

Table des matières

I^{ère} PARTIE : INTRODUCTION

1. Introduction	1
2. Problématique	3
2.1. Plan de la recherche.....	3

II^{ème} PARTIE : CADRE THEORIQUE

3. Géostatistique.....	4
3.1. Multipoint.....	4
3.2. Echantillonnage direct.....	5
4. Fractal.....	7
4.1. Définition.....	7
4.2. Dimension fractale.....	8
5. Downscaling.....	9
6. Présentation des zones d'étude	11
6.1. Zone 1	11
6.2. Zone 2	12
6.3. Zone 3	13
6.4. Zone 4	14
6.5. Autres.....	15

III^{ème} PARTIE : METHODOLOGIE

7. Préparation des données de base	16
8. Méthode d'échantillonnage direct	18
8.1. Fonctionnement	18
8.2. Paramètres.....	19
9. Méthode pour l'acquisition des données	21
10. Dimension fractale	22

IV^{ème} PARTIE : PRESENTATION, ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

11. Résultats	24
11.1. Zone 1.....	24
11.1.1. Tout MNT	24
11.1.1.1. Erreur quadratique moyenne.....	24
11.1.1.2. Moyenne.....	25
11.1.2. Fluctuation	26
11.1.2.1. Erreur quadratique moyenne.....	26
11.1.2.2. Moyenne.....	27
11.2. Zone 2.....	27
11.2.1. Tout MNT	28
11.2.1.1. Erreur quadratique moyenne.....	28
11.2.1.2. Moyenne.....	28
11.2.2. Fluctuation	29
11.2.2.1. Erreur quadratique moyenne.....	29
11.2.2.2. Moyenne.....	30
11.3. Zone 3.....	30
11.3.1. Tout MNT	31
11.3.1.1. Erreur quadratique moyenne.....	31
11.3.1.2. Moyenne.....	32
11.3.2. Fluctuation	32
11.3.2.1. Erreur quadratique moyenne.....	32
11.3.2.2. Moyenne.....	33
11.4. Zone 4.....	34
11.4.1. Tout MNT	34
11.4.1.1. Erreur quadratique moyenne.....	34
11.4.1.2. Moyenne.....	34
11.4.2. Fluctuation	35
11.4.2.1. Erreur quadratique moyenne.....	35
11.4.2.2. Moyenne.....	35
12. Interprétation et analyse des résultats.....	37
12.1. Tout MNT.....	37
12.1.1. Zone 1	37
12.1.2. Zone 2	40

12.1.3. Zone 3	42
12.1.4. Zone 4	44
12.1.5. Résumé.....	46
12.2. Fluctuation.....	46
12.2.1. Zone 1	46
12.2.2. Zone 2	47
12.2.3. Zone 3	48
12.2.4. Zone 4	49
12.2.5. Résumé.....	50
12.3. Comparaison des approches.....	50

I^{ère} PARTIE : INTRODUCTION

1. Introduction

Les modèles numériques de terrains (MNT) sont des représentations en trois dimensions de la topographie. 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 et 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 (Mariéthoz, 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 et 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 et 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).

Ce mémoire s'intéresse à améliorer la résolution de MNT existant, en se basant sur la caractéristique fractale des surfaces topographiques naturelles (Turcotte, 1992) et en utilisant la technique géostatistique de l'échantillonnage direct.

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 d'échantillonnage direct ?

La base théorique qui permet de répondre à cette question de recherche provient du rapport scientifique de Mariéthoz & 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 2 avec l'algorithme d'échantillonnage direct. 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 est fractale. Il doit donc y avoir une invariance d'échelle ainsi qu'une stationnarité. En se basant sur cette hypothèse, ce rapport tente d'améliorer la résolution des MNT grâce à la géostatistique du multi-point, et plus précisément grâce à l'échantillonnage direct. Pour ce faire, ce travail recherche comment obtenir de bon résultat en faisant un downscaling de facteur 2 grâce à l'algorithme d'échantillonnage direct.

2.1. Plan de la recherche

Ce mémoire se compose de cinq parties. La première est l'introduction. Elle pose les bases de ce qui va suivre. Elle se termine ici en présentant la suite du travail.

La deuxième partie présente le cadre théorique. Elle définit les différents concepts et éléments 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. La quatrième partie présente les résultats et les commente. La dernière partie fait une synthèse du travail sous forme de conclusion.

II^{ème} PARTIE : CADRE THEORIQUE

3. Géostatistique

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

3.1. Multipoint

La géostatistique du multi-point 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. Le multi-point ne permet pas de faire des simulations satisfaisantes à partir des données de l'objet d'étude. C'est pour cela que nous devons avoir une image d'entraînement qui correspond plus ou moins à ce que nous attendons. Par conséquent, le multi-point se base sur des statistiques d'images et non pas sur des modèles. Le dernier concept est l'utilisation d'image d'entraînement afin d'évaluer les données statistiques.

Les données connues ne sont donc pas suffisantes lorsque nous voulons faire du multi-point pour obtenir des résultats probants. Il faut alors des données qui représentent la réalité du terrain, les images d'entraînement. La figure 1 nous présente un exemple tiré de Renard (2007). Si nous possédons des données catégorielles (sable ou eau) sur un cours d'eau, il nous faut savoir, avant d'y faire des statistiques, comment le cours d'eau se comporte en général dans les mêmes conditions que les nôtres. Si le cours d'eau est méandré, le résultat ne sera pas le même que si le cours d'eau est en tresse. A partir de l'image d'entraînement et des données de terrain connues, il est alors possible de faire de la géostatistique multi-point afin de modéliser le cours d'eau.

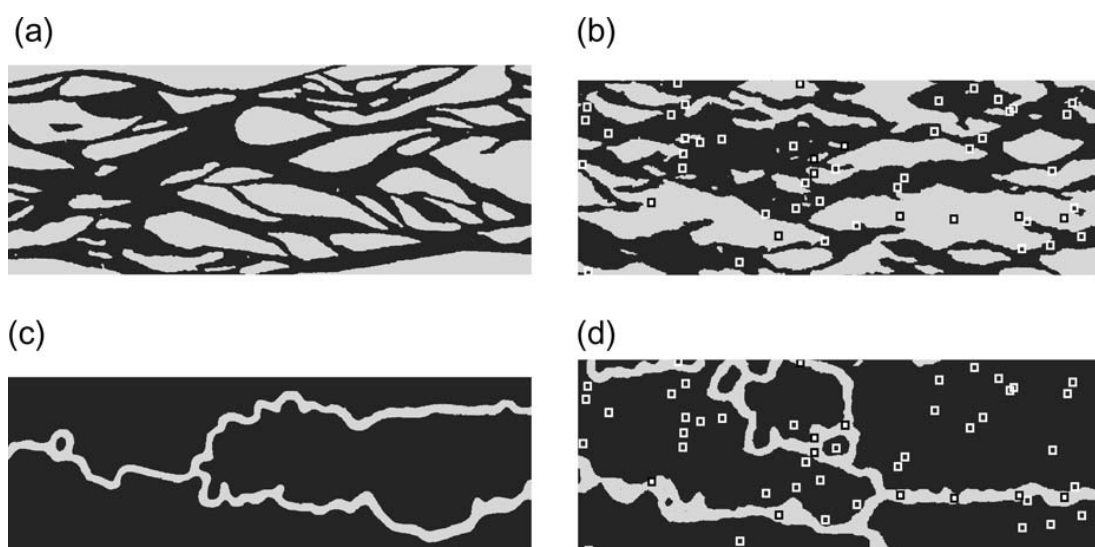


Figure 1 : Utilisation de géostatistique multi-point sur deux images d'entraînement (a et c). (a) image d'entraînement d'une rivière en tresse. (b) résultat du multipoint avec (a) comme image d'entraînement. (c) image d'entraînement d'une rivière méandrée. (d) résultat du multi-point avec (c) comme image d'entraînement.

Source : Renard (2007)

3.2. Echantillonnage direct

Comme nous l'avons vu, le multi-point utilise une image d'entraînement, qui regroupe toutes les spécificités du terrain d'étude. 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, Renard & Straubhaar, 2010).

La figure 2 nous présente le fonctionnement de cette méthode. L'échantillonnage direct part de l'image d'entraînement afin de créer l'image finale. Il en déduit les éléments manquants grâce aux voisins connus. Il faut définir une certaine distance autour de la valeur inconnue. 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. Une fois une valeur correspondante trouvée, nous l'attribuons à la donnée recherchée, avant de recommencer avec une autre valeur.

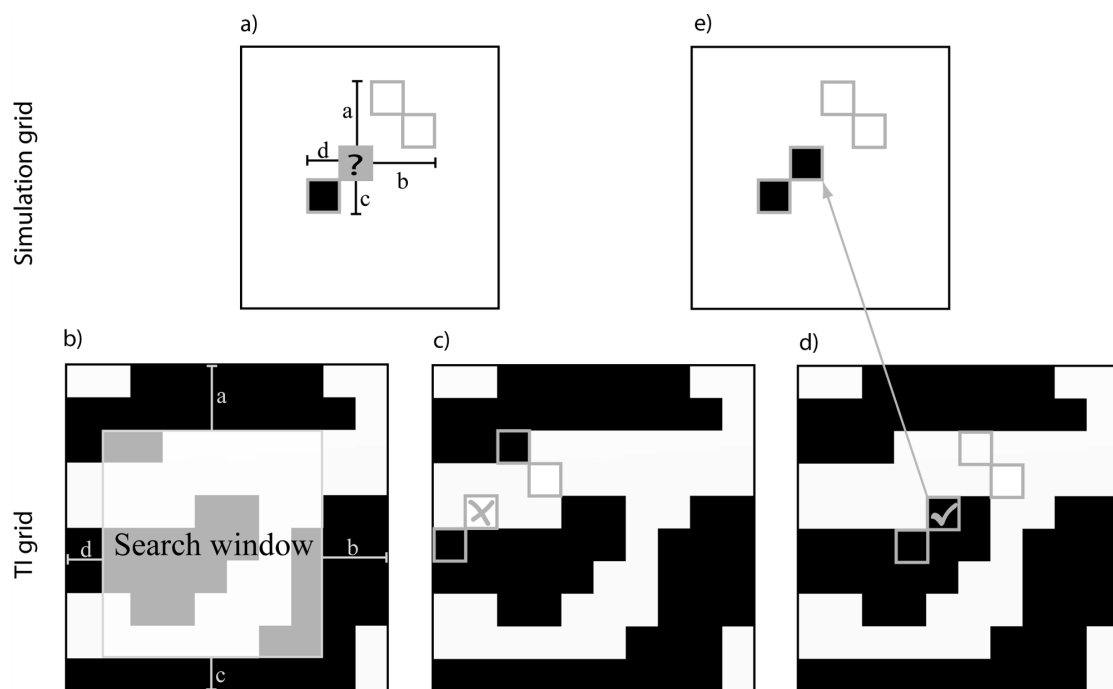


Figure 2 : Méthode d'échantillonnage direct. (a) Élément à simuler en fonction de ses voisins connus. (b) image d'entraînement avec la fenêtre de recherche. (c) Tentative ratée de recherche de l'élément inconnu. (d) Résultat positif pour la simulation. (e) Valeur de l'élément inconnu en (a).

Source : Mariethoz et al. (2010)

4. Fractal

4.1. Définition

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). Il en a conclu que plus nous nous basons sur une échelle petite, plus le périmètre calculé grandit. Par conséquent, une des caractéristiques fondamentales des objets fractals est que les propriétés métriques que nous mesurons sont fonctions de l'échelle d'observations (Abedini & Shaghaghian, 2009).

La figure 3 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). Nous répétons cette étape 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 correspond à un zoom sur la côte.

où k est une constante (Richardson, 1961; Mandelbrot, 1967), ce qui implique l'augmentation de la longueur de la ligne mesurée avec la diminution de l'unité de mesure utilisée (fig. 4). L'équation (1) s'applique évidemment aux courbes

tales dans la littérature (Goodchild, 1980; Adler, 19 Mark, 1987). La dimension estimée à partir du diagramme utilisant la courbe de rivières

Figure 3 : Construction de la courbe de Koch

Source : Robert & Roy (1993)

En 1997, 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 (Huang & Turcotte, 1989; Turcotte, 1992; Klinkenberg & Goodchild, 1992).

Pour pouvoir extraire les caractéristiques fractales d'une image, il faut une invariance d'échelle et une stationnarité (Mandelbrot 1967), qui nous permettront, à partir de géostatistique, de reproduire l'image à une échelle plus précise. L'invariance d'échelle est le fait que des éléments se retrouvent à différentes échelles. 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

La dimension topologique est toujours inférieure à la dimension fractale (Fleurant, 2015). Il existe plusieurs sortes de dimension fractale, comme par exemple celle de Minkowski-Bouligand ou de Hausdorff-Besicovitch. La plus répandue, car elle est la plus facile à calculer, est la dimension fractale d'homothétie interne. Elle peut être calculée par la formule :

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

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 la 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. Pour chaque maillage, il faut calculer le nombre de boîtes contenant au moins une partie de l'objet étudié. Ensuite, il faut créer un graphique avec des axes en logarithme, correspondant à la taille des boîtes et au nombre de boîtes remplies. 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

La figure 4 illustre la méthode utilisée pour améliorer la résolution par un facteur deux. 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. Après avoir augmenté la résolution de leur image de base, Mariethoz et al. (2011) ont comparé les images finales avec des résolutions différentes pour voir quel facteur permet de mieux préserver les caractéristiques fractales à plus petite échelle. Il en est ressorti qu'une augmentation d'un facteur deux de la résolution conserve mieux les caractéristiques fractales.

