, afin de trouver une méthode globale et non pas définie seulement pour des régions précises.

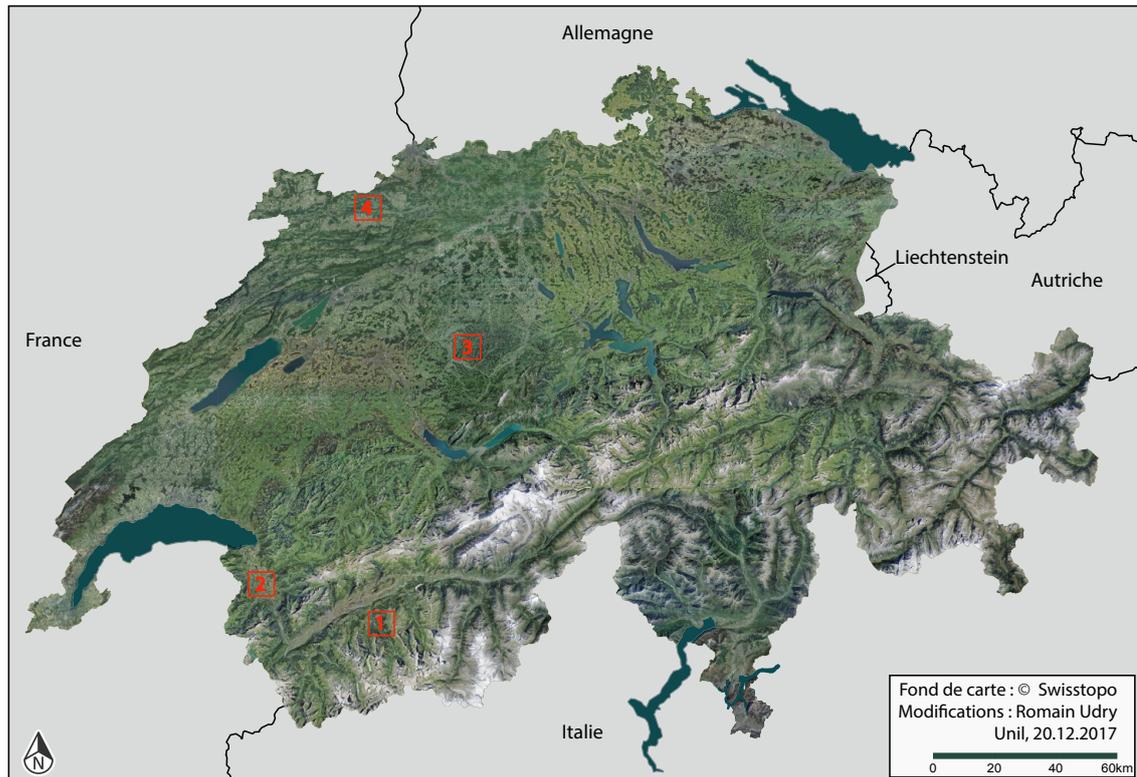
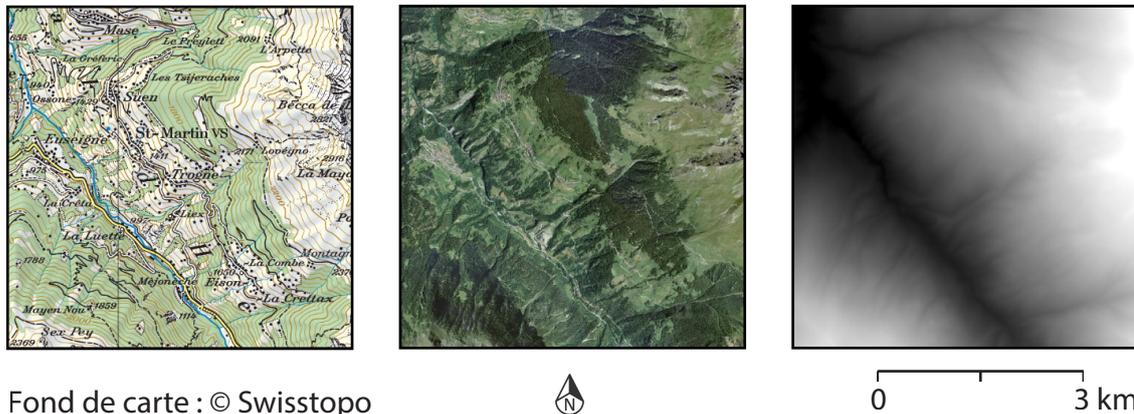


Figure 7 : Position des quatre zones d'étude

La première zone se situe dans le Valais central. La deuxième est dans la plaine du Rhône dans les environs de Collombey, elle est partagée entre le canton du Valais et de Vaud. Quant à la troisième, elle se trouve dans le canton de Berne. La dernière est située dans le Jura.

### 6.1. Zone 1

La première zone d'étude se situe dans le val d'Hérens en Valais, plus précisément dans la région de Saint-Martin. Il s'agit d'une partie de la vallée de La Borgne. Plusieurs petits affluents arrivent dans cette zone, comme le montre la figure 8. Elle a une superficie de 36 km<sup>2</sup>, soit 6 kilomètres de long et autant de large.



Fond de carte : © Swisstopo

Figure 8 : Illustration de la première zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).

Etant donné qu'il s'agit d'une vallée alpine créée par une rivière, l'altitude la plus faible, 629 mètres, se situe sur le lit de la rivière le plus en aval. Dans cette zone, elle se trouve au Nord-Ouest. La rive droite est plus élevée : elle atteint 2'831 mètres d'altitude. En revanche, pour la rive gauche le point le plus haut ne dépasse pas les 2'400 mètres. Il y a donc plus de 2'200 mètres d'écart entre les deux altitudes extrêmes de cette zone. La distribution des altitudes de cette dernière est représentée par la figure 9.

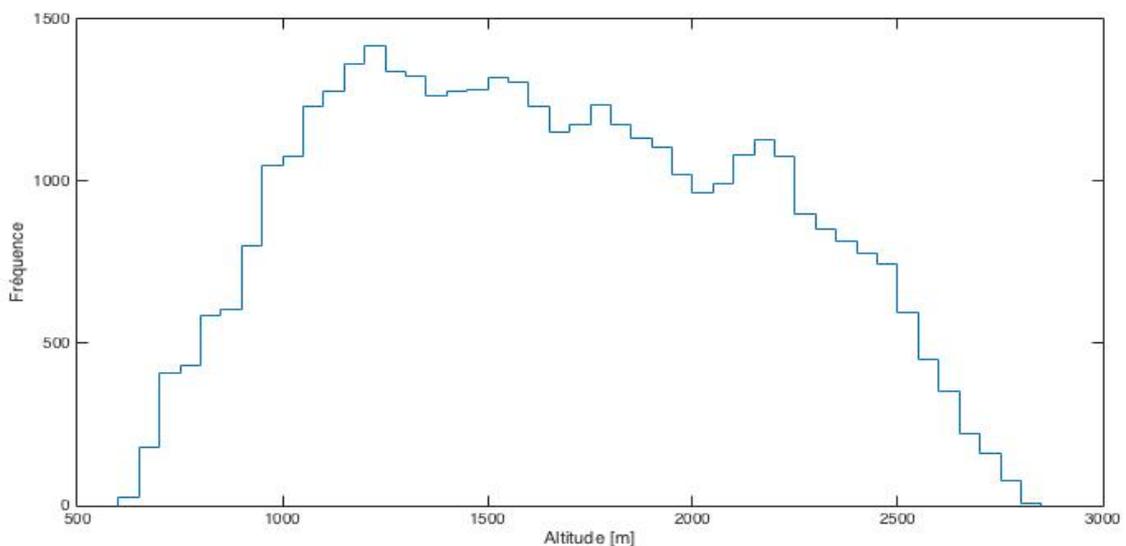
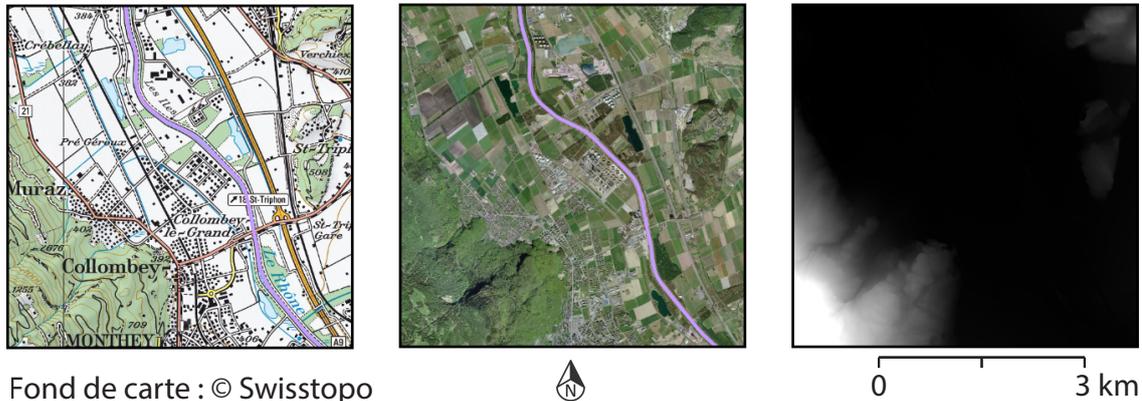


Figure 9 : Histogramme de la distribution d'altitude de la première zone.

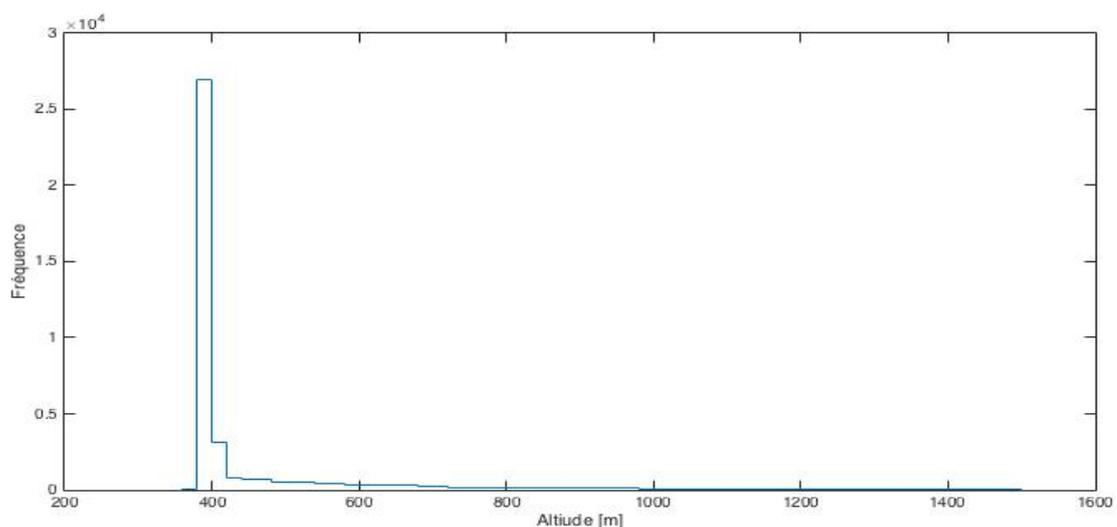
## 6.2. Zone 2

La deuxième zone d'étude se situe dans la plaine du Rhône, à la hauteur de Collombey. Elle a une superficie de 36 km<sup>2</sup>, soit 6 kilomètres de long et autant de large. Comme le montre la figure 10, elle est répartie entre le canton du Valais et le canton de Vaud.



**Figure 10 :** Illustration de la deuxième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).

Cette zone est relativement plate étant donné qu'il s'agit de la plaine du Rhône. Dans les extrémités Nord-Est et Sud-Ouest, les coteaux apparaissent et changent la topographie, tout comme les trois collines qui composent le village de St-Triphon. Comme pour la première zone, le point le plus bas se situe le plus en aval du cours d'eau. Il se situe en dessous de 380 mètres, tandis que le point le plus élevé, qui se situe sur le coteau en-dessus de Collombey, dépasse les 1'500 mètres d'altitude. Cette zone présente donc un moins grand dénivelé que la première et une plus grande homogénéité dans la distribution d'altitude comme le montre la figure 11.



**Figure 11 :** Histogramme de la distribution d'altitude de la deuxième zone.

### 6.3.Zone 3

La troisième zone d'étude se situe dans le canton de Berne, à l'Est de la capitale, un peu plus au Nord de Langnau. Elle a une superficie de 36 km<sup>2</sup>, soit 6 kilomètres de long et autant de large. Il s'agit d'une zone composée de plusieurs vallées creusées par deux cours d'eau principaux, le Frittebach et le Gohlgrabe, comme le montre la figure 12. Ces cours d'eau principaux sont rejoints par de nombreux autres.

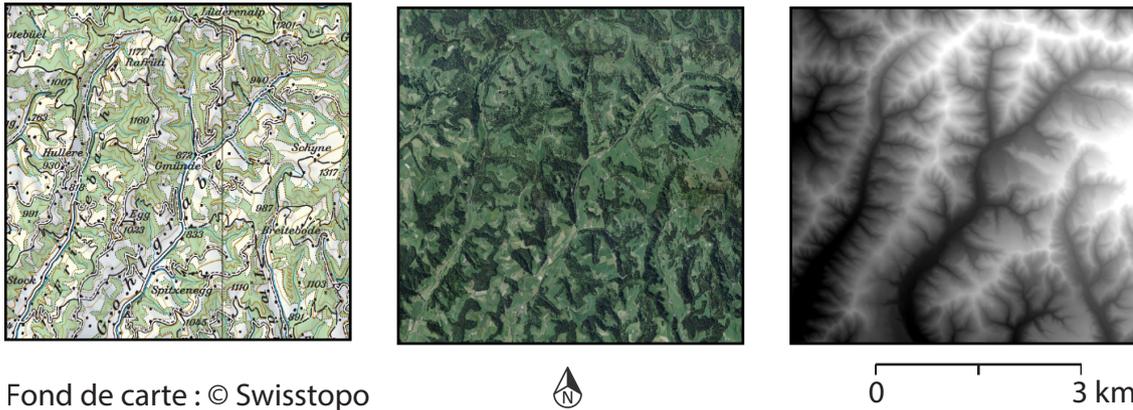


Figure 12 : Illustration de la troisième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).

Cette zone a une topographie totalement différente de la précédente. En effet, l'altitude varie fortement d'un endroit à l'autre, mais la différence d'altitude est plus faible. Le point le plus bas se trouve à environ 700 mètres, tandis que le point le plus élevé n'atteint que de justesse les 1300 mètres. La figure 13 représente la distribution des altitudes pour cette zone.

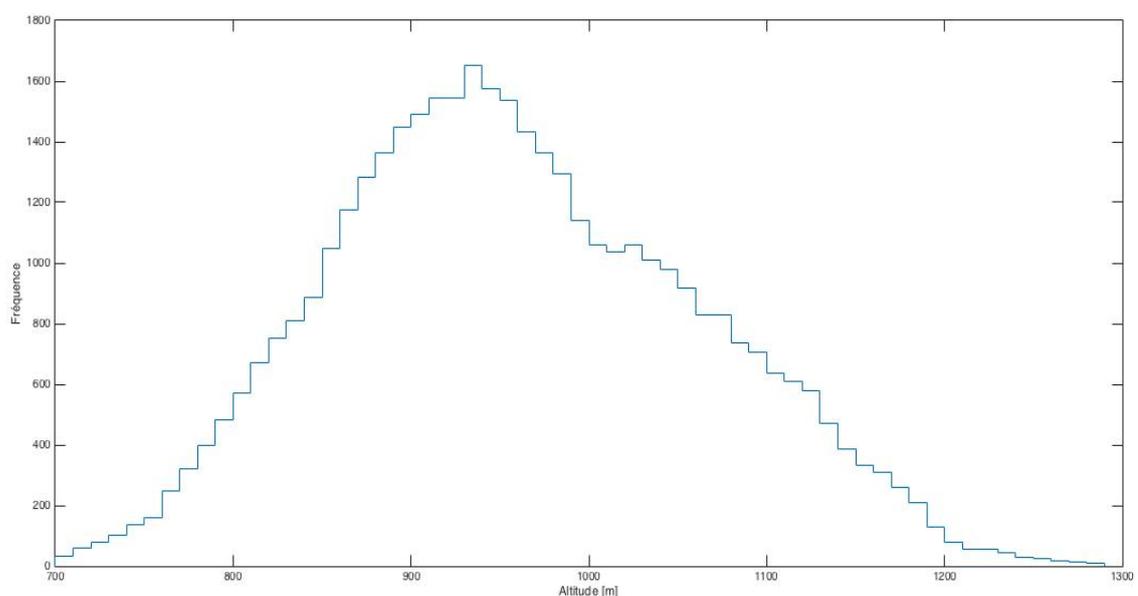


Figure 13 : Histogramme de la distribution d'altitude de la troisième zone.

#### 6.4. Zone 4

La dernière zone se situe principalement dans le canton du Jura, vers Delémont. Une petite partie du Nord-Est de cette zone d'étude est à la limite avec le canton de Bâle-Campagne et Soleure. Comme les autres zones, elle a une superficie de 36 km<sup>2</sup>, soit 6 kilomètres de long et autant de large. Le relief est plissé étant donné que la zone se situe dans le Jura. La Birse traverse cette zone du Sud au Nord-Est, comme le montre la figure 14.



Figure 14: Illustration de la quatrième zone par une carte topographique (à gauche), une image aérienne (au milieu) et un MNT (à droite).

Dans cette zone d'étude, tous les sommets des plis atteignent environ 800 mètres d'altitude. L'altitude maximum, qui se situe au Nord du chef lieu du Jura, atteint même 888 mètres. De là, l'altitude diminue pour atteindre les environ de 400 mètres au fond de la vallée de la Birse. La figure 15 montre la distribution des altitudes pour cette zone.

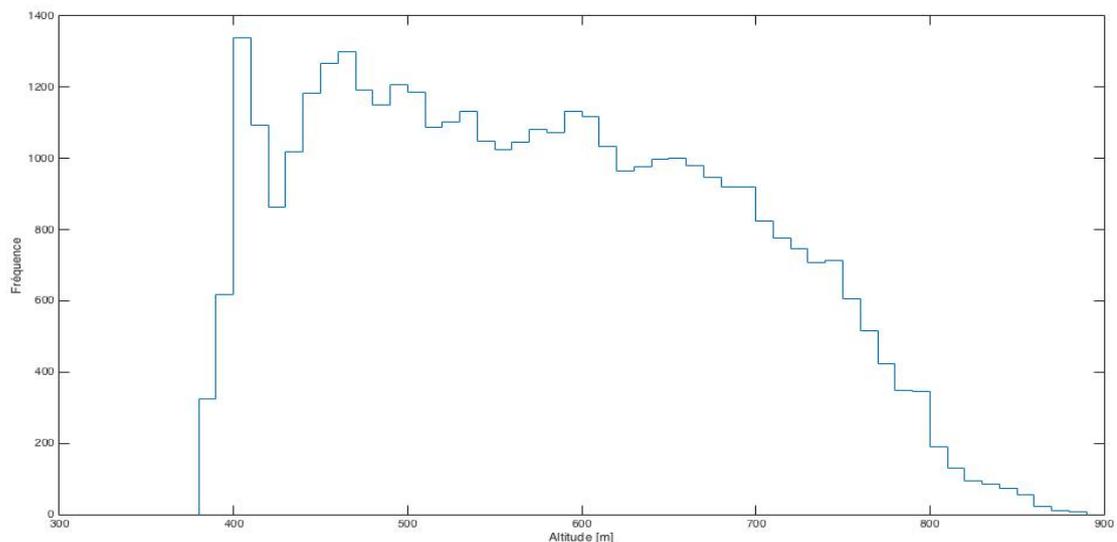


Figure 15: Histogramme de la distribution d'altitude de la dernière zone.

### 6.5. Synthèse des zones d'étude

Ces quatre zones ont été choisies afin d'avoir des caractéristiques différentes, qui permettent de voir si le *downscaling* à partir de l'algorithme DS peut être généralisé ou s'il fonctionne mieux avec des caractéristiques topographiques spécifiques.

La première zone présente une grande différence d'altitude entre le point le plus élevé et le moins élevé, mais avec une augmentation quasi constante sur les coteaux. La deuxième zone est relativement plate et contrairement aux autres zones, elle n'est pas stationnaire. Quant à la troisième zone et la quatrième zone, elles présentent une plus grande diversité que les deux premières zones, à cause d'une plus forte variation entre l'augmentation et la diminution d'altitude, mais une fois dans les Préalpes et l'autre dans le Jura.

## III<sup>ème</sup> PARTIE : METHODOLOGIE

---

### 7. Préparation des données de base

Les données qui constituent la base de ce travail proviennent de la banque de données UNILGIS, mise à disposition par l'université de Lausanne. Il s'agit du swissALTI3D, qui est un MNT avec une résolution de deux mètres qui couvre l'entier de la Suisse (Office fédéral de la topographie swisstopo, 2017). Afin de pouvoir répondre à la problématique de ce travail de recherche, il a fallu sélectionner les différentes zones vues précédemment et les extraire du MNT de base. Le *downscaling* aurait pu s'effectuer directement sur ces données, mais afin de correspondre au mieux avec les organisations ou pays ne possédant pas les moyens d'avoir des MNT autant précis, la résolution a été diminuée. L'extraction des zones d'étude, ainsi que la diminution de la résolution, ont été effectuées avec le logiciel ArcGIS. Avant d'obtenir un MNT à 30 mètres, il a d'abord fallu en avoir un à 15 mètres, afin de comparer les résultats à la fin du *downscaling*. La diminution de résolution a été faite par la technique de rééchantillonnage cubique, qui convient bien aux données continues (ArcGIS Pro, 2017). Elle calcule la valeur du MNT grâce à une convolution cubique et l'ajuste à l'aide d'une courbe lissée des 16 valeurs les plus proches (ArcGIS Pro, 2017). Le fait de passer d'un MNT de 2 mètres à un MNT avec une moins bonne résolution provoque une perte de précision. En effet, le minimum augmente, tandis que le maximum diminue. Ainsi, l'histogramme des valeurs se ressert pour toutes les zones d'étude.

