



HAL
open science

Etude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale

Mhamad El El Hage Hage

► **To cite this version:**

Mhamad El El Hage Hage. Etude de la qualité géomorphologique de modèles numériques de terrain issus de l'imagerie spatiale. Autre. Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, 2012. Français. NNT : 2012CNAM0846 . tel-00780682

HAL Id: tel-00780682

<https://theses.hal.science/tel-00780682>

Submitted on 24 Jan 2013

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

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

ÉCOLE DOCTORALE 415**Laboratoire de Géodésie et Géomatique (L2G)****THÈSE** présentée par :**Mhamad EL HAGE**soutenue le : **12 novembre 2012**pour obtenir le grade de : **Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers**Discipline/ Spécialité : **Géomatique / Géodésie****Etude de la qualité géomorphologique de
modèles numériques de terrain issus de
l'imagerie spatiale****THÈSE dirigée par :**

M. POLIDORI Laurent

Professeur CNAM, Directeur de thèse

Mme SIMONETTO Elisabeth

Maître de conférences, CNAM/ESGT

M. FAOUR Ghaleb

Chercheur, CNRS Liban

RAPPORTEURS :

Mme CORBONNOIS Jeannine

Professeur des Universités, Université du Maine

M. GRUSSENMEYER Pierre

Professeur des Universités, INSA de Strasbourg

EXAMINATEURS :

M. TOUTIN Thierry

Chercheur, Ressources naturelles Canada

M. CANTOU Jean-Philippe

Chef de Projet, IGN Espace

*Pour les enfants innocents
torturés et abattus
sous un silence coupable...*

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes parents, mes frères et sœurs qui m'ont encouragé et soutenu durant les trois années de la thèse. Je remercie également mes amis et mes collègues qui m'ont aussi aidé dans les moments difficiles.

Je veux exprimer ma sincère gratitude à M. Polidori, directeur de thèse, pour m'avoir soutenu ainsi que pour ses commentaires et ses orientations toujours pertinents et constructifs. Je tiens à remercier Mme Simonetto, qui a encadré mon travail, pour sa disponibilité et son aide précieuse. Je remercie également M. Faour, qui a encadré mon travail de fin d'études d'ingénieur et m'a suivi durant la période de thèse effectuée au CNRS du Liban, pour sa disponibilité et ses remarques de qualité.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury qui ont consacré du temps pour la lecture du rapport et l'évaluation du travail.

Je souhaite aussi remercier les membres du laboratoire L2G avec qui j'ai passé la plus grande partie de la thèse notamment Benoît, Bilel, Eric, Frédéric, Ghyslain, Jean-Michel, Jérôme, Joëlle, José, Laurent, Marcell, Maryam, Mathieu, Mickaël, Stéphane. Je n'oublie évidemment pas les membres du CNRS du Liban en particulier M. Chadi Abdallah pour ses conseils et les données qu'il nous a fournies.

Je remercie aussi les membres d'IGN-Espace, en particulier M. Jean-Philippe Cantou, pour nous avoir fourni le logiciel GeoView.

Merci sincèrement aux membres du projet « bassins versants en Haïti », en particulier M. Cédric Gaucherel pour ses idées et son support informatique. Ce projet était la première application directe de mon étude et m'a permis d'aborder les problèmes que peuvent rencontrer les utilisateurs de MNT.

Je remercie par ailleurs Alexandre Hervé qui a traité un aspect de ma thèse durant son travail de fin d'études. Son travail m'a aidé à répondre à plusieurs questions.

Je pense également aux personnels de l'ESGT, notamment Nelly, Nathalie et Christophe, qui m'ont accompagné dans ma formation et m'ont fourni un soutien par leur motivation.

Résumé

La production de Modèles Numériques de Terrain (MNT) a subi d'importantes évolutions durant les deux dernières décennies en réponse à une demande croissante pour des besoins scientifiques et industriels. De nombreux satellites d'observation de la Terre, utilisant des capteurs tant optiques que radar, ont permis de produire des MNT couvrant la plupart de la surface terrestre. De plus, les algorithmes de traitement d'images et de nuages de points ont subi d'importants développements. Ces évolutions ont fourni des MNT à différentes échelles pour tout utilisateur. Les applications basées sur la géomorphologie ont profité de ces progrès. En effet, ces applications exploitent les formes du terrain dont le MNT constitue une donnée de base.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact des paramètres de production de MNT par photogrammétrie et par InSAR sur la qualité de position et de forme de ces modèles. La qualité de position, évaluée par les producteurs de MNT, n'est pas suffisante pour évaluer la qualité des formes. Ainsi, nous avons décrit les méthodes d'évaluation de la qualité de position et de forme et la différence entre elles. Une méthode originale de validation interne, qui n'exige pas de données de référence, a été proposée. Ensuite, l'impact des paramètres de l'appariement stéréoscopique, du traitement interférométrique ainsi que du rééchantillonnage, sur l'altitude et les formes, a été évalué. Finalement, nous avons conclu sur des recommandations pour choisir correctement les paramètres de production, en particulier en photogrammétrie.

Nous avons observé un impact négligeable de la plupart des paramètres sur l'altitude, à l'exception de ceux de l'InSAR. Par contre, un impact significatif existe sur les dérivées de l'altitude. L'impact des paramètres d'appariement présente une forte dépendance avec la morphologie du terrain et l'occupation du sol. Ainsi, le choix de ces paramètres doit être effectué en prenant en considération ces deux facteurs. L'effet des paramètres du traitement interférométrique se manifeste par des erreurs de déroulement de phase qui affectent principalement l'altitude et peu les dérivées. Les méthodes d'interpolation et la taille de maille présentent un impact faible sur l'altitude et important sur ses dérivées. En effet, leur valeur et leur qualité dépendent directement de la taille de maille. Le choix de cette taille doit s'effectuer selon les besoins de l'application visée. Enfin, nous avons conclu que ces paramètres sont interdépendants et peuvent avoir des effets similaires. Leur choix doit être effectué en prenant en considération à la fois l'application concernée, la morphologie du terrain et son occupation du sol afin de minimiser l'erreur des résultats finaux et des conclusions.

Mots clés : MNT, Géomorphologie, Qualité, Validation externe, Validation interne, Imagerie spatiale, Photogrammétrie, InSAR, Paysage, Rééchantillonnage, Analyse de sensibilité.

Résumé en anglais

The production of Digital Elevation Models (DEMs) has undergone significant evolution during the last two decades resulting from a growing demand for scientific as well as industrial purposes. Many Earth observation satellites, using optical and radar sensors, have enabled the production of DEMs covering most of the Earth's surface. The algorithms of image and point cloud processing have also undergone significant evolution. This progress has provided DEMs on different scales, which can fulfill the requirements of many users. The applications based on geomorphology have benefitted from this evolution. Indeed, these applications concentrate specifically on landforms for which the DEM constitutes a basic data.

The aim of this study is to assess the impact of the parameters of DEM production by photogrammetry and InSAR on position and shape quality. The position quality, assessed by DEM producers, is not sufficient for the evaluation of shape quality. Thus, the evaluation methods of position and shape quality and the difference between them are described. A novel method of internal validation, which does not require reference data, is proposed. Then, the impact of image matching and interferometric processing parameters as well as resampling, on elevation and shapes, is assessed. Finally, we conclude on recommendations on how to choose the production parameters correctly, particularly for photogrammetry.

We observe little impact from most of the parameters on the elevation, except InSAR parameters. On the other hand, there is a significant impact on the elevation derivatives. The impact of matching parameters presents a strong dependence on the terrain morphology and the landcover. Therefore, these parameters have to be selected by taking into account these two factors. The effect of interferometric processing manifests by phase unwrapping errors that mainly affect the elevation and less the derivatives. The interpolation methods and the mesh size present a small impact on the elevation and a significant impact on the derivatives. Indeed, the value of the derivatives and their quality depend directly on the mesh size. The selection of this size has to be made according to the foreseen application. Finally, we conclude that these parameters are interdependent and can have similar effects. They must be selected according to the foreseen application, the terrain morphology and the landcover in order to minimize the error in the final results and the conclusions.