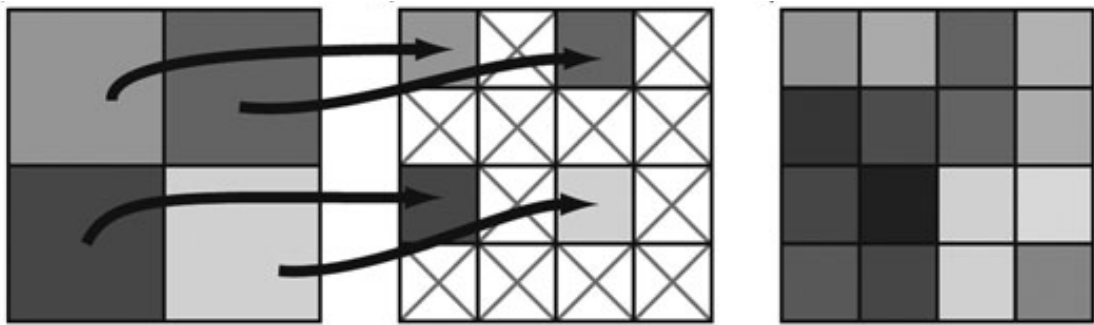


Figure 4 : illustration de l'amélioration de la résolution par un facteur deux. (1) les pixels de l'image d'origine vont migrer en (2) dans une grille [2X ; 2Y]. (3) Simulation des pixels vides en utilisant l'image d'origine comme image d'entraînement.

Source : Mariethoz & al. (2011)

Pour ce mémoire, nous allons placer chaque pixel de notre MNT dans la grille deux fois plus grande afin de pouvoir augmenter la résolution par un facteur deux. A partir des pixels connus, nous allons utiliser l'algorithme d'échantillonnage direct, qui utilise la méthode décrite en-dessus, mais qui est amélioré pour ne pas placer de façon totalement aléatoire la grille avec les voisins connus. L'algorithme d'échantillonnage direct est détaillé dans la suite du rapport.

Les MNT sont des représentations de la topographie. Ils ne prennent en compte que la surface du terrain, même lorsque des éléments y sont présents (Office fédéral de topographie, 2015). Pour créer un tel modèle, il faut récolter des données d'altitude, soit sous forme de données photogrammétriques, soit sous forme de données altimétriques (Ouédraogo, Degré & Debouche, 2014). Afin

d'obtenir des modèles numériques à très haute résolution, il faut que les appareils soient capables d'acquérir plusieurs points par mètre carré. Les appareils permettant d'obtenir une aussi bonne qualité sont coûteux. Il n'est donc pas possible pour certains pays en voie de développement d'avoir recours à de tels modèles. Même des pays industrialisés ne peuvent pas se permettre de modéliser l'entier de leur territoire. Le fait de ne pas pouvoir avoir une information suffisamment précise sur les MNT peut poser un problème de risque. En effet, la quantification des mouvements rocheux reste difficile sur des modèles avec une faible résolution.

6. Présentation des zones d'étude

Afin de déterminer la meilleure façon d'utiliser l'algorithme d'échantillonnage direct, quatre zones d'étude ont été choisies. Chacune des zones se situe en Suisse, comme le montre la figure 5. 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.

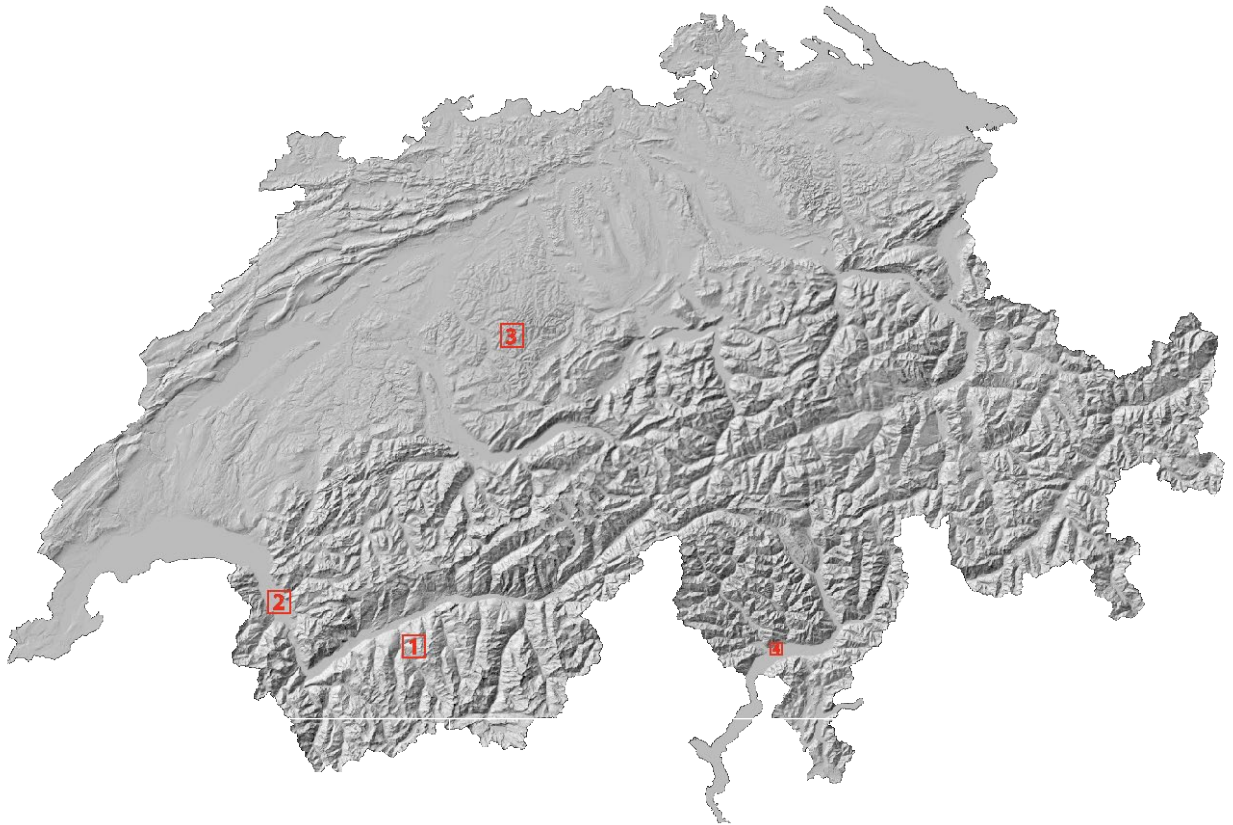


Figure 5 : Carte montrant la position des quatre zones d'étude

La première zone se situe en Valais. 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 au Tessin.

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 6. Elle a une superficie de 36 km², soit 6 kilomètres de long et autant de large.



Figure 6 :

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 2831 mètres d'altitude. En revanche, pour la rive gauche le point le plus haut ne dépasse pas les 2400 mètres. Il y a donc plus de 2200 mètres d'écart entre les deux altitudes extrêmes de cette zone. La distribution des altitudes de cette dernière est représentée par la figure 7.

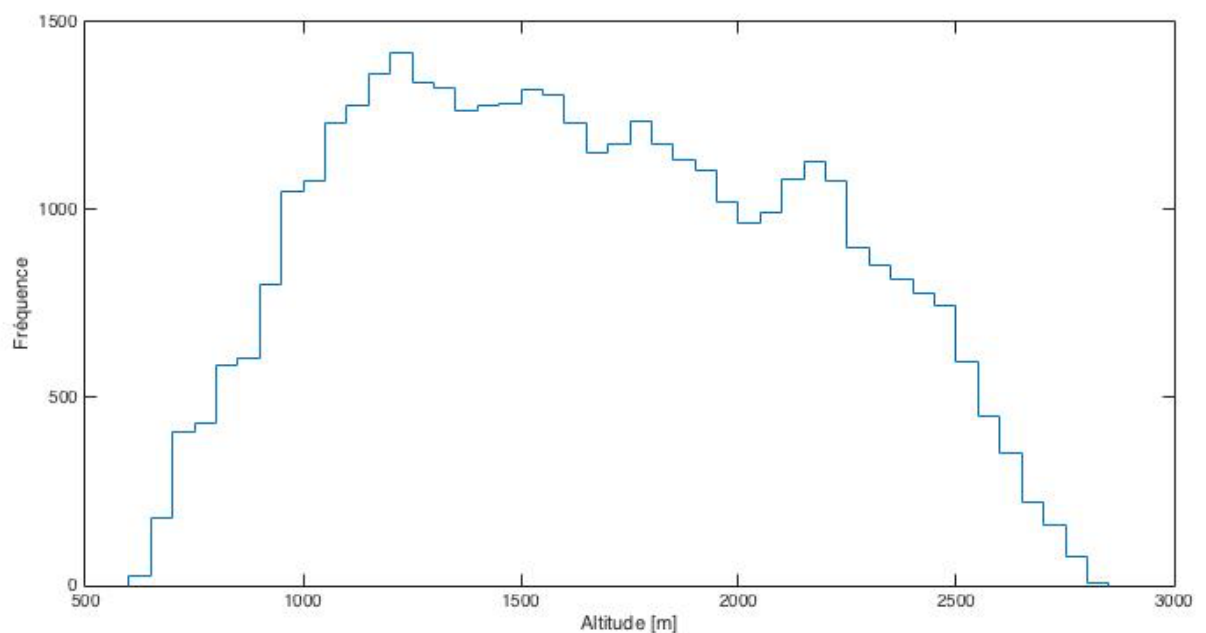


Figure 7 :

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 km², soit 6 kilomètres de long et autant de large. Comme le montre la figure 8, elle est répartie entre le canton du Valais et le canton de Vaud.



Figure 8 :

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 1500 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 9.

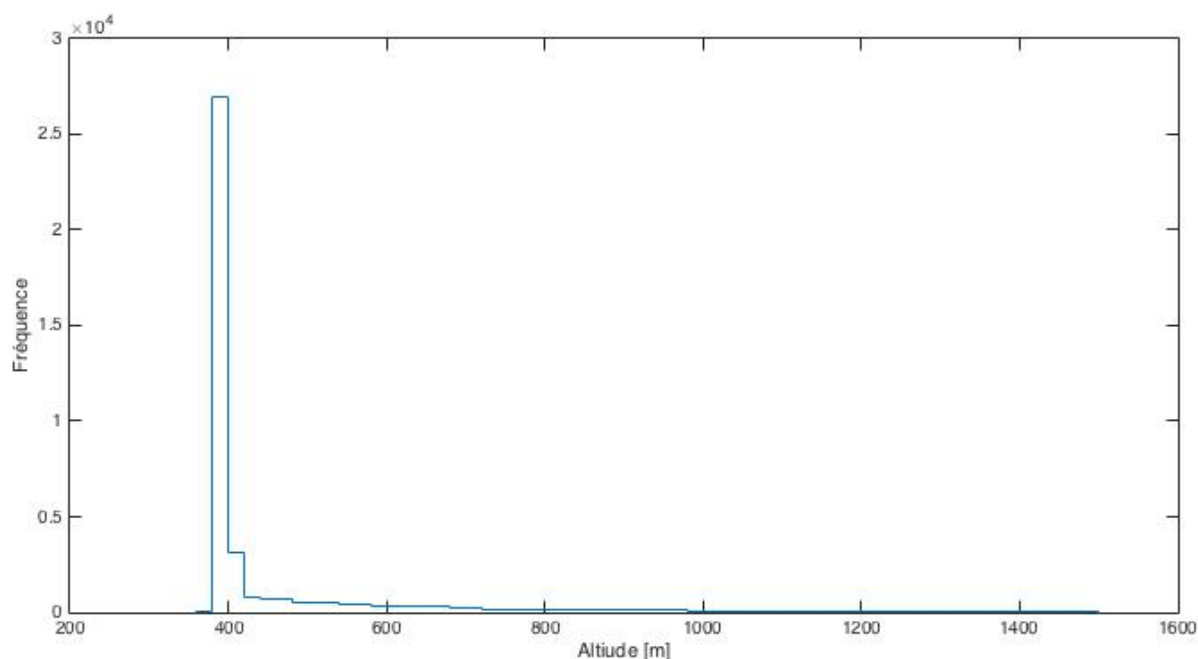


Figure 9 :

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 km², 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 10. Ces cours d'eau principaux sont rejoints par de nombreux autres.



Figure 10 :

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.

6.4. Zone 4

La dernière zone se situe au Tessin dans la région de Locarno. Elle se compose d'une partie du delta de la Maggia et du lac Majeur, comme le montre la figure 11. Elle a une superficie inférieure aux autres, qui est de 9 km², soit 3 kilomètres de long et de large.