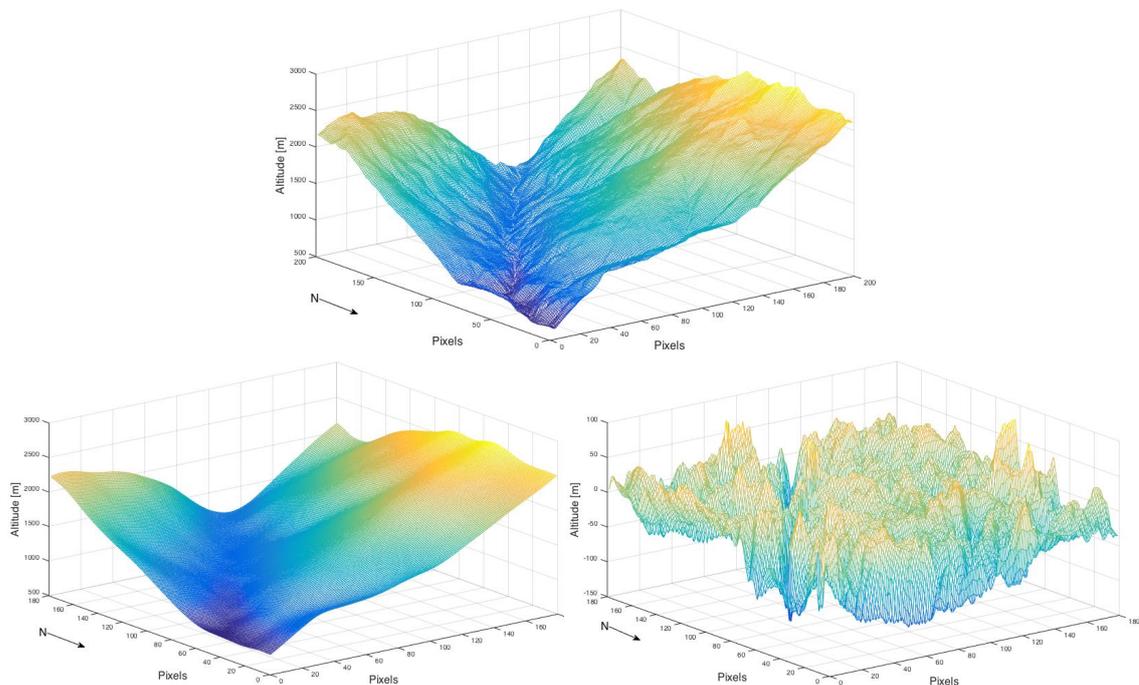
Etant donné que ce travail cherche à trouver une méthode pour réaliser un *downscaling* de MNT à partir de l'échantillonnage direct, les simulations n'ont pas uniquement porté sur l'entier du MNT, mais également sur les fluctuations locales. Afin de créer ces fluctuations, il a fallu retirer la moyenne glissante du MNT. La moyenne glissante est calculée par la formule :

$$\bar{x}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{n-k} \text{ ou } \bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} \frac{x_n - x_{n-N}}{N} \quad (2)$$

- $N$  = nombre de valeurs successives à prendre en compte
- $x_n$  = valeur de référence
- $k$  = rang

Lorsque la moyenne glissante est enlevée, les différences d'altitude sont plus petites que lorsque le MNT est entier. En effet, pour la première zone, cette différence passe d'environ 2'200 mètres à environ 210 mètres. Pour la deuxième zone, elle diminue d'environ 900 mètres. Quant à la troisième zone, elle vaut environ 170 mètres à la place des 700 mètres pour l'entier du MNT. Pour la dernière zone d'étude, elle passe d'environ 500 mètres à un peu plus de 180 mètres.

La figure 16 montre le MNT entier de la première zone d'étude, la moyenne glissante, ainsi que les fluctuations. Elle permet de visualiser la diminution de la différence d'altitude entre le MNT entier et celui sans la moyenne glissante.



**Figure 16 : Présentation du MNT en 3D (en haut), de la moyenne lissée (à gauche) et des fluctuations (à droite) de la première zone.**

Une fois que les MNT de 15 et 30 mètres ainsi que les fluctuations ont été créés, il est temps de passer au *downscaling* grâce à l'algorithme DS.

## 8. Algorithme Direct Sampling (DS)

L'algorithme DS est implémenté dans le langage ANSI C et les fichiers d'entrée et de sortie sont au format ASCII SGeMS (Remy & al., 2009). Le fonctionnement de l'algorithme est inspiré par l'article de Shannon (1948) où aucune base de donnée n'est utilisée. Contrairement aux algorithmes utilisant la géostatistique du multipoint comme SNESIM (Strebelle, 2002) et IMPALA (Straubhaar & al., 2011), cette méthode ne stocke pas toutes les valeurs possibles pour les valeurs manquantes, mais attribue la première valeur qui correspond (Meerschmann & al., 2013 ; Mariethoz & al., 2010). Ainsi, elle n'est pas limitée par la dimension des données (Mariethoz & al. 2010). De plus, il n'est pas nécessaire de construire une image d'entraînement, car l'image de base prend ce rôle (Mariethoz & al., 2011). Le rayon qui contient le nombre de voisin autour de la valeur recherchée diminue plus la simulation est complète (Mariethoz & Renard, 2010), ce qui a plus ou moins le même effet que les multi-grilles (Strebelle, 2002).

L'algorithme DS utilise des outils de simulation stochastique à points multiples afin de ne pas reproduire les motifs trouvés dans l'image d'entraînement, mais plutôt de propager les statistiques spatiales d'une échelle à l'autre (Mariethoz & al., 2011). Deux hypothèses sont nécessaires pour l'algorithme DS, il s'agit de l'hypothèse de stationnarité et d'invariance d'échelle (Mariethoz & al., 2011).

Le but de l'algorithme DS est de produire des réalisations d'une variable spatiale  $Z$ , dépendante de tous les  $N$  emplacements  $x_i$  d'une grille régulière, avec  $i = [1, \dots, N]$  (Mariethoz & Renard, 2010). Ces emplacements de la grille régulière peuvent être assimilés aux pixels d'une image (Mariethoz & al., 2011). Etant donné que  $Z$  est spatialement structurée, la valeur de chaque emplacement  $Z(x)$  dépend des valeurs de ses voisins (Yin, Mariethoz & Cabe, 2017). Comme mentionné au point 3.1., le principe du multipoint est de définir cette dépendance à partir d'une image d'entraînement.

Dans notre étude,  $Z(x)$  est une variable continue, mais l'algorithme peut aussi bien fonctionner avec des variables catégorielles et des données multivariées (Meerschmann & al., 2013 ; Mariethoz & al. 2010 ; Mariethoz & Renard, 2010).

### 8.1. Fonctionnement

La description et le fonctionnement de l'algorithme DS ont été notamment décrits dans les articles de Mariethoz & al. (2011), Mariethoz, Renard & Straubhaar (2010), ou Mariethoz et Renard (2010). Par conséquent, cette partie ne fait que reprendre ce que vous pouvez trouver dans leurs travaux. Cette partie montre le fonctionnement de l'algorithme pour des variables catégorielles et continues.

La réalisation de  $Z$  doit avoir la même dépendance spatiale que l'image d'entraînement, dont les nœuds sont  $y_i$  (Mariethoz & al., 2011). Afin de respecter toutes les dépendances, chaque réalisation doit être un échantillon de la distribution jointe à  $N$  dimensions

$$F(x) = P\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_N)\}. \quad (3)$$

Cela peut être accompli en assignant des valeurs à tous les emplacements, en utilisant le paradigme de simulation séquentielle (Deutsch & Journel, 1992) qui considère la décomposition suivante

$$F(x) = P\{Z(x_1)\} * P\{Z(x_2)|Z(x_1)\} * \dots * P\{Z(x_N)|Z(x_1), \dots, Z(x_{N-1})\} \quad (4)$$

Chaque emplacement  $x$  de la grille est visité de façon aléatoire (Yin & al., 2017). La valeur  $Z(x)$  est alors calculée en tenant compte de la valeur de ses voisins, avec  $n$  le nombre maximum de voisin visité. Ces voisins sont déjà connus, soit parce qu'il s'agit d'une mesure prise à cet endroit, soit parce que la valeur a déjà été simulée par la simulation séquentielle. Si aucun voisin n'est trouvé pour  $x$ , la valeur  $Z(y)$  de l'image d'entraînement est attribuée à  $Z(x)$  (Mariethoz & al., 2010). D'une fois que la valeur  $Z(x)$  est déterminée, elle est utilisée à son tour pour déterminer les valeurs manquantes. Chaque emplacement a une valeur conditionnée par la valeur des emplacements simulés précédemment, grâce au paradigme de simulation séquentielle (Mariethoz & al., 2010).

Afin de limiter le temps de calcul, il est possible de limiter le voisinage par  $n$ , avec  $n \ll N$  (Mariethoz & al., 2011). A chaque emplacement  $x$ , les vecteurs de décalage  $L = \{h_1, \dots, h_n\} = \{x_1 - x, \dots, x_n - x\}$  définissent la position des voisins. Les données centrées sur  $x$  sont la combinaison entre les vecteurs de décalage et la valeur à la position des voisins,  $d_n(x, L) = \{Z(x + h_1), \dots, Z(x + h_n)\}$  (Mariethoz & al., 2010). Il faut également calculer  $d_n(y, L)$ , dans l'image d'entraînement afin de pouvoir

calculer la distance entre les données trouvées dans la simulation et l'image d'entraînement,  $d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\}$ . Différentes méthodes pour calculer cette distance existent. Pour les variables catégorielles, la distance correspond à la proportion de non-correspondance des valeurs (Mariethoz & al., 2011). Elle est calculée avec  $\alpha$  valant 0 si les deux valeurs sont identiques ou 1 si elles sont différentes.

$$d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i \in [0,1],$$

où

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & \text{si } Z(x_i) = Z(y_i) \\ 1 & \text{si } Z(x_i) \neq Z(y_i) \end{cases} \quad (5)$$

Pour les variables continues, la distance peut être normalisée par la distance de Manhattan

$$d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z(x_i) - Z(y_i)|}{\text{argmax}(Z^{ti}) - \text{argmin}(Z^{ti})} \in [0,1], \quad (6)$$

ou bien être calculée par la distance euclidienne pondérée

$$d\{d_n(x, L), d_n(y, L)\} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i [Z(x_i) - Z(y_i)]^2} \in [0,1],$$

où

$$\alpha_i = \frac{\|h_i\|^{-\delta}}{d_{max}^2 \sum_{j=1}^n \|h_j\|^{-\delta}} \quad (7)$$

avec  $d_{max} = \max Z(y) - \min Z(y)$  et  $\delta = 0$ , car toutes les valeurs ont la même importance (Mariethoz & al., 2010).  $\alpha_i$  détermine le poids des valeurs en fonction de la distance au centre.

Il est rare que la valeur  $d_n(x, L)$  et  $d_n(y, L)$  soient identiques, c'est pourquoi il faut un seuil d'acceptation  $t$  (Meerschmann & al., 2013). Si la distance  $d$  est inférieure à  $t$ , alors la valeur de  $Z(y)$  est attribuée à  $Z(x)$ , sinon  $Z(x)$  prend la valeur de  $Z(y)$  ayant la plus faible distance  $d$ .

Pour le *downscaling* de MNT, l'algorithme utilise la distance de Manhattan, mais pour d'autre utilisation, la méthode de calcul peut changer.

## 8.2. Paramètres

L'algorithme DS est simple en paramétrage (Mariethoz & al. 2010). Les différents paramètres utilisés pour effectuer ce travail figurent dans le tableau 1. Pour cette étude, seuls deux paramètres ont des valeurs variables, alors que 18 autres ont des valeurs fixes.

Paramètres variables		Paramètres fixes	
Nom	Valeurs	Nom	Par défaut
Seuil [0 1]	0.01/0.02/0.04/0.06/0.08/0.1/0.12/0.14/0.16/0.18/0.2/0.25/0.5/0.75/0.99	Méthode de simulation	SR2 (MPS par défaut)
Nombre maximum de voisin	1/5/10/15/20/30/50/80	Nombre de simulation	10
		Distance maximum de recherche	Moitié du MNT (x y z)
		Ratio d'anisotropie	1 1 1
		Transformation	0 (pas de transformation)
		Type de chemin	0 (aléatoire)
		Type de variable	0 pour catégorielle / 1 pour continue
		Exposant de la fonction de distance	0
		Paramètres de traitement simultané	0 0 0 0 (pas de traitement simultané)
		Nœud initial	1350
		Paramètre de réduction	1 (pas de paramètre de réduction)
		Parallélisation	1 (pas de parallélisation)
		Proportion de l'image d'entraînement à scanner	1
		Paramètres de post-traitement	0 0 (pas de post-traitement)
		Nombre de variable à simuler ensemble	1
		Point relatif des valeurs	1
		Point des données de conditionnement pour chaque variable	1
		Conditionnement des données	No-yes

Tableau 1 : Présentation des différents paramètres de l'algorithme DS.

Les deux paramètres avec des valeurs variables sont le seuil et le nombre de voisin maximum pour chaque valeur simulée. Uniquement ces deux paramètres sont variables pour ce travail, car selon l'étude menée par Meerschman et al. (2013), ils sont les seuls à vraiment avoir un impact sur les résultats pour des variables continues.

Le seuil correspond à la valeur que la distance calculée ne doit pas dépasser pour pouvoir être validé (Mariethoz & al., 2011). Il varie de 0.01 à 0.99 pour la première zone d'étude pour les simulations avec l'entier du MNT afin de vérifier que plus le seuil augmente, moins les résultats des simulations sont bons, comme l'affirment Meerschman et al. (2013). Pour les autres simulations, le seuil maximum est fixé à 0.1. Des tests numériques effectués font ressortir qu'un seuil de 0.05 est faible et qu'un seuil de 0.5 est élevé (Mariethoz & al., 2010 ; Mariethoz & Renard, 2010).

En ce qui concerne le nombre maximum de voisin, pour toutes les simulations, huit valeurs ont été utilisées. Ces valeurs sont les mêmes que Meerschman et al. (2013) ont utilisées pour leur recherche (1, 5, 10, 15, 20, 30, 50 et 80). Le rayon qui contient le nombre de voisin autour de la valeur recherchée diminue plus la simulation est complète (Mariethoz & Renard, 2010), ce qui a plus ou moins le même effet que les multi-grilles (Strebelle, 2002).

Pour les paramètres fixes, seuls la méthode de simulation, le type de variable et la distance maximum de recherche ont des paramètres à changer. Pour les autres, les paramètres par défauts restent. Le DS User Guide donne plus d'informations sur les paramètres.

Afin de faire le *downscaling* qui nous intéresse avec l'algorithme DS, il faut mettre SR2 pour la méthode de simulation. SR signifie super-résolution et le chiffre 2 désigne une amélioration de la résolution par un facteur deux. Pour le type de variables, étant donné qu'il s'agit de variables continues, le paramètre a une valeur de 1. Une valeur de 0 signifierait qu'il s'agit de variables catégorielles. La distance maximum de recherche correspond à la moitié de la taille du MNT.

## 9. Méthode pour l'acquisition des données

Afin de produire les résultats que nous avons obtenus et qui sont présentés dans la quatrième partie de ce travail, l'algorithme DS a simulé chaque zone d'étude deux fois, afin de trouver la meilleure méthode pour l'obtention d'un bon *downscaling* de MNT. Lors de la première partie des simulations, les simulations sont faites en prenant en compte l'entier du MNT, tandis que pour la seconde, la moyenne glissante a été enlevée afin de ne garder que les fluctuations locales.

Pour la première zone d'étude avec le MNT entier, nous avons effectué des simulations de *downscaling* avec l'algorithme DS, en faisant varier la position du seuil, ainsi que le nombre maximum de voisin avec les valeurs présentes dans le chapitre précédent. Dix simulations ont donc été effectuées pour chaque combinaison des 15 seuils et des 8 valeurs de voisins maximum, ce qui représente un total de 1'200 simulations.

Afin de produire les résultats des autres zones, nous avons diminué le nombre de simulations à 480, car comme le montre l'étude de Meerschman & al. (2013), de bonnes simulations sont obtenues lorsque la position du seuil est inférieure à 0.1. De plus, dans la partie des résultats, la même conclusion est faite. Nous avons donc fait des simulations avec 10 réalisations pour les 6 différentes positions des seuils inférieurs et égaux à 0.1 et pour les 8 valeurs de voisin maximum. Ainsi, plus de 4'500 simulations ont été effectuées pour ce travail.

Afin de voir si les résultats des simulations sont de bonne qualité et de savoir lesquels sont les meilleurs, l'erreur quadratique moyenne a été effectuée sur les MNT après le *downscaling*, pour déterminer la précision. Pour voir où les simulations sont les moins proches de la réalité, les résultats qui comprennent l'intervalle des 80% des erreurs les plus faibles sont également calculés.

## 10. Dimension fractale

Afin de calculer la dimension fractale, le logiciel FROG mis au point par le Dr. Jean-François Parrot (2009) a été utilisé. Sur les nombreuses possibilités qu'offre le logiciel, la dimension fractale 3D globale ainsi que la dimension fractale locale ont été choisies.

Pour la dimension fractale locale, le logiciel utilise la méthode de comptage de boîtes tridimensionnelle, comme le montre la figure 17. La description de la méthode a été faite par Taud & Parrot (2005), que cette partie ne fait que reprendre.

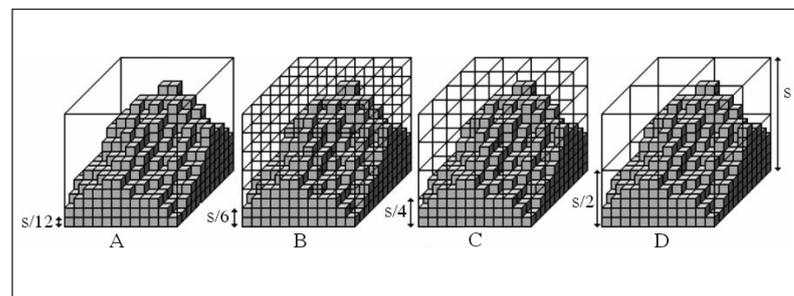


Figure 17: Illustration de la méthode de comptage de boîtes tridimensionnelle, avec la taille du cube (s) 12 et la taille des boîtes (q) de 1 pour (A), de 2 pour (B), de 3 pour (C) et de 6 pour (D).

Source : Taud & Parrot (2005)

Un cube de taille  $s \times s \times s$  est centré sur un pixel du MNT étudié. Le volume correspondant à la surface du MNT est défini par des voxels (Parrot, 2009). Un voxel correspond à un cube ayant comme base un pixel et comme hauteur l'altitude du pixel. L'altitude du MNT est ainsi composée par la superposition de plusieurs voxels (Taud & Parrot, 2005). Le coefficient  $h$  permet de faire varier la résolution verticale. Un cube est ainsi composé d'un nombre de voxels, qui doit être compris entre 0 et la taille du cube. Ce nombre se calcule grâce à la formule suivante :

$$V_s = \sum_{i=1,s} \sum_{j=1,s} v_s(i,j) \quad (8)$$

$v_s$  se calcule dans l'espace dimensionnel à partir de  $T(i,j)$ .

$$T(i,j) = \left( \frac{I(i,j) - I_c}{ps} * h \right) + \frac{s}{2} \quad (9)$$

- $I$  = l'image traitée

- $I_c$  = la valeur du pixel central
- $ps$  = la taille du pixel
- $h$  = la résolution verticale
- $s$  = la taille du cube

$$vs(i, j) = \begin{cases} T(i, j) & \text{si } 1 < T(i, j) < s \\ s & \text{si } T(i, j) \geq s \\ 0 & \text{si } T(i, j) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

La taille des boîtes dans le cube varie de 1 à  $\frac{s}{2}$ . Le nombre de boîtes remplies correspond à la valeur maximale de  $vs(i, j)/q$ , qui se calcule grâce à l'équation :

$$Ns = \sum_{i=1, \frac{s}{q}}^{\frac{s}{q}} \sum_{j=1, \frac{s}{q}}^{\frac{s}{q}} \frac{1}{q} * \text{Max} \{Vs(i * q - m, j * q - m)\} \quad 0 \leq m < q \quad (11)$$

- $m$  = taille du pixel

L'inverse de la pente  $P = \ln(q) / \ln(N_s)$ , où  $N_s$  est le nombre de boîtes contenant au moins une partie de l'objet étudié et  $q$  est la taille des boîtes, donne la dimension fractale (Fleurant, 2015 ; Taud & Parrot, 2005), comme le montre la figure 18.

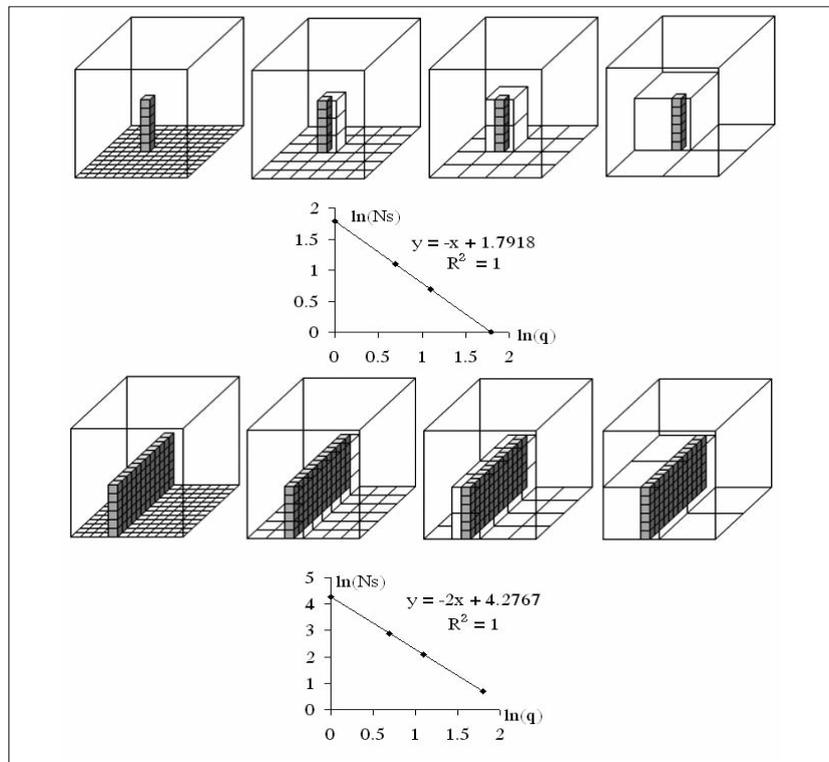


Figure 18 : Dimension fractale locale d'une ligne et d'un plan avec la taille du cube ( $s$ ) 12 et la taille des boîtes ( $q$ ) de 1, 2, 3 et 6.

Source : Parrot (2009)

### 10.1. Dimension fractale des zones

Dans ce mémoire, la dimension fractale des zones est utilisée afin de voir si elle a une influence sur le *downscaling* à partir de l'algorithme DS. Les dimensions fractales obtenues grâce au logiciel FROG ne sont pas les résultats les plus importants de ce document, qui sont les résultats obtenus grâce aux simulations faites par l'algorithme DS. C'est pourquoi les dimensions fractales de chaque zone d'étude sont présentées dans cette partie et non pas après.

Le tableau 2 présente les résultats obtenus par le logiciel FROG pour la dimension fractale 3D globale ainsi que la dimension fractale locale moyenne. Les calculs ont été faits sur le MNT en entier et sur les fluctuations pour chacune des zones d'étude. Afin d'obtenir les résultats ci-dessous pour la dimension fractale locale, la taille du cube  $s$  a été fixée à 12 et la résolution verticale  $h$  à 0.5.