Keywords: DEM, Geomorphology, Quality, External validation, Internal validation, Spatial imagery, Photogrammetry, InSAR, Landscape, Resampling, Sensitivity analysis.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Résumé en anglais	5
Table des matières	6
Liste des tableaux	9
Liste des figures	10
Introduction générale	14
Première partie : Le relief terrestre : représentation et caractérisation	18
I. Altitudes, formes et représentation du terrain	20
I.1 Altitudes et formes du terrain	20
I.2 Représentation du terrain	22
I.3 Conclusion.....	24
II. Géomorphométrie	25
II.1 Indices géomorphologiques locaux.....	26
II.1.1 Pente maximale et aspect.....	27
II.1.2 Courbure	29
II.2 Descripteurs hydrographiques.....	29
II.2.1 Descripteurs de bassin versant.....	30
II.2.2 Descripteurs du réseau hydrographique.....	30
II.2.3 Extraction du bassin versant et du réseau hydrographique.....	33
II.3 Conclusion	33
Conclusion de la première partie.....	34
Deuxième partie : Production et évaluation du MNT	35
III. Production du MNT	37
III.1 Photogrammétrie.....	37
III.1.2 Profil de corrélation.....	40
III.1.3 Paramètres contrôlables.....	41
III.2 Interférométrie radar à synthèse d'ouverture	41
III.2.1 Acquisition des images.....	41
III.2.2 Traitement interférométrique	42
III.3 Forme de la maille et codage des altitudes	44

III.3.1	Forme de la maille.....	44
III.3.2	Choix de la taille de maille en fonction de l'échelle de cartographie.....	45
III.3.3	Codage des altitudes.....	46
III.4	Méthode d'interpolation.....	47
III.4.1	Interpolation linéaire	47
III.4.2	Interpolation des voisins naturels.....	47
III.4.3	Interpolation bilinéaire	48
III.4.4	Interpolation bicubique	49
III.4.5	Interpolation des plus proches voisins.....	49
III.4.6	Interpolation par pondération inverse à la distance (PID).....	50
III.4.7	Krigeage	50
III.4.8	Interpolation par Spline.....	51
III.5	Conclusion	51
IV.	Evaluation du MNT	52
IV.1	Validation externe.....	53
IV.1.1	Qualité de position	54
IV.1.2	Qualité des formes.....	54
IV.2	Validation interne.....	59
IV.2.1	Fondement.....	59
IV.2.2	Méthodologie	60
IV.3	Conclusion	61
	Conclusion de la deuxième partie	62
	Troisième partie : Facteurs de qualité géomorphologique	63
V.	Description de la zone d'étude et des données utilisées	65
V.1	Description de la topographie, la morphologie et l'occupation du sol	65
V.2	Imagerie et logiciels utilisés.....	68
V.3	Données de référence.....	69
VI.	Influence des paramètres de l'appariement d'images optiques	70
VI.1	Influence de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol.....	71
VI.2	Données utilisées et méthodologie.....	72
VI.3	Analyse de sensibilité	74
VI.3.1	Impact sur le taux d'échec d'appariement.....	74
VI.3.2	Impact sur l'altitude et sur ses dérivées	80
VI.4	Validation.....	84

VI.4.1	Validation externe	84
VI.4.2	Validation interne.....	89
VI.5	Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique.....	92
VI.5.1	Effet sur les bassins versants.....	92
VI.5.2	Effet sur le réseau hydrographique et ses attributs.....	93
VI.6	Synthèse de l'étude et discussion.....	94
VI.7	Conclusion	97
VII.	Influence des paramètres de traitement interférométrique des données RSO	99
VII.1	Méthodologie	100
VII.2	Analyse de sensibilité	101
VII.2.1	Impact sur l'altitude et la pente	101
VII.2.2	Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique.....	107
VII.3	Conclusion	111
VIII.	Influence des méthodes de rééchantillonnage.....	113
VIII.1	Impact des méthodes d'interpolation.....	113
VIII.1.1	Choix et performance des méthodes d'interpolation.....	113
VIII.1.2	Impact sur l'altitude et la pente	114
VIII.2	Impact de la taille de maille.....	115
VIII.2.1	Impact sur l'altitude et la pente	115
VIII.2.2	Impact sur l'erreur de l'altitude et de la pente.....	119
VIII.2.3	Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique.....	121
VIII.3	Conclusion.....	123
IX.	Vers une meilleure représentation morphologique.....	124
IX.1	L'importance de l'évaluation de la qualité morphologique	124
IX.2	Synthèse de l'influence des paramètres	125
IX.3	Choix des paramètres selon l'application	129
IX.4	Conclusion	130
	Conclusion de la troisième partie	131
	Conclusion générale	132
	Bibliographie.....	137

Liste des tableaux

tableau II.1. Indices géomorphologiques primaires extraits du MNT (source : Moore et al., 1991). ...	26
tableau II.2. Algorithmes utilisés dans le calcul de p et q (m : taille de maille).....	28
tableau V.1. Caractéristiques des couples d'images optiques.	68
tableau VI.1. Valeurs des paramètres d'appariement utilisées dans l'étude (valeurs par défaut soulignées).....	74
tableau VI.2. Equations des modèles d'erreur avec les pépites, seuils et portées pratiques correspondantes.	87
tableau VII.1. Valeurs des paramètres de traitement.....	100
tableau IX.1. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement sur le taux d'échec en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol.	126
tableau IX.2. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement et de la taille de maille sur la morphologie du MNT en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol : bilan des impacts.....	127
tableau IX.3. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement et de la taille de maille sur la morphologie du MNT en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol : vue synoptique.	128

Liste des figures

figure I.1. Signal continu formé de deux harmoniques de fréquences différentes.	21
figure I.2. Fréquence d'échantillonnage en fonction de la fréquence maximale.....	21
figure I.3. Extrait de la carte de Cassini du département de Queyras aux alpes (A) (Source : Bibliothèque nationale de France) et zone de la vallée Marineris sur Mars (B) (source : Google Earth).	22
figure I.4. Tableaux du 17 ^{ème} (peintre Joos de MOMPER).	22
figure I.5. Représentation de l'altitude du terrain par courbes de niveau (A) et avec un MNT représenté en hypsométrie (B).	23
figure I.6. Représentation du relief en hypsométrie (A) et par ombrage (B).	24
figure II.1. Sources et applications de la géomorphométrie (source : Pike et al., 2008).	25
figure II.2. Fenêtre de calcul des indices géomorphologiques.	27
figure II.3. Relation entre l'indice de compacité et la forme du bassin versant (source : Musy et Higy, 2004).	30
figure II.4. Réseau hydrographique classifié selon l'ordre de Strahler.	31
figure II.5. Courbe de Von Koch.....	31
figure II.6. Différentes ouvertures du compas.....	32
figure II.7. Estimation de la dimension fractale de la courbe de Von Koch par la méthode du compas.	32
figure II.8. Distances utilisées pour le calcul de la sinuosité.....	33
figure III.1. Fenêtre de corrélation de taille 3×3 et vecteur de radiométrie (Paparoditis, 2001).	38
figure III.2. Droite épipolaire (L_1) du point m_1 dans l'image esclave.	38
figure III.3. Domaine de recherche en altitude du point homologue.....	39
figure III.4. Profil de la corrélation (m_2 : point homologue)	40
figure III.5. Cas d'une décision fiable.	40
figure III.6. Problème de périodicité des pics de corrélation.....	41
figure III.7. Mode d'acquisition des données RSO.	42
figure III.8. Compression, repliement et ombre.	42
figure III.9. Bases perpendiculaire et parallèle.....	43

figure III.10. Traitement InSAR pour extraire les altitudes du terrain.	43
figure III.11. Principe de la triangulation de Delaunay (ABC ne respecte pas la contrainte de Delaunay, ABD le respecte).	45
figure III.12. Diagramme de Voronoï (gauche) et triangulation de Delaunay (droite).	45
figure III.13. Superficie lisible minimale (SLM) au sol et taille de maille maximale (m_{max}) selon différente échelle (E).	46
figure III.14. Triangulation de Delaunay et voisins naturels du point k.	48
figure IV.1. Méthodologie de la validation externe.	55
figure IV.2. Modèle de variance de l'erreur d'altitude ($\gamma_h = (1 - e - h75)$).	56
figure IV.3. Histogramme de pentes.	60
figure IV.4. Choix des paires de points en fonction de la distance dans la direction horizontale (source : Hengl, 2008).	61
figure V.1. Localisation de la zone d'étude et sa topographie décrite par le MNT SPOT par défaut (cf. chapitre VI).	65
figure V.2. Répartition en pourcentage de la pente calculée en utilisant le MNT par défaut.	66
figure V.3. Répartition des classes d'occupations du sol en pourcentage selon la classification utilisée.	67
figure V.4. Répartition des classes d'occupations du sol selon la pente du terrain.	67
figure V.5. Premier (A) et deuxième (B) profils de référence (en rouge).	69
figure VI.1. Modélisation des arbres dans un MNT issu des images simulées du satellite Pléiades (Durupt et al., 2006).	72
figure VI.2. Différence d'altitude en fonction de la pente du terrain.	72
figure VI.3. Taux d'échec en fonction des paramètres d'appariement (SPOT et ASTER).	75
figure VI.4. Impact des paramètres d'appariement sur le taux d'échec en fonction de la pente du MNT SPOT par défaut.	76
figure VI.5. Impact des paramètres d'appariement sur le taux d'échec en fonction de l'occupation du sol.	78
figure VI.6. Impact des paramètres d'appariement sur l'altitude, la pente et la courbure de profil des MNT SPOT et ASTER.	80
figure VI.7. Impact des paramètres d'appariement sur la pente moyenne en fonction de la pente du premier MNT.	82