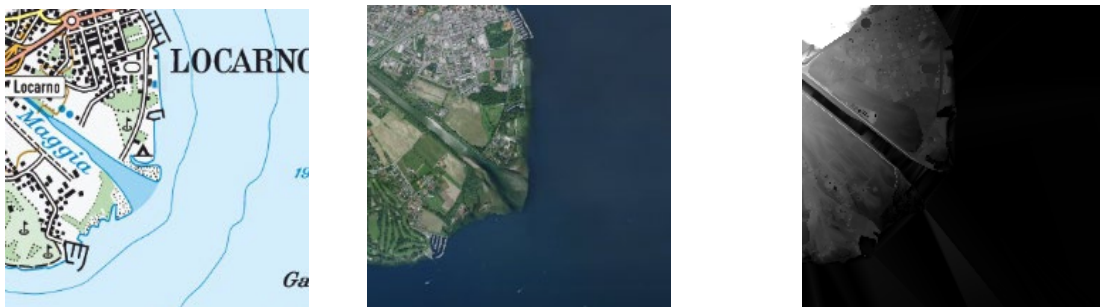


Figure 11 :

Le point le plus élevé de cette zone se situe au Nord-Ouest, sur le delta de la Maggia, à environ 215 mètres. De là, l'altitude diminue jusqu'au niveau du lac pour atteindre environ 195 mètres. La distribution des altitudes de cette zone est relativement proche de la deuxième.

6.5. Autres

Ces quatre zones ont été choisies afin d'avoir des caractéristiques différentes, qui permettent de voir si le downscaling à partir de l'algorithme d'échantillonnage direct 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, tout comme la partie sur le lac de la quatrième zone, mais la différence d'altitude est beaucoup plus importante. Quant à la troisième zone, elle présente une plus grande diversité que les autres zones, à cause d'une plus forte variation entre l'augmentation et la diminution d'altitude.

III^{ème} 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 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 :

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

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

- $k = \text{rang}$

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 diminue moins que pour les précédentes, car la différence est déjà faible avec le MNT entier, mais elle diminue quand même de moitié.

La figure 12 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.

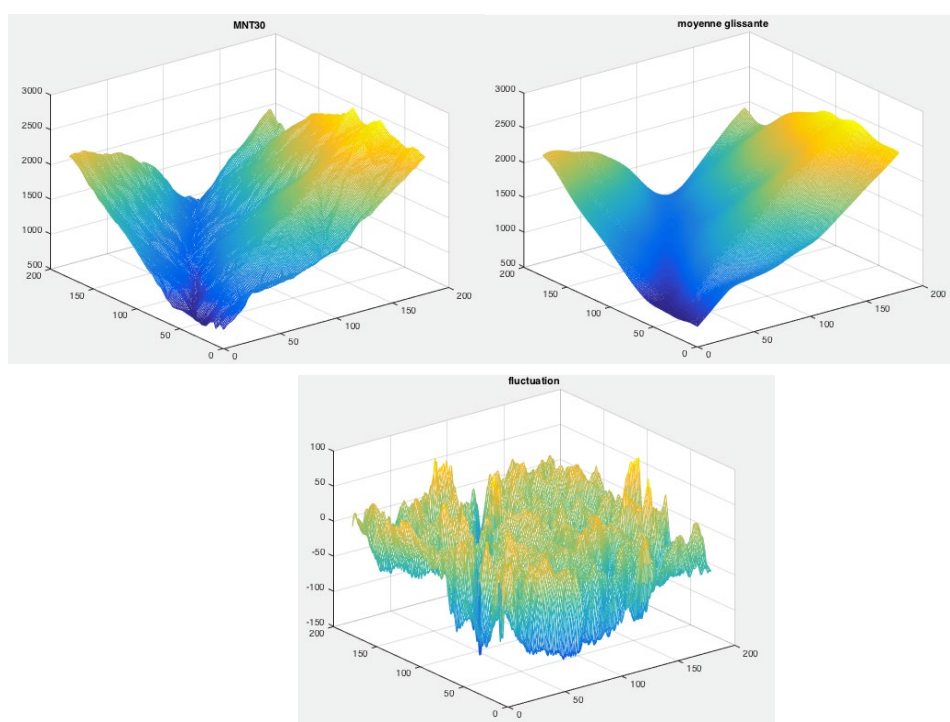


Figure 12

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 d'échantillonnage direct.

8. Méthode d'échantillonnage direct

Le but de la méthode d'échantillonnage direct est de produire des réalisations d'une variable spatiale Z , dépendante de tous les N emplacements x_i d'une grille régulière, avec $i = [1, \dots, N]$. Ces emplacements de la grille régulière peuvent être assimilés aux pixels d'une image. Etant donné que Z est spatialement structurée, la valeur de chaque emplacement $Z(x)$ dépend des valeurs de ses voisins. Comme mentionné au point 3.1., le principe du multi-point est de définir cette dépendance à partir d'une image d'entraînement. Dans notre étude, $Z(x)$ est une variable continue, mais comme l'ont montré Mariéthoz & al. (2011), elle peut aussi être une variable catégorielle.

8.1. Fonctionnement

La description et le fonctionnement de la méthode d'échantillonnage direct ont été décrits par Mariéthoz & al. (2011). Par conséquent, cette partie ne fait que reprendre ce que vous pouvez trouver dans leurs travaux. Nous commençons par présenter la méthode d'échantillonnage direct, puis nous décrivons la méthode pour la super-résolution qui nous permet de faire le *downscaling*.

La réalisation de Z doit avoir la même dépendance spatiale que l'image d'entraînement. Afin de respecter toutes les dépendances, chaque réalisation doit être un échantillon de la distribution jointe à N dimensions

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

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

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

Chaque emplacement x de la grille est visité de façon aléatoire. La valeur $Z(x)$ est alors calculée en tenant compte de la dépendance spatiale entre les valeurs de ses voisins. La valeur des voisins est déjà connue, soit parce qu'il s'agit d'une mesure prise à cet endroit, soit parce que la valeur a été simulée par la simulation séquentielle. D'une fois que la valeur $Z(x)$ est déterminée, elle est utilisée pour conditionner la répartition des valeurs d'attribut possible pour les autres emplacements de la grille, qui seront visités par la suite. A partir du paradigme de

simulation séquentielle, chaque emplacement a une valeur conditionnée par la valeur des emplacements simulés précédemment.

8.2. Paramètres

Les différents paramètres utilisés pour effectuer ce travail figurent dans le tableau 1. 18 paramètres ont des valeurs fixes et deux ont des valeurs variables.

Les deux paramètres avec des valeurs variables sont le seuil et le nombre de voisin maximum pour chaque valeur simulée. Seuls 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 varie de 0.01 à 0.99 pour la première zone d'étude pour les simulations avec l'entier du MNT. Pour les autres simulations, le seuil maximum est fixé à 0.1. Les différentes valeurs sont décrites dans le tableau 1. Plus le seuil est petit, plus l'erreur acceptée pour la valeur simulée est petite. 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. Elles sont également décrites dans le tableau ci-dessous.

Fixed parameters			
Name	Default		
Simulation method	MPS		
Number of realizations	10		
Max search distance	125 125 0 (½ size simulation grid)		
Anisotropy ratios in the search window (x,y,z)	1 1 1		
Transformations	0 (no transformations)		
Path type	0 (random path)		
Type of variable	0 for categorical, 1 for continuous		
Exponent of the distance function in the template	0		
Syn-processing parameters (4)	0 0 0 0 (no syn-processing)		
Initial seed	1350		
Parameters reduction	1 (no parameters reduction)		
Parallelization	1 (serial code, no parallelization)		
Varied parameters			
Name	Default	Range	Case
Threshold position	0.05	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	1
Max fraction of TI to scan <i>f</i>	0.5	0.05–0.1–0.15–0.2–0.3–0.4–0.5–0.6–0.75–1	1
Max number of points in neighborhood <i>r</i>	50	1–5–10–15–20–30–50–80	1
Post-processing parameters			2
– Number of post-processing steps (<i>p</i>)			
– Post-processing factor (<i>p_f</i>)	0	0–1–2	
	0	0–1–3	
Number of variables to simulate jointly	1	1–2	3
Relative weight of each variable	1	0.1 0.9–0.25 0.75–0.5 0.5–0.75 0.25–0.9 0.1	3
Weight of conditioning data (<i>δ</i>)	1	0–1–5	4
Data conditioning	No	No–yes	4

Tableau 1 :

Pour les paramètres fixes, seuls la méthode de simulation, le type de variable et la proportion de l'image d'entraînement seront décrits ici. Le nom et les indications

sur les valeurs par défaut présents dans le tableau sont suffisamment parlants pour les autres variables.

Afin de faire le downscaling qui nous intéresse avec l'algorithme d'échantillonnage direct, 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 2. Pour le type de variables, étant donné qu'il s'agit de variables continues, le paramètre α a une valeur de 1. Une valeur de 0 signifierait qu'il s'agit de variables catégorielles. La proportion de l'image d'entraînement de 1 signifie que l'algorithme la scanne en entier.

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 d'échantillonnage direct 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, nous tenons compte de l'entier du MNT, tandis que pour la seconde, nous avons éliminé la moyenne glissante 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 d'échantillonnage direct, 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 1200 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 maxima de voisins. 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.

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 locale a été choisie. Pour ce faire, le logiciel utilise la méthode de comptage de boîtes tridimensionnelle, comme le montre la figure 13. La description de la méthode a été décrite par Taud & Parrot (2005), que cette partie ne fait que reprendre.

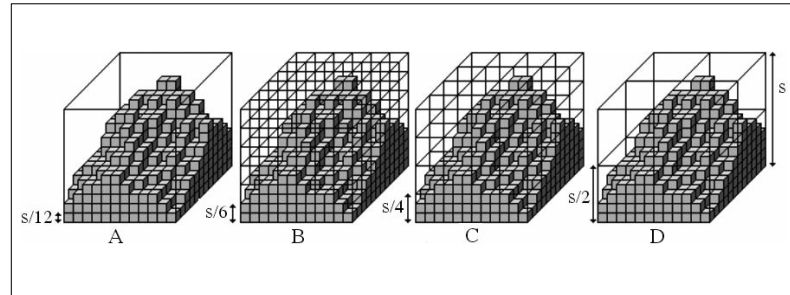


Figure 13 :

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. 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. 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 :

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

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

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

- 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

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

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 :

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

(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 14.

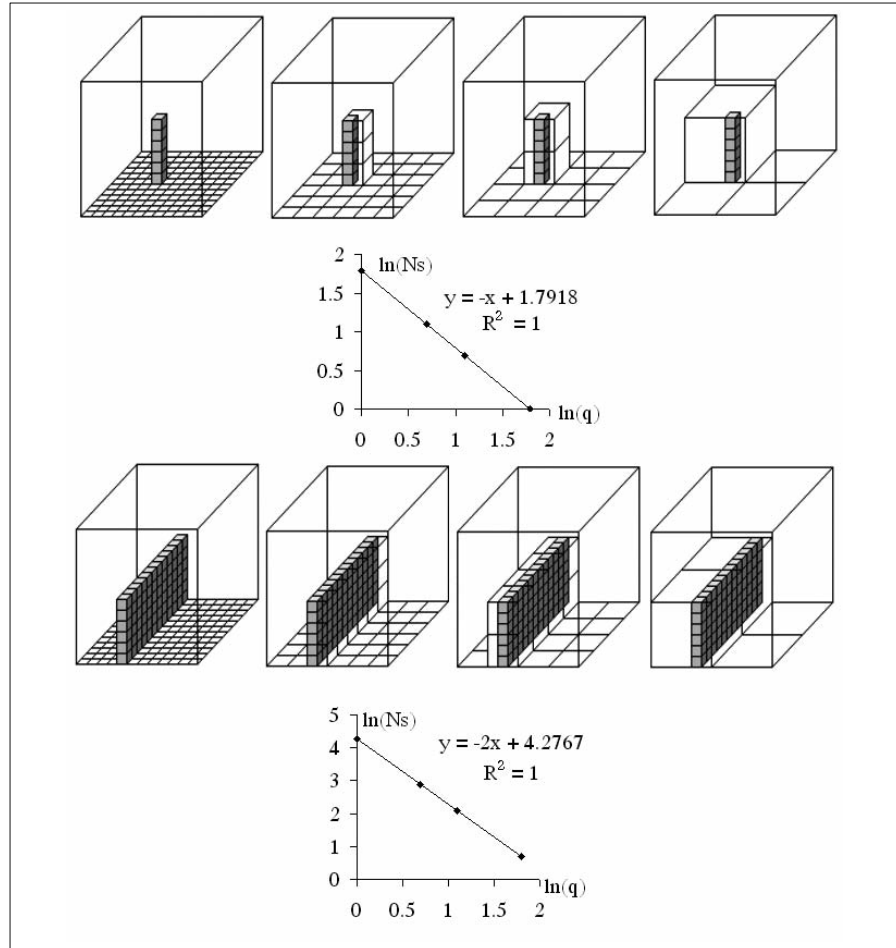


Figure 14 :

IV^{ème} 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 d'échantillonnage direct. 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. Tout MNT

Comme cité plus tôt dans ce travail, les résultats présentés ici proviennent des 1'200 simulations de downscaling grâce à l'algorithme d'échantillonnage direct. Une moyenne des 10 simulations pour les mêmes paramètres a été faite. Il ne reste donc plus que 120 valeurs en fonction du nombre de voisins maximum et du seuil, comme le montre les tableaux 2 et 3.