		Dimension fractale	
		3D globale	locale (moyenne)
Zone 1	entier	2.948	2.725
	fluctuation	2.800	2.710
Zone 2	entier	2.322	2.824
	fluctuation	2.278	2.801
Zone 3	entier	2.874	2.704
	fluctuation	2.852	2.647
Zone 4	entier	2.901	2.719
	fluctuation	2.781	2.678

Tableau 2 : Résultats de la dimension fractale 3D globale et de la dimension fractale locale pour les différentes zones d'étude.

Les résultats de la dimension fractale 3D globale pour le MNT en entier est d'environ 2.9 pour toutes les zones à l'exception de la deuxième. Cela peut s'expliquer par le fait que la deuxième zone n'est pas stationnaire, il est donc normal que sa dimension fractale soit inférieure à celle des autres zones. Pour les fluctuations, la deuxième zone a également une dimension fractale inférieure aux autres zones. La dimension fractale 3D globale est supérieure lorsque le MNT est entier à celle des fluctuations.

Les résultats de la dimension fractale locale moyenne sont plus faibles que ceux de la dimension 3D globale sauf pour la deuxième zone. Par contre comme pour la dimension 3D globale, les résultats sont meilleurs pour le MNT entier que pour les fluctuations.

# IV<sup>ème</sup> PARTIE : PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

---

## 11. Résultats

Dans ce chapitre sont présentés les résultats obtenus à la suite du *downscaling* fait à partir de l'algorithme DS. Ils sont décrits par zone. Comme mentionné dans le chapitre 7, dans chaque zone d'étude sont présentés dans un premier temps les résultats qui concernent le MNT en entier, puis ceux pour le MNT sans la moyenne lissée, donc que pour les fluctuations. Tous ces résultats sont commentés et discutés dans le chapitre suivant.

### 11.1. Zone 1

La partie suivante présente les résultats de la première zone d'étude, qui se situe en Valais, dans la région de Saint-Martin, comme mentionné dans le chapitre 6.

#### 11.1.1. MNT en entier

Comme cité plus tôt dans ce travail, les résultats présentés ici proviennent des 1'200 simulations de *downscaling* grâce à l'algorithme DS. Une moyenne des 10 simulations pour les mêmes paramètres a été faite afin d'obtenir les valeurs présentes dans les tableaux 3 et 4. Il ne reste donc plus que 120 valeurs en fonction du nombre de voisins maximum et du seuil. Cette moyenne a été effectuée après avoir calculé l'erreur quadratique moyenne et l'intervalle comprenant le huitante pourcent des différences entre le MNT de base et celui de la simulation, pour chacune des 10 simulations. En effet, si cette moyenne serait faite avant la réalisation des calculs, les fluctuations locales seraient moins présentes.

##### 11.1.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 3. Elles sont comprises entre 18.9 et 556.6 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 30, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne calculée entre le MNT obtenu grâce au *downscaling* et celui de base augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin. La seule exception est lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, la valeur de l'erreur quadratique moyenne diminue légèrement en passant d'un seuil de 0.5 à un seuil de 0.75.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	52.4	25.6	22.1	20.9	19.0	18.9	19.9	22.0
	0.02	88.2	43.8	38.3	35.8	35.4	33.7	34.7	32.4
	0.04	165.1	86.6	65.4	63.6	61.8	60.1	61.0	56.9
	0.06	219.5	132.7	98.4	89.9	89.5	86.3	86.2	83.1
	0.08	261.4	169.4	135.5	118.9	114.8	109.3	111.0	108.4
	0.1	295.2	197.3	164.9	148.6	140.6	133.9	131.4	131.8
	0.12	318.8	219.4	190.6	175.8	165.6	155.5	152.7	155.5
	0.14	344.0	239.3	212.4	199.4	189.0	178.6	174.7	176.2
	0.16	360.6	257.9	230.8	218.2	211.2	200.9	194.5	195.0
	0.18	386.5	273.3	248.6	236.8	229.5	221.8	215.1	214.2
	0.2	417.2	289.7	265.4	255.7	247.0	240.7	236.2	234.9
	0.25	464.8	327.8	301.5	294.3	289.7	286.5	281.1	284.6
	0.5	556.5	513.1	487.1	488.0	478.9	481.5	484.4	486.3
	0.75	556.2	537.0	524.0	527.7	521.9	522.6	523.9	523.9
	0.99	556.8	538.1	524.6	528.8	522.5	523.3	524.2	524.9

Tableau 3 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne diminue de manière générale avec l'augmentation du nombre maximum de voisin. Cette diminution est présente pour tous les nombres de voisin seulement pour le seuil 0.06 et les seuils 0.16 à 0.2. Pour le seuil 0.01, une augmentation de l'erreur quadratique moyenne apparaît à partir du passage de 30 à 50 voisins maximums. Cette augmentation apparaît au même moment pour les seuils 0.02, 0.04 et 0.08, mais elle n'est pas présente lorsque le nombre de voisin maximum passe de 50 à 80. Pour les seuils 0.1 à 0.14 ainsi que pour le seuil 0.25, une augmentation de l'erreur quadratique moyenne n'est présente qu'entre les deux plus grands nombres de voisin qui ont été testés. Pour les seuils les plus élevés, entre 0.5 et 0.99, une diminution de l'erreur quadratique moyenne n'est présente que lorsque le nombre de voisin maximum passe de 1 à 5 et de 15 à 20.

### 11.1.1.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 4. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 20.2 et 725.2 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 15, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin, sauf pour trois exceptions où l'intervalle reste le même lorsque le seuil augmente. Ces dernières apparaissent lorsque le nombre maximum de voisin est de 1 et que le seuil passe de 0.5 à 0.75 et lorsque le seuil passe de 0.75 à 0.99 pour un nombre maximum de voisin de 50 et 80.

		Nombre maximum de voisin							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	44.6	23.8	21.0	20.2	20.3	20.6	22.2	26.3
	0.02	87.5	46.2	39.9	37.7	36.7	35.9	36.1	37.5
	0.04	176.8	103.8	79.2	75.7	73.8	71.4	69.6	68.7
	0.06	252.6	166.8	124.4	113.3	110.5	107.9	106.1	104.1
	0.08	320.1	216.1	172.5	153.9	147.3	141.1	141.3	139.9
	0.1	373.1	254.1	214.6	194.1	183.6	173.6	172.6	173.6
	0.12	406.6	285.6	249.1	231.1	218.1	204.6	203.1	206.6
	0.14	437.1	312.6	278.6	262.1	250.1	237.1	233.1	235.1
	0.16	462.1	337.6	303.6	288.1	279.1	266.6	259.6	260.6
	0.18	495.1	357.1	326.6	312.1	303.6	294.1	286.1	285.1
	0.2	532.1	377.1	348.1	335.6	325.1	316.6	312.1	311.6
	0.25	595.1	423.1	391.6	383.6	378.6	376.1	371.1	377.1
	0.5	724.6	664.6	629.1	628.6	615.6	619.1	625.1	630.1
	0.75	724.6	696.1	676.6	681.6	672.1	673.1	675.6	676.1
0.99	725.1	698.1	677.1	683.1	673.1	674.1	675.6	676.1	

Tableau 4 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, la valeur de l'intervalle diminue de manière générale avec l'augmentation du nombre maximum de voisin.

Cette diminution est constant pour les seuils 0.4, 0.6, 0.18 et 0.2. Une augmentation de l'intervalle intervient au passage des deux plus grands nombres de voisin maximum pour les seuils de 0.1 à 0.16 ainsi que pour le seuil 0.25. Pour le seuil 0.01, la diminution va jusqu'à 15 voisins, ensuite il y a une augmentation. Au seuil 0.02, le passage d'une diminution de l'intervalle à une augmentation intervient avec un nombre de voisin maximum de 30, alors que pour le seuil 0.5 le changement se fait déjà à partir de 20 voisins. Pour le seuil 0.08, la tendance générale est suivie sauf pour le passage de 30 à 50 voisins maximums. Pour les deux seuils les plus élevés, l'intervalle augmente entre 10 et 15 voisins ainsi qu'après un nombre maximum de 20 voisins et cela jusqu'au plus grand nombre maximum de voisin.

### 11.1.2. Fluctuations

A partir d'ici, les résultats présentés ne proviennent plus que de 480 simulations, car comme mentionné plus tôt, les valeurs de seuils supérieures à 0.1 n'ont pas été prises en compte à cause de leurs mauvais résultats.

#### 11.1.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 5. Elles sont comprises entre 7.2 et 22.7 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	12.6	7.3	7.2	7.4	7.7	8.3	9.4	11.0
	0.02	13.4	8.0	8.0	8.0	8.1	8.6	9.5	11.0
	0.04	16.0	9.9	9.6	9.6	9.7	10.0	10.7	11.9
	0.06	18.6	12.3	11.7	11.7	11.9	12.2	13.0	14.1
	0.08	20.9	14.7	14.0	14.0	14.2	14.7	15.7	17.0
	0.1	22.7	16.9	16.1	16.3	16.5	17.0	18.3	19.7

Tableau 5: Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la première zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

Les erreurs quadratiques moyennes augmentent plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin sauf lorsque le seuil passe de 0.01 à 0.02

pour le nombre maximum de voisin. Dans ce cas particulier, l'erreur quadratique moyenne reste la même.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est 1, l'erreur est plus grande qu'avec le plus grand nombre maximum de voisin testé, il a donc une diminution de l'erreur entre 1 et 5 voisins.

Pour les valeurs de seuils 0.01 et 0.1, l'accroissement de l'erreur quadratique commence à partir de 10 voisins. Les valeurs pour les seuils de 0.04 à 0.08 diminuent jusqu'à 10 voisins, puis restent stables entre 10 et 15 avant de suivre la tendance générale. Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne du seuil 0.02 diminuent entre 1 et 5 voisins, ensuite elles se stabilisent jusqu'à un nombre de voisin maximum de 15 avant d'augmenter.

#### 11.1.2.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 6. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 9.2 et 28.2 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

		Nombre maximum de voisin							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	14.3	9.3	9.2	9.4	9.7	10.2	11.2	12.8
	0.02	15.6	10.1	10.0	10.1	10.3	10.6	11.2	12.9
	0.04	19.2	12.5	12.1	12.3	12.4	12.6	13.3	14.4
	0.06	22.8	15.6	14.9	15.0	15.1	15.5	16.5	17.7
	0.08	25.9	18.9	17.9	18.0	18.2	18.7	20.2	21.7
	0.1	28.2	21.7	20.8	20.9	21.2	21.8	23.5	25.1

Tableau 6 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du *downscaling* en mètre pour la première zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin, sauf une fois où l'intervalle reste le même lorsque le seuil augmente. Cette exception apparaît lorsque le nombre de voisin maximum est de 50 et que le seuil passe de 0.01 à 0.02.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est 1, l'intervalle est plus grand qu'avec le plus grand nombre maximum de voisin testé, il a donc une diminution de l'intervalle entre 1 et 5 voisins. Cette diminution continue jusqu'à un nombre maximum de voisin de 10 pour tous les seuils, ensuite c'est la tendance générale qui prend le relais, à l'exception du seuil 0.04 où l'intervalle est le même pour 10 et 15 voisins, et donc l'augmentation se fait plus tard.

## 11.2. Zone 2

Pour la deuxième zone, qui se situe principalement en Valais, les résultats sont présentés de la même manière que précédemment. Les résultats prenant en compte l'entier du MNT, ainsi que ceux n'incluant que les fluctuations, proviennent de 480 simulations, tout comme pour les résultats des fluctuations de la zone 1.

### 11.2.1. MNT en entier

#### 11.2.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 7. Elles sont comprises entre 8.8 et 99.6 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 20, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	23.4	10.7	9.4	9.0	8.8	9.1	13.7	12.9
	0.02	29.8	14.6	13.4	13.3	12.8	12.2	15.3	15.4
	0.04	50.8	23.2	21.4	21.0	20.4	20.0	21.7	21.3
	0.06	70.4	32.9	29.8	28.9	28.4	28.0	28.8	28.7
	0.08	86.3	43.7	37.7	37.1	36.7	36.4	37.3	36.1
	0.1	99.6	54.2	45.7	45.4	45.3	44.9	46.2	44.5

Tableau 7 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne a tendance à diminuer plus le nombre maximum de voisin est grand, en tout cas jusqu'à 30 voisins. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est toujours la plus élevée pour un seuil donné.

Pour tous les seuils à part le seuil 0.01, une augmentation de l'erreur quadratique moyenne apparaît lors du passage de 30 à 50 voisins. Pour cette exception, l'augmentation est déjà présente avec un nombre de voisin maximum de 20. L'augmentation continue jusqu'au nombre de voisin maximum testé pour le seuil

0.02. Pour les autres seuils, la tendance générale réapparaît au passage des deux plus grands nombres de voisin.

### 11.2.1.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 8. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 9.2 et 73.8 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 15, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	13.9	9.9	9.3	9.2	9.3	9.5	10.3	11.1
	0.02	20.3	14.2	13.2	12.9	12.8	12.9	13.3	13.6
	0.04	39.3	20.9	19.8	19.2	19.0	18.8	18.9	18.6
	0.06	56.4	28.7	26.3	25.3	25.2	24.5	24.7	24.2
	0.08	67.5	38.8	33.3	32.3	32.6	32.1	33.2	31.1
	0.1	73.8	48.4	45.7	39.7	40.5	40.1	41.8	39.1

Tableau 8 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, aucune tendance ne peut être tirée des valeurs de l'intervalle. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'intervalle est le plus élevé pour un seuil donné.

Pour le seuil 0.01, les valeurs de l'intervalle diminuent lorsque le nombre de voisin maximum augmente, mais cela que jusqu'à 15 voisins. Ensuite, les valeurs augmentent. L'intervalle pour le seuil 0.02 suit le même cheminement que le précédent à la différence que la diminution s'arrête à 20 voisins. Les seuils 0.04 et 0.06 n'ont une augmentation de la valeur de l'intervalle que lorsque le nombre maximum de voisin passe de 30 à 50. Les deux plus grands seuils ont comme les deux précédents, la plus petite valeurs de l'intervalle avec le plus grand nombre de

voisins maximums et une augmentation entre 30 et 50. Par contre, entre 15 et 20 voisins maximums, il y a une augmentation de la valeur de l'intervalle.

## 11.2.2. Fluctuations

### 11.2.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 9. Elles sont comprises entre 3.7 et 12.3 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 5, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

Elles augmentent plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin, sauf lorsque le seuil passe de 0.01 à 0.02 pour le nombre maximum de voisin. Dans ce cas particulier, l'erreur quadratique moyenne diminue.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	6.9	3.7	3.9	4.1	4.2	4.5	5.3	6.2
	0.02	7.3	4.1	4.2	4.4	4.4	4.7	5.5	5.5
	0.04	8.8	5.6	5.4	5.4	5.4	5.6	6.3	6.8
	0.06	10.2	7.3	6.9	6.9	6.9	7.1	7.7	8.3
	0.08	11.5	9.1	8.7	8.6	8.6	8.8	9.4	9.8
	0.1	12.3	10.6	10.2	10.1	10.1	10.4	10.8	11.2

Tableau 9 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la deuxième zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné.

Pour le plus petit seuil, elle augmente à partir de 5 voisins. Le même phénomène se produit avec le seuil 0.02 sauf que la moyenne reste constante entre 15 et 20 ainsi qu'entre 50 et 80 voisins. Les seuils 0.04 et 0.06 voient leurs erreurs diminuer jusqu'à ce que le nombre de voisin maximum atteigne 10, là une stabilisation se fait jusqu'à 20 voisins avant de suivre la tendance générale. Pour les deux plus grands seuils, l'erreur quadratique moyenne suit presque le même schéma que pour les seuils précédents à l'exception que la diminution se prolonge jusqu'à 15 voisins.

### 11.2.2.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 10. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 2.8 et 11.7 mètres. La valeur minimale est obtenue à deux reprises lors de la simulation avec un seuil de 0.01, avec un nombre maximum de voisin de 5 et de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	4.3	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.5	4.2
	0.02	5.5	3.7	3.6	3.6	3.7	3.8	4.2	4.3
	0.04	8.1	5.5	5.2	5.1	5.2	5.3	5.8	6.1
	0.06	10.0	7.5	7.1	7.0	7.0	7.1	7.7	8.0
	0.08	11.2	9.4	9.1	8.9	9.0	9.1	9.7	10.0
	0.1	11.7	10.7	10.6	10.5	10.6	10.8	11.2	11.6

Tableau 10 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du *downscaling* en mètre pour la deuxième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'intervalle est plus élevé que les autres.

Le seuil 0.01 diminue entre 1 et 5 voisins maximums, puis se stabilise jusqu'à 10 avant d'augmenter. Pour le seuil 0.02, la stabilisation intervient seulement entre 10 et 15 voisins, tandis que pour le seuil 0.06 elle n'est présente qu'entre 15 et 20 voisins maximums. Les seuils 0.04 et 0.1 suivent la tendance générale en n'augmentant que lorsque le nombre de voisin maximum dépasse 15. La tendance est également suivie pour le seuil 0.08 mais l'augmentation ne se fait que lorsque le nombre de voisin dépasse 20.

### 11.3. Zone 3

Pour la troisième zone, qui se situe dans le canton de Berne dans la région de Langnau, les résultats sont présentés de la même manière que précédemment. Tout comme pour la deuxième zone, les résultats prenant en compte l'entier du MNT, ainsi que ceux n'incluant que les fluctuations, proviennent de 480 simulations.

#### 11.3.1. MNT en entier

##### 11.3.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 11. Elles sont comprises entre 7.4 et 76.7 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	17.7	8.1	7.4	7.5	8.0	9.1	11.5	14.4
	0.02	25.0	12.5	11.3	11.1	11.2	11.4	12.4	14.7
	0.04	39.4	20.9	18.8	18.4	18.3	18.7	19.3	20.2
	0.06	54.3	29.6	26.3	25.6	25.4	25.3	26.4	27.3
	0.08	67.0	39.1	34.7	33.5	32.9	32.8	33.4	34.1
	0.1	76.7	48.3	42.7	41.1	40.3	40.1	41.2	42.0

Tableau 11 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'erreur quadratique est plus élevée que les autres.

Les seuils à partir de 0.06 inclus ont des valeurs de l'erreur quadratique moyenne qui diminuent jusqu'à 30 voisins avant d'augmenter. Pour les seuils inférieurs, le passage d'une diminution à une augmentation s'effectue avec un nombre de voisin

maximum moins élevé. Plus les seuils diminuent, plus le nombre de voisin maximum qui fait la transition diminue. En effet pour un seuil de 0.04, l'augmentation commence à partir du passage de 20 à 30 voisins, pour le seuil 0.02, elle intervient entre 15 et 20 voisins et pour 0.01 elle est déjà présente entre 10 et 15 voisins.

### 11.3.1.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 12. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 9.4 et 97.4 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	19.4	9.9	9.4	9.5	10.0	11.3	14.2	17.9
	0.02	27.1	15.0	13.9	14.0	14.1	14.5	15.6	18.3
	0.04	46.4	25.8	23.1	22.7	22.8	23.5	24.8	26.0
	0.06	65.8	37.9	33.6	32.4	32.0	32.1	33.4	35.0
	0.08	83.1	50.4	44.6	42.9	42.2	42.1	43.0	44.0
	0.1	97.4	62.6	55.3	53.2	52.2	51.8	53.3	54.5

Tableau 12 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'intervalle est plus élevé que les autres.

Les seuils à partir de 0.06 inclus ont des valeurs de l'intervalle qui diminuent jusqu'à 30 voisins avant d'augmenter. Pour les seuils inférieurs, le passage d'une diminution à une augmentation s'effectue avec un nombre de voisin maximum

moins élevé. Plus les seuils diminuent, plus le nombre de voisin maximum qui fait la transition diminue. En effet pour un seuil de 0.04, l'augmentation commence à partir du passage de 20 à 30 voisins, pour le seul 0.02, elle intervient entre 15 et 20 voisins et pour 0.01 elle est déjà présente entre 10 et 15 voisins.

### 11.3.2. Fluctuations

#### 11.3.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 13. Elles sont comprises entre 6.1 et 23.0 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin, sauf pour les seuils 0.01 à 0.02 où lorsque le nombre de voisin maximum est égal ou supérieur à 30 l'erreur reste la même.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	13.9	6.5	6.1	6.4	6.8	7.7	9.5	12.3
	0.02	14.7	7.2	6.6	6.6	6.9	7.7	9.5	12.3
	0.04	16.4	9.0	8.6	8.4	8.3	8.4	9.7	12.4
	0.06	18.6	10.8	10.6	10.6	10.5	10.4	11.0	12.9
	0.08	20.8	12.8	12.4	12.5	12.7	12.8	13.1	14.4
	0.1	23.0	14.9	14.2	14.3	14.6	14.9	15.5	16.6

Tableau 13: Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la troisième zone avec uniquement les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'erreur quadratique est plus élevée que les autres.

L'erreur quadratique moyenne diminue jusqu'à 10 voisins maximums, puis elle augmente pour les seuils 0.01, 0.08 et 0.1. La seule différence avec le seuil 0.02 est que l'erreur n'est pas égale entre 10 et 15 voisins maximums. La diminution se prolonge jusqu'à 20 voisins pour le seuil 0.04. Pour le seuil 0.06, elle va même jusqu'à 30 voisins, mais avec une stabilisation pour le nombre de voisin maximum de 10 et 15.

### 11.3.2.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 14. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 7.7 et 28.8 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin, sauf lorsqu'il reste constant. Ceci arrive lorsque le nombre maximum de voisin est supérieur ou égal à 50, pour les seuils 0.01 et 0.02.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	17.0	8.1	7.7	8.1	8.5	9.5	11.7	15.1
	0.02	17.9	9.1	8.4	8.5	8.7	9.6	11.7	15.1
	0.04	19.9	11.4	11.0	10.7	10.6	10.7	12.1	15.2
	0.06	22.8	13.8	13.5	13.5	13.5	13.4	13.9	16.1
	0.08	25.7	16.5	15.9	16.1	16.3	16.4	16.9	18.3
	0.1	28.8	19.2	18.3	18.4	18.8	19.2	20.0	21.4

Tableau 14 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du *downscaling* en mètre pour la troisième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'intervalle est plus élevé pour un seuil donné.

Pour les deux plus petits et grands seuils testés, l'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude diminue jusqu'à 10 voisins maximums avant d'augmenter. Pour le seuil 0.04, la diminution s'étend jusqu'à 20 voisins. Pour le seuil 0.06, elle va jusqu'à 30 voisins, avec la particularité que la même valeur d'intervalle est présente entre 10 et 20 voisins, ensuite pour les plus grands nombres de voisin maximum, l'intervalle augmente. Dans les deux derniers cas, l'intervalle augmente avec les plus grands nombres de voisin maximum.