figure VI.8. Impact des paramètres d'appariement sur la pente moyenne en fonction de l'occupation du sol.	83
figure VI.9. EMQ de l'altitude en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation (A), du seuil de corrélation (B) et du seuil de courbure (C).	85
figure VI.10. Variogramme de l'erreur d'altitude.	86
figure VI.11. Erreur de la pente (A) et de l'aspect (B) en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation.	87
figure VI.12. EMQ de la pente en fonction de la distance de calcul de la pente, de la taille de la fenêtre de corrélation (A, A'), du seuil de corrélation (B, B') et du seuil de courbure (C, C') pour les deux profils.	88
figure VI.13. Variogramme de la pente en fonction de la distance pour les différentes tailles de fenêtre de corrélation.	90
figure VI.14. Présence d'artéfacts de formes carrées de fortes pentes sur les zones de faibles pentes.	90
figure VI.15. Pourcentage de cuvettes (A) et moyenne quadratique de la différence d'altitude sur les cuvettes (B).	91
figure VI.16. Impact des paramètres d'appariement sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité (C) du bassin versant Nahr Ibrahim.	92
figure VI.17. Impact de taille de la fenêtre de corrélation et du seuil de corrélation sur le pourcentage (A) et la longueur moyenne (B) des chenaux ayant un ordre de Strahler entre 1 et 4.	93
figure VI.18. Différence de la dimension fractale (A) et de la sinuosité (B) en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation.	94
figure VII.1. Impact des paramètres du traitement des images RSO du couple 1 sur l'altitude moyenne et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.	101
figure VII.2. Impact des paramètres sur l'erreur de l'altitude du couple 1 et erreur sur les deux couples avec les paramètres par défaut.	102
figure VII.3. Impact du filtrage et de la méthode d'interpolation sur l'erreur de l'altitude du couple 2 (A) et sur la cohérence moyenne des couples 1 et 2 (B).	103
figure VII.4. Différence de l'altitude (A) et de la cohérence (B) entre les méthodes d'interpolation cubique et linéaire du couple 1 et représentation 3D de la différence d'altitude (C). La dépression de terrain est visible sur le MNT produit avec la méthode d'interpolation linéaire.	104
figure VII.5. Différence de la cohérence entre les méthodes d'interpolation cubique et par cosinus surélevé.	105

figure VII.6. Différence de l'altitude (A) et de la cohérence (B) produits avec les valeurs alpha 1 et 0,2 du filtre de Goldstein.	105
figure VII.7. Localisation du saut de phase (en rouge) avec la méthode d'interpolation linéaire (A) et avec les valeurs alpha 1 et 0,2 du filtrage (B).....	106
figure VII.8. Différence de l'altitude (A) et de la pente (B) des MNT produits avec les méthodes d'interpolation cubique et linéaire et angle d'incidence locale nul (en rouge).....	106
figure VII.9. Impact des paramètres sur la moyenne et l'écart-type de la pente pour le couple 1 et valeurs pour les deux couples avec les paramètres par défaut.....	107
figure VII.10. Impact des paramètres sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité du bassin Nahr Ibrahim (C) pour le couple 1 et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.	109
figure VII.11. Impact sur le nombre de bras de cours d'eau et d'embranchements (A) et sur la longueur moyenne des bras de cours d'eau (B) pour le couple 1 et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.....	110
figure VII.12. Impact sur la dimension fractale du réseau hydrographique ayant l'ordre de Strahler maximal pour le couple 1 et résultats sur les deux couples avec les paramètres par défaut.....	111
figure VIII.1. Histogrammes des altitudes (A) et des pentes (B) pour les trois méthodes d'interpolation.	115
figure VIII.2. Histogrammes de l'altitude (A), de la pente (B) et de la courbure (C) des MNT produits pas les fenêtres de corrélation 5×5 et 13×13.	116
figure VIII.3. Pentes supérieures à 20 degrés (en noir).....	117
figure VIII.4. Pourcentage de cellules ayant une pente supérieure à 20, 30 et 40 degrés selon différentes tailles de maille.....	118
figure VIII.5. Courbes de niveau générées avec différentes tailles de maille.	119
figure VIII.6. L'EMQ de l'altitude en fonction de la taille de maille.	119
figure VIII.7. Erreur de la dérivée partielle (A) et celle de la pente du profil (B) en fonction de la taille de maille.	120
figure VIII.8. Impact de la taille de maille sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité (C) du bassin versant Nahr Ibrahim.	121
figure VIII.9. Impact du sous-échantillonnage sur le nombre de bras de cours d'eau et d'embranchements (A), sur la longueur moyenne de ces bras (B), sur l'ordre de Strahler maximal (C) et sur la dimension fractale du réseau hydrographique ayant l'ordre de Strahler maximal (D).	122

Introduction générale

Modélisation tridimensionnelle du relief terrestre

La modélisation du relief terrestre a commencé depuis plusieurs siècles sous forme de cartes topographiques. Ces cartes ont connu d'importantes améliorations pour répondre à des objectifs tant administratifs que militaires aux dix-septième et dix-huitième siècles. Elles ont constitué jusqu'à nos jours une des sources les plus utilisées pour décrire la topographie du terrain. De plus, elles sont utilisées pour produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT) par interpolation de leur altitude. L'apparition des caméras métriques et de la technique de photogrammétrie avec Aimé Laussedat au dix-neuvième siècle ont conduit à une autre approche pour la production des MNT basée cette fois sur des images argentiques, puis plus tard sur celles qui sont numériques. Au vingtième siècle, des nouvelles techniques de production de MNT sont apparues telles que celles basées sur les données RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) et LIDAR (Light Detection And Ranging).

Ces techniques de modélisation tridimensionnelle du terrain ont connu de véritables progrès en réponse à une demande croissante pour des besoins scientifiques et industriels. Ces évolutions ont commencé avec l'intégration du support informatique et la production du premier Modèle Numérique du Terrain (MNT) en 1975 par l'USGS (United States Geological Survey) (Meade, 2008). Ensuite, le lancement des satellites d'observation de la Terre utilisant des capteurs tant optiques que radar ont permis de produire des MNT mondiaux couvrant la plupart de la surface terrestre. Par exemple, la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), lancée en 2000 a recueilli des données altimétriques sur une grande partie de la masse terrestre par interférométrie d'images RSO (Rabus et al., 2003; Jarvis et al., 2004). Ces données sont disponibles gratuitement sur Internet avec une taille de maille de 3 arc-secondes pour la plupart de la surface terrestre et de 1 arc-seconde pour les États-Unis avec une erreur verticale de 6 m. Par ailleurs, le développement du LIDAR, qui fournit un nuage dense de points avec des altitudes très précises, a contribué à une meilleure représentation de la surface terrestre sur de grandes échelles (Hodgson et Bresnahan, 2004). Ces développements ont permis de fournir des MNT à différentes échelles pour tout utilisateur qui s'intéresse à l'analyse du terrain. De même, les algorithmes de traitement d'images et de nuages de points ont subi d'importants développements tout en poursuivant l'évolution des techniques de captage des données. Par exemple, le passage de l'appariement manuel à l'appariement automatique d'images optiques a réduit le temps de production des MNT photogrammétriques.

Parallèlement aux évolutions techniques et algorithmiques de la production des MNT, la géomorphométrie s'est évoluée. Elle est définie comme étant « *la science de la description quantitative et de l'analyse des caractéristiques géométriques-topologiques de la surface terrestre* » (Rasemann et al., 2004). Cette science a pour objet de quantifier la géomorphologie du terrain par le calcul de différents indices à partir d'un MNT. Les indices géomorphologiques sont des descripteurs quantitatifs de la morphologie du terrain pour laquelle la pente, l'aspect et la courbure sont les variables de base. En effet, ils sont utilisés pour caractériser les éléments du relief (MacMillan et

Shary, 2008) pour de nombreuses applications telles que la géomorphologie, la géologie, l'hydrologie, la climatologie, la météorologie, la science des sols et l'étude de la végétation (Hengl et MacMillan, 2008). Par exemple, le sens d'écoulement de l'eau est déterminé selon la direction de la pente maximale (Gruber et Peckham, 2008). Ainsi, le MNT est devenu en plus d'une simple grille contenant les altitudes du terrain, une couche riche en information et nécessaire à l'analyse du terrain.

Premier objectif de la thèse

La qualité d'un MNT peut affecter les résultats ou les conclusions d'analyse des utilisateurs. Cette qualité peut se concevoir selon deux principales approches : qualité des positions et qualité des formes (Schneider, 2000). La considération de la qualité des positions ou de la qualité des formes dépend de l'utilisation du MNT. En effet, certaines applications exigent une bonne qualité de positions, par exemple la production des orthoimages, tandis que d'autres requièrent une fidélité sur les formes comme par exemple l'hydrographie. Pourtant, seule la qualité des positions est indiquée par le fournisseur d'un MNT ou évaluée par l'utilisateur, tandis que celle des formes n'est que rarement évoquée. Vu que les formes sont obtenues à partir des altitudes du MNT, leur qualité dépend directement de la qualité des positions. En effet, la qualité des formes dépend de l'autocorrélation spatiale de l'erreur de l'altitude et la plupart des indices géomorphologiques y sont sensibles (Heuvelink, 1998). Ainsi, il est possible d'avoir une mauvaise qualité des positions, mais une modélisation correcte des formes et vice versa. Par ailleurs, la plupart des indices géomorphologiques dépendent de l'échelle, contrairement à l'altitude qui est indépendante de l'échelle (El Hage et al., 2010). Par conséquent, l'évaluation de leur qualité est relative à la taille de la maille du MNT (Evans et al., 2008b).

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la qualité des formes. Ainsi, nous montrons que l'estimation de la qualité des positions n'est pas suffisante pour cela. Ensuite, nous proposons une méthode d'évaluation de la qualité des formes. Cette méthode consiste en une validation interne qui n'exige pas de données de référence, et une validation externe qui requiert des données de référence.