11.1.1.1. Erreur quadratique moyenne

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 seuil est de 0.99. Dans ce cas, l'erreur quadratique moyenne n'augmente pas tout le temps, mais elle prend la même valeur qu'au seuil précédent, 0.75. Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 2. Elles sont comprises entre 8.9 et 407 mètres.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	17.9	9.4	8.9	9.1	9.3	10.2	12.8	17.3

0.02	34.7	17.0	13.8	13.3	13.5	13.7	15.3	17.0
0.04	73.1	51.2	27.3	25.7	25.1	24.8	25.0	25.2
0.06	102.3	87.8	53.4	42.4	40.7	38.5	38.6	38.3
0.08	130.9	110.9	81.7	65.3	58.4	52.2	52.9	52.3
0.1	158.4	124.5	102.2	86.3	76.6	67.2	64.7	66.1
0.12	177.6	133.1	116.0	103.8	92.8	80.2	76.9	80.4
0.14	201.8	141.7	126.4	116.3	106.8	96.0	91.5	93.7
0.16	218.9	151.4	135.3	126.6	120.6	111.5	105.3	106.6
0.18	242.9	160.0	145.1	137.7	132.1	126.7	120.6	120.9
0.2	270.3	174.8	157.2	152.9	145.3	142.7	139.3	136.9
0.25	319.3	208.5	186.1	181.0	177.8	175.9	172.6	177.1
0.5	406.7	381.4	360.8	360.9	352.5	355.8	358.8	360.3
0.75	406.5	404.8	396.8	399.8	395.1	397.6	400.8	403.8
0.99	407.0	405.7	397.2	400.5	395.7	398.3	401.3	404.0

Tableau 2 :

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. Pour les seuils allant de 0.10 à 0.16 et 0.25, lorsque le nombre maximum de voisin est de 80, le résultat est plus élevé que celui qui le précède. Pour le seuil 0.02, une augmentation de l'erreur quadratique moyenne intervient à partir de 50 voisins maxima. Pour les seuils de 0.01, 0.5, 0.75 et 0.99, l'augmentation est déjà présente à 30 voisins. Pour les deux derniers seuils cités précédemment, il y a aussi une augmentation à 15 voisins.

11.1.1.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling est comprise entre -27.1 et 78.5 mètres, comme le montre le tableau 3.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	-0.5	-0.1	-2.0	-2.1	-2.4	-2.5	-3.4	-4.7
0.02	3.3	5.9	-2.1	-2.2	-1.9	-1.1	-0.6	-0.3
0.04	8.5	37.1	6.2	-1.2	-2.9	-3.7	-1.5	1.9
0.06	10.6	66.1	29.4	11.9	3.6	-3.1	-2.0	3.1

0.08	17.4	78.5	48.7	31.1	15.7	-1.4	-5.1	3.5
0.1	18.6	78.1	62.6	45.3	28.5	3.9	-5.0	4.4
0.12	17.7	73.2	64.5	55.9	40.1	12.0	-3.9	3.8
0.14	20.1	64.4	61.6	51.8	42.7	16.8	1.4	0.7
0.16	20.2	54.1	53.6	51.9	37.2	21.9	5.0	-3.4
0.18	20.3	44.2	47.1	43.7	35.8	19.3	5.7	-9.4
0.2	20.4	35.6	34.3	33.5	30.2	20.1	3.5	-15.4
0.25	12.3	28.7	16.5	16.2	9.0	0.8	-7.9	-27.1
0.5	-6.1	-8.2	4.3	-9.3	-5.5	-9.3	-12.2	-14.3
0.75	-6.2	-13.7	0.8	-13.6	-5.3	-7.3	-5.4	-0.3
0.99	-6.1	-13.4	0.9	-13.5	-5.3	-7.2	-5.1	-0.2

Tableau 3 :

11.1.2. Fluctuation

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 4. Elles sont comprises entre 6.6 et 16.9 mètres. Elles augmentent plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	8.6	6.6	6.6	6.7	6.9	7.3	8.1	9.5
0.02	9.5	6.8	6.9	7.0	7.1	7.5	8.3	9.7
0.04	10.9	7.2	7.4	7.5	7.7	8.0	8.7	10.0
0.06	13.0	8.5	8.4	8.5	8.8	9.1	10.0	11.2
0.08	15.1	10.5	10.0	10.1	10.4	10.8	12.0	13.4
0.1	16.9	12.4	11.8	12.0	12.2	12.8	14.0	15.4

Tableau 4:

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, à partir de 5 voisins. En effet, lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur est pratiquement autant grande qu'avec un plus grand nombre

maximum de voisin testé. Pour les valeurs de seuils 0.06 à 0.1, l'accroissement de l'erreur quadratique commence seulement à partir de 10 voisins. Dans ces cas, il y a une diminution entre 5 et 10 voisins.

11.1.2.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling est positive pour chaque simulation effectuée. Elle est comprise entre 2.1 et 3.9 mètres.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	3.8	3.9	3.9	3.9	3.8	3.7	3.3	2.7
0.02	3.7	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.4	2.7
0.04	3.6	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7	3.4	2.8
0.06	3.2	3.5	3.7	3.6	3.7	3.6	3.5	3.1
0.08	2.7	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.4	3.2
0.1	2.1	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.7	2.6

Tableau 5 :

La moyenne diminue plus le nombre de voisin maximum augmente, mais cela qu'à partir de 5, lorsque le seuil est inférieur à 0.06. Avec un seuil supérieur, elle augmente avant de diminuer, comme le montre le tableau 5.

Plus le seuil augmente, plus la moyenne des différences diminue excepté pour le seuil 0.02 avec 20 et 30 voisins, pour les seuils 0.04 à 0.08 lorsqu'il y a 80 voisins maximums et pour le seuil 0.06 avec 50 voisins.

11.2. Zone 2

Pour la deuxième zone, qui se situe également 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.

11.2.1. Tout MNT

11.2.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 6. Elles sont comprises entre 24.7 et 87.4 mètres. Elles augmentent plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	25.5	25.1	25.1	25.0	24.9	24.7	24.8	24.8
0.02	29.0	25.6	25.9	25.8	25.8	25.5	25.4	25.1
0.04	45.5	27.0	28.5	28.7	28.5	28.2	28.2	27.4
0.06	62.4	30.0	32.2	32.9	33.1	32.6	32.4	31.2
0.08	75.9	35.2	36.1	37.9	38.5	38.6	38.9	36.9
0.1	87.4	42.4	41.1	43.7	45.0	45.4	46.5	44.1

Tableau 6 :

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, pour une valeur de seuil allant de 0.01 à 0.04. Ce n'est qu'une tendance et non pas une généralité, à cause de l'augmentation à partir de 50 voisins pour un seuil de 0.01, une autre à 10 voisins pour le seuil de 0.02 et une augmentation entre 10 et 15 voisins pour le seuil de 0.04.

Pour les seuils supérieurs, l'erreur quadratique moyenne diminue avant d'augmenter, pour finir par rediminuer. Pour un seuil de 0.06, l'augmentation est présente de 10 à 20 voisins. Pour le seuil suivant, elle commence au même endroit, mais s'étend jusqu'à 50 voisins. Pour la dernière valeur de seuil, l'augmentation débute un peu plus tard que les autres, soit à 15 voisins, pour se terminer en même temps que la précédente.

Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné.

11.2.1.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling est positive pour chaque simulation effectuée. Elle est comprise entre 5.6 et 35.9 mètres.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	6.7	6.7	6.8	6.7	6.6	6.3	5.6	5.7
0.02	9.9	7.4	7.8	7.6	7.6	7.5	6.6	6.3
0.04	18.8	9.1	9.9	10.0	9.9	9.8	9.1	8.7
0.06	26.4	10.4	12.4	13.1	13.0	12.6	12.1	11.4
0.08	31.7	12.1	14.3	16.0	16.1	16.2	16.0	15.0
0.1	35.9	15.1	16.7	18.9	19.5	19.7	20.2	19.3

Tableau 7 :

De manière générale, elle augmente plus le seuil est grand et plus le nombre maximum de voisin diminue. Comme le montre le tableau 7, il n'y a qu'au seuil 0.01 que la moyenne est plus grande avec 80 voisins qu'avec 50.

11.2.2. Fluctuation

11.2.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 8. Elles sont comprises entre 3.1 et 11.1 mètres. Elles augmentent plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	4.9	3.1	3.4	3.6	3.7	4.0	4.5	5.4
0.02	5.2	3.3	3.5	3.7	3.8	4.1	4.7	5.5
0.04	6.7	4.3	4.3	4.4	4.5	4.7	5.2	5.9
0.06	8.6	6.1	5.7	5.7	5.8	6.0	6.6	7.2
0.08	10.1	7.9	7.5	7.5	7.6	7.8	8.2	8.7
0.1	11.1	9.5	9.2	9.1	9.1	9.4	9.8	10.2

Tableau 8 :

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, à partir de 5 voisins pour les seuils inférieurs à 0.06. Pour les autres, l'augmentation de l'erreur intervient plus tard, à 10 voisins pour 0.06 et 0.08, tandis qu'à 0.1 elle n'apparaît qu'à 15.

Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné, sauf pour 0.01 et 0.02, où elle se situe juste en dessous de celle avec 80 voisins.

11.2.2.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling est légèrement négative pour chaque simulation effectuée, à part pour un seuil de 0.1 et un nombre maximum de voisin de 1 où la moyenne est de zéro. Les valeurs sont comprises entre -0.9 et 0 mètre. De manière générale, elles s'éloignent de zéro plus le nombre maximum de voisin augmente. Comme le montre le tableau 9, seul au seuil 0.1 et 0.08, la moyenne est plus grande avec 80 voisins qu'avec 50.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
0.02	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5
0.04	-0.3	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
0.06	-0.2	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
0.08	-0.1	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1

Tableau 9 :

Pour un nombre de voisin maximum donné, mise à part pour 1, la moyenne s'éloigne de zéro en augmentant le seuil jusqu'à 0.06, avant de se rapprocher à nouveau de zéro. Lorsque le nombre de voisin maximum est de 1, la moyenne commence à se rapprocher de zéro à partir d'un seuil de 0.04, pour l'atteindre à 0.1.

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. Tout MNT

11.3.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 10. Elles sont comprises entre 54.1 et 136.2 mètres. Elles ont tendance à augmenter plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin. Les exceptions apparaissent pour le seuil de 0.02 entre 10 et 50 voisins, pour le seuil de 0.04 pour un nombre de voisin maximum supérieur à 20, pour le seuil de 0.06 uniquement pour 80 voisins et pour le seuil de 0.1 pour 1 voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	124.9	123.7	123.8	124.0	124.4	124.4	124.5	124.3
0.02	125.9	123.9	123.5	123.7	124.0	124.3	124.5	124.3
0.04	129.7	125.1	124.0	123.7	123.3	123.4	123.4	124.2
0.06	133.5	127.6	126.1	125.4	125.0	124.9	124.1	123.6
0.08	136.2	130.7	128.6	128.0	127.3	127.3	126.3	125.8
0.1	54.1	133.3	131.2	130.3	130.0	129.6	128.8	128.7

Tableau 10 :

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne ne montre pas de tendance générale pour l'ensemble des résultats de cette zone. Comme pour les résultats de la première et deuxième zone, lorsque le nombre de voisin est de 1, l'erreur quadratique est plus élevée que les autres à l'exception du seuil 0.1, où le résultat est nettement inférieur.

Les seuils de 0.01 à 0.04 montrent une augmentation à partir d'un certain nombre de voisin, lorsque le nombre maximum de voisin augmente. Pour le seuil 0.01, l'augmentation de l'erreur quadratique moyenne commence dès que le nombre de voisin est plus grand que 5. Pour le seuil 0.02, elle intervient légèrement plus tard, soit à partir de 15 voisins, tandis que pour le seuil 0.04, elle intervient à 30 voisins.

Les seuils plus grands montrent une diminution de l'erreur quadratique moyenne avec l'augmentation du nombre maximum de voisin, sauf pour le seuil 0.1 où il y a une augmentation entre 1 et 5 voisins.

11.3.1.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling est positive pour chaque simulation effectuée, excepté pour un seuil de 0.1 et un nombre maximum de voisin de 1, où la moyenne est négative. De manière générale, elle s'éloigne de zéro plus le nombre maximum de voisin augmente. Les seules exceptions se situent au seuil 0.08 avec 20 voisins et avec un nombre de voisins maximum de 50 pour le seuil 0.02, 0.06, 0.08 et 0.1.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	71.3	71.5	71.6	71.8	72.1	72.2	72.4	72.5
0.02	70.4	71.2	71.5	71.8	72.1	72.3	72.2	72.2
0.04	67.2	70.4	70.4	70.8	70.9	71.6	71.8	72.8
0.06	64.4	68.7	69.4	69.6	69.8	70.3	70.1	70.9
0.08	62.2	66.8	67.9	68.5	68.4	68.8	67.5	68.7
0.1	-2.7	64.5	66.3	67.0	67.3	67.1	65.2	66.2

Tableau 11 :

En ce qui concerne les résultats avec un nombre de voisin fixe, comme le montre le tableau 11, la moyenne des différences diminue plus le seuil est grand, à l'exception de 2 cas, au seuil 0.02 avec 30 voisins et au seuil 0.04 avec 80 voisins.