## 11.4. Zone 4

Pour la quatrième zone, qui se situe dans le Jura, les résultats sont présentés de la même manière que précédemment. Tout comme pour la deuxième et troisième zones, les résultats prenant en compte l'entier du MNT, ainsi que ceux n'incluant que les fluctuations, proviennent de 480 simulations.

### 11.4.1. MNT en entier

#### 11.4.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 15. Elles sont comprises entre 5.7 et 72.0 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	16.5	6.4	5.7	5.8	6.1	6.9	8.6	11.0
	0.02	21.5	10.3	9.2	8.8	8.7	8.8	9.7	11.7
	0.04	34.8	18.0	15.6	15.1	15.0	15.0	15.3	15.9
	0.06	48.4	25.9	22.6	21.7	21.2	20.8	21.1	22.0
	0.08	59.9	33.8	29.3	29.3	27.3	26.8	27.0	28.0
	0.1	72.0	41.4	36.1	34.5	33.7	33.1	32.9	33.5

Tableau 15 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'erreur quadratique est plus élevée que les autres.

Pour le plus petit seuil, l'erreur quadratique moyenne diminue jusqu'à 10 voisins maximums, puis elle augmente. Pour le seuil 0.02, c'est entre 20 et 30 voisins que l'erreur commence à augmenter. Au seuil 0.04, la valeur minimale de l'erreur quadratique moyenne est atteinte lorsque les simulations sont effectuées avec un

nombre de voisin maximum de 20 et de 30. Les seuils 0.06 et 0.08 agissent de la même façon. L'erreur diminue jusqu'à 30 voisins avant d'augmenter pour les nombres de voisin maximum supérieurs. Pour le seuil le plus élevé, l'augmentation de l'erreur n'est présente que lorsque le nombre maximum de voisin passe de 50 à 80.

#### 11.4.1.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 16. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 6.7 et 88.2 mètres. La valeur minimale est obtenue lors de la simulation avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin de 10, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude augmente plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	15.3	7.2	6.7	6.9	7.3	8.2	10.1	12.8
	0.02	22.7	11.8	10.6	10.4	10.5	10.8	11.7	13.8
	0.04	39.4	21.9	18.9	18.4	18.5	18.5	19.1	20.1
	0.06	56.7	32.5	28.1	26.9	26.4	26.1	26.8	28.1
	0.08	72.9	43.3	37.6	37.6	34.9	34.4	34.7	36.1
	0.1	88.2	53.5	46.9	44.8	43.7	42.8	42.7	43.5

Tableau 16 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle montre une tendance à la diminution jusqu'à un certain nombre de voisin maximum avant de finir par augmenter pour les plus grands nombres de voisin. Lorsque le nombre de voisin est de 1, l'intervalle est plus élevé que les autres.

Pour le plus petit seuil testé, l'augmentation commence dès que le nombre de voisin maximum est supérieur à 10. Pour le seuil 0.02, elle n'intervient qu'à partir du passage de 15 à 20 voisins. C'est aussi le cas pour le seuil 0.04 sauf qu'il y a une

stabilisation de la valeur de l'intervalle entre 20 et 30 voisins. Au seuil 0.06, la diminution s'interrompt lorsque les simulations sont faites avec 30 voisins maximums. Mise à part une stabilisation de la valeur de l'intervalle entre 10 et 15 voisins, le seuil 0.08 agit comme celui de 0.06. Pour le seuil le plus élevé, l'augmentation de l'intervalle n'est présente que lorsque le nombre maximum de voisin passe de 50 à 80.

## 11.4.2. Fluctuations

### 11.4.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 17. Elles sont comprises entre 5.1 et 21.6 mètres. La valeur minimale apparaît lors de la simulation avec un nombre maximum de voisin de 10 pour les seuils 0.01 et 0.02, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'erreur quadratique moyenne est la même pour les deux plus petits seuils et cela pour un nombre de voisin maximum allant de 1 à 30. Sinon, elle augmente plus le seuil est grand, quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	10.7	5.3	5.1	5.3	5.5	6.0	7.1	8.9
	0.02	10.7	5.3	5.1	5.3	5.5	6.0	7.2	9.0
	0.04	14.2	7.9	7.5	7.4	7.4	7.6	8.2	9.6
	0.06	16.8	9.9	9.4	9.3	9.3	9.4	9.8	10.9
	0.08	19.3	12.3	11.3	11.4	11.5	11.6	12.2	13.4
	0.1	21.6	14.3	13.3	13.3	13.5	13.8	14.7	16.0

Tableau 17 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour la quatrième zone uniquement avec les fluctuations, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné.

Pour les deux plus petits seuils, l'erreur quadratique moyenne commence à augmenter dès que le nombre de voisin maximum est supérieur à 10. Pour les seuils allant de 0.04 à 0.08, cette augmentation n'intervient qu'après 20 voisins.

Mais les valeurs de l'erreur quadratique moyenne sont minimales avec un nombre maximum de voisin de 15 et 20. Pour le seuil le plus élevé testé, la diminution se termine à 10 voisins maximums qui a la même erreur quadratique moyenne que lorsque la simulation est faite avec 15 voisins maximums.

#### 11.4.2.2. Intervalle des 80 %

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* se trouve dans le tableau 18. Tout comme pour les valeurs de l'erreur quadratique moyenne, l'unité de mesure est le mètre. Les valeurs sont en valeurs absolues et elles sont comprises entre 6.5 et 27.0 mètres. La valeur minimale apparaît lors de la simulation avec un nombre maximum de voisin de 10 pour les seuils 0.01 et 0.02, tandis que la valeur maximale correspond à la simulation avec le seuil le plus élevé et le plus petit nombre maximum de voisin.

L'intervalle contenant le 80% des différences d'altitude est le même pour les deux plus petits seuils et cela pour un nombre de voisin maximum allant de 1 à 30. Sinon, elle augmente plus le seuil est grand, quel que soit le nombre maximum de voisin.

		Nombre de voisin maximum							
		1	5	10	15	20	30	50	80
Seuil	0.01	12.1	6.6	6.5	6.7	6.9	7.3	8.4	10.2
	0.02	12.1	6.6	6.5	6.7	6.9	7.3	8.6	10.3
	0.04	16.8	9.8	9.4	9.3	9.3	9.5	10.1	11.4
	0.06	20.4	12.6	11.9	11.8	11.7	11.8	12.3	13.4
	0.08	23.8	15.7	14.5	14.6	14.7	14.8	15.6	17.0
	0.1	27.0	18.4	17.1	17.2	17.3	17.7	18.8	20.5

Tableau 18 : Résultats des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre les fluctuations du MNT de base et celles provenant du *downscaling* en mètre pour la quatrième zone, en fonction du seuil et du nombre de voisin maximum.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'intervalle augmente de manière générale plus le nombre maximum de voisin est grand. Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'intervalle est le plus élevé pour un seuil donné.

Pour les deux plus petits et grands seuils, l'intervalle diminue jusqu'à ce que le nombre de voisin maximum atteigne 10, puis il suit la tendance générale. Pour le seuil 0.04, la diminution lors du passage de 10 à 15 voisins maximums, mais

l'augmentation ne se fait que lorsque le nombre de voisins est supérieur à 20. Pour le seuil 0.08, la diminution va jusqu'à 20 voisins, mais elle atteint un palier entre 10 et 15. Ensuite, l'intervalle suit la tendance générale.

## 12. Interprétation et analyse des résultats

Cette partie, comme son nom l'indique, concerne l'analyse des résultats qui ont été présentés précédemment. Tout d'abord, les résultats issus des deux méthodes sont analysés séparément pour chaque zone afin de voir quelle combinaison des paramètres variables donne les meilleurs résultats. Ensuite, afin de voir si le caractère fractal de la référence a une influence sur les résultats, les différentes zones d'étude sont comparées. Après chacune des parties, un résumé avec une interprétation de l'analyse des résultats est fait. Pour terminer cette partie, une comparaison des résultats est faite avec une autre méthode utilisant la géostatistique du multipoint.

### 12.1. MNT en entier

#### 12.1.1. Zone 1

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la première zone avec l'entier du MNT sont compris entre 18.9 et 556.8 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin maximum élevé. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.99 et que le nombre maximum de voisin est 1.

La figure 19 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 30 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre l'augmentation des différences d'altitude lorsque le seuil augmente. Compte tenu des résultats obtenus pour les seuils et l'observation faite par Meerschman et al. (2013), qui dit que pour des images d'entraînements à variables continues, les meilleurs résultats proviennent lorsque le seuil est inférieur ou égal à 0.1, seuls les résultats avec l'entier du MNT de la zone 1 possèdent des valeurs de seuil supérieur à 0.1.

Les résultats ne correspondent pas toute à fait avec ceux de Meerschman et al. (2013). Ces derniers affirment effectivement que pour avoir les meilleurs résultats, il faut un nombre de voisin maximum supérieur ou égal à 30. C'est bien le cas pour 30 voisins mais lors des simulations, si le nombre de voisin maximum est supérieur à 30 l'erreur augmente. Normalement, plus le nombre de voisin maximum augmente, plus il y a de chance de trouver une valeur correspondante à la valeur du MNT de base, étant donné que le rayon de recherche grandit. Cette

différence peut provenir des caractéristiques topographiques propres à chaque zone. En effet, notre zone d'étude présente de forte variation d'altitude sur des petites distances, ce qui peut conduire à des erreurs lorsque le nombre de voisin est élevé.

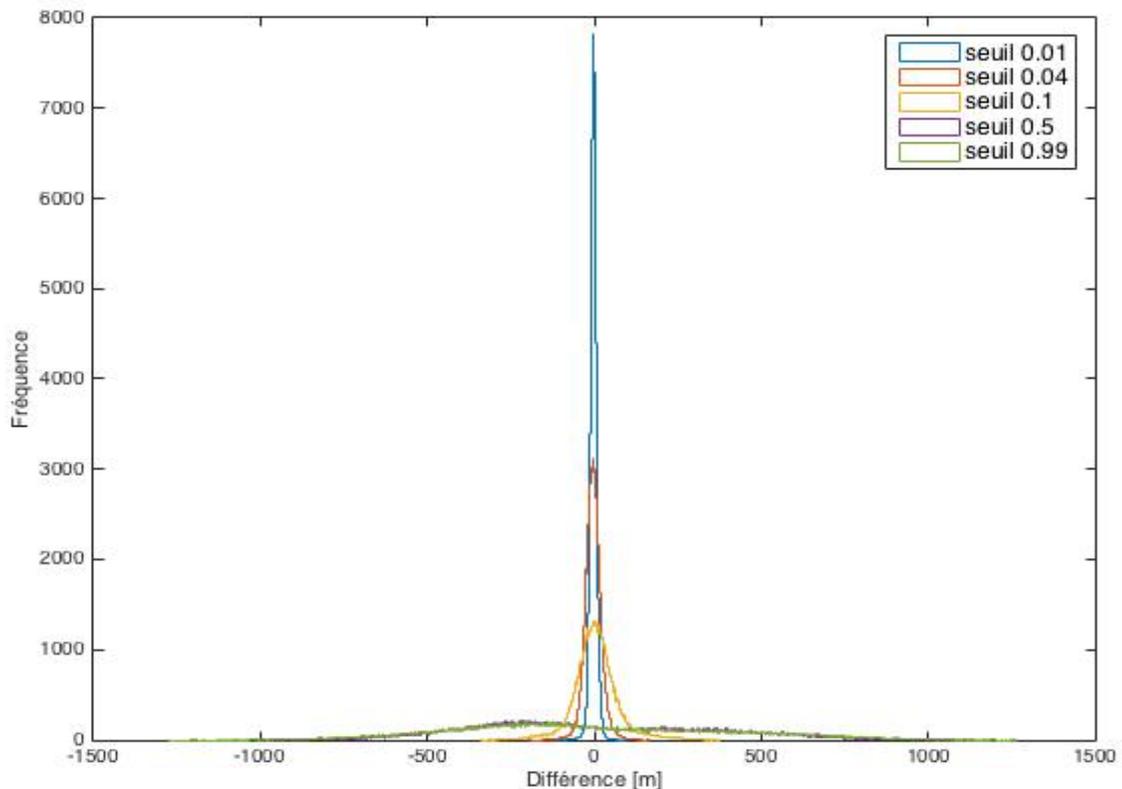


Figure 19 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 30 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 20.2 et 725.2 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente et plus le nombre maximum de voisin augmente. Par contre, le meilleur résultat ne se situe pas avec le plus grand nombre de voisin, mais lorsqu'il y a 15 voisins. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats. Les résultats qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent où les altitudes maximums et minimums se trouvent, comme l'illustre la figure 20. C'est donc dans le fond de la vallée creusée par la Borgne et à l'Est de la zone que les résultats du *downscaling* sont les moins bons. La concentration vient du fait que le seuil d'acceptation augmente, ce qui a pour conséquence une augmentation des valeurs centrales et donc les extrêmes sont moins bien représentées.

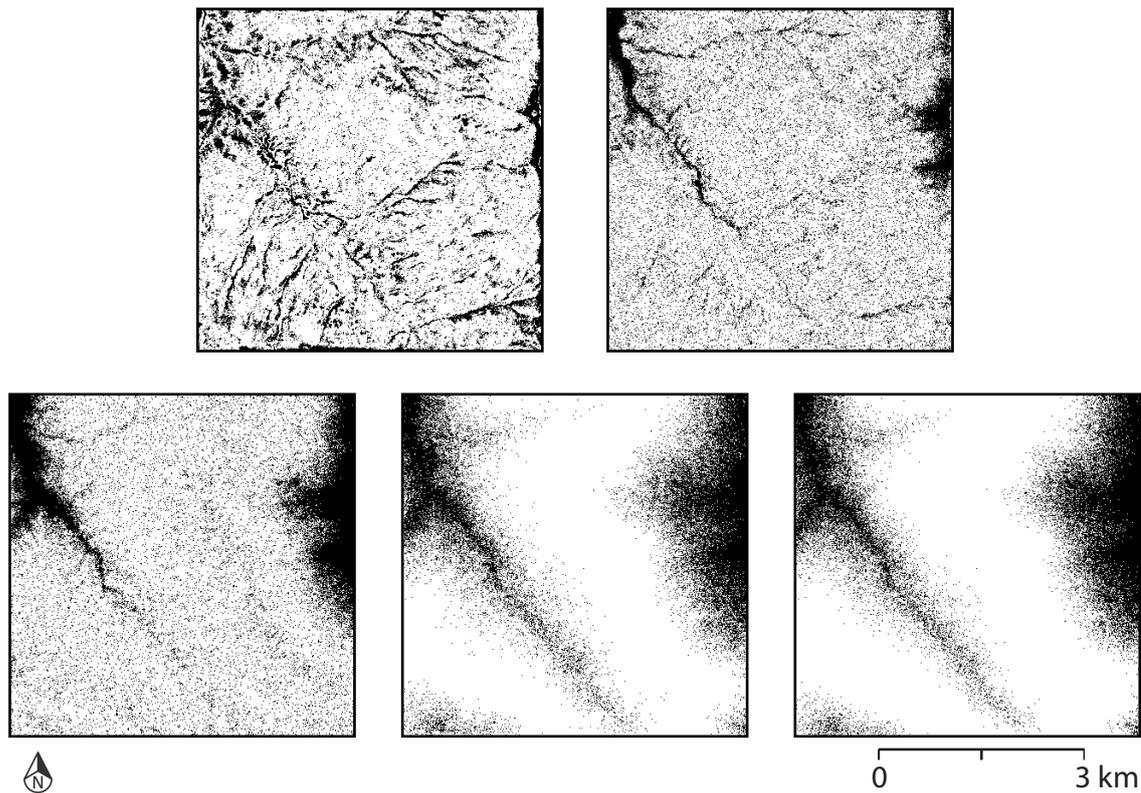


Figure 20 : Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.

Les histogrammes des MNT après le *downscaling* suivent plus ou moins la forme générale du MNT de base pour les plus petits seuils testés. En effet, lorsque le seuil grandit, la forme de l'histogramme obtenu après l'augmentation de la résolution s'éloigne du tracé original. Il se ressert et ne donne plus que les valeurs centrales, comme le montre la figure 21. Pour les faibles valeurs de seuil, les différences se font surtout ressentir sur les maxima et les minima. Le fait que la précision de la simulation avec un seuil plus élevé soit moins bonne est logique, puisqu'augmenter le seuil signifie laisser une plus grande marge d'erreur à la valeur recherchée. Puisque l'algorithme DS fonctionne grâce au voisinage, il est normal de retrouver plus souvent les valeurs centrales en augmentant le seuil et en augmentant le nombre de voisin maximum, il est plus difficile de trouver les fluctuations locales.

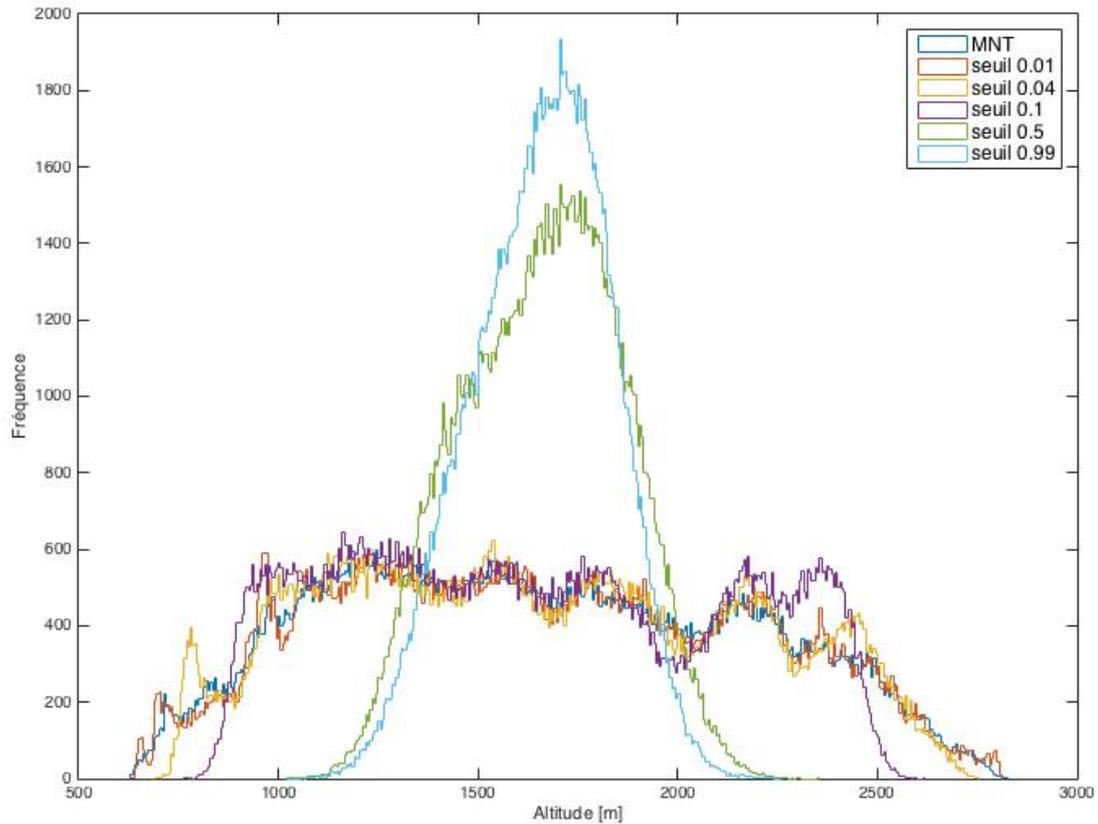


Figure 21 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 30 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04, 0.1, 0.5 et 0.99.

La figure 22 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu, mais il est possible de voir une moins bonne netteté des affluents de la Borgne sur le MNT simulé. Cela confirme les résultats décrits précédemment qui disent que la simulation favorise les valeurs moyennes au dépend des valeurs extrêmes.

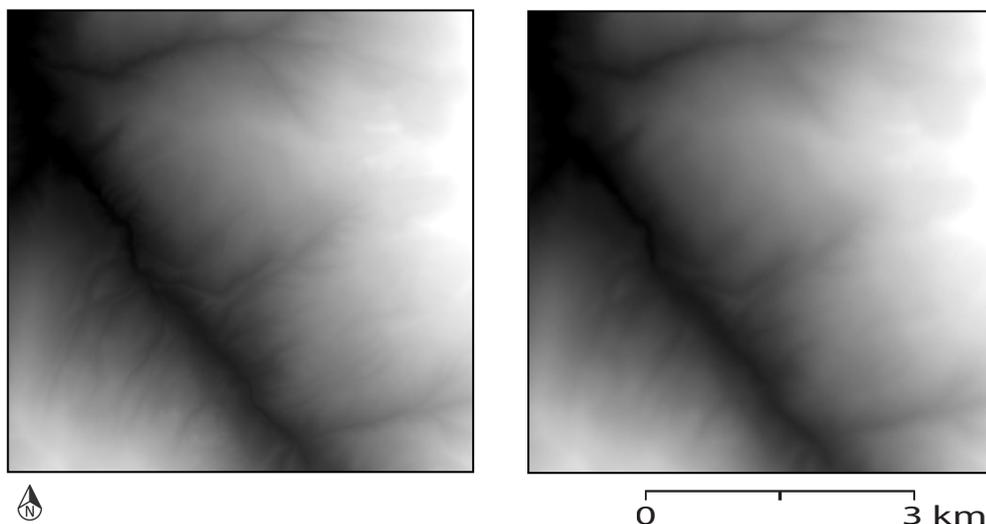


Figure 22: MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.1.2. Zone 2

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la deuxième zone avec l'entier du MNT sont compris entre 8.8 et 99.6 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin compris entre 20 et 30. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne augmentent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1. Contrairement aux résultats de Meerschmann et al. (2013), le meilleur résultat pour cette zone se trouve lorsque le nombre maximum de voisin est de 20.

Contrairement à la première zone, l'histogramme des différences d'altitude s'étend sur les valeurs positives après le pic, comme le montre la figure 23. Cela provient certainement du fait que la zone d'étude est séparée entre la plaine, qui représente la majeure partie de la zone avec plus ou moins la même altitude, et une partie du coteau, qui surplombe Collombey. Plus le seuil grandit, moins il y a de résultat avec une légère différence d'altitude et plus l'histogramme s'étend vers des valeurs positives.