Deuxième objectif

Plusieurs facteurs peuvent avoir un impact sur la qualité morphologique d'un MNT : Premièrement, la morphologie et l'occupation du sol du terrain modélisé et deuxièmement, la technique de production du MNT comme la photogrammétrie ou l'InSAR. En effet, pour chaque technique, il existe un certain nombre de paramètres contrôlables qui peuvent avoir une influence sur la qualité du MNT produit. Les différentes méthodes de rééchantillonnage ont aussi une influence directe sur la morphologie. Selon (Polidori et al., 1991), il existe des interpolations lissantes comme l'interpolation tendant à préserver les altitudes au détriment de la texture, et d'autres conservant la texture au détriment des altitudes.

La ligne de production du MNT passe donc par plusieurs étapes, chacune d'entre elles peut affecter la qualité morphologique du MNT. Notre étude vise ainsi à évaluer l'impact des paramètres de production sur la morphologie des MNT. Nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'impact des paramètres de l'appariement stéréoscopique, du traitement interférométrique ainsi que des méthodes de rééchantillonnage et de la taille de la maille. De plus, l'erreur d'altitude due à la morphologie du terrain et à l'occupation du sol est souvent négligée mais nous montrons que ces deux facteurs ont pourtant un impact important sur l'analyse morphologique basée sur le MNT. Enfin, nous proposons des critères d'évaluation de la qualité qui peuvent répondre aux exigences de certaines thématiques.

Plan de la thèse

Dans la première partie, nous présentons des généralités sur la différence entre position et formes du terrain et nous abordons les méthodes de représentation d'un MNT. Ensuite, nous introduisons la géomorphométrie et les méthodes de calcul des indices géomorphologiques.

Dans la deuxième partie, nous exposons les techniques de production de MNT à partir d'images optiques et radar. Ensuite, nous abordons les méthodes d'interpolation les plus communément utilisées et leur caractéristique. Nous expliquons aussi les notions de taille et forme de maille d'un MNT et du codage des altitudes. Nous expliquons les méthodes de validation interne et externe de la qualité des MNT.

La troisième partie concerne l'étude de l'impact des paramètres de production du MNT sur les formes et leur qualité. Nous étudions leur impact en photogrammétrie et en interférométrie, à la fois sur les positions et les formes, en tenant compte de la morphologie locale du terrain et de l'occupation du sol. Nous analysons ensuite l'impact de la méthode de rééchantillonnage et de la taille de la maille. Nous concluons sur des recommandations pour choisir correctement des paramètres de production de MNT, en particulier en photogrammétrie, selon l'application.

Première partie

Le relief terrestre : représentation et caractérisation

Le système solaire est composé de plusieurs planètes telluriques dont la surface présente différentes formes. La Terre est l'une de ces planètes ayant ses propres caractéristiques d'altitude et de forme. La représentation de ces caractéristiques sur des cartes ou sur ordinateur est depuis longtemps un outil d'aide à la prise de décision et à d'une meilleure compréhension des phénomènes naturels. Pour cela, les outils et les méthodes permettant cette représentation se sont développés au fil du temps. De plus, la géomorphométrie s'est évoluée afin de répondre au besoin de différentes applications d'étude de la surface terrestre.

Dans cette partie, nous présentons les notions d'altitude et de forme du terrain et les méthodes de représentation du terrain. Nous abordons ensuite la géomorphométrie.

I. Altitudes, formes et représentation du terrain

Le terrain est une surface continue qui s'étale sur différentes altitudes et présente une diversité de formes. Il est composé du relief ayant des caractéristiques morphologiques variées. Par définition le relief est « *n'importe quel objet physique de la surface de la terre ayant une forme caractéristique et reconnaissable* » (Bates and Jackson, 2005). Cette morphologie résulte d'un ensemble de processus endogènes tels que la tectonique et exogènes tels que le climat (Hugget, 2003).

Dans ce chapitre, nous introduisons les notions d'altitude et de forme du terrain et les méthodes de représentation du terrain.

I.1 Altitudes et formes du terrain

Le relief est similaire à un signal bidimensionnel continu. Sa modélisation numérique exige un échantillonnage de points tridimensionnels. Chaque point est caractérisé par une position planimétrique et altimétrique. Cette position est calculée par rapport à une référence et elle n'a aucun sens si cette référence n'est pas précisée. En planimétrie, la référence est un repère souvent relié à un système de coordonnées. En altimétrie, cette référence est le plus souvent une surface qui représente le niveau moyen de la mer appelée géoïde et donc on parle de l'altitude. Elle peut être aussi un ellipsoïde qui est une approximation du géoïde et, dans ce cas on parle d'une hauteur ellipsoïdale. Ces coordonnées planimétriques et altimétriques définissent la position d'un point dans l'espace par rapport à un repère tridimensionnel. La mesure de cette position est possible par plusieurs techniques telles que la photogrammétrie et l'interférométrie d'images radar. En effet, ces techniques fournissent un échantillon de points tridimensionnels repartis sur une zone.

Afin de bien modéliser la morphologie du relief, la répartition des points doit respecter le théorème de Shannon (Polidori et El Hage, 2012). Ainsi, la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale à deux fois la fréquence maximale (figures suivantes) :

$$f_{éch} \geq 2f_{max} \quad (1.1)$$

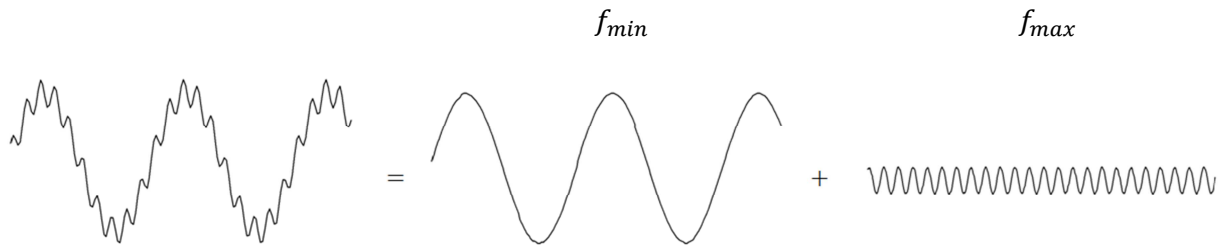


figure I.1. Signal continu formé de deux harmoniques de fréquences différentes.

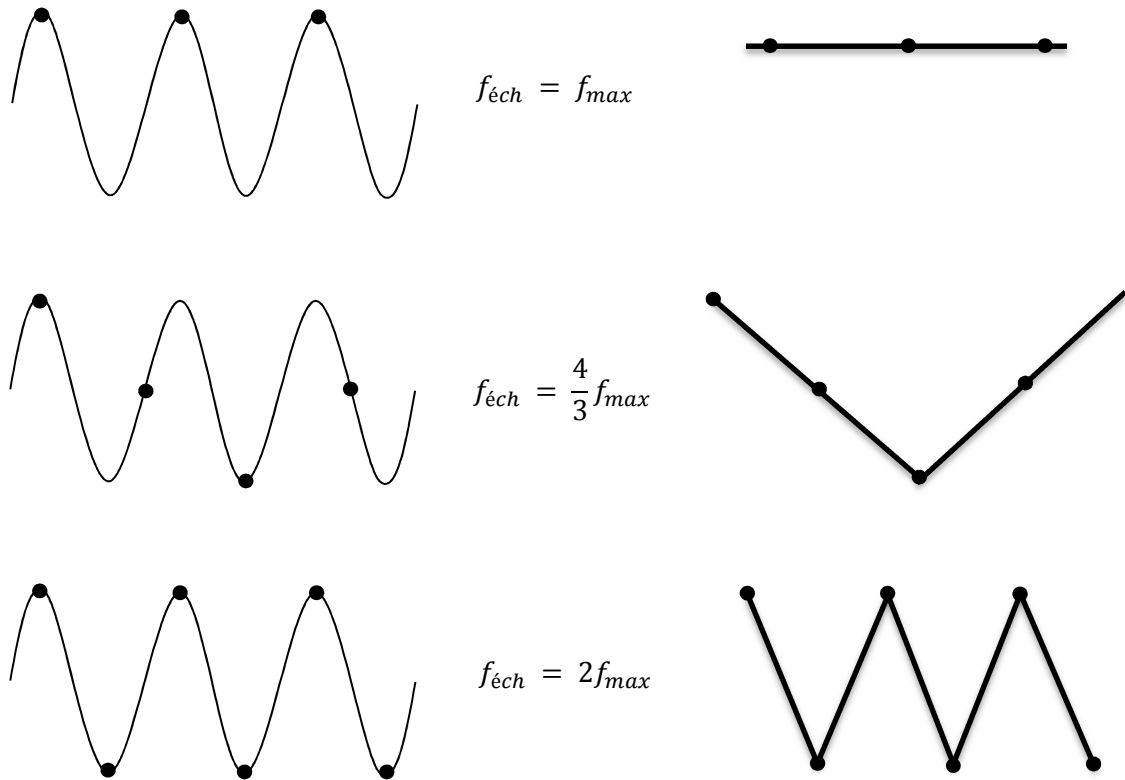


figure I.2. Fréquence d'échantillonnage en fonction de la fréquence maximale.