11.3.2. Fluctuation

11.3.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 12. Elles sont comprises entre 5.4 et 15.5 mètres. Elles ont tendance à augmenter plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin. La seule fois qu'elle diminue est lorsque le seuil passe de 0.02 à 0.04 pour 80 voisins.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	9.4	5.6	5.4	5.6	5.8	6.3	7.8	10.4
0.02	9.7	5.9	5.6	5.6	5.8	6.3	7.8	10.4
0.04	10.5	6.2	6.5	6.4	6.4	6.5	7.8	10.3
0.06	11.9	6.8	7.3	7.4	7.4	7.4	8.1	10.3
0.08	13.6	7.8	7.9	8.2	8.5	8.5	9.0	10.6

0.1	15.5	9.1	8.7	9.0	9.3	9.6	10.2	11.6
------------	-------------	-----	-----	-----	-----	-----	------	------

Tableau 12 :

Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné, sauf pour 0.01 et 0.02 où elle se situe juste en dessous de celle avec 80 voisins.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne a tendance à augmenter plus le nombre de voisin devient grand. Lorsque le nombre de voisin maximum est de 10, une diminution de l'erreur quadratique moyenne intervient pour les seuils 0.01, 0.02 et 0.1. Elle diminue aussi au seuil 0.04 pour 15 voisins.

11.3.2.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui obtenu après le downscaling, est comprise entre -0.3 et 0.7 mètre. Les valeurs maximales sont présentes lorsque le nombre de voisin maximum est petit et que le seuil est proche de 0.1. Comme le montre le tableau 13, une différence moyenne de zéro est présente neuf fois. La moyenne des différences a tendance à augmenter plus le seuil est grand, du moins pour les valeurs positives.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	0.2	0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.2
0.02	0.3	0.0	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.2	-0.2
0.04	0.4	0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
0.06	0.5	0.3	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	0.0	0.0
0.08	0.6	0.5	0.2	-0.1	-0.3	-0.3	0.0	0.1
0.1	0.7	0.6	0.6	0.4	0.1	0.0	0.1	0.5

Tableau 13 :

Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1 ou de 5, les valeurs sont positives ou nulles pour le seuil 0.02 avec 5 voisins. Pour le seuil 0.08, elles sont en plus positives pour 10 et 80 voisins. Elles sont aussi positives pour le seuil 0.1 sauf pour 30 voisins où elle vaut zéro.

11.4. Zone 4

Pour la quatrième zone, qui se situe à Locarno, 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.

11.4.1. Tout MNT

11.4.1.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 14. Elles sont comprises entre 0.4 et 1.5 mètres. Elles ont tendance à augmenter plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
0.02	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
0.04	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7
0.06	1.0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7
0.08	1.3	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
0.1	1.5	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1

Tableau 14 :

Lorsque le nombre maximum de voisin est de 1, l'erreur quadratique moyenne est la plus élevée pour un seuil donné, mise à part pour les seuils 0.01 et 0.02, où elle est égale à celle de 80 voisins.

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne augmente de manière générale plus le nombre de voisin maximum devient grand. Seule une exception existe ; la diminution intervient au seuil 0.1 entre 5 et 10 voisins.

11.4.1.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui obtenu après le downscaling, est supérieure ou égale à 0 mètre, à l'exception du seuil 0.08 avec 5 voisins maximum. A part ce cas, la moyenne est comprise entre 0 et 0.4 mètre. Les valeurs les plus élevées se situent lorsque le seuil s'approche de 0.1 et que le nombre de voisin est grand. Comme le montre le tableau 15, une différence

moyenne de zéro est présente dix fois. De manière générale, la moyenne des différences augmente plus le seuil est grand.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
0.02	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.04	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.06	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.08	0.2	-0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
0.1	0.3	0.0	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4

Tableau 15 :

11.4.2. Fluctuation

11.4.2.1. Erreur quadratique moyenne

Les valeurs de l'erreur quadratique moyenne calculées en mètre se trouvent dans le tableau 16. Elles sont comprises entre 0.3 et 0.7 mètres. Elles ont tendance à augmenter plus le seuil est grand, cela quel que soit le nombre maximum de voisin.

RMSE	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	0.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
0.02	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
0.04	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
0.06	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
0.08	0.6	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7
0.1	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7

Tableau 16 :

En ce qui concerne les résultats d'une valeur de seuil fixe, l'erreur quadratique moyenne augmente de manière générale plus le nombre de voisin maximum devient grand. Comme pour les autres zones, lorsque le nombre de voisin maximum passe de 1 à 5, une diminution de l'erreur quadratique moyenne intervient.

11.4.2.2. Moyenne

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui obtenu après le downscaling, est comprise entre -0.1 et 0 mètre pour tous les cas testés, sauf au seuil 0.02 avec 20 voisins maximum, où la moyenne est de -0.6 mètre. Comme le

montre le tableau 17, une différence moyenne de zéro est présente 41 fois sur les 48 cas.

Moyenne	1	5	10	15	20	30	50	80
0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0
0.02	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.6	-0.1	0.0	0.0
0.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

Tableau 17 :

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 du downscaling avec le MNT complet sont analysés pour chaque zone. Ensuite, ce sont les résultats provenant de l'amélioration de la résolution des fluctuations qui vont être interprétés. Pour finir cette partie, une comparaison entre les deux manières d'obtenir des résultats est effectuée.

12.1. Tout MNT

12.1.1. Zone 1

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la première zone avec l'entier du MNT sont compris entre 8.9 et 407 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. 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.

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 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 supérieures à 0.1. La figure 15 montre la distribution des différences d'altitude entre le MNT de base et celui après le downscaling pour 20 voisins avec différentes valeurs de seuils. Ce dernier illustre la diminution de résultat correct lorsque le seuil augmente.

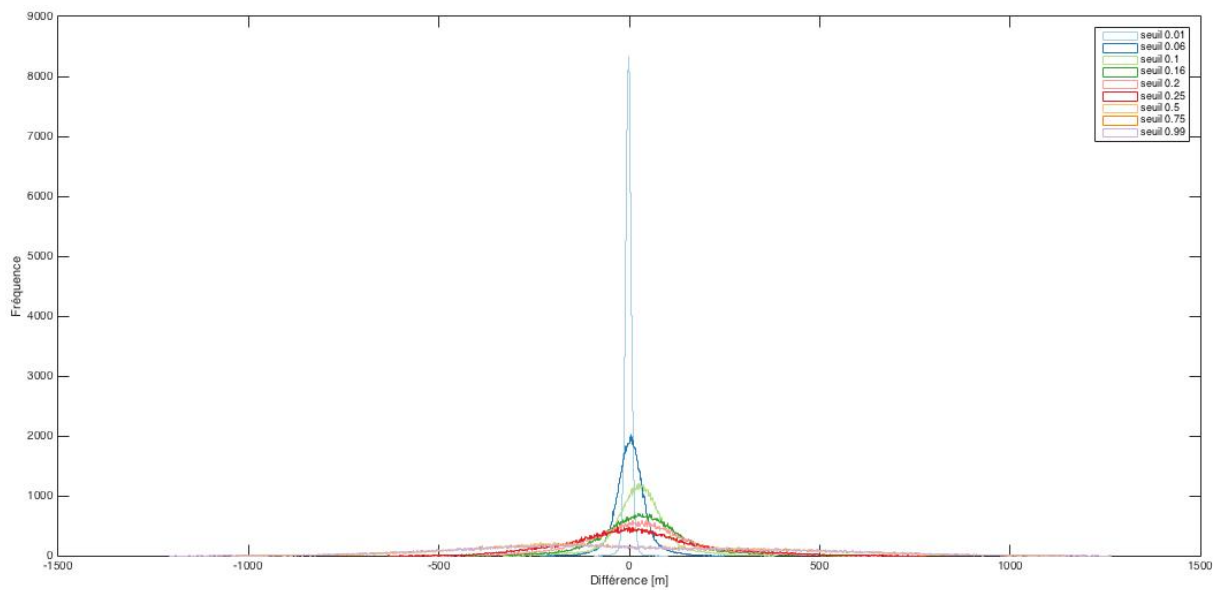


Figure 15 :

Cependant, le meilleur résultat n'est pas au seuil 0.01 avec 80 voisins, mais avec 10. Par conséquent, ces résultats ne correspondent pas avec ceux de Meerschman et al. (2013). Ces derniers affirment effectivement que pour avoir de bons résultats, il faut un nombre de voisin maximum supérieur ou égal à 30. 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.

Tout comme pour l'erreur quadratique moyenne, les meilleurs résultats de la moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling apparaissent lorsque le seuil est faible. Cette moyenne indique si la simulation surestime ou sous-estime les valeurs du MNT. Sur la figure 16, les trois possibilités sont présentes. En jaune, la courbe montre une sous-estimation des valeurs réelles d'altitude du MNT, en ayant son pic dans les alentours de -30 mètres. La courbe bleue représente une bonne simulation, où le pic des différences se situe plus ou moins en dessus de zéro mètre. En rouge, il s'agit d'une surestimation, étant donné que le pic est dans la partie positive de l'histogramme.

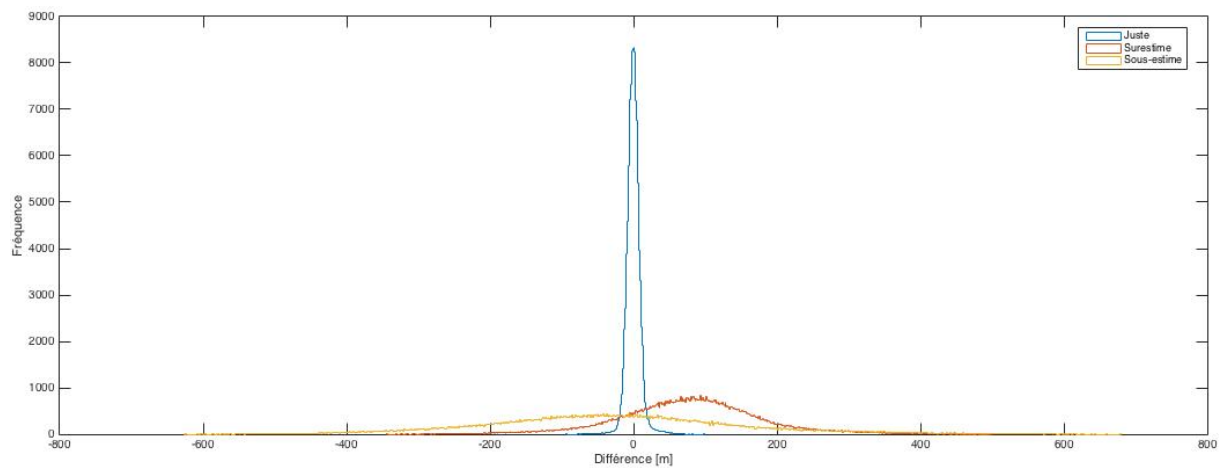


Figure 16 :

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 17. Pour les faibles valeurs de seuil, les différences se font surtout ressentir sur les maxima et les minima. Cela dépend de la surestimation ou sous-estimation des valeurs réelles du MNT. Ces différences proviennent donc de la moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling. 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 d'échantillonnage direct fonctionne grâce au voisinage, il est normal de retrouver plus souvent les valeurs centrales en augmentant le seuil.

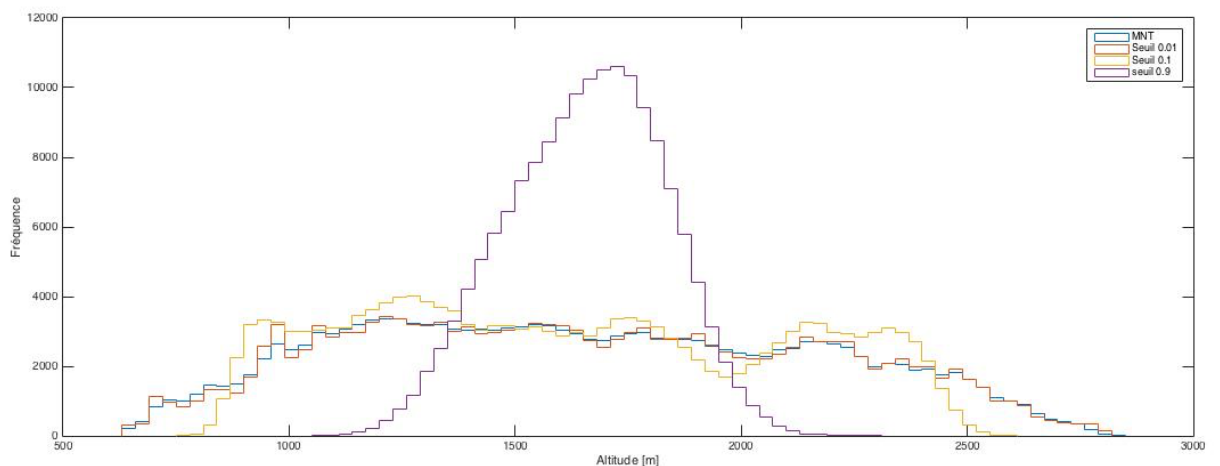


Figure 17 :

12.1.2. Zone 2

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la deuxième zone avec l'entier du MNT sont compris entre 24.7 et 87.4 mètres. L'erreur quadratique moyenne minimale est supérieure à celle de la première zone, mais la maximale est plus petite. Cette dernière est plus petite, car le seuil maximum pris dans cette zone n'est que 0.1 et non pas 0.99 comme pour la zone 1.