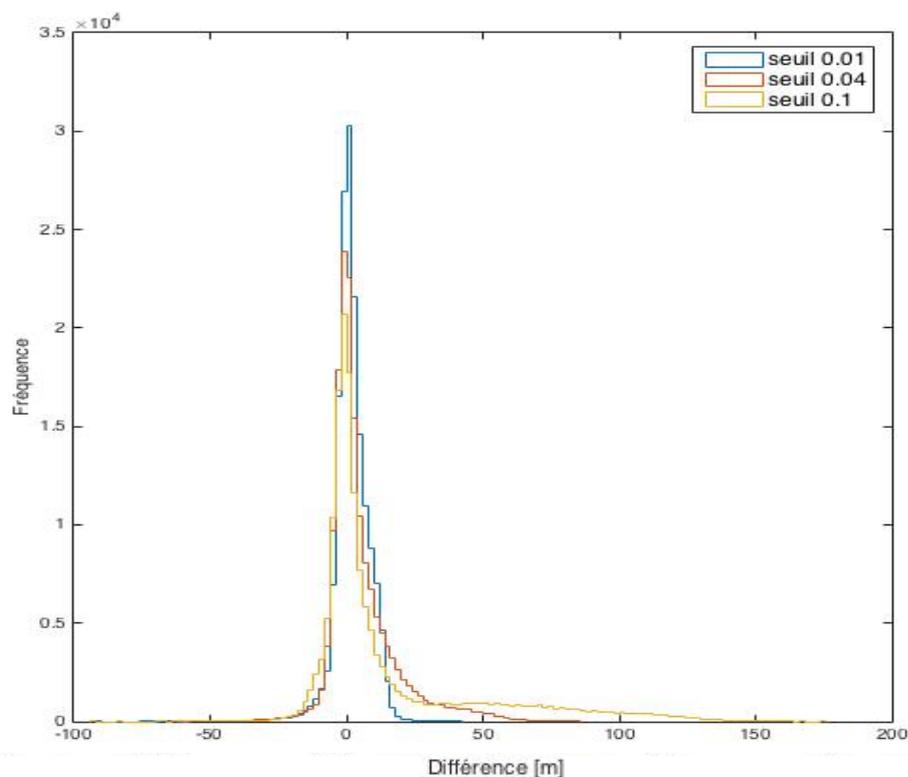
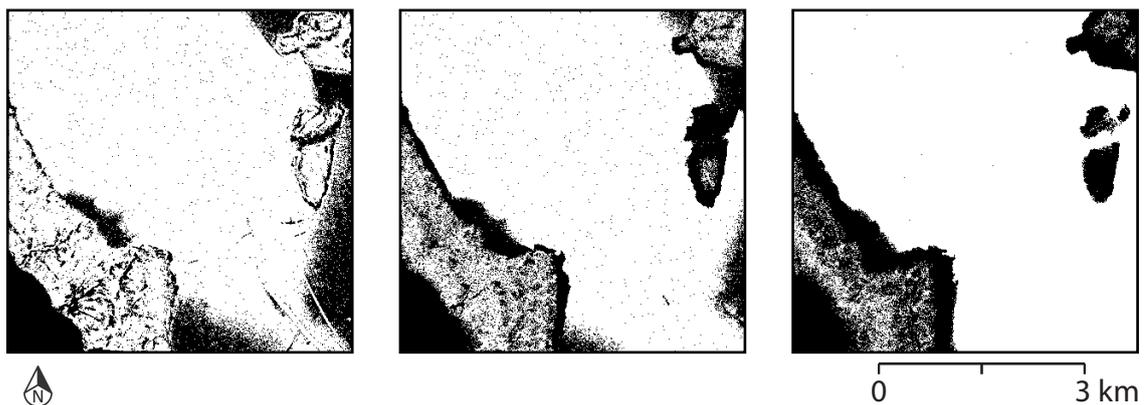


Figure 23 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 20 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont comprises entre 9.2 et 73.8 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente. Par contre, pour le nombre maximum de voisin, c'est lorsqu'il se trouve entre 15 et 30 qu'il est le plus faible. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent sur les coteaux, comme le montre la figure 24. Le fait que la précision de la simulation avec un seuil plus élevé soit moins bonne sur le coteau vient du fait qu'augmenter le seuil signifie laisser une plus grande marge d'erreur à la valeur recherchée. Puisque l'algorithme DS fonctionne grâce au voisinage, il est normal de retrouver plus souvent les valeurs centrales en augmentant le seuil, dans ce cas c'est les valeurs de la plaine qui ressortent le plus et donc l'erreur est plus grande sur le coteau.



**Figure 24 :** Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

Comme pour la zone précédente, les histogrammes provenant des simulations suivent plus ou moins le tracé de l'histogramme de base pour les petits seuils. Plus les seuils grandissent, plus le tracé des histogrammes diffère. Une surestimation des valeurs les plus communes est visible sur la figure 25 quelle que soit la simulation, ainsi qu'un décalage vers les valeurs centrales avec l'augmentation du seuil.

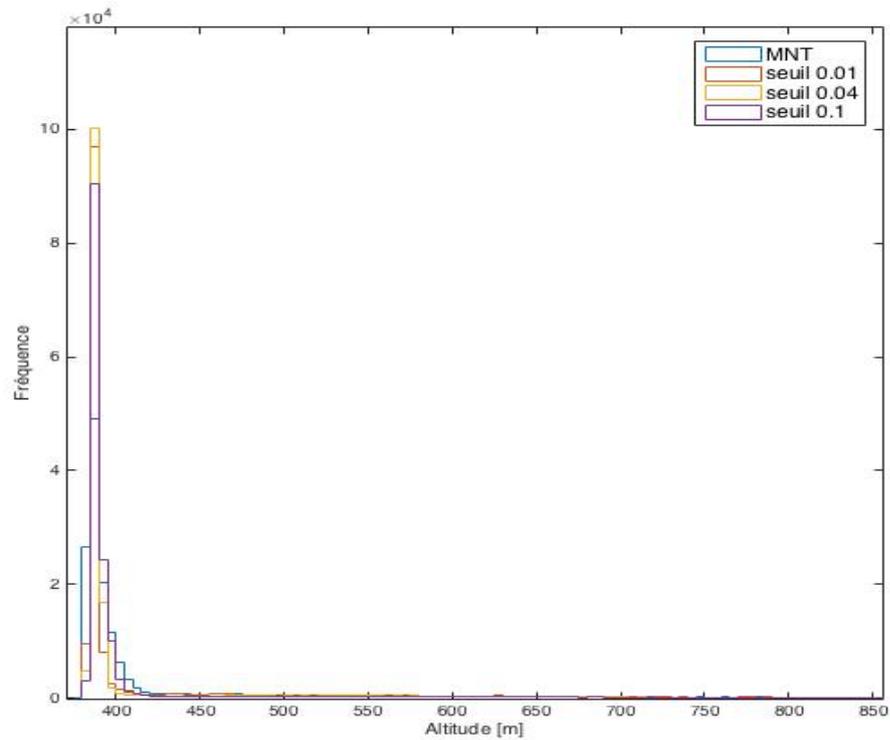


Figure 25 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 20 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 26 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

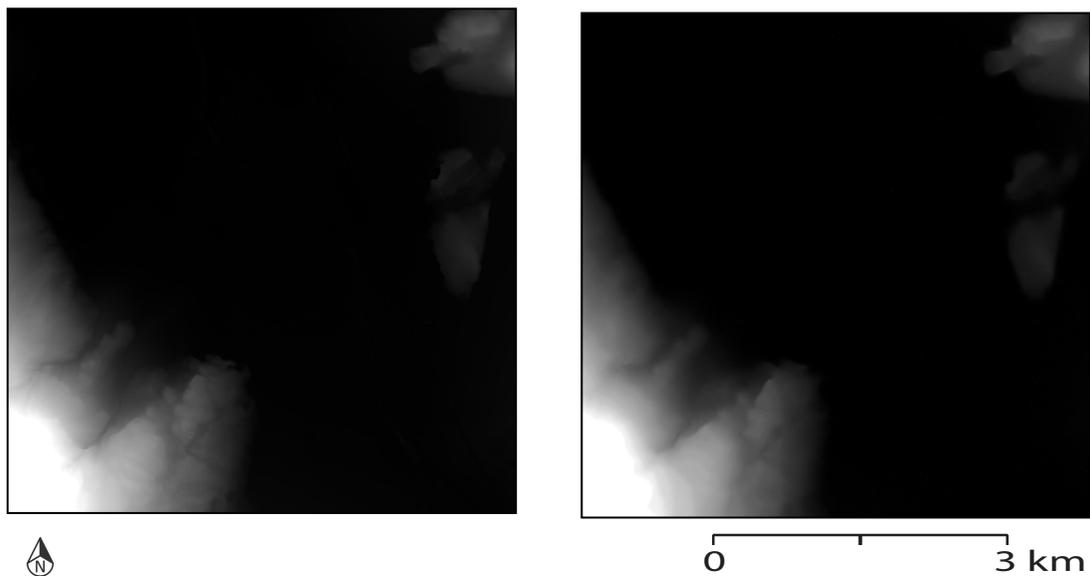
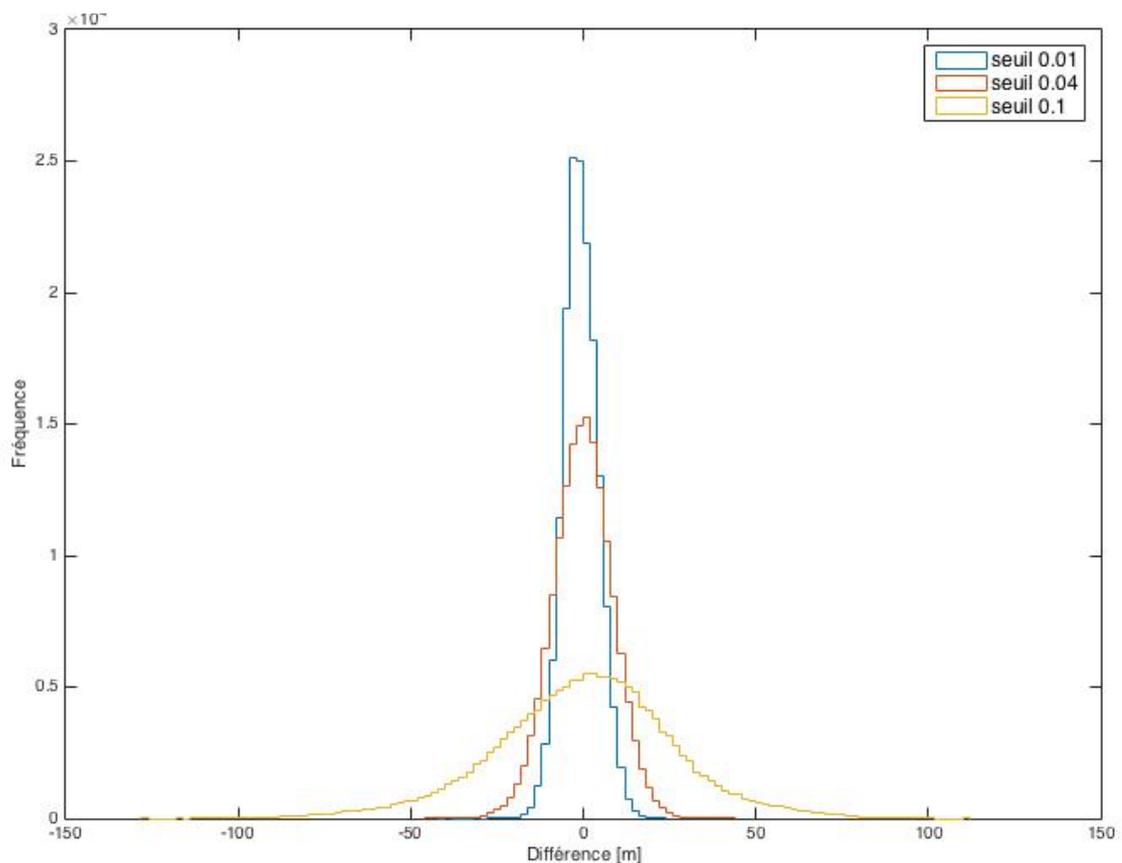


Figure 26 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.1.3. Zone 3

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la troisième zone avec l'entier du MNT sont compris entre 7.4 et 76.7 mètres. L'erreur a tendance à grandir avec l'agrandissement du seuil, comme pour les deux cas précédents. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des seuils faibles et un nombre de voisin maximum entre 10 et 30. Cette tendance rejoint plus ou moins celle trouvée pour la deuxième zone et contredit les dires de Meerschman et al. (2013). Une fois de plus, il y a de forts changements d'altitude pour des petites zones. Par conséquent, plus le nombre de voisin augmente, plus il y a de chance de trouver une valeur qui ne correspond pas forcément aux spécificités de la zone de recherche.

La figure 27 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 10 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.



Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 9.4 et 97.4 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente. Par contre, pour le nombre maximum de voisin, c'est lorsqu'il se trouve entre 10 et 30 qu'il est le plus faible. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent dans le fond des vallées ainsi qu'au sommet des crêtes, comme le montre la figure 28. Les résultats les moins bons sont donc où il y a les altitudes maximums et minimums. Tout comme pour les zones précédentes, ce phénomène provient du fait qu'en augmentant le seuil, les valeurs centrales sont mieux représentées et donc les extrêmes sont moins proches de la réalité.

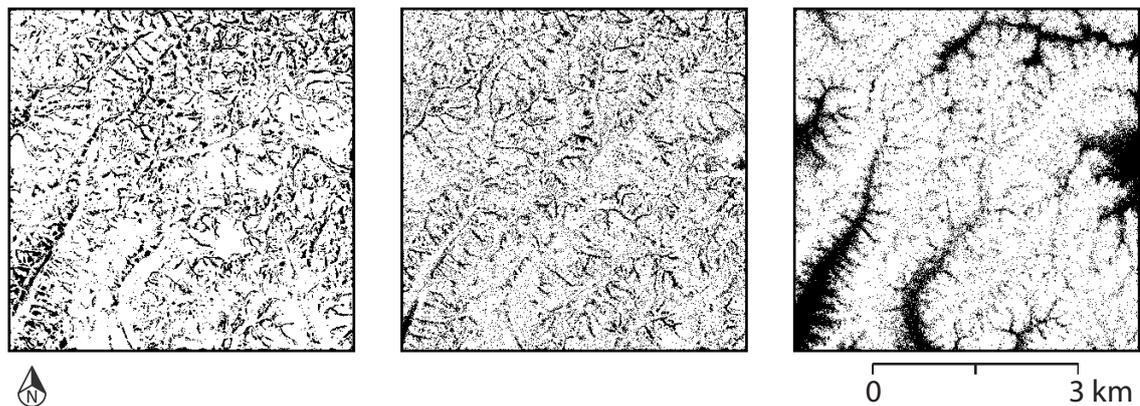


Figure 28 : Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

Les histogrammes provenant des simulations s'éloignent de l'histogramme du MNT de base lorsque le seuil augmente, comme le montre la figure 29. Le même phénomène que pour les deux zones précédentes se produit lorsque le seuil augmente, à savoir, une convergence des valeurs simulées vers les valeurs centrales.

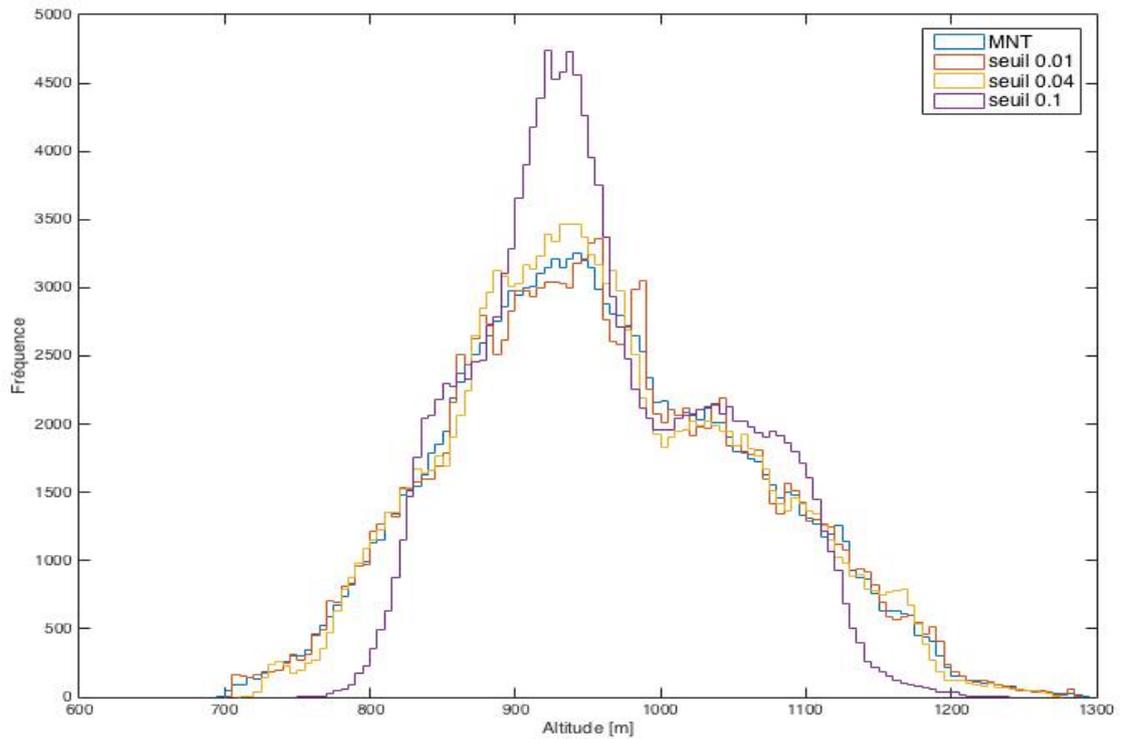


Figure 29 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 30 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

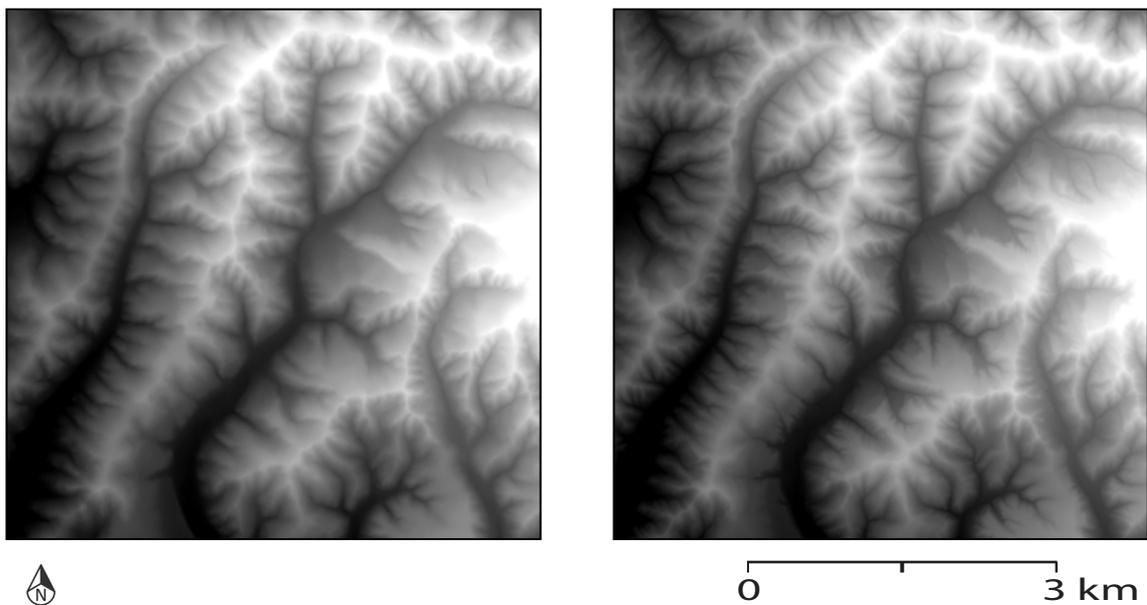


Figure 30 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

#### 12.1.4. Zone 4

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la dernière zone avec l'entier du MNT sont compris entre 5.7 et 72.0 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin compris entre 10 et 30. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne augmentent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1. Contrairement aux résultats de Meerschmann et al. (2013), le meilleur résultat pour cette zone se trouve lorsque le nombre maximum de voisin est de 10. Cela provient du fait qu'il y a de forts changements d'altitude pour des petites zones et par conséquent, plus le nombre de voisin augmente, plus il y a de chance de trouver une valeur qui ne correspond pas forcément aux spécificités de la zone de recherche.

La figure 31 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 10 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.

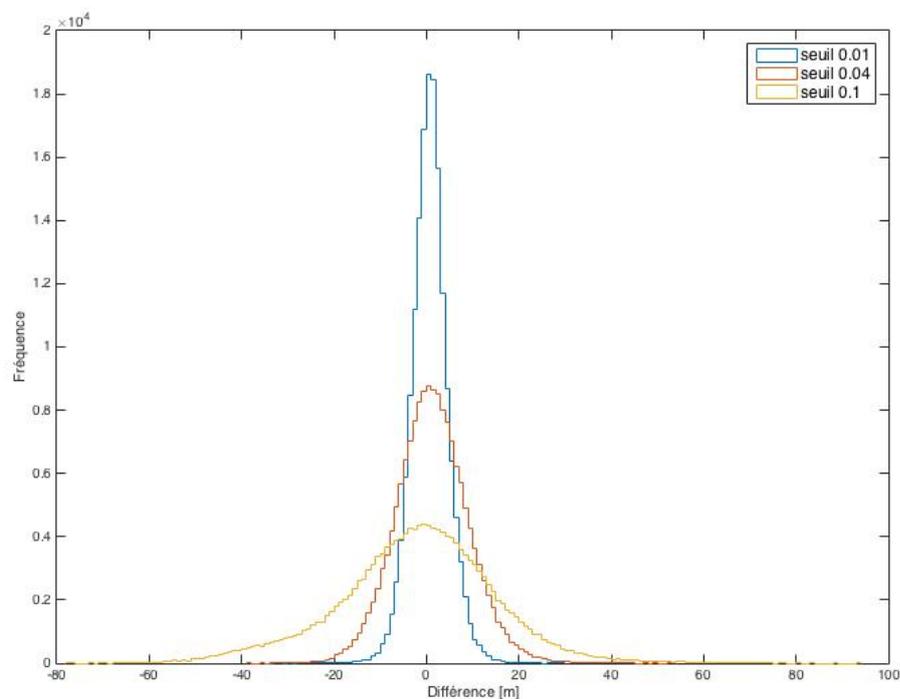


Figure 31 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 6.7 et 88.2 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente. Par contre, pour le nombre maximum de voisin, c'est lorsqu'il se trouve entre 10 et 30 qu'il est le plus faible. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent dans le fond de la vallée creusée par la Birse ainsi que sur les plus hautes crêtes, comme le montre la figure 32. Les résultats les moins bons sont donc où il y a les altitudes maximums et minimums. Ce phénomène provient du fait qu'en augmentant le seuil, les valeurs centrales sont mieux représentées et donc les extrêmes sont moins proches de la réalité.



**Figure 32 : Illustrations des endroits où les résultats du downscaling sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 15 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.**

Comme pour les zones précédentes, les histogrammes provenant des simulations suivent plus ou moins le tracé de l'histogramme de base pour les petits seuils. Plus les seuils grandissent, plus le tracé des histogrammes diffère. Une surestimation des valeurs les plus communes est visible sur la figure 33 quelle que soit la simulation, ainsi qu'un décalage vers les valeurs centrales avec l'augmentation du seuil.