Les formes du terrain peuvent être modélisées à partir de ce semis de points. Ainsi, si la fréquence d'échantillonnage est égale à la fréquence maximale, la morphologie du terrain sera totalement déformée. Une fréquence égale aux quatre tiers de la fréquence maximale provoque une perte de plusieurs détails de la morphologie. Par contre, une fréquence d'échantillonnage égale au moins au double de la fréquence maximale conserve la forme du terrain.

La notion d'échelle est aussi importante. Ainsi, si nous voulons modéliser grossièrement le relief d'une zone (basses fréquences), un petit échantillon bien reparti, tout en respectant le théorème de Shannon, peut suffire. Par contre, sur cette même zone, pour modéliser les détails fins de la morphologie (hautes fréquences), il faut utiliser un échantillon plus grand, toujours en respectant le théorème de Shannon. Ainsi, la représentation idéale des formes du terrain dépend aussi bien de la répartition des points que de l'échelle qui varie selon les détails à modéliser.

I.2 Représentation du terrain

La représentation du relief a commencé depuis longtemps sur des cartes. Cette représentation s'effectuait de différentes manières. La figure I.3 (A) représente une carte faite par César-François Cassini, cartographe et astronome français du 18^{ème} siècle, qui a établi avec son fils Jean-Dominique la première carte générale de la France. Cette carte est basée sur une triangulation géodésique. Ce qu'on remarque sur cette carte est que le relief représenté n'est pas réaliste.

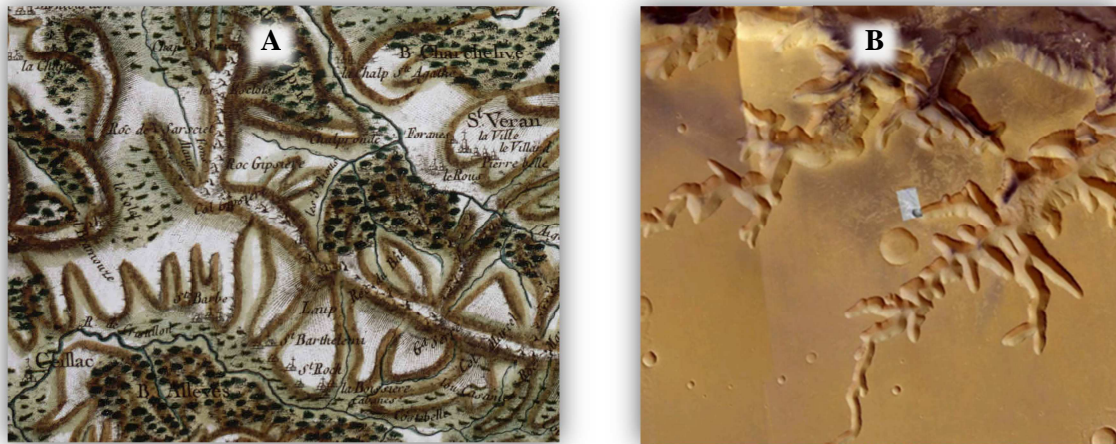


figure I.3. Extrait de la carte de Cassini du département de Queyras aux alpes (A) (Source : Bibliothèque nationale de France) et zone de la vallée Marineris sur Mars (B) (source : Google Earth).

L'information d'altitude ne figure pas sur cette carte mais des formes du terrain sont représentées. En effet, on observe des formes lisses qui entourent la rivière avec les pentes apparaissant en marron. La morphologie du terrain semble plane avec une présence de fortes dépressions. Cela ressemble plus à la morphologie de Mars qu'à celle de la Terre (figure I.3 B). Ainsi, on peut facilement déduire que la morphologie du terrain n'est pas bien représentée. On trouvait aussi des formes de relief irréalistes dans des tableaux du 17^{ème} siècle (figure I.4).



figure I.4. Tableaux du 17^{ème} (peintre Joos de MOMPER).

Ainsi, la méthode de représentation du relief est très importante pour conserver l'information sur les formes du terrain. En numérique, on distingue deux méthodes très utilisées, les courbes de niveau numérisées et les MNT (figure I.5). Les courbes de niveau sont des courbes équidistantes en altimétrie, dont chacune passe par des points de même altitude. Elles sont surtout utilisées dans les cartes topographiques pour représenter le relief du terrain. La capacité de ces courbes à bien représenter le relief du terrain dépend de la répartition des points lors d'une numérisation et de la distance altimétrique qui sépare les courbes. Si ces points sont repartis de façon à respecter le théorème de Shannon, le relief au niveau de ces courbes sera bien représenté. Cependant, aucune information sur le terrain n'est disponible entre ces courbes.

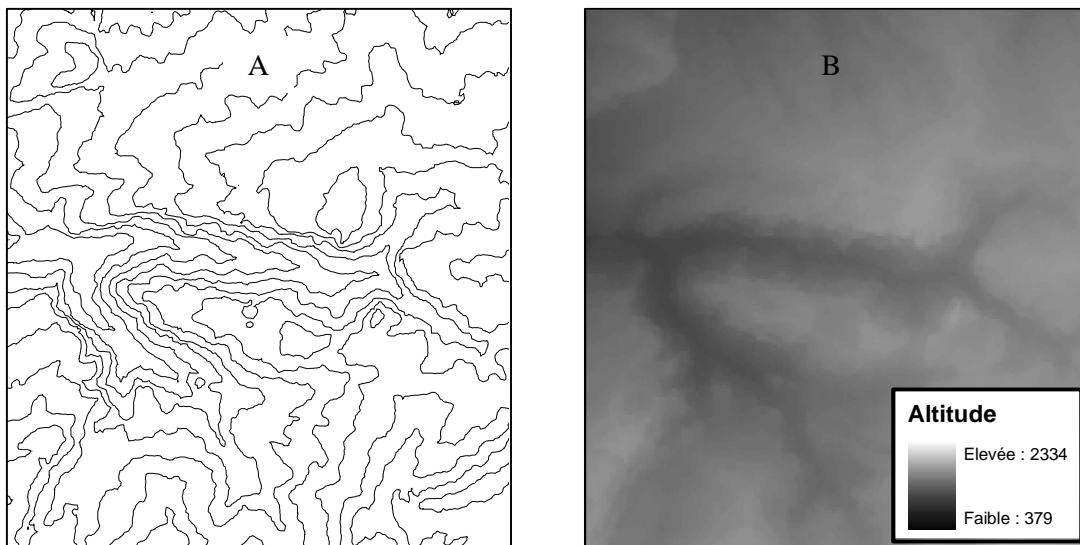


figure I.5. Représentation de l'altitude du terrain par courbes de niveau (A) et avec un MNT représenté en hypsométrie (B).

Un modèle numérique du terrain est un modèle qui représente l'altitude du terrain sur la base d'une maille régulière ou irrégulière. Il est obtenu par différentes techniques d'échantillonnage tel que la photogrammétrie ou l'interpolation de courbes de niveau.

Les échantillonnages régulier et irrégulier peuvent ne pas respecter le théorème de Shannon. Dans ce cas, la représentation des formes du terrain est affectée. L'avantage d'une maille régulière est la commodité du stockage car le fichier numérique est de format raster et il contient implicitement les coordonnées planimétriques. Par contre, pour respecter le théorème de Shannon, une petite taille de maille est exigée mais cela augmente le volume des données. Une maille irrégulière est plus adaptée à la représentation des formes du terrain notamment si les points de l'échantillon sont choisis en milieu de rupture de la pente.

La visualisation du MNT dépend de l'information que l'on veut montrer. Ainsi, l'altitude est souvent représentée en niveau de gris (hypsométrie). Cette représentation est adéquate pour l'altitude mais pas

pour les formes du terrain. Pour mieux visualiser les formes, la méthode de l'ombrage est utilisée. Elle consiste à éclairer le MNT depuis une position définie (figure I.6).

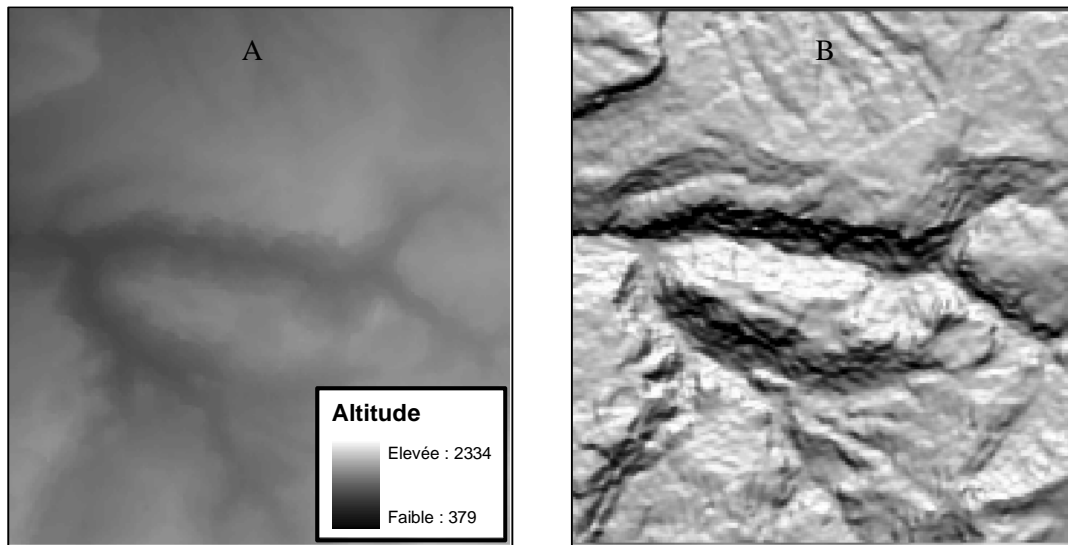


figure I.6. Représentation du relief en hypsométrie (A) et par ombrage (B).