En règle générale, tout comme pour la zone 1, les meilleurs résultats sont obtenus 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. Le meilleur résultat se trouve au seuil 0.01, comme attendu, mais avec 30 voisins. Dans cette zone, les résultats sont plus proches de ceux de Meerschman et al. (2013) que ceux de la première zone.

Dans cette zone, toutes les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont positives. Il y a donc une surestimation générale des valeurs simulées. Contrairement à la première zone, l'histogramme des différences d'altitude montre ici deux pics, comme le montre la figure 18. 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. Le premier pic qui se situe dans les alentours de zéro représente la plaine, tandis que le second, qui est perceptible sur la figure 19, dans les environs de 120 mètres, mais beaucoup moins prononcé, représente le coteau.

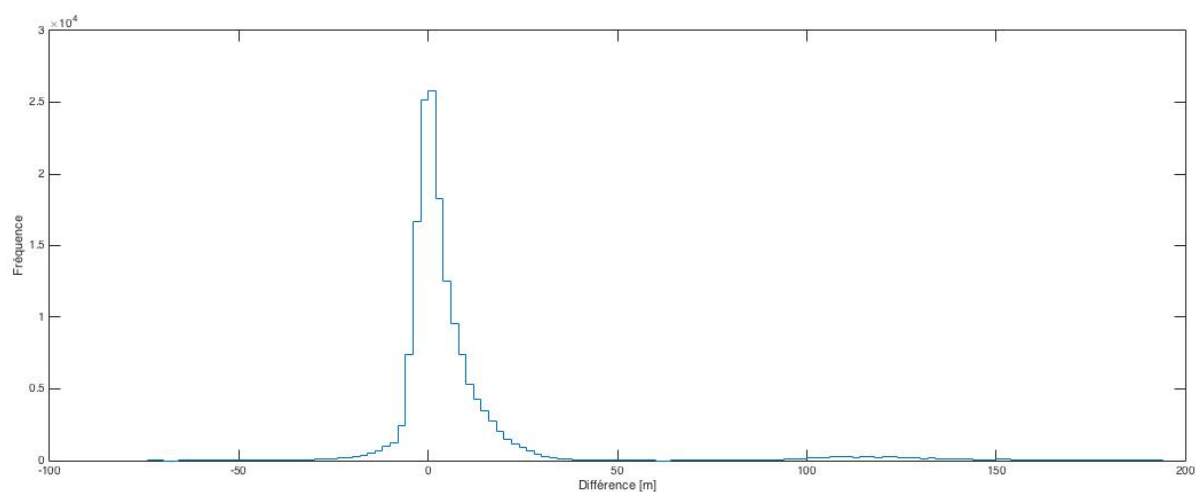


Figure 18 :

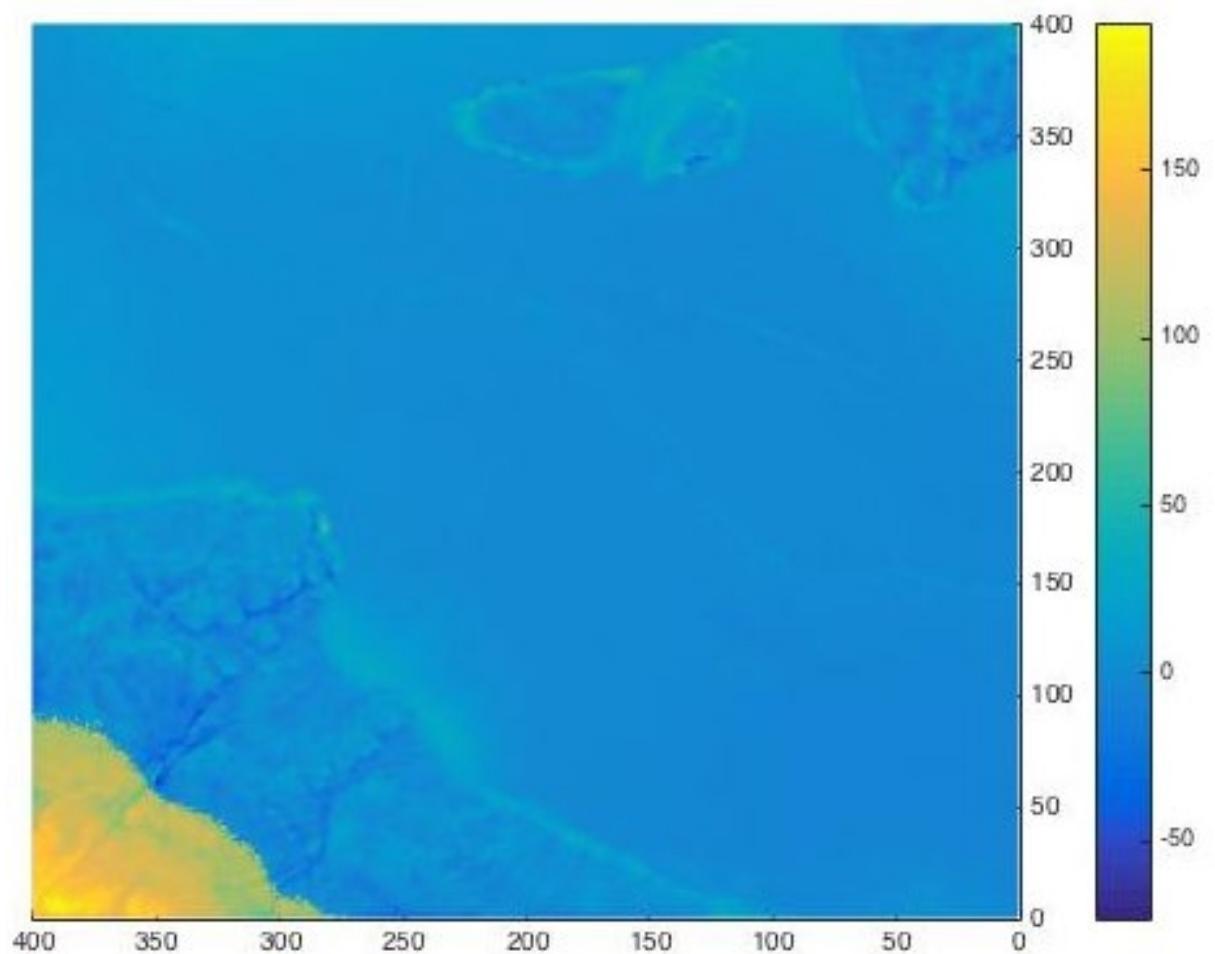


Figure 19 :

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 est visible sur la figure 20 quelle que soit la simulation, ainsi qu'un décalage vers les valeurs centrales.

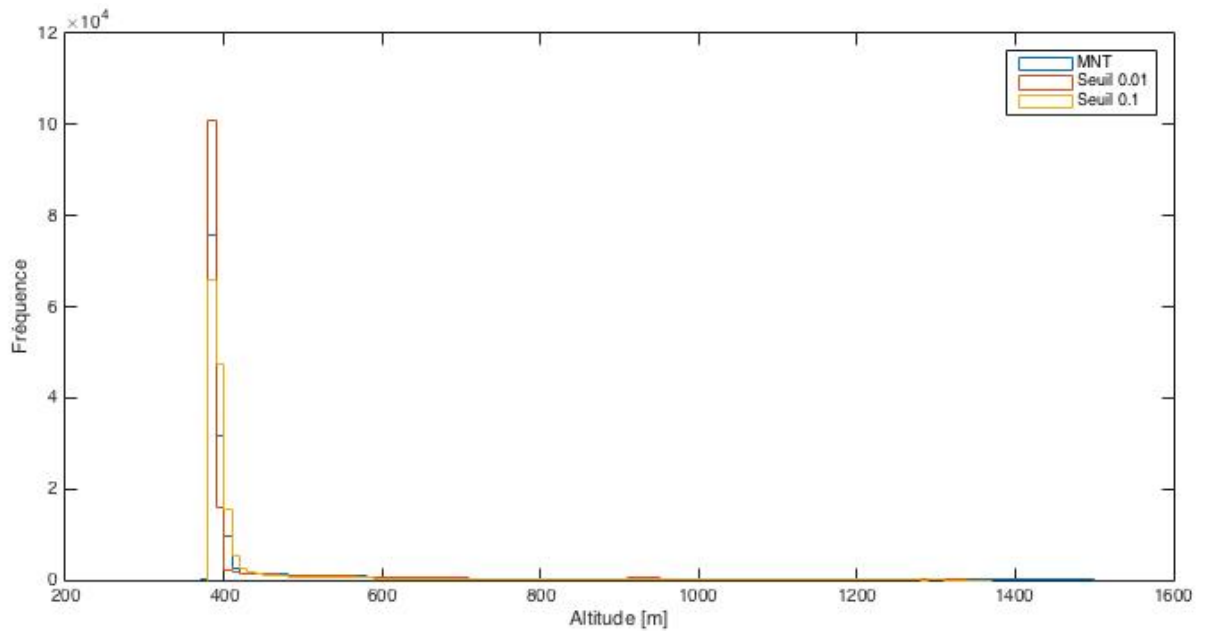


Figure 20 :

12.1.3. Zone 3

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la troisième zone avec l'entier du MNT sont compris entre 54.1 et 136.2 mètres. Le résultat de l'erreur quadratique de 54.1 mètres est probablement une erreur, étant donné que c'est la seule valeur à être en-dessous de 100 mètres. De plus, l'erreur a tendance à grandir avec l'agrandissement du seuil, comme pour les deux cas précédents. La valeur minimale trouvée devrait donc être normalement la valeur maximale.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec des seuils faibles et un nombre de voisin maximum entre 10 et 15. Cette tendance rejoint celle trouvée pour la première 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.

Les erreurs quadratiques moyennes trouvées sont très grandes, elles sont pratiquement toutes supérieures à 100 mètres.

Dans cette zone, toutes les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont positives, à l'exception de la valeur correspondant à la valeur décrite comme certainement fausse en-dessus. Il y a donc une surestimation des valeurs, tout comme pour la deuxième zone. Les

grandes valeurs trouvées peuvent s'expliquer par le fait qu'il y a à nouveau, comme pour la zone 2, deux pics, qui sont visible sur la figure 21.

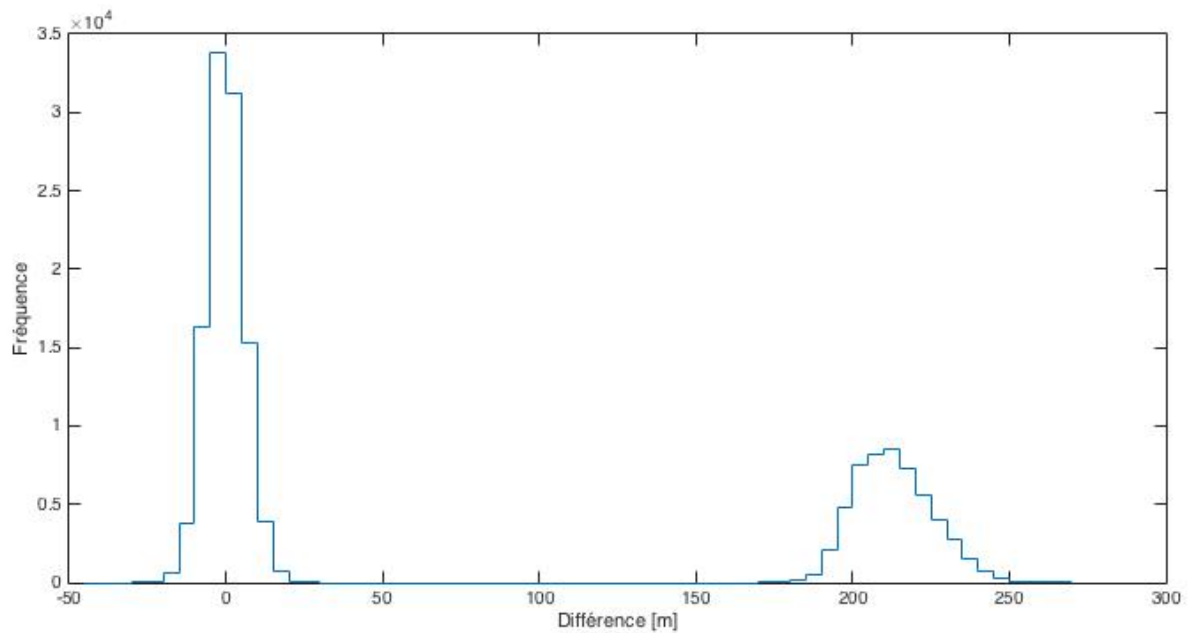


Figure 21 :

Contrairement aux deux premières zones d'étude, les histogrammes provenant des simulations ne suivent que très peu la forme de l'histogramme du MNT de base, comme le montre la figure 22. Toutefois, le même phénomène se produit lorsque le seuil augmente, à savoir, une convergence des valeurs simulées vers les valeurs centrales. Le fait de ne pas avoir de bons histogrammes découle de la haute valeur des résultats de l'erreur quadratique moyenne ainsi que de la moyenne des différences.