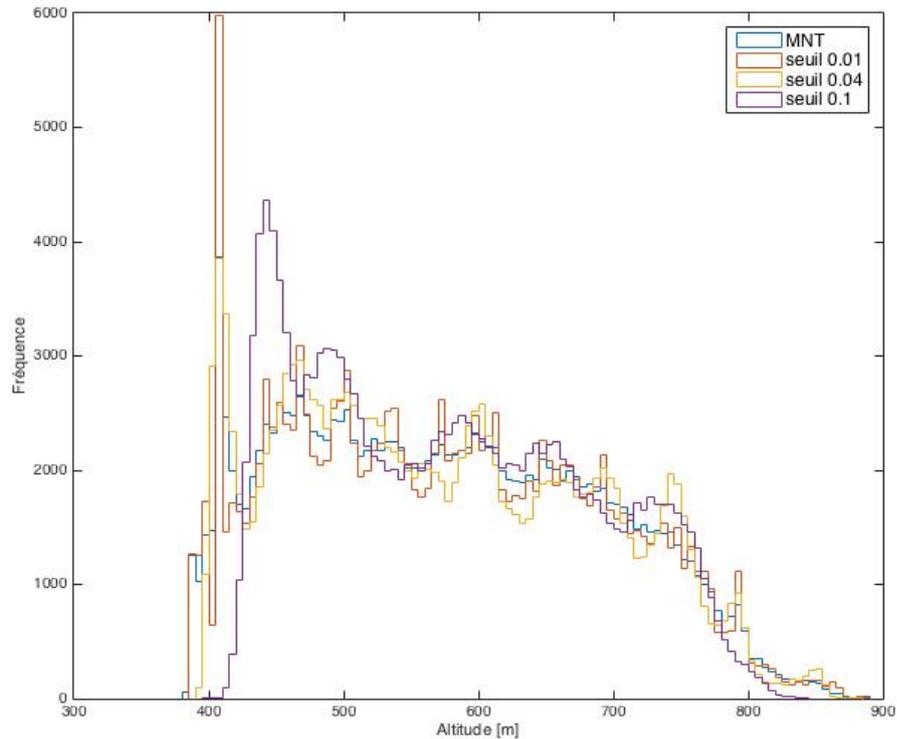


Figure 33 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 34 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

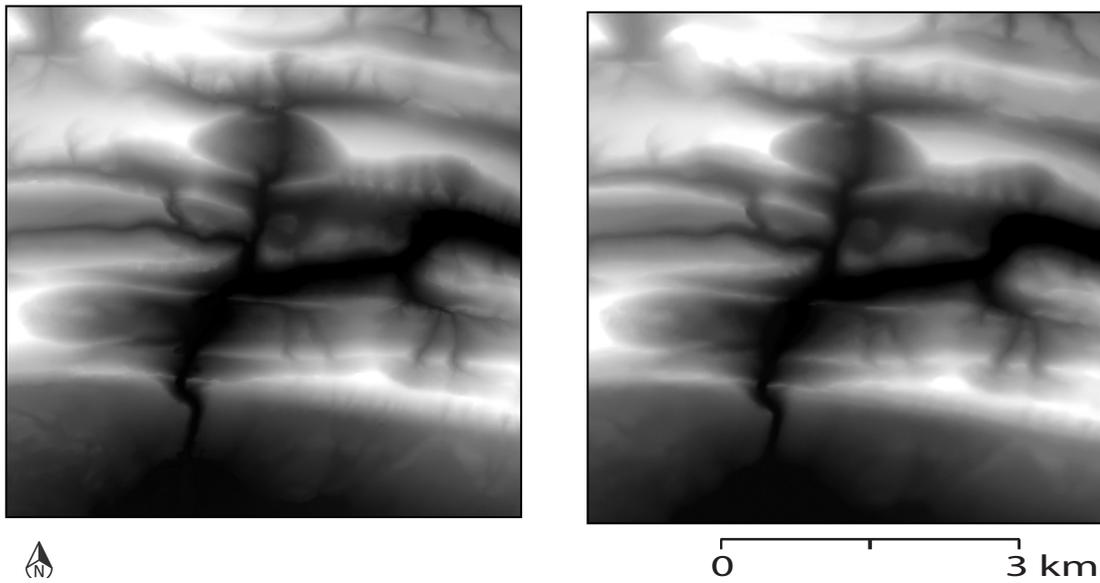


Figure 34 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.1.5. Synthèse pour l'entier du MNT

En ce qui concerne le *downscaling* à partir de l'algorithme DS pour l'entier du MNT, plus les seuils sont grands moins les résultats sont concluants. Le fait que la précision de la simulation avec un seuil plus élevé est moins bonne est logique, puisqu'augmenter le seuil signifie laisser une plus grande marge d'erreur à la valeur recherchée.

Les meilleures simulations interviennent pour les petits seuils avec un nombre de voisin maximum compris entre 10 et 30. Contrairement aux résultats trouvés par Meerschman et al. (2013), les meilleurs résultats n'interviennent pas lorsque le nombre de voisin maximum est supérieur à 30, certainement à cause des fortes variations locales de nos zones d'études.

Le *downscaling* par l'algorithme DS fonctionne bien pour les valeurs centrales des MNT mais pose des problèmes pour les valeurs extrêmes, comme le montre le peu de différences observables entre le MNT de référence et le MNT simulé, les histogrammes de distribution des altitudes ainsi que la localisation des plus grandes erreurs. Le fait que l'algorithme simule les valeurs par rapport aux voisins connus a une influence sur les problèmes à simuler les valeurs extrêmes, mais il faut aussi prendre en compte que lors de la préparation des données, la diminution de la résolution a provoqué un resserrement de l'histogramme.

## 12.2. Fluctuations

### 12.2.1. Zone 1

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la première zone uniquement avec les fluctuations sont compris entre 7.2 et 22.7 mètres. L'erreur a tendance à augmenter avec l'agrandissement du seuil. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des seuils faibles et un nombre de voisin maximum d'environ 10. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne augmentent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Cette tendance contredit les dires de Meerschman et al. (2013), comme pour la plupart des résultats provenant du *downscaling* des MNT en entier. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1.

La figure 35 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 10 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.

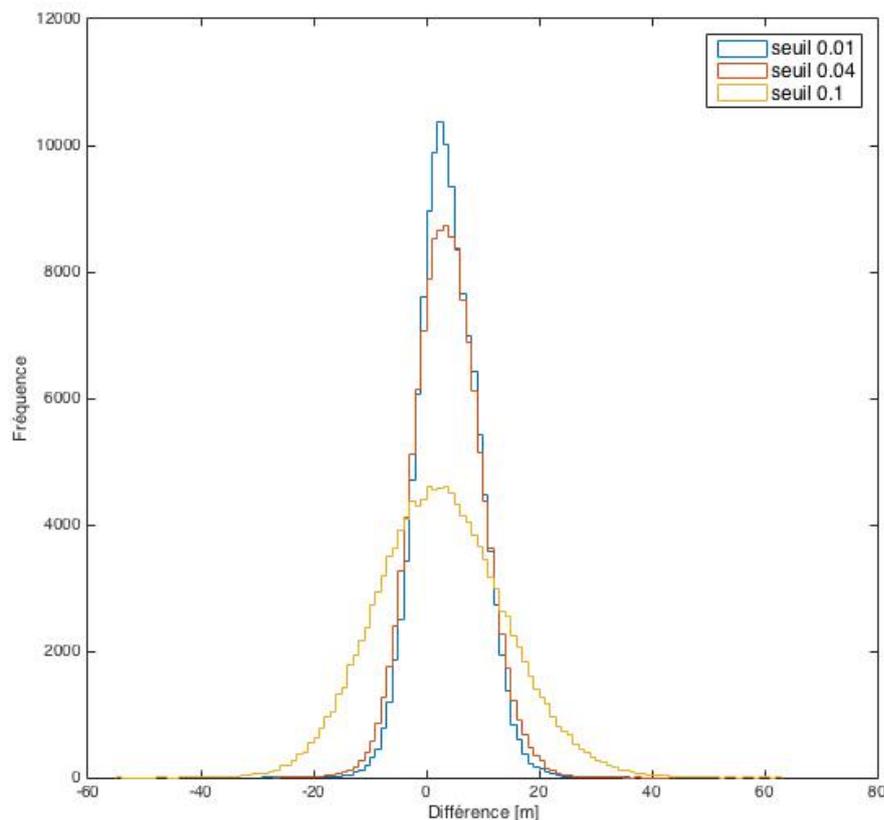
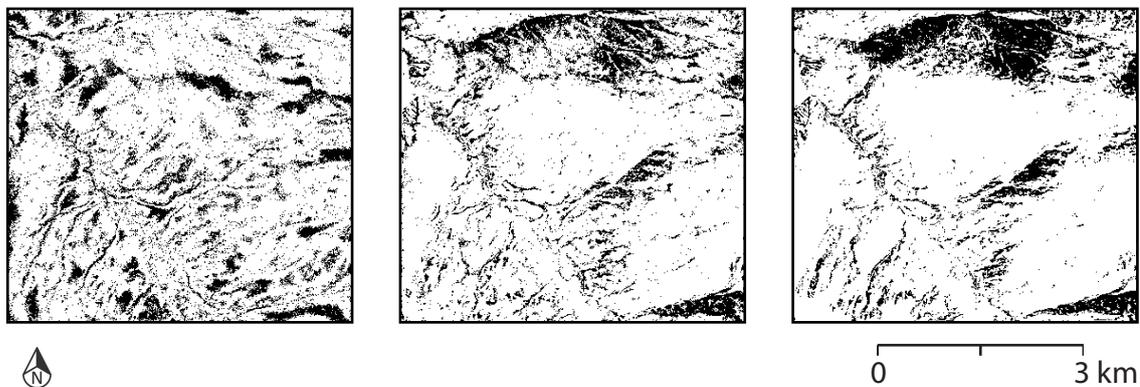


Figure 35 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 9.2 et 28.2 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente et plus le nombre maximum de voisin augmente. Par contre, le meilleur résultat ne se situe pas avec le plus grand nombre de voisin, mais lorsqu'il y a 10 voisins. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent où les fluctuations maximums et minimums se situent, comme l'illustre la figure 36. Ce phénomène provient du fait qu'en augmentant le seuil, les valeurs centrales sont mieux représentées et donc les extrêmes sont moins proches de la réalité.



**Figure 36 :** Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

Les histogrammes provenant des simulations avec des seuils 0.01, 0.04 et 0.1 suivent celui du MNT de base, comme le montre la figure 37. Comme attendu, après avoir analysé l'erreur quadratique moyenne, l'histogramme avec un seuil élevé est moins proche que celui avec un seuil faible. Il donne moins de valeurs dans les altitudes extrêmes, alors qu'il exagère les valeurs centrales, à cause de la plus grande liberté laissée par un seuil élevé. Il donne donc des valeurs plus standard.

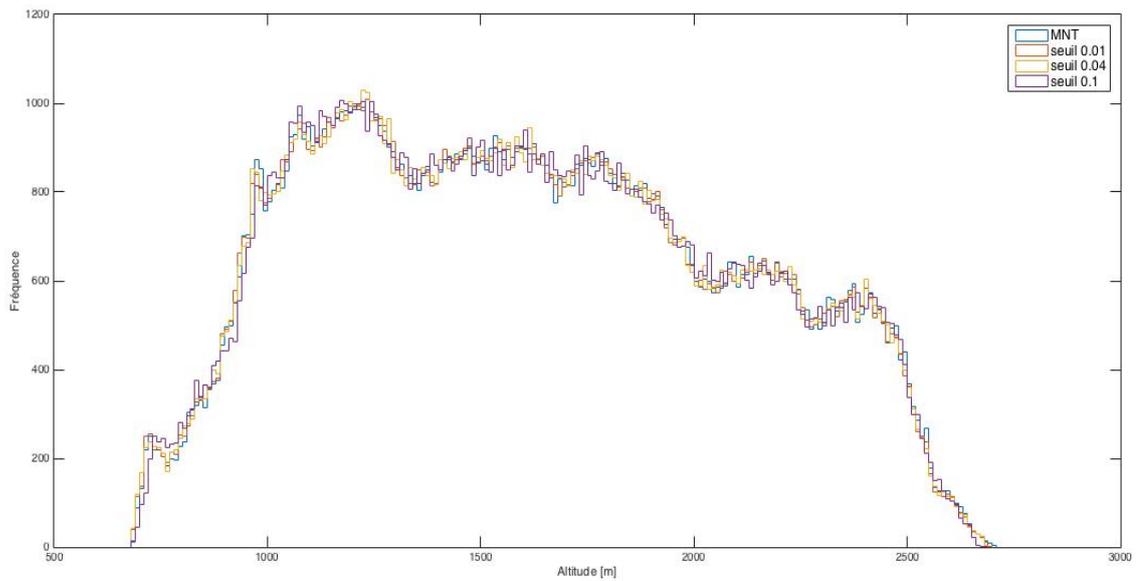


Figure 37 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 38 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

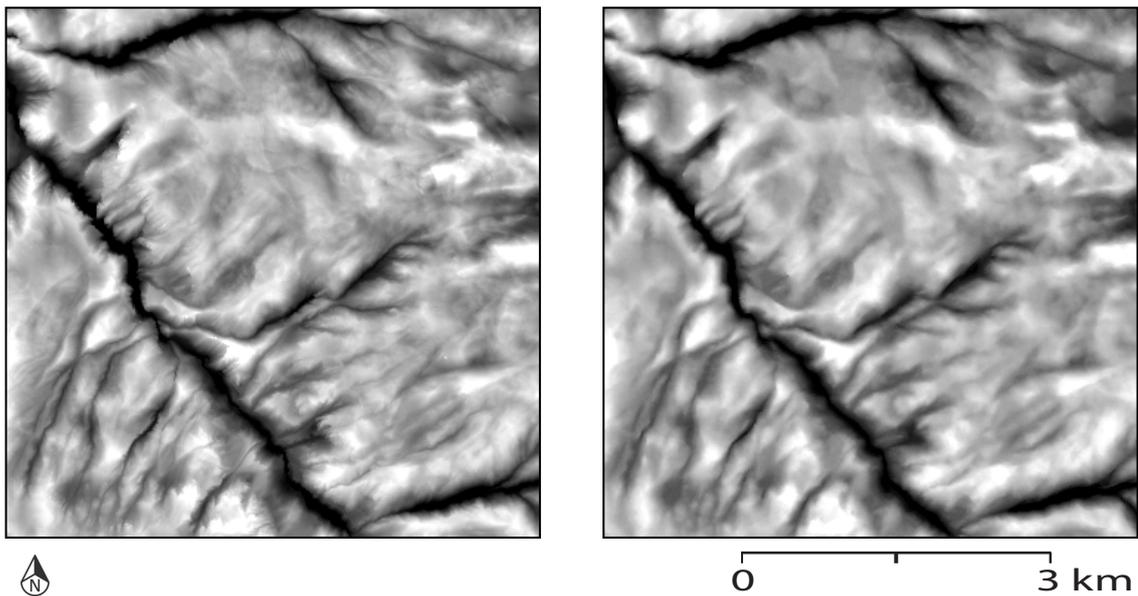


Figure 38 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.2.2. Zone 2

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la deuxième zone uniquement avec les fluctuations sont compris entre 3.9 et 12.3 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin compris entre 10 et 20. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne grandissent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1. Contrairement aux résultats de Meerschmann et al. (2013), le meilleur résultat pour cette zone se trouve lorsque le nombre maximum de voisin est de 10. Cela provient du fait qu'il y a de forts changements de fluctuations pour des petites zones et par conséquent, plus le nombre de voisin augmente, plus il y a de chance de trouver une valeur qui ne correspond pas forcément aux spécificités de la zone de recherche

Tout comme pour l'histogramme des différences d'altitude pour la deuxième zone avec l'entier du MNT, lors de la simulation avec le seuil 0.1, le pic s'étend sur les valeurs positives, comme le montre la figure 39. Cela provient certainement de la topographie de la zone d'étude, malgré le fait que seules les fluctuations sont prises en compte, les résultats montrent que la zone est séparée entre la plaine et le coteau. Plus le seuil grandit, moins il y a de résultat avec des faibles différences d'altitude et plus l'histogramme s'étend vers des valeurs positives.

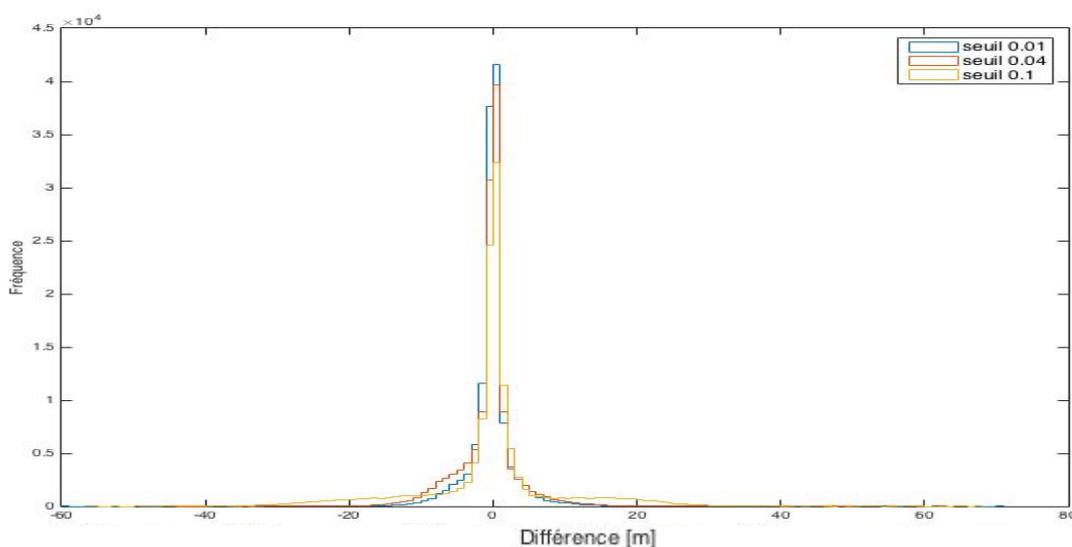


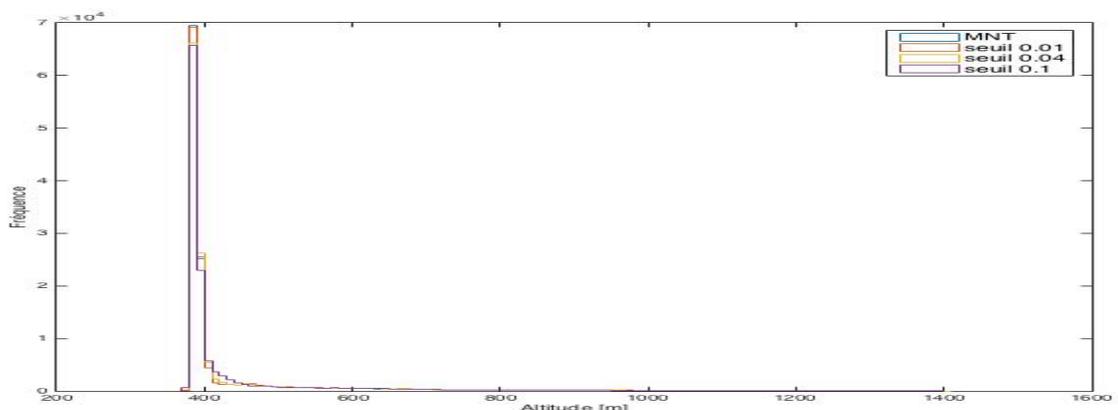
Figure 39 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 2.8 et 11.7 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente et plus le nombre maximum de voisin augmente. Le meilleur résultat est obtenu avec un nombre de voisin maximum compris ente 5 et 10. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent où les fluctuations maximums et minimums se trouvent, comme l'illustre la figure 40. La même explication que pour les autres zones peut être donnée pour expliquer cette tendance.



**Figure 40 :** Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

Comme le montre la figure 41, avec un seuil de 0.01, l'histogramme provenant du MNT *downscaler* est pratiquement identique à celui de base. Par contre, comme pour la première zone, avec le seuil à 0.1, l'histogramme diffère plus ; il sous-estime les valeurs extrêmes, mais surestime les valeurs centrales.



**Figure 41 :** Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 42 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Des différences sont visibles dans la plaine du Rhône. Elles proviennent du fait que l'algorithme a plus de mal à simuler les valeurs extrêmes, étant donné qu'il calcule les valeurs à simuler à partir des voisins.

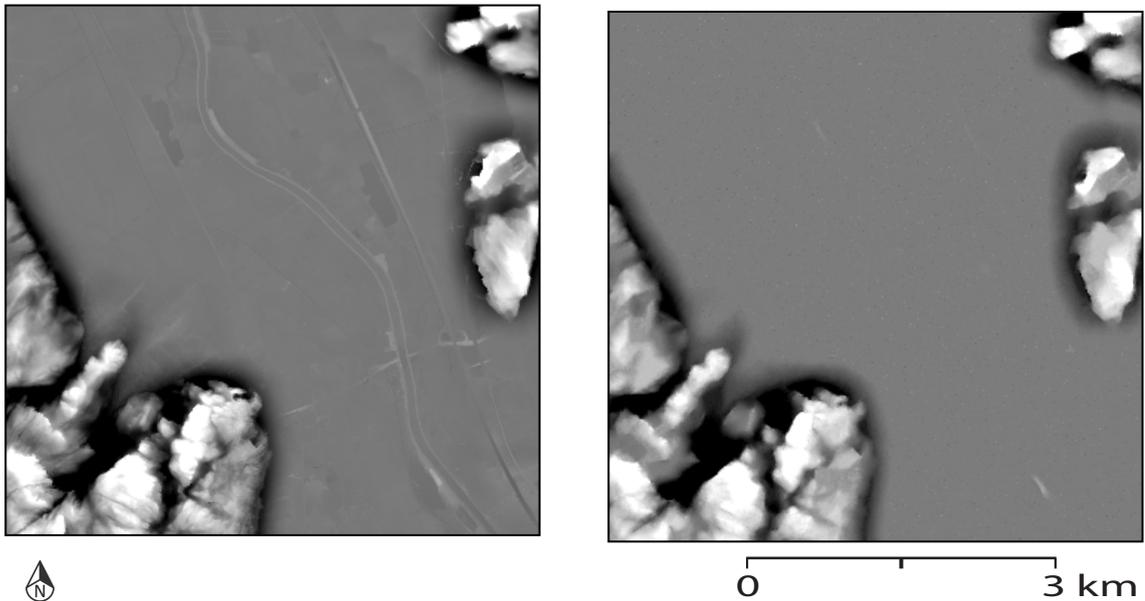


Figure 42 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.2.3. Zone 3

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la troisième zone uniquement avec les fluctuations sont compris entre 6.1 et 23.0 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin compris entre 10 et 20. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne augmentent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1. Contrairement aux résultats de Meerschmann et al. (2013), le meilleur résultat pour cette zone se trouve lorsque le nombre maximum de voisin est de 10, cela à cause des variations des fluctuations sur des petites distances.