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la relation entre position et formes du terrain et celle entre échantillonnage des points et fidélité de la représentation des formes du relief. De plus, nous avons abordé les méthodes de représentation du terrain, leurs avantages et leurs inconvénients. A partir d'une représentation numérique du terrain, l'analyse géomorphologique peut s'effectuer par l'intermédiaire de la géomorphométrie, science de la description quantitative de la morphologie terrestre. Dans le chapitre suivant, nous introduisons cette science, nous présentons les indices géomorphologiques qui sont des descripteurs quantitatifs de la morphologie et nous expliquons les méthodes de calcul utilisées dans l'étude.

II. Géomorphométrie

La description morphologique du terrain est réalisée par géomorphométrie. Rasemann et al. (2004) définissent la géomorphométrie comme étant la « science de la description quantitative et de l'analyse des caractéristiques géométriques-topologiques de la surface terrestre ». Elle rassemble la géoscience, les mathématiques et l'informatique pour modéliser la surface terrestre, la paramétrer puis l'analyser. En conséquence, plusieurs applications utilisent cette science pour répondre à leurs besoins. La figure II.1 représente les sources et les applications de la géomorphométrie.

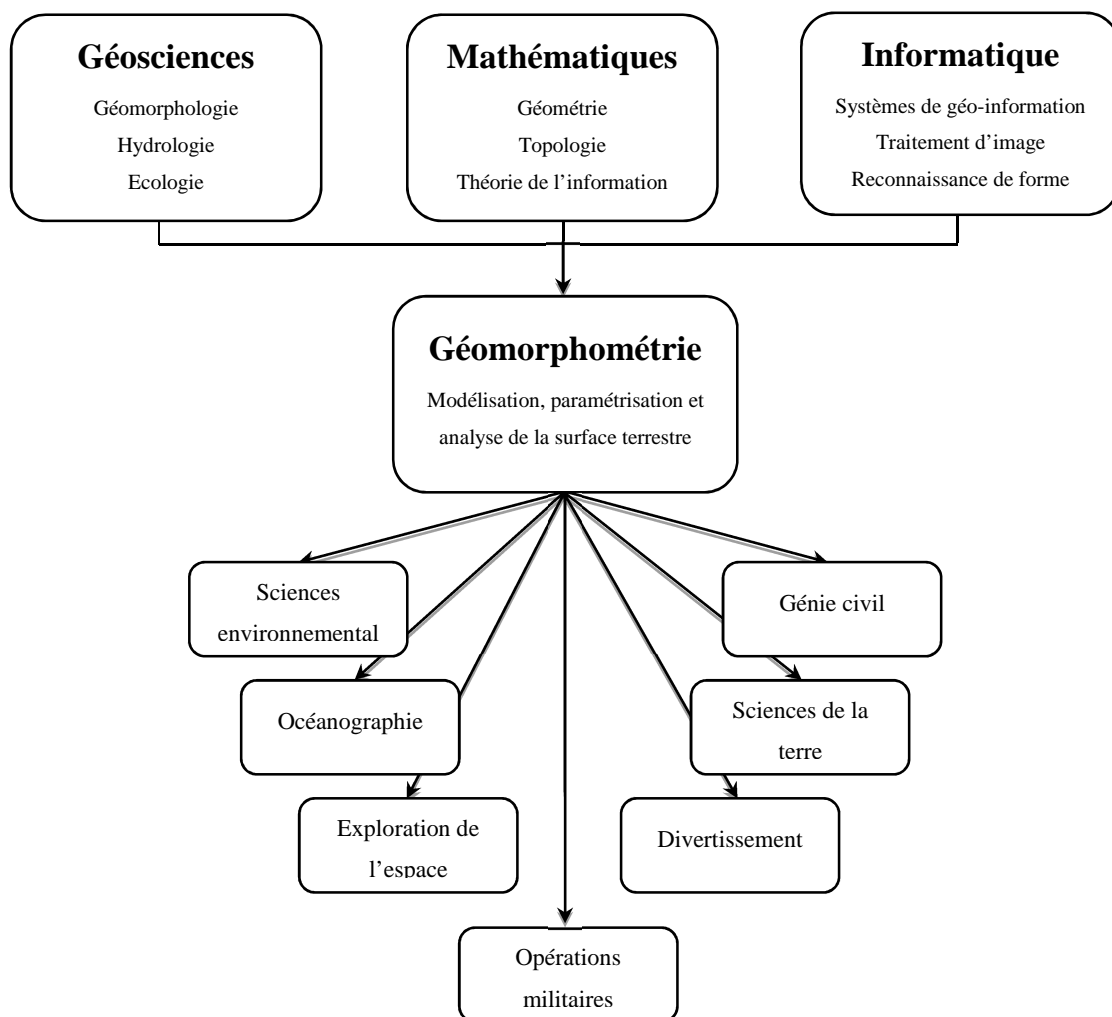


figure II.1. Sources et applications de la géomorphométrie (source : Pike et al., 2008).

L'invention des MNT a permis de passer de la plateforme physique à la plateforme numérique, ce qui a beaucoup facilité la quantification numérique des indices morphologiques tels que la pente et la courbure. Cette quantification a permis ensuite d'analyser la surface terrestre et les différents

phénomènes affectant cette surface. Dans ce chapitre, nous présentons les indices géomorphologiques et hydrographiques utilisés dans l'étude avec leur méthode de calcul.

II.1 Indices géomorphologiques locaux

Les indices géomorphologiques sont des descripteurs de la morphologie du terrain comme la pente et la courbure et ils sont extraits des MNT. Ils sont utilisés dans diverses applications et leur qualité joue un rôle clé pour ces applications. Les indices géomorphologiques basiques se divisent en deux parties (Olaya, 2008) : mesures géométriques comme la pente, l'aspect, la courbure et les autres indices qui en découlent ; mesures statistiques comme l'écart-type de l'altitude qui décrit la rugosité du terrain et la dimension fractale. Nous nous sommes intéressés aux mesures géométriques.

Les indices géométriques se classent à leur tour en deux groupes : indices primaires qui se calculent à partir du MNT seul et indices secondaires qui sont calculés en utilisant le MNT avec d'autres données (Wilson et Gallant, 2000). Le tableau II.1 présente des indices géomorphologiques primaires avec les applications qui les utilisent.

Attribut	Définition	Utilisation
Altitude	Altitude du terrain	Climatologie, végétation, énergie potentielle
Pente	Gradient de l'altitude	Vitesse d'écoulement et taux de ruissellement du sursol et du sous-sol, précipitation, végétation, géomorphologie, teneur en eau du sol, classe de la capacité du terrain, risque de glissement
Aspect	Azimut de la pente	Insolation solaire, orientation des pluies dominantes, évapotranspiration, distribution de la flore et la faune
Courbure du profil	Courbure du profil de la pente	Accélération du flux, taux d'érosion/dépôt, géomorphologie
Courbure du plan	Courbure de courbe de niveau	Écoulement convergent/divergent, teneur en eau du sol, caractéristiques du sol
Courbure tangentielle	Courbure du plan multipliée par la pente	Mesure alternative de convergence et de divergence locales d'écoulement

tableau II.1. Indices géomorphologiques primaires extraits du MNT (source : Moore et al., 1991).

Dans notre étude, nous utilisons la pente maximale, l'aspect et la courbure comme descripteurs de la morphologie du terrain. Dans ce qui suit, nous présentons leurs méthodes de calcul.

II.1.1 Pente maximale et aspect

La pente maximale et l'aspect (direction de cette pente) constituent les dérivées premières de l'altitude. Elles sont utilisées dans plusieurs applications notamment en hydrographie. Selon Evans (1972), la pente est l'indice le plus important pour la description de la morphologie du terrain. Le calcul de ces deux indices en utilisant un MNT ayant une maille régulière s'effectue avec une fenêtre carrée le plus souvent de taille 3×3 (figure II.2). Cette pente se calcule en pourcentage ou en unité angulaire. Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser l'unité angulaire.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

figure II.2. Fenêtre de calcul des indices géomorphologiques.