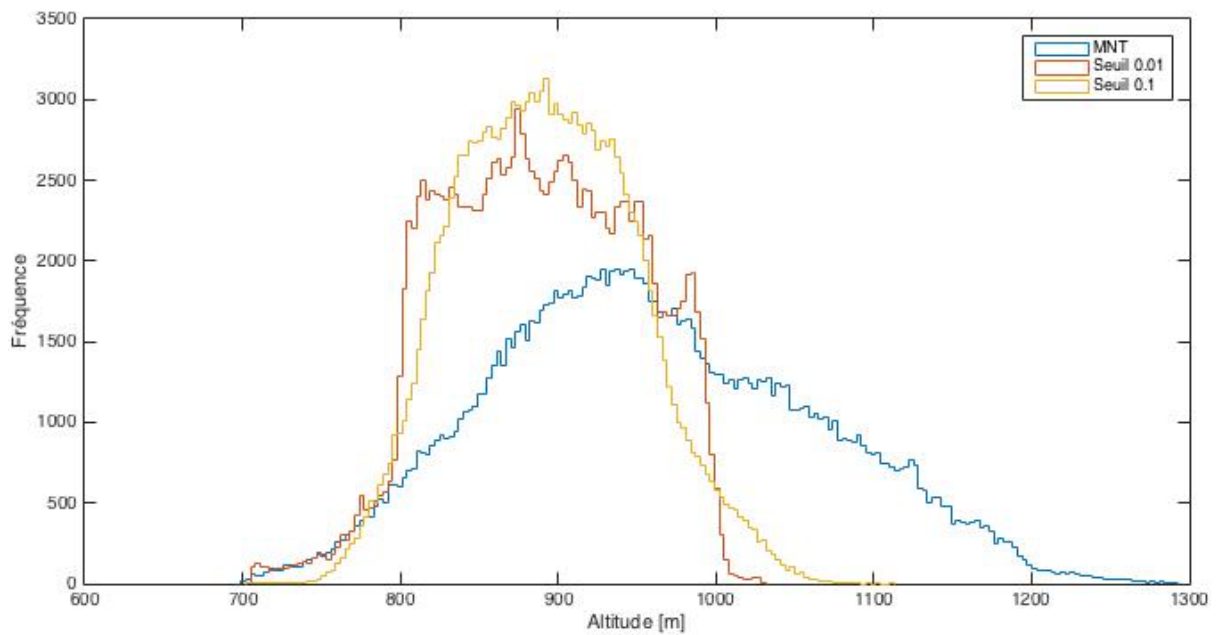


Figure 22 :

12.1.4. Zone 4

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la dernière zone avec l'entier du MNT sont compris entre 0.4 et 1.5 mètres. Ces erreurs sont très faibles par rapport à celles des autres zones. L'explication provient du fait que la différence d'altitude entre la région la plus haute et la plus basse de notre zone d'étude est plus faible que pour les zones précédentes.

Tout comme les autres zones étudiées, l'erreur augmente lorsque le seuil grandit, car la liberté apportée à la validation de la valeur grandit elle aussi. Les meilleurs résultats proviennent de la combinaison entre un seuil faible et un petit nombre maximum de voisin, mise à part 1. Cela contredit pour la troisième fois les dires de Meerchman et al. (2013). En effet, plus le nombre de voisin augmente et plus l'erreur croît.

Dans cette zone, toutes les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont égales à zéro ou très proche. Il n'y a donc pas de surestimation ou sous-estimation. De plus, l'histogramme ne présente qu'un seul pic, ce qui diminue la moyenne. Le fait que l'erreur quadratique moyenne soit faible agit aussi sur la faible différence. Comme le montre la figure 23, la majeure partie des valeurs simulées est pratiquement identique aux valeurs de base.

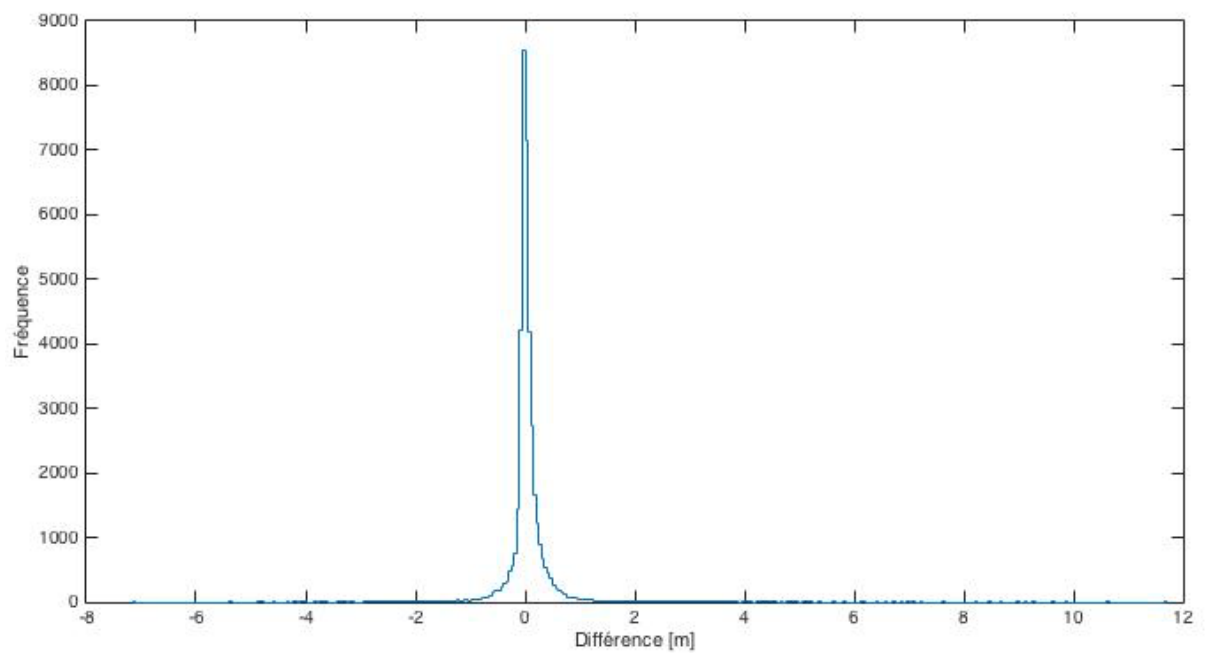


Figure 23 :

Comme pour les deux premières zones, les histogrammes provenant du downscaling suivent plus ou moins le tracé du MNT de base. De nouveau, plus le seuil augmente, plus l'histogramme diffère, avec une augmentation des valeurs centrales, comme le montre la figure 24.

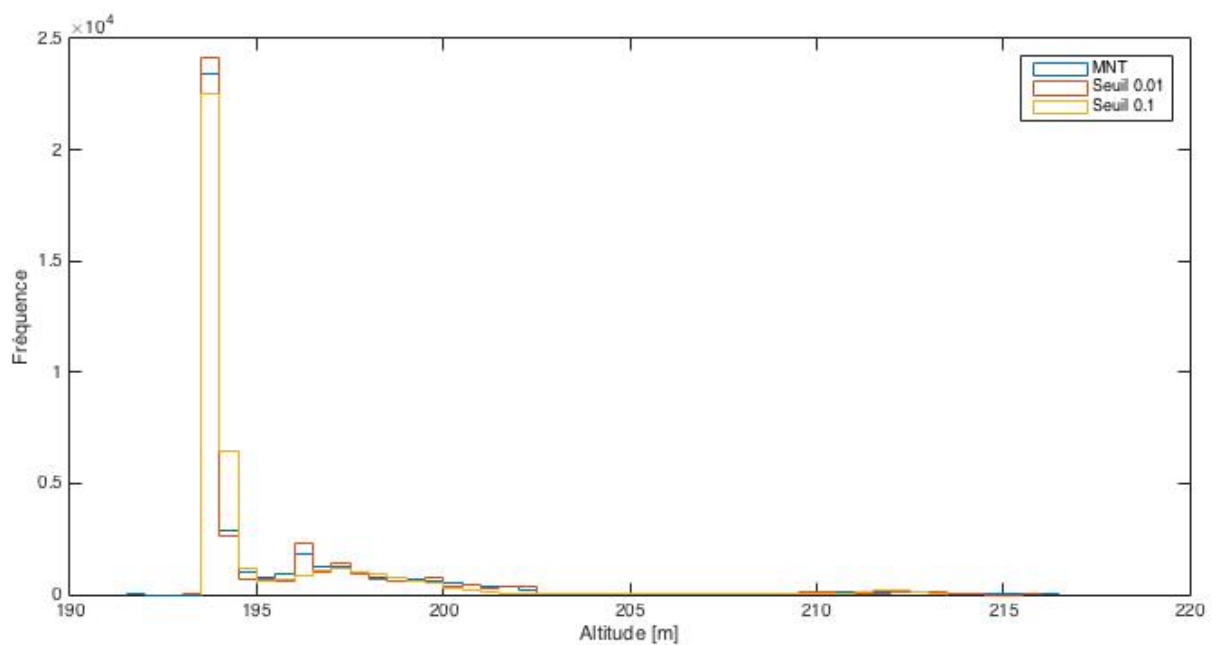


Figure 24 :

12.1.5. Résumé

En résumé, plus les seuils sont grands moins, les résultats sont concluants. Les meilleures simulations interviennent pour les petits seuils avec un nombre de voisin maximum inférieur à 30, du moins pour trois des quatre zones d'étude. Les résultats de l'erreur quadratique moyenne élevés montrent que le downscaling par l'algorithme d'échantillonnage direct sur l'ensemble du MNT n'est pas optimal.

12.2. Fluctuation

12.2.1. Zone 1

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la première zone avec uniquement les fluctuations sont compris entre 6.6 et 16.9 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des seuils faibles et un petit nombre de voisin maximum, mais supérieur à 1. Ce résultat contredit à nouveau la conclusion de Meerschman et al. (2013).

Les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont dans tous les cas positives et ne dépassent pas 4 mètres. Une surestimation générale existe, mais elle est assez faible. Cette faiblesse provient du peu de différence entre les altitudes des fluctuations, ainsi que par le seul pic sur l'histogramme que nous montre la figure 25.

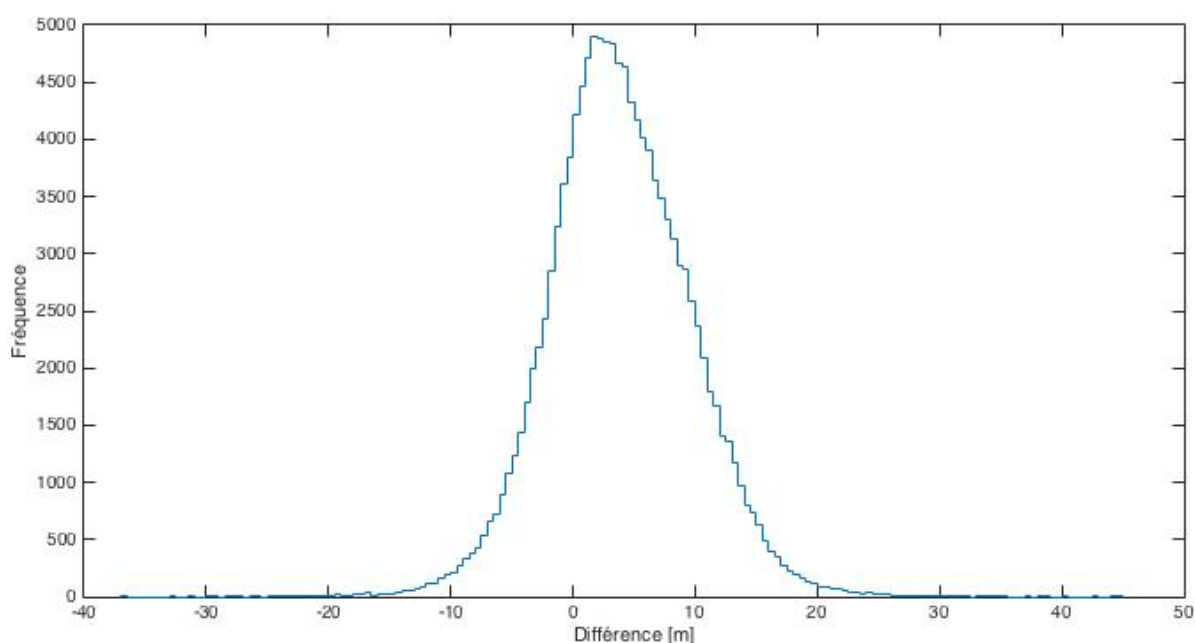


Figure 25 :

Les histogrammes provenant des simulations avec des seuils 0.01 et 0.1 suivent celui du MNT de base, comme le montre la figure 26. 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.