La figure 43 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 10 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.

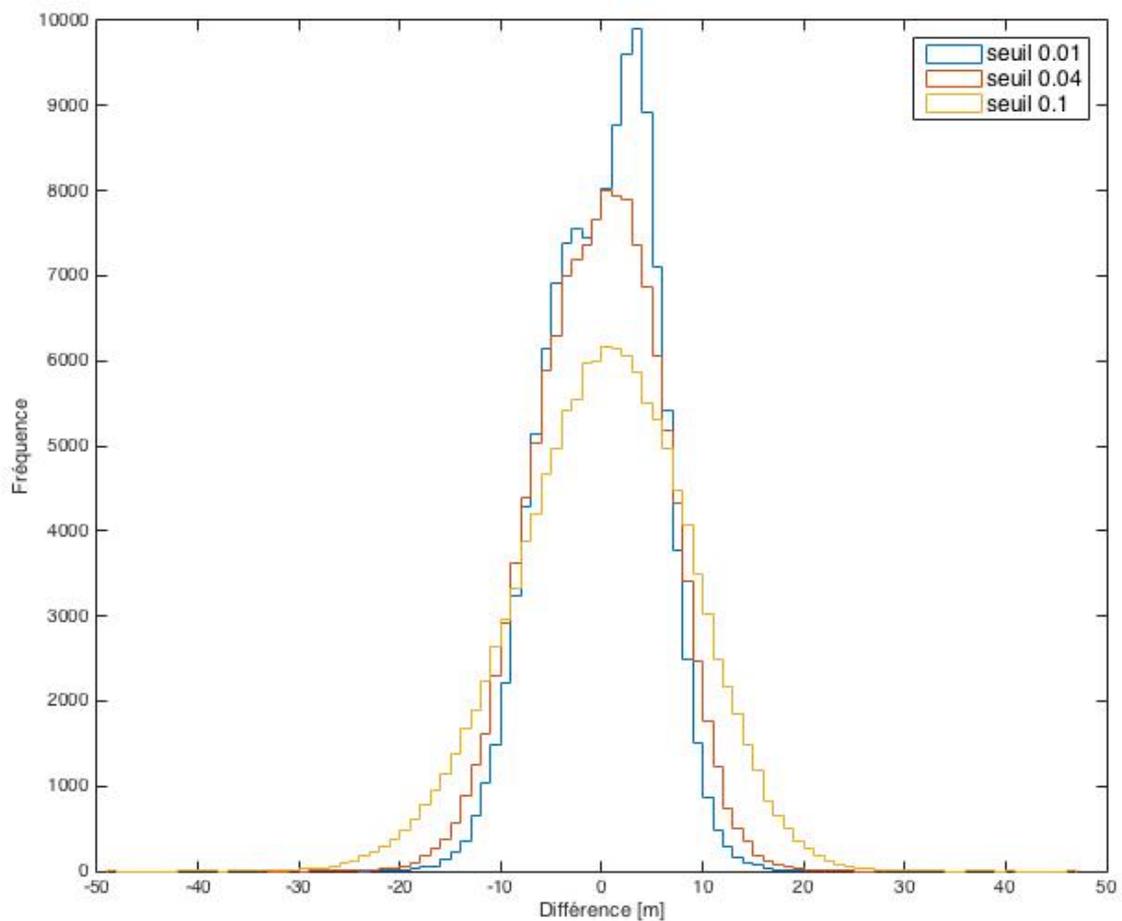


Figure 43 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 7.7 et 28.8 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente et plus le nombre maximum de voisin augmente. Le meilleur résultat est obtenu avec un nombre de voisin maximum de 10. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent où les fluctuations maximums et minimums se trouvent, comme l'illustre la figure 44. Cette tendance provient du fait qu'en augmentant le seuil, les valeurs centrales sont mieux représentées et donc les extrêmes sont moins proches de la réalité.

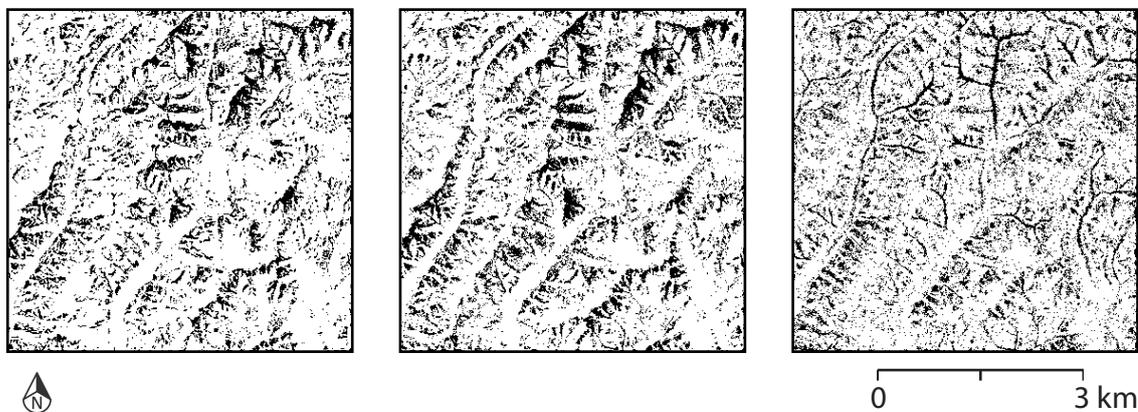


Figure 44 : Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

La distribution de l'altitude pour le MNT produit grâce au *downscaling* avec un seuil de 0.01 suit bien la forme générale du MNT de base. Par contre, avec un seuil plus élevé, le même phénomène que pour les autres zones se produit, comme la figure 45 le montre.

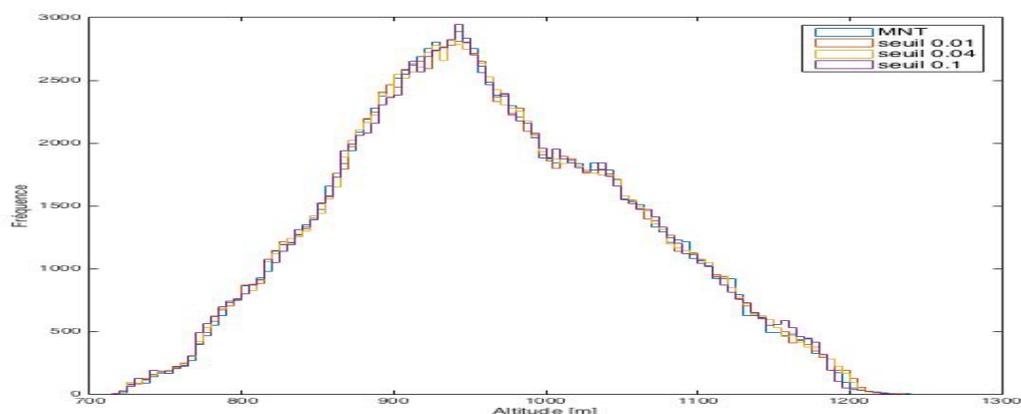


Figure 45 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 46 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

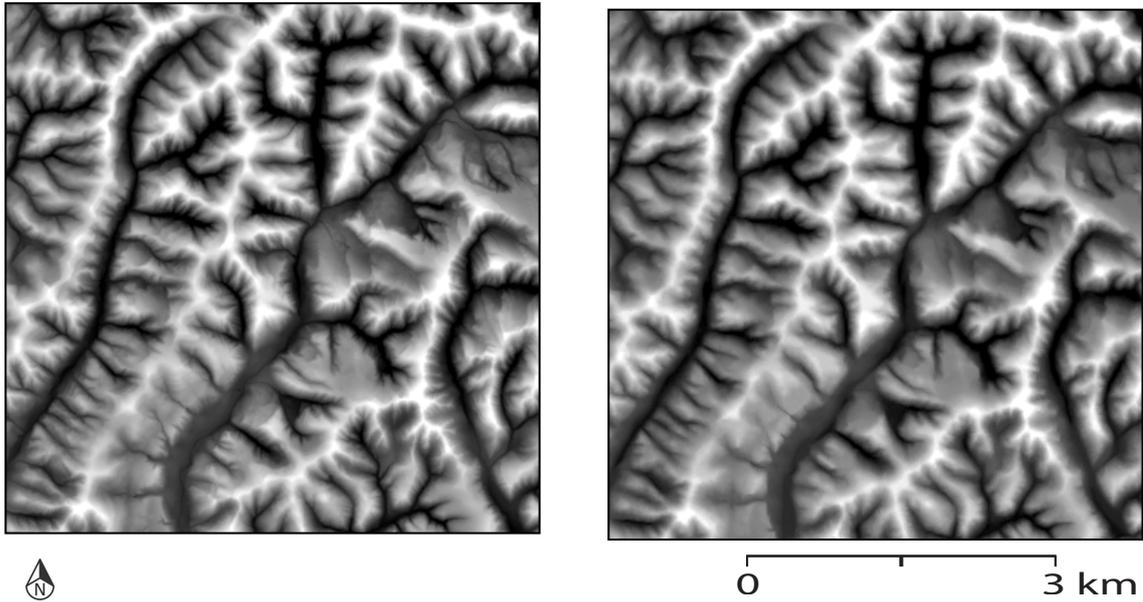


Figure 46 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

#### 12.2.4. Zone 4

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la troisième zone uniquement avec les fluctuations sont compris entre 5.1 et 21.6 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus en règle générale, avec des seuils faibles et un nombre de voisin compris entre 10 et 20. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne augmentent ensuite avec l'augmentation du nombre de voisin. Mais ils sont aussi moins bons si le nombre de voisin maximum diminue. En effet, le moins bon résultat des simulations intervient lorsque le seuil est 0.1 et que le nombre maximum de voisin est 1. Contrairement aux résultats de Meerschmann et al. (2013), le meilleur résultat pour cette zone se trouve lorsque le nombre maximum de voisin est de 10, cela à cause des variations des fluctuations sur des petites distances.

La figure 47 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le *downscaling* pour 10 voisins avec différentes valeurs de seuils. Cette dernière illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.

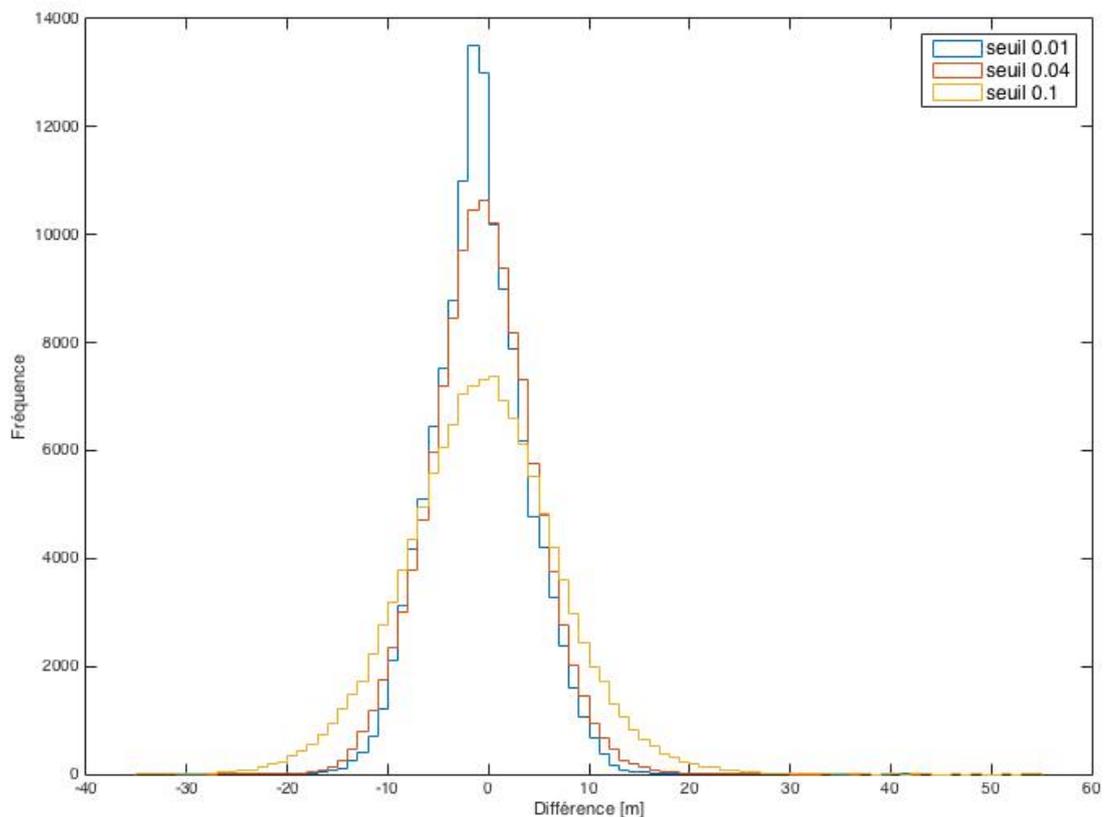


Figure 47 : Histogramme présentant les différences entre le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

Les valeurs des intervalles contenant le huitante pourcent des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du *downscaling* sont comprises entre 6.5 et 27.0 mètres. Comme pour l'erreur quadratique moyenne, les résultats ont tendances à être moins bons plus le seuil augmente et plus le nombre maximum de voisin augmente. Le meilleur résultat est obtenu avec un nombre de voisin maximum de 10. Plus le seuil augmente, plus les mauvais résultats, ceux qui ne sont pas dans l'intervalle des huitante pourcent, se concentrent où les fluctuations maximums et minimums se trouvent, comme l'illustre la figure 48. Ce phénomène provient du fait qu'en augmentant le seuil, les valeurs centrales sont mieux représentées et donc les extrêmes sont moins proches de la réalité.



**Figure 48 :** Illustrations des endroits où les résultats du *downscaling* sont les moins bons, à partir d'un nombre de voisin maximum de 10 et d'un seuil (de gauche à droite) de 0.01, 0.04 et 0.1.

Comme le montre la figure 49, avec un seuil de 0.01, l'histogramme provenant du MNT *downscaler* est pratiquement identique à celui de base. Par contre, comme pour la première zone, avec le seuil à 0.1, l'histogramme diffère plus ; il sous-estime les valeurs extrêmes, mais surestime les valeurs centrales.

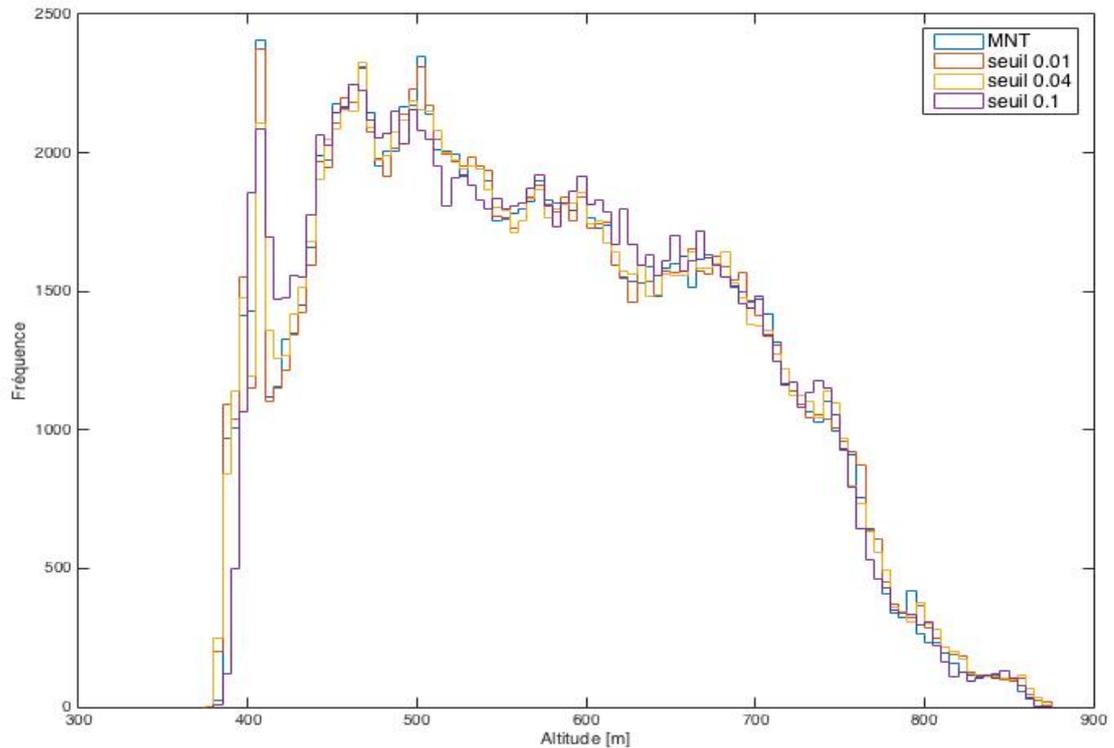


Figure 49 : Histogramme présentant la distribution des altitudes pour le MNT de base et les simulations de 10 voisins maximums pour les seuils 0.01, 0.04 et 0.1.

La figure 50 présente les MNT de terrain de base avec une référence de 15 mètres et celui avec de la meilleure simulation. Très peu de différences sont perceptibles à l'œil nu.

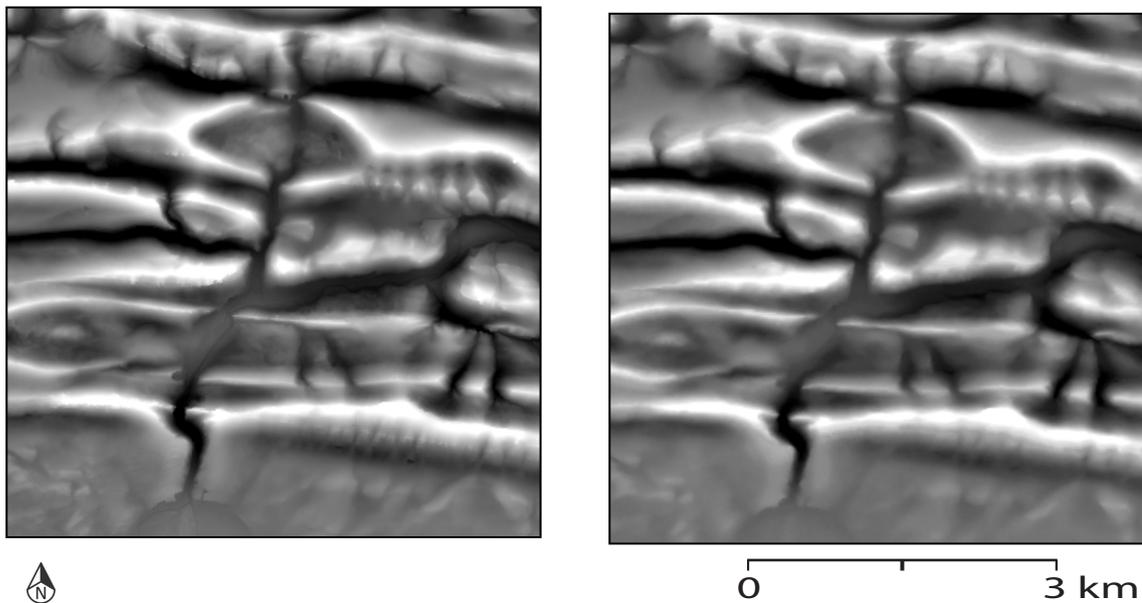


Figure 50 : MNT de référence à 15 mètres (à gauche) et MNT simulé par l'algorithme DS (à droite).

### 12.2.5. Synthèse des fluctuations

En ce qui concerne le *downscaling* à partir de l'algorithme DS uniquement sur les fluctuations, plus les seuils sont grands moins les résultats sont concluants. Le fait que la précision de la simulation avec un seuil plus élevé soit moins bonne est logique, puisqu'augmenter le seuil signifie laisser une plus grande marge d'erreur à la valeur recherchée.

Les meilleures simulations interviennent pour les petits seuils avec un nombre de voisin maximum supérieur à 1, mais ne dépassant pas les 30 voisins. Contrairement aux résultats trouvés par Meerschman et al. (2013), les meilleurs résultats n'interviennent pas lorsque le nombre de voisin maximum est supérieur à 30, certainement à cause des fortes variations locales de nos zones d'études.

Le *downscaling* par l'algorithme DS fonctionne bien pour les valeurs centrales des MNT mais pose des problèmes pour les valeurs extrêmes, comme le montre le peu de différences observables entre le MNT de référence et le MNT simulé, les histogrammes de distribution des altitudes ainsi que la localisation des plus grandes erreurs. Le fait que l'algorithme simule les valeurs par rapport aux voisins connus a une influence sur les problèmes à simuler les valeurs extrêmes, mais il faut aussi prendre en compte que lors de la préparation des données, la diminution de la résolution a provoqué un resserrement de l'histogramme.

### 12.3. Comparaison des approches

Pour les deux approches, celle avec l'entier du MNT et celle à partir uniquement des fluctuations, les résultats donnent les mêmes conclusions. Les simulations effectuées sur les quatre zones d'étude ont permis de montrer que les meilleurs résultats du *downscaling* à partir de l'algorithme DS surviennent lorsque les seuils sont faibles et que le nombre de voisin est inférieur à 30. Lorsque seulement les fluctuations sont prises en compte, le nombre de voisin maximum pour avoir les meilleurs résultats est plus faible que pour l'approche avec l'entier du MNT, cela provient du fait que les variations locales sont moins importantes dans la première approche.

L'approche de *downscaling* en ne prenant en compte que les fluctuations de MNT permet d'obtenir de meilleurs résultats que celle avec l'entier du MNT. Cela provient du fait que les différences d'altitude entre les fluctuations sont plus faibles que celles du MNT complet.

#### 12.4. Influence de la dimension fractale

Afin de déterminer si la dimension fractale a une influence sur la qualité du *downscaling* à partir de l'algorithme DS, il faut comparer les résultats des simulations des différentes zones d'étude. Il n'est pas possible d'obtenir des résultats probants en se basant sur les résultats présentés précédemment dans ce mémoire, car la différence d'altitude entre le point le plus haut et le plus bas à l'intérieur des zones n'est pas la même.

Afin de comparer les résultats, il a fallu normaliser les différentes zones d'étude par leur minimum et leur maximum. Ainsi, les altitudes des MNT sont comprises entre 0 et 1, grâce à l'équation suivante :

$$z = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (12)$$

A partir des nouvelles valeurs des MNT et des fluctuations, l'algorithme DS fait des simulations pour les meilleures combinaisons entre le seuil et le nombre maximum de voisin. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour chaque zone avec l'ensemble du MNT et des fluctuations sont présents dans le tableau 19.