Il existe deux méthodes de calcul de la pente maximale. La première est basée sur la trigonométrie et la deuxième sur la géométrie différentielle. En trigonométrie, la pente maximale est calculée en utilisant l'altitude du point au centre (e) de la fenêtre de calcul et celle minimale des points voisins (équation 2.1), la distance entre les deux points étant égale à la taille de la maille ou à celle de la diagonale. Par conséquent, l'aspect dans ce cas est limité aux 8 directions principales.

$$\text{Pente}_{\max} = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{Z_e - Z_{\min}}{\text{distance}} \right) \quad (2.1)$$

Comme nous avons vu dans le premier chapitre, le terrain est similaire à un signal bidimensionnel dont l'altitude est représentée par une fonction $z = f(x, y)$. Ainsi, la pente en un point peut aussi être obtenue en dérivant cette fonction. Pour ce faire, on a recours à la géométrie différentielle. La pente maximale est liée au gradient qui est le vecteur tangent à la surface du terrain et orienté dans la direction du plus fort changement de l'altitude. La norme de ce vecteur fournit la pente maximale et sa direction fournit l'aspect. Ses coordonnées sont les dérivées partielles de l'altitude suivant la direction des x et des y.

$$\overrightarrow{\text{grad}(z)} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

Pour calculer ces dérivées partielles, et du fait que le MNT est une surface discrète, on utilise les différences finies (Evans, 1972). La différence d'altitude est calculée dans la direction des x et celle des y en utilisant une fenêtre de calcul. Pour une surface lisse, lorsque la taille de maille tend vers zéro, la différence finie tend vers la dérivée partielle (Shary, 2008).

Ainsi, la pente maximale vaut (en degré) :

$$\text{Pente}_{\max} = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \sqrt{p^2 + q^2} \quad (2.3)$$

et l'aspect sera (en degré) :

$$\text{Aspect} = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\frac{q}{p} \right) \quad (2.4)$$

p et q sont calculés de différentes manières selon l'algorithme d'extraction qui est caractérisé par les points considérés dans le calcul de la différence finie. Le tableau suivant présente quelques algorithmes (Liu et Bian, 2008).

Nom de l'algorithme	p	q
Différence finie du second ordre	$\frac{z_f - z_d}{2m}$	$\frac{z_h - z_b}{2m}$
Différence finie du troisième ordre	$\frac{(z_c + z_f + z_i) - (z_a + z_d + z_g)}{6m}$	$\frac{(z_g + z_h + z_i) - (z_a + z_b + z_c)}{6m}$
Différence finie du troisième ordre pondérée par l'inverse de la distance au carré	$\frac{(z_c + 2z_f + z_i) - (z_a + 2z_d + z_g)}{8m}$	$\frac{(z_g + 2z_h + z_i) - (z_a + 2z_b + z_c)}{8m}$
Différence finie du troisième ordre pondérée par l'inverse de la distance	$\frac{(z_c + \sqrt{2}z_f + z_i) - (z_a + \sqrt{2}z_d + z_g)}{(4 + 2\sqrt{2})m}$	$\frac{(z_g + \sqrt{2}z_h + z_i) - (z_a + \sqrt{2}z_b + z_c)}{(4 + 2\sqrt{2})m}$

tableau II.2. Algorithmes utilisés dans le calcul de p et q (m : taille de maille).

Comme l'affirment Snyder (1983), Skidmore (1989), Srinivasan et Engel (1991) et Zhou et Liu (2004a, b), les différents algorithmes de calcul de la pente produisent des résultats qui peuvent être bien différents pour un même MNT. Dans notre étude, nous avons choisi l'algorithme différence finie du troisième ordre pondérée par l'inverse de la distance au carré disponible dans ArcGIS pour extraire la pente et l'aspect.

II.1.2 Courbure

La dérivée seconde de l'altitude est la courbure exprimée en rad/m ou 1/m. Cette dérivée est utilisée pour étudier la concavité et la convexité du terrain. La formule suivante est utilisée pour calculer la courbure d'une courbe plane (Olaya, 2008) :

$$k = \frac{d^2z}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1,5}} \quad (2.5)$$

Il existe trois principaux types de courbure : courbure du profil, courbure du plan et courbure tangentielle. La première est la courbure dans la direction de la pente maximale, la deuxième est calculée le long de la courbe de niveau et la troisième est calculée suivant la direction perpendiculaire au gradient. La méthode de calcul de ces courbures, expliquée par Olaya (2008), est la suivante :

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{a + c + d + f + g + i - 2 \cdot (b + e + h)}{3m^2} \quad (2.6)$$

$$s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{c + g - a - i}{4m^2} \quad (2.7)$$

$$t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{a + b + c + g + h + i - 2 \cdot (d + e + f)}{3m^2} \quad (2.8)$$

Ainsi, nous pouvons calculer la courbure du profil :

$$\text{Courbure du profil} = -\frac{p^2 \cdot r + 2 \cdot p \cdot q \cdot r \cdot s + q^2 \cdot t}{(p^2 + q^2) \cdot \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}} \quad (2.9)$$

celle du plan :

$$\text{Courbure du plan} = -\frac{q^2 \cdot r - 2 \cdot p \cdot q \cdot s + p^2 \cdot t}{\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}} \quad (2.10)$$

et celle tangentielle :

$$\text{Courbure tangentielle} = -\frac{q^2 \cdot r - 2 \cdot p \cdot q \cdot s + p^2 \cdot t}{(p^2 + q^2) \cdot \sqrt{1 + p^2 + q^2}} \quad (2.11)$$

II.2 Descripteurs hydrographiques

Le bassin versant et le réseau hydrographique sont aussi extraits du MNT. Ces objets gouvernent l'écoulement de l'eau vers un exutoire. Le bassin versant est une surface hydrologiquement close comprenant le réseau hydrographique amenant l'eau de l'amont à l'aval jusqu'à l'exutoire. Dans cette étude, nous nous intéressons à la description de la forme du bassin versant et à la géométrie et la topologie du réseau hydrographique.

II.2.1 Descripteurs de bassin versant

Les bassins versants topographiques sont délimités par la ligne de crête. Pour caractériser ces bassins, nous avons choisi de calculer le périmètre et l'aire des bassins versants en 2D. Comme leur forme influe sur le débit d'eau écoulé à travers le bassin nous avons aussi choisi de calculer un indice de forme. L'indice utilisé est celui de compacité de Gravelius (Gravelius, 1914). La valeur de cet indice est toujours supérieure à 1 et une valeur proche de 1 signifie que le bassin est rond. Plus cet indice s'éloigne de 1, plus le bassin est allongé (figure II.3). Il est calculé par la formule 2.12, P est le périmètre du bassin versant et A son aire.

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}} \quad (2.12)$$

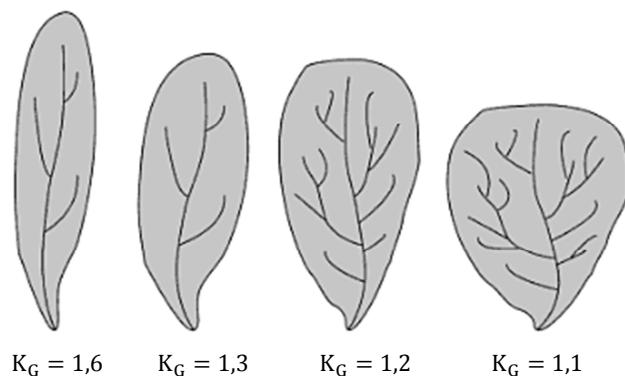


figure II.3. Relation entre l'indice de compacité et la forme du bassin versant (source : Musy et Higy, 2004).

II.2.2 Descripteurs du réseau hydrographique

L'écoulement de l'eau suit l'altitude minimale à cause de la gravité. Ainsi, le réseau hydrographique représente les lignes de talwegs à travers le bassin versant. Ce réseau a différentes caractéristiques qui dépendent de plusieurs facteurs tels que la pente du terrain et la forme du bassin versant. Dans notre étude, nous nous intéressons à la géométrie, la topologie, l'ordre de Strahler et la longueur de ce réseau calculés en 2D. Comme la dimension fractale et la sinuosité sont des descripteurs adaptés à la caractérisation de la géométrie du réseau hydrographique (Gaucherel et al., 2011), nous les utilisons dans cette étude. De plus, nous étudions la topologie du réseau hydrographique en utilisant le nombre de chenaux, de bras de cours d'eau et d'embranchements. D'abord, nous définissons ces termes qui seront fréquemment utilisés dans la suite de l'étude :

Embranchement : aussi appelé confluence, c'est un point d'intersection de chenaux (point rouge sur la figure II.4).

Bras de cours d'eau : c'est l'ensemble des chenaux ayant le même ordre de Strahler et qui sont liés entre eux par une confluence.

Ordre de Strahler : classification hiérarchique du réseau hydrographique qui se base sur les règles suivantes (figure II.4) :

1. Les chenaux en amont qui n'ont pas d'affluent ont un ordre égal à 1.
2. L'intersection de deux chenaux ayant le même ordre produit un chenal ayant un ordre supérieur.
3. L'intersection de deux chenaux d'ordres différents produit un chenal ayant l'ordre le plus élevé de deux chenaux.

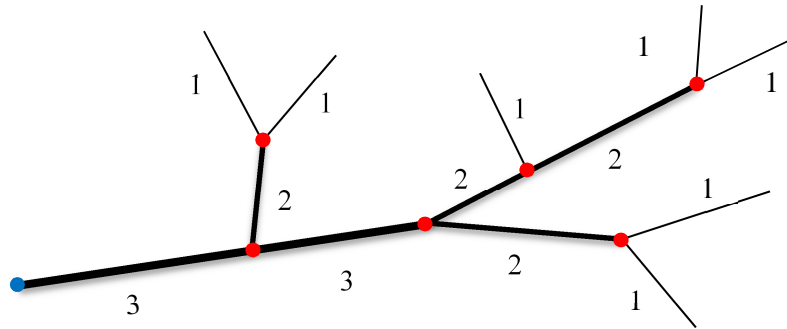


figure II.4. Réseau hydrographique classifié selon l'ordre de Strahler.