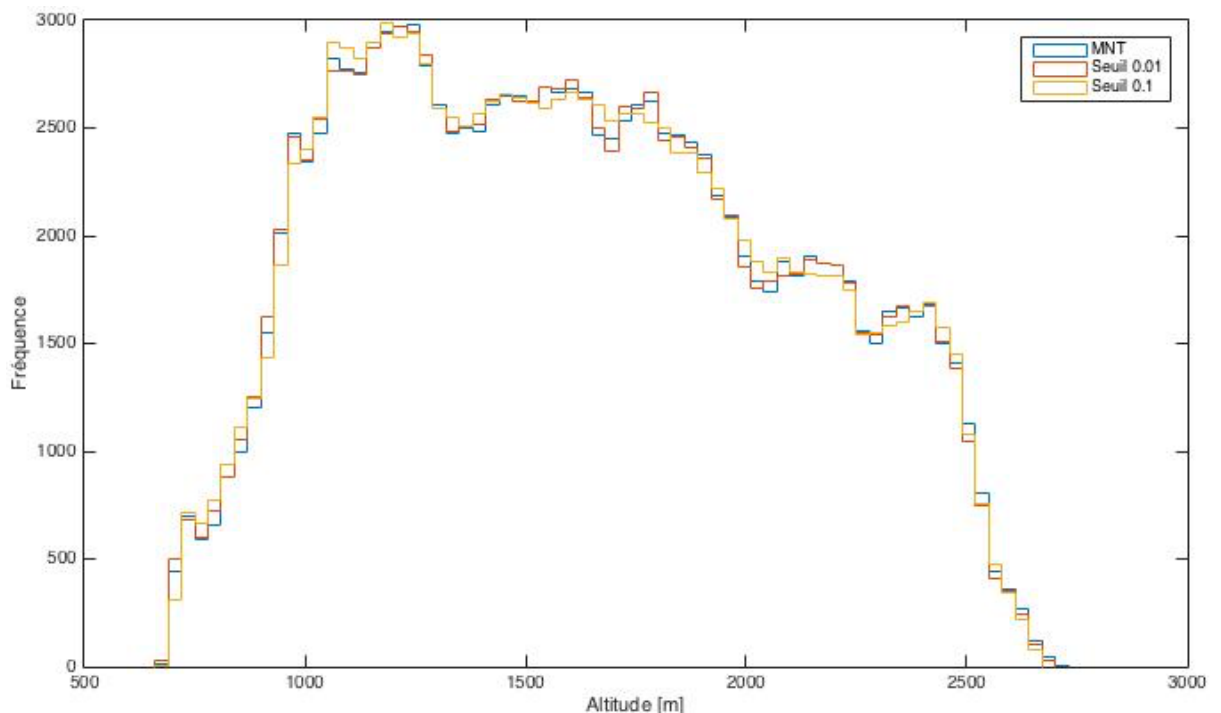


Figure 26 :

12.2.2. Zone 2

Les résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la deuxième zone avec uniquement les fluctuations sont compris entre 3.1 et 11.1 mètres. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des seuils faibles et un petit nombre de voisin maximum, mais supérieur à 1. Ce résultat contredit à nouveau la conclusion de Meerschman et al. (2013).

Les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui provenant du downscaling sont, dans pratiquement tous les cas négatives, mise à part pour le seuil le plus élevé avec 1 seul voisin, où elle est nulle. Etant donné que les valeurs ne dépassent pas un mètre de différence avec le MNT de base, les résultats sont bons malgré une légère sous-estimation générale.

Comme le montre la figure 27, 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.

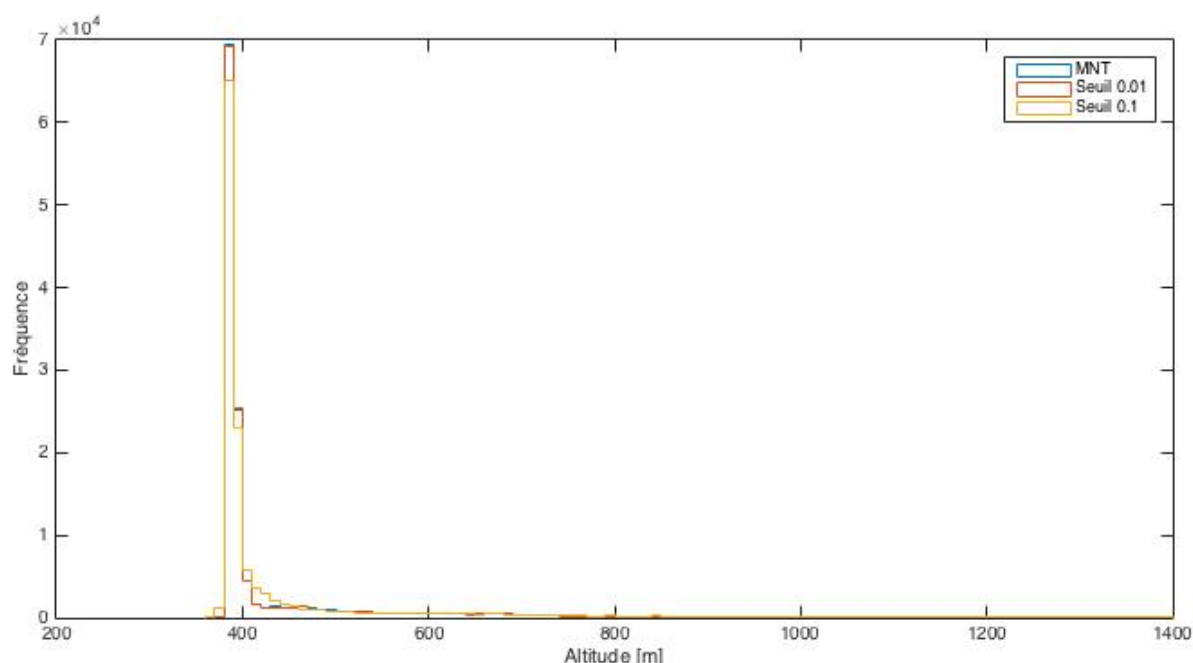


Figure 27 :

12.2.3. Zone 3

Tout comme les deux premières zones, les meilleurs résultats de l'erreur quadratique moyenne pour la troisième zone avec uniquement les fluctuations sont obtenus avec des seuils faibles et un petit nombre de voisin maximum, mais supérieur à 1. Ils contredisent donc une fois de plus les dires de Meerschman et al. (2013) au sujet du nombre de voisin maximum à avoir.

Les moyennes des différences d'altitude entre le MNT de base et celui obtenu après le downscaling sont relativement faibles, étant donné qu'elles ne dépassent pas les 1 mètres. Comme pour les autres zones, lorsque seules les fluctuations sont prises en compte, il n'y a qu'un seul pic sur l'histogramme des différences, ce qui ne provoque pas une augmentation de la moyenne.

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 28 nous le montre.

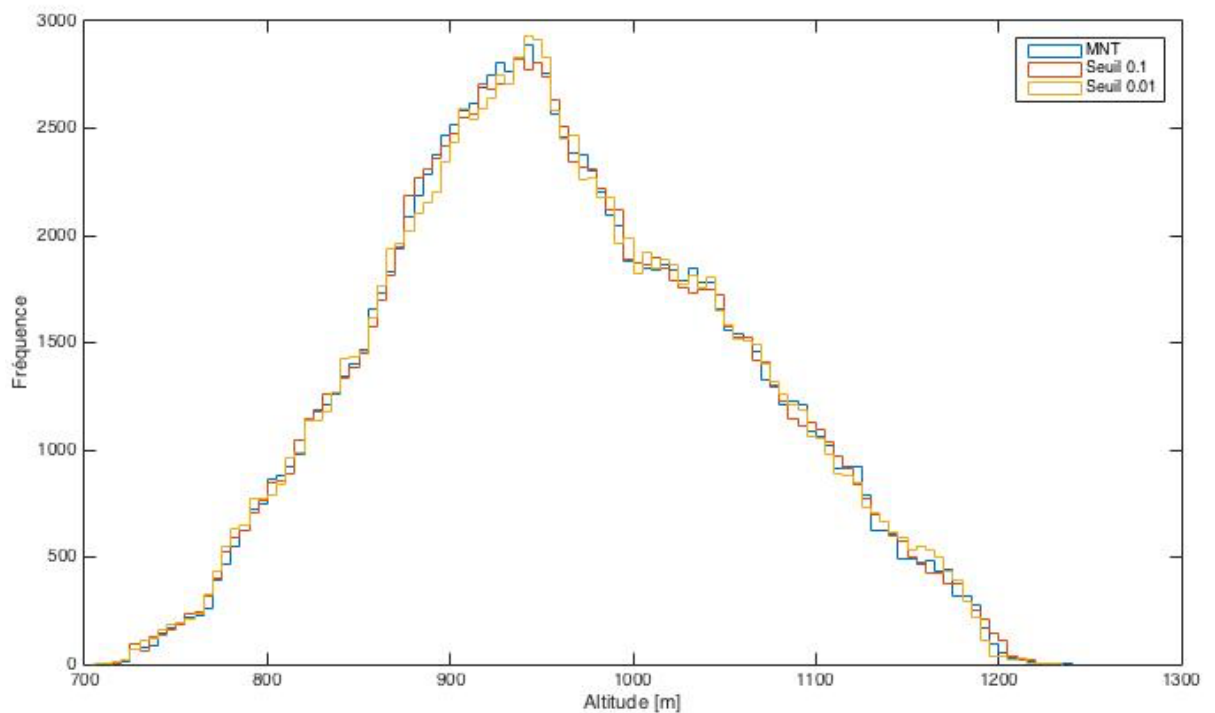


Figure 28 :

12.2.4. Zone 4

Pour cette dernière zone, l'erreur quadratique moyenne est très faible, car elle ne dépasse pas les 1 mètres. Comme pour les zones précédentes, les meilleurs résultats s'obtiennent avec un seuil faible et un nombre de voisin maximum relativement peu élevé. Cela peut s'expliquer par le fait que la différence d'altitude des fluctuations ne dépasse pas les 15 mètres, ce qui est relativement faible.

La moyenne des différences d'altitude entre le MNT de base et celui obtenu après le downscaling est pratiquement nulle. Par conséquent, la simulation a donné de bons résultats, en ne surestimant ou ne sous-estimant pas l'altitude.

La figure 29 montre que les histogrammes des MNT créés grâce au downscaling suivent plus ou moins celui de base.

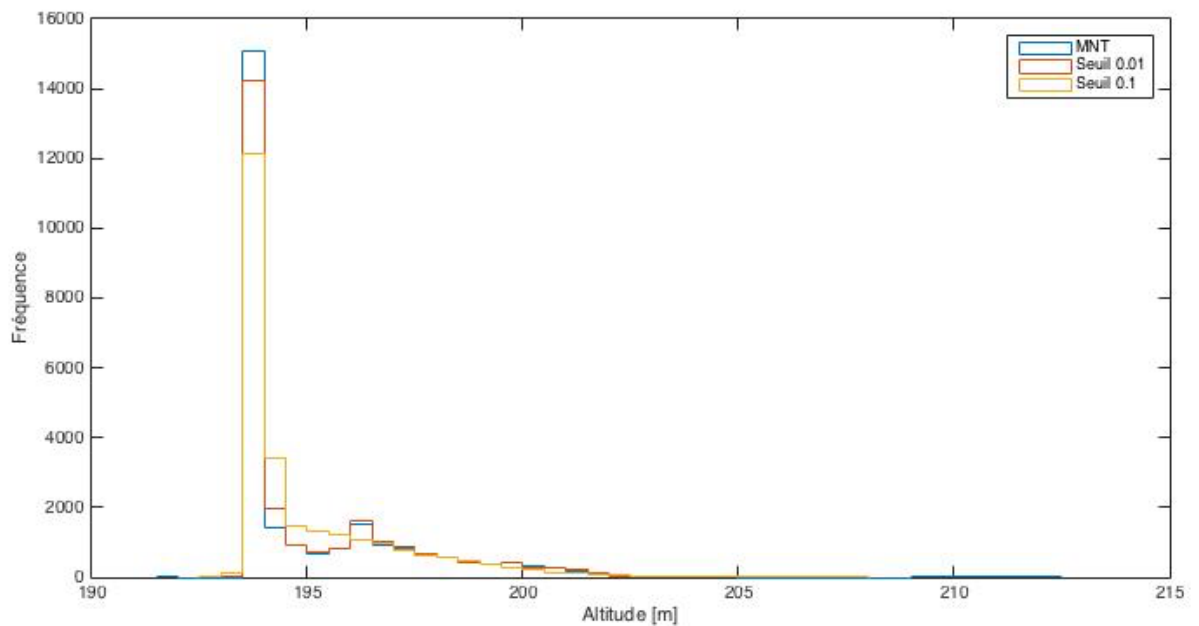


Figure 29 :

12.2.5. Résumé

Pour le downscaling des fluctuations des MNT, les meilleurs résultats proviennent d'un seuil peu élevé et d'un nombre de voisin maximum supérieur à 1, mais ne dépassant pas les 30 voisins.

12.3. Comparaison des approches

Les simulations effectuées sur les quatre zones d'étude ont permis de montrer que les meilleurs résultats surviennent lorsque les seuils sont faibles et que le nombre de voisin est inférieur à 30.

L'approche de downscaling en ne prenant en compte que les fluctuations de MNT permet d'obtenir de meilleurs résultats. Cela provient du fait que les différences d'altitude entre les fluctuations sont plus faibles que celles du MNT complet. De plus, elle permet de supprimer le deuxième pic sur les histogrammes des différences entre les MNT simulés et celui de base.