		Nombre de voisin maximum				
		5	10	15	20	30
Zone 1	MNT en entier	0.0119	0.0101	0.0093	0.0089	0.0089
	Fluctuations	0.0341	0.0336	0.0344	0.0358	0.0387
Zone 2	MNT en entier	0.0102	0.0088	0.0086	0.0089	0.0087
	Fluctuations	0.0255	0.0262	0.0271	0.0276	0.0290
Zone 3	MNT en entier	0.0137	0.0128	0.0130	0.0137	0.0156
	Fluctuations	0.0420	0.0390	0.0408	0.0428	0.0471
Zone 4	MNT en entier	0.0128	0.0115	0.0115	0.0123	0.0139
	Fluctuations	0.0343	0.0334	0.0343	0.0353	0.0375

Tableau 19 : Résultats de l'erreur quadratique moyenne en mètre pour les quatre zones avec l'entier du MNT ainsi qu'avec uniquement les fluctuations, avec le seuil 0.01 et un nombre de voisin maximum variable.

Tout d'abord, il faut remarquer que contrairement aux résultats précédents, les meilleurs résultats proviennent des simulations avec l'entier du MNT. Cela provient du fait que les dimensions fractales des zones avec l'entier du MNT sont plus élevées que celles avec uniquement les fluctuations et que contrairement aux résultats présentés plus tôt dans ce document, les différences d'altitude de chaque zone avec ou sans la moyenne lissée sont les mêmes.

Ensuite, contrairement aux hypothèses de base, lorsque la dimension fractale globale est la plus importante les résultats ne sont pas les meilleurs. En effet, au chapitre 10.1, les résultats de la dimension fractale 3D globale montre que la deuxième zone a une dimension fractale inférieure aux autres zones, alors que c'est celle qui présente les meilleurs résultats pour l'erreur quadratique moyenne dans cette partie. Par contre, les résultats obtenus pour cette partie montre que l'erreur quadratique moyenne est plus faible lorsque la dimension fractale locale est élevée.

Etant donné que l'algorithme DS produit ses simulations grâce au voisinage, il est donc logique que c'est la dimension fractale locale qui influence les résultats et non pas la dimension fractale 3D globale, donc il n'est pas forcément nécessaire que la zone soit stationnaire de manière générale.

## 12.5. Comparaison avec une autre méthode

Dans cette partie, l'algorithme que le doctorant R. Luiz Gustavo développe pour sa thèse de doctorat est brièvement présenté, ainsi que la comparaison entre les résultats qu'il a obtenu pour le *downscaling* d'un facteur deux sur une zone d'étude dans les Alpes suisses, avec les résultats provenant de l'algorithme DS.

### 12.5.1. Brève présentation

La méthode développée par R. Luiz Gustavo est un algorithme se basant sur la géostatistique du multipoint afin d'améliorer la résolution de MNT. L'algorithme utilise des patches pour simuler les valeurs manquantes.

Contrairement à l'algorithme DS, l'image d'entraînement n'est pas le MNT de base, mais des images de télédétection à haute résolution ainsi que des données à haute résolution (Luiz Gustavo, Mariethoz & Lane, 2017b). Une des difficultés de cette méthode est le choix des images d'entraînement. L'algorithme commence par simuler les structures à large échelle et termine par les éléments plus fins. Il simule la topographie générale grâce à des fonctions paramétriques tandis que les structures d'élévation résiduelles sont simulées stochastiquement à partir d'une approche basée sur la distance (Luiz Gustavo, Mariethoz & Lane, 2017a). Les voisins ne possèdent pas tous la même valeur, elle varie en fonction de la distance.

### 12.5.2. Comparaison des résultats

Le *downscaling* pour comparer les deux méthodes a été fait sur un MNT avec une résolution de 32 mètres, donc le résultat de la simulation donne un MNT avec une résolution de 16 mètres.

Les résultats obtenus grâce à l'algorithme de R. Luiz Gustavo donnent une erreur quadratique moyenne de 2.06 mètres pour les éléments les plus fins et de 0.27 mètres pour la topographie générale.

Les meilleurs résultats obtenus avec l'algorithme DS donne une erreur quadratique moyenne de 3.86 mètres pour le MNT en entier et de 3.43 mètres pour le *downscaling* uniquement sur les fluctuations, qui peuvent plus ou moins s'apparenter à l'échelle la plus fine de l'autre méthode.

Les résultats sont meilleurs avec l'algorithme de R. Luiz Gustavo. La figure 51 montre où les erreurs sont le plus grandes pour les deux méthodes. Malgré le fait que le nouvel algorithme améliore la qualité du *downscaling*, il rencontre toujours des difficultés avec les valeurs extrêmes, mais dans une moins grande mesure.

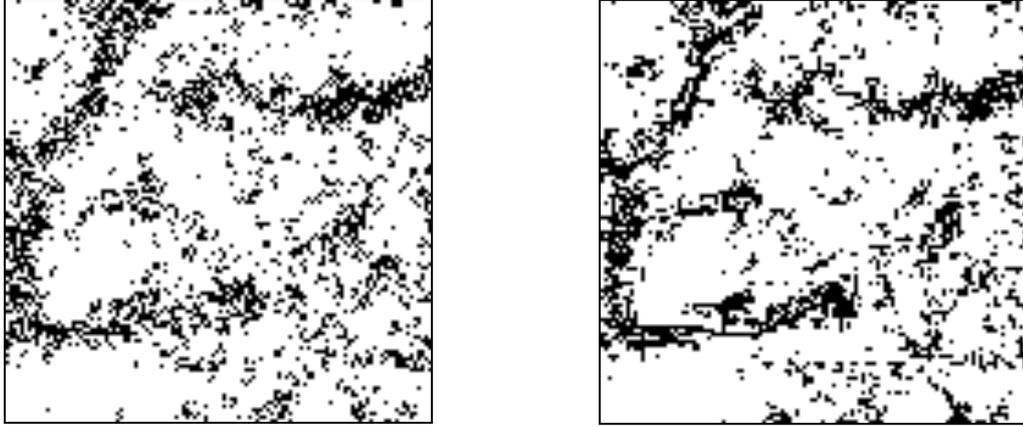


Figure 51 : Illustration des moins bonnes valeurs simulés par l'algorithme de R. Luiz Gustavo (à gauche) et par l'algorithme DS (à droite).

# V<sup>ème</sup> PARTIE : CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

---

## 13. Conclusion

Dans ce mémoire, deux méthodes pour améliorer la résolution de MNT à partir de l'algorithme DS sont présentées. Pour pouvoir faire un *downscaling*, l'algorithme pose l'hypothèse d'autosimilarité afin de propager les statistiques spatiales d'une échelle à une autre. En premier lieu, les pixels du MNT de base sont répartis dans une grille avec un nombre de ligne et de colonne deux fois supérieurs à celles de base. Ensuite, les valeurs manquantes sont complétées grâce à la géostatistique du multipoint.

Les simulations ont été faites sur des MNT entiers ainsi qu'uniquement sur les fluctuations de ces derniers en variant le seuil et le nombre maximum de voisin. Pour ces deux méthodes, les résultats montrent que pour améliorer au mieux la résolution des MNT, il faut que le seuil soit faible. En effet, lorsque le seuil augmente, l'algorithme accepte plus facilement des valeurs éloignées de la valeur réelle, car il permet une plus grande différence entre le résultat du calcul de la distance entre les valeurs de l'image d'entraînement et de celle de la simulation. En ce qui concerne le nombre maximum de voisin, les résultats des deux méthodes tendent à dire qu'il ne devrait pas être trop grand. En effet, lorsqu'il est élevé, les variations locales ne sont pas suffisamment prises en compte. Puisque l'algorithme fonctionne grâce au voisinage, les régions avec les plus petites et les plus grandes altitudes sont mal simulées.

A partir des observations faites dans ce mémoire, afin d'obtenir le meilleur *downscaling* de MNT avec l'algorithme DS, il faut faire des simulations avec un seuil de 0.01 et un nombre maximum de voisin entre 10 et 30. Le temps de calcul augmente avec la diminution du seuil, il faut donc choisir entre un temps de calcul plus élevé et une moins bonne simulation.

Afin de voir si la dimension fractale a une influence sur le résultat du *downscaling* à partir de l'algorithme DS, les histogrammes des quatre zones d'étude ont été normalisés par leur minimum et leur maximum. Les résultats montrent que la

dimension fractale générale influence moins les simulations que la dimension fractale locale. Donc, la stationnarité de la zone en elle-même est moins importante que la stationnarité des régions qui la composent. Cela provient du fait que l'algorithme fonctionne grâce au voisinage.

Les simulations à partir des fluctuations donnent des résultats pour l'erreur quadratique moyenne inférieurs à celles à partir de l'entier du MNT, lorsque les histogrammes ne sont pas normalisés. Il faut donc en conclure que le *downscaling* des MNT entiers est plus performant, mais vu que les différences d'altitude sont plus élevées, les erreurs sont plus grandes.

Pour avoir de meilleurs résultats, il faudrait réussir à améliorer la simulation des altitudes maximales et minimales, car comme l'a montré ce mémoire, les plus grandes erreurs se situent dans ces altitudes. La comparaison avec l'algorithme de R. Luiz Gustavo montre également qu'il rencontre des problèmes de simulations de ces régions.

## Liste des abréviations

ASTER : *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

DS : Direct Sampling

METI : ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie du Japon

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NASA : *National Aeronautics and Space Administration*

SRTM : *Shuttle Radar Topography Mission*

## Références bibliographiques

Abedini, M. J., & Shaghaghian, M. R. (2009). Exploring scaling laws in surface topography. *Chaos, Solitons and Fractals*, 42, 2373–2383, doi : 10.1016/j.chaos.2009.03.121.

Alcolea, A., & Renard, P. (2010). Blocking moving window algorithm : Conditioning multiple-point simulations hydrogeological data, *Water Resources Research*, 46(8), 1-18, doi : 10.1029/2009WR007943.

ArcGIS Pro (2017, 12 janvier). *Jeu d'outils traitement raster* [Page Web]. Disponible sur : <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/data-management/resample.htm> (consulté le 22.03.2017).

Arpat, B., & Caers, J. (2007). Conditional simulations with patterns. *Mathematical Geology*, 39(2), 177-203.

Atkins, C., Bouman, C., & Allebach, J. (1999). *Tree-based resolution synthesis*. In : Proceedings of the conference on image processing, image quality, image capture systems conferences (PICS-99). Savannah, USA.

Band, L. E. (1986). Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22, 15-24, doi : 10.1029/WR022i001p00015.

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69, doi : 10.1080/02626667909491834.

Chilès, J.-P. (2004). *La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications* (mémoire de licence). Université Pierre et Marie Curie, Institut des sciences de la terre, Paris, France.

De Fouquet, C. (2006). *La modélisation géostatistique des milieux anthropisés* (mémoire de licence). Université Pierre et Marie Curie, Institut des sciences de la terre, Paris, France.

Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1992). *Geostatistical software library and user's guide (GSLIB)*. New York : Oxford University Press.

El Ouassini, A., Saucier, A., Marcotte, D., & Favis, B. (2008). A patchwork approach to stochastic simulation: a route towards the analysis of morphology in multiphase systems. *Chaos Solitons Fractals*, 36(2), 418-436, doi : 10.1016/j.chaos.2006.06.100.

Farsiu, S., Robinson, D., Elad, M., & Milanfar, P. (2004). Advances and challenges in super-resolution. *Inc. Int J imaging systems technology*, 14(2), 47-57, doi : 10.1002/ima.20007.

Fleurant, C. (2015). Génération de semis de points fractals : une méthode du comptage de boîtes inversée, *Cybergeo : European Journal of Geography : Systèmes, Modélisation, Géostatistiques* (736), doi : 10.4000/cybergeo.27164.

Freeman, W.T., Jone, T.R., & Pasztor, E.C. (2002). Example-based super-resolution. *IEEE Computer graphics and applications*, 22(2), 56-65, doi : 10.1109/38.988747.

Guardiano, F., & Srivastava, M. (1993). Multivariate geostatistics : Beyond bivariate moments, *Geostatistics-Troia*, 5, 133-144.

Guillot, G. (2004). *Introduction à la géostatistique* (polycopié). Ecole d'ingénieur à Paris, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, France.

Hayakawa, Y. S., Oguchi, T., & Lin, Z. (2008). Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3, *Geophysical Research Letters*, 35, L17404, doi:10.1029/2008GL035036

Huang, J., & Turcotte, D. L. (1989). Fractal mapping of digitized images : application to the topography of Arizona and comparisons with synthetic images, *Journal of Geophysical Research*, 94(B6), 7491-7495, doi : 10.1029/JB094iB06p07491.

Journel, A., & Zhang, T. (2006). The necessity of a multiple-point prior model. *Mathematical Geology*, 38(5), 591-610.

Katz, D.M. (2010, 18 octobre). How long is the Coastline of the Law: Additional Thoughts on the Fractal Nature of Legal Systems [Page Web]. Disponible sur : <https://computationallegalstudies.com/2010/10/18/how-long-is-the-coastline-of-the-law-additional-thoughts-on-the-fractal-nature-of-legal-systems/> (consulté le 18.12.17).

Kent, C., & Wong, J. (1982). An index of littoral zone complexity and its measurement. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39, 847-853, doi : 10.1139/f82-115.

Klinkenberg, B., & Goodchild, M. F. (1992). The fractal properties of topography : a comparison of methods, *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(3), 217-234, doi : 10.1002/esp.3290170303.

Ling, F., Zhang, Y., Foody, G. M., Fellow, IEEE, Li, X., ... Du, Y. (2016). Learning-based superresolution land cover mapping, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 54(7), doi : 10.1109/TGRS.2016.2527841.

Long, M., & Peng, F. (2013). A box-counting method with adaptable box height for measuring the fractal feature of images, *Radioengineering*, 22(1).

Luiz Gustavo, R., Mariethoz, G., & Lane, S.N. (2017a). *Multiple-point simulation of sub-pixel topography on low-resolution digital elevation model conditioned to high-resolution satellite imagery*. [Conférence].

Luiz Gustavo, R., Mariethoz, G., & Lane, S.N. (2017b). *Spatial modeling and uncertainty assessment of fine scale surface processes based on coarse terrain elevation data*. In : GSA Annual Meeting in Seattle, USA.

Mandelbrot, B. (1967). How long is the coast of Britain ? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 156(3775), 636-638.

Mandelbrot, B. (1977). *Fractals : Form, Chance and Dimension*. San Francisco : W.H. Freeman.

Mandelbrot, B. (1982). *The fractal geometry of nature*. New York: W.H. Freeman and company.

Mark, D.M., & Goodchild, M.F. (1982). Topologic model for drainage networks with lakes, *Water Resources Research*, 18(2), 275-280, doi:10.1029/WR018i002p00275.

Mariethoz, G. (2014). *DS User Guide : for version 3.37*.

Mariethoz, G., & Caers, J. (2014). *Multiple-Point Geostatistics : stochastic modeling with training images*, Oxford : Wiley-Blackwell.

Mariethoz, G., & Renard, P. (2010). Reconstruction of incomplete data sets or images using direct sampling, *Mathematical Geosciences*, 42(3), 245-268, doi : 10.1007/s11004-010-9270-0

Mariethoz, G., Renard, P., & Straubhaar, J. (2010). The direct sampling method to perform multiple-point simulations. *Water Resources Research*, 46, W11536, doi : 10.1029/2008WR007621

Mariethoz, G., Renard, P., & Straubhaar, J. (2011). Extrapolating the fractal characteristics of an image using scale-invariant multiple-point statistics. *Mathematical Geosciences*, 43, 783-797, doi : 10.1007/s11004-011-9362-5

Meerschman, E., Pirot, G., Mariethoz, G., Straubhaar, J., Van Meirvenne, M., & Renard, P. (2013). A practical guide to performing multiple-point statistical simulations with the direct sampling algorithm, *Computers & Geosciences*, 52, 307-324, doi : 10.1016/j.cageo.2012.09.019.

Montgomery, D. R., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Channel network source representation using digital elevation models, *Water Resources Research*, 29(12), 3925-3934, doi : 10.1029/93WR02463.

Morris, D. G., & Heerdegen, G. (1988). Automatically derived catchment boundaries and channel networks and their hydrological applications, *Geomorphology*, 1, 131-141.

Moussa, R., & Bocquillon, C. (1993). Morphologie fractale du réseau hydrographique, *Hydrological Sciences Journal*, 38(3), 187-201, doi : 10.1080/02626669309492662.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2009, 29 juin). *ASTER Imagery*. [Page Web]. Disponible sur :

<http://www.nasa.gov/topics/earth/features/20090629.html> (consulté le 15.04.16).

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2016, 6 mai). *Shuttle Radar Topography Mission* [Page Web]. Disponible sur : <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (consulté le 05.05.16).

Office fédéral de topographie (2015, 7 septembre). *MNT25* [Page Web]. Disponible sur : <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/dhm25.html> (consulté le 10.02.16).

Ouédraogo, M., Degré, A., & Debouche, C. (2014). Synthèse bibliographique : le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation, *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(3), 407-421.

Parrot, J.-F. (2009). *Software FROG : Fractal researches on Geosciences*. [Manuel d'utilisation].

Puech, C., Thommeret, N., Kaiser, B., Bailly, J. S., Jacome, A., Rey, F., & Mathys, N. (2009). MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2, 141-152.

Remy, N., Boucher, A., & Wu, J. (2009). *Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide*. Cambridge : Cambridge university press.

Renard, P. (2007). Stochastic Hydrogeology: What Professionals Really Need? *Ground Water*, 45(5): 531-541, doi : [10.1111/j.1745-6584.2007.00340.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00340.x)

Rezaee, H., Mariethoz, G., Koneshloo, M., & Asghari, O. (2013). Multiple-point geostatistical simulation using the bunch-pasting direct sampling method. *Computers & Geosciences*, 52, 293-308, doi: 10.1016/j.cageo.2013.01.020.

Robert, A., & Roy, A. G. (1993). La modélisation fractale et la variabilité spatiale des phénomènes naturels. *Géographie physique et Quaternaire*, 47, 3-19, doi : 10.7202/032928ar

Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell Labs Technical Journal*, 27(3), 379-423, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

Shelberg, M.C., Moellering, H., & Lam, N. (1982). Measuring the fractal dimensions of empirical cartographic curves: Proceedings, *Fifth International Symposium on Computer-Assisted Cartography (Auto Carto V)*, 481–490.

Smith, T. R., Zhan, C., & Gao, P. (1990). A knowledge-based, two-step procedure for extracting channel networks from noisy DEM data, *Computer Geoscience*, 16, 777-786.

Straubhaar, J., Renard, P., Mariethoz, G., Froideveaux, R., & Besson, O. (2011). An improved parallel multiple-point algorithm using a list approach, *Mathematical geosciences*, 43(3), 305-328, doi : 10.1007/s11004-011-9328-7.

Strebelle, S. (2002). Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics, *Mathematical Geology*, 34(1), 1-21.

Stroubek, F., Cristobal, G., & Flusser, J. (2007). A unified approach to superresolution and multichannel blind deconvolution, *IEEE transactions on image processing*, 16(9), 2322-2332.

Taud, H., & Parrot, J.-F. (2005). Measurement of DEM roughness using the local fractal dimension, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 11(4), 327-338.

Tsai, R.Y., & Huang, T.S. (1984). Multiframe image restoration. In: Advance in computer vision and image processing. JAI Press, Cambridge, 317-339.

Turcotte, D. L. (1992). *Fractals and chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge : Cambridge University Press.

Von Koch, H. (1906). Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes. *Acta Mathematica*, 30(1), 145-174.

Wackernagel, H. (2004). *Géostatistique et assimilation séquentielle de données* (mémoire de licence). Université Pierre et Marie Curie, Institut des sciences de la terre, Paris, France.

Wu, J., Boucher, A., & Zhang, T. (2008). A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM, *Computer and Geosciences*, 34(12), 1863-1876, doi:10.1016/j.cageo.2007.08.008

Yin, G., Mariethoz, G., & McCabe, M.F. (2017). Gap-filling of Landsat 7 imagery using the direct sampling method. *Remote Sensing*, 9(1), 12, doi:10.3390/rs9010012.

Zhang, W., & Montgomery, D. R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019-1028.

Zhang, X., Drake, N.A., Wainwright, J., & Mulligan, M. (1999). Comparaison of slope estimates from low resolution DEMs : scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 763-779, doi : 10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J

Zlotnik, V. A., Zurbuchen, B. R., Ptak, T., & Teutsch, G. (2000). Support volume and scale effect in hydraulic conductivity : experimental aspects. In: Theory, modelling, and field investigations in hydrogeology : A special volume in honor of Shlomo P Neuman's 60th birthday. *Geological Society of America*, 215-231.

## Annexes

### DS paramètres

```

/*****
THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND
CONTRIBUTORS "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES,
INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF
MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE
DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT OWNER OR CONTRIBUTORS
BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR
CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT
OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR
BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF
LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING
NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS
SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.
*****/

    /*** Use C-style comments in this file ***/

/*** FILE GENERATED WITH WriteParamsFile.m SEE USER MANUAL AND PhD
    THESIS FOR MEANING OF THE PARAMETERS ***/

//METHOD
SR 2      // Simulation method

//FILES
ti1      // File containing training images.
none     // File containing angles map.
none     // File containing affinity maps.
none     // File containing conditioning data points.
test     // Prefix for the simulation output files.
none     // Prefix for the vtk (paraview) file.
none     // Prefix for the file name for the report.

//PARALLELIZATION
2        // OpenMP version: number of threads.s).

//REALIZATIONS
10       // Number of realizations.

//GRID
200 200 1 // Number of cells in simulation grid (x,y,z).
1 1 1    // Size of cells (x,y,z).
1 1 1    // Origin of simulation grid (x,y,z).

```

```
//NEIGHBORHOOD
100 100 0 // Maximum search distance (x,y,z).
1 1 1 // Anisotropy ratios in the search radius(x,y,z).

//DS PARAMETERS
0.01 // Threshold position, between 0 and 1. -1 for automatic threshold.
1.0 // Max. fraction of the TI to scan.

//TRANSFORMATIONS
0 // Use of rotations.
0 // Use of affinity.

//PATH
0 // Path type.

//VARIABLES
1 // Number of variables to simulate jointly.
1 // Type of each variable.
1 // Relative weight of each variable.
1 // Weight of conditioning data for each variable.
15 // Maximum number of points in neighborhood for each simulated variable.
0 // Exponent of the distance function in the template for each variable.

//SYN-PROCESSING
0 0 0 0 // Syn-processing parameters. 4 values

//POST-PROCESSING
0 1 // Post-processing parameters. 2 values.

//PARAMETERS REDUCTION
1 // Moment when parameters reduction takes place.

//MISC
1350 // Initial random seed.
1 0 // Display options. 2 values:

END
```