La dimension fractale est utilisée pour décrire la complexité de formes naturelles que la géométrie classique ne peut pas décrire. Elle est basée sur le principe que les formes naturelles sont constituées d'une forme élémentaire, appelée fractale, qui se répète sur différentes échelles.

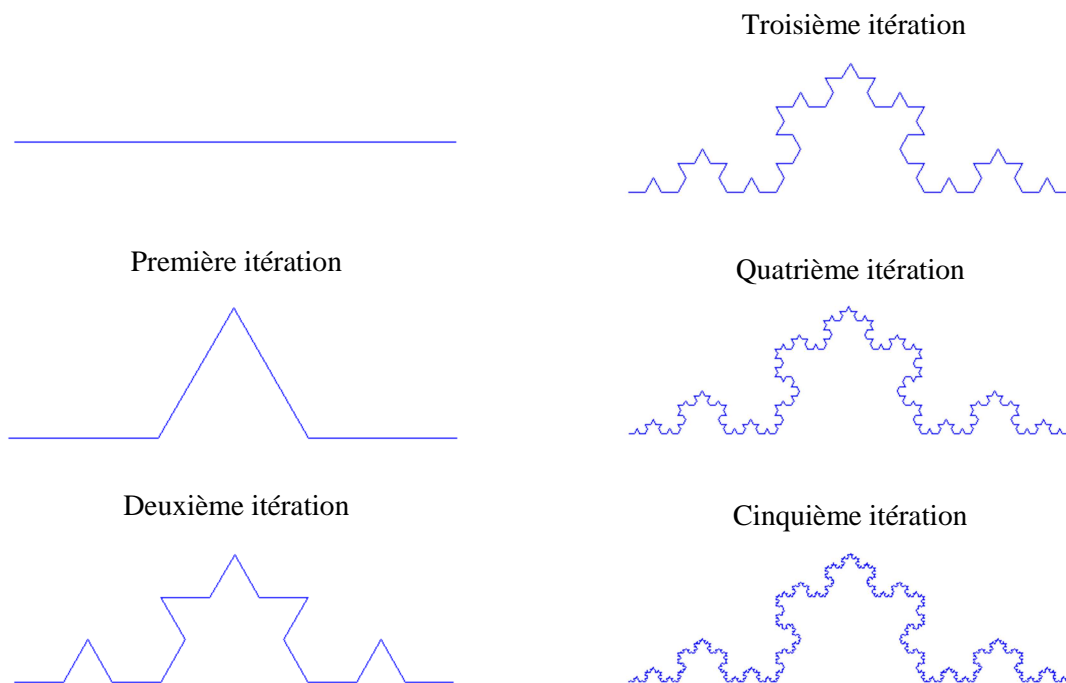


figure II.5. Courbe de Von Koch.

Il existe deux types de fractale, auto-similaires exactes et auto-affines. La même forme se répète de manière exacte à différentes échelles avec les fractales auto-similaires exactes tandis que dans le cas d'une fractale auto-affines, la forme répétée n'est pas exactement la même. Dans notre étude, nous utilisons les fractales auto-similaires exactes dont la courbe de Von Koch constitue un exemple (figure II.5). Elle consiste à découper un segment en plusieurs copies identiques de même longueur.

Pour calculer la dimension fractale, il existe plusieurs méthodes telles que celle du compas et du comptage des boîtes. Dans cette étude, nous utilisons la méthode du compas qui consiste à mesurer la longueur $L(k)$ de la rivière en utilisant différentes ouvertures du compas k (figure II.6).

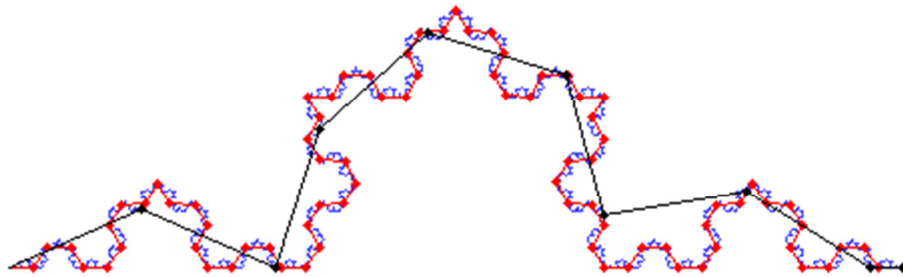


figure II.6. Différentes ouvertures du compas.

Ensuite, la dimension fractale D est déduite de la pente de la courbe loglog (figure II.7) en se basant sur la formule 2.13 (b est une constante de proportionnalité).

$$\log(L(k)) = (1 - D) \log(k) + b \quad (2.13)$$

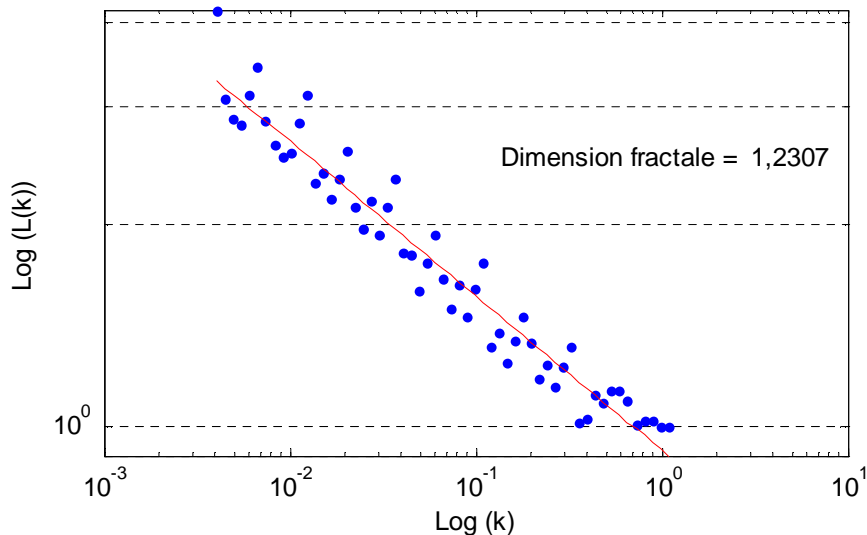


figure II.7. Estimation de la dimension fractale de la courbe de Von Koch par la méthode du compas.

La sinuosité caractérise la forme générale d'un chenal, s'il est rectiligne, sinueux ou méandrique. Par exemple, si ce réseau est rectiligne, sa sinuosité vaut 1 et plus il est sinueux, plus

cette valeur augmente. Dans notre étude, la sinuosité est définie par le rapport entre la distance curviligne et la distance linéaire à vol d'oiseau (Beyer, 2009) (figure II.8).

$$S = \frac{d_c}{d_l} \quad (2.14)$$

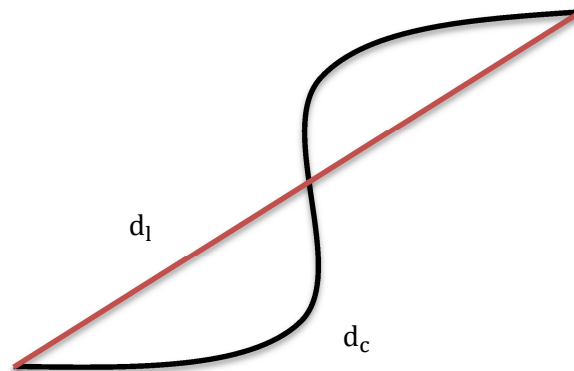


figure II.8. Distances utilisées pour le calcul de la sinuosité.

II.2.3 Extraction du bassin versant et du réseau hydrographique

Nous avons utilisé le logiciel ArcGIS pour extraire les bassins versants et le réseau hydrographique. La première étape dans cette extraction est le remplissage du MNT pour ne pas obtenir un réseau hydrographique discontinu à cause de la présence de cuvettes. Un point ayant une altitude plus petite que ses 8 points voisins est considéré comme cuvette et son remplissage se fait en se basant sur ces points. Ensuite, la direction du flux est extraite suivant la pente maximale calculée par trigonométrie sur une fenêtre carrée 3×3 (cf. partie II.1.1). En se basant sur cette direction de flux, les bassins versants et le réseau hydrographique peuvent être obtenus.

II.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la géomorphométrie. De plus, nous avons présenté les indices géomorphologiques et hydrographiques utilisés dans l'étude ainsi que leur méthode de calcul.

Conclusion de la première partie

Dans cette partie, nous avons présenté les méthodes d'optimisation de l'échantillonnage afin d'avoir une représentation fidèle de la morphologie du terrain et les méthodes de représentation de cette morphologie. De plus, nous avons abordé la géomorphométrie qui consiste à quantifier des caractéristiques de cette morphologie.

La photogrammétrie et l'InSAR sont des techniques d'échantillonnage très utilisées pour cartographier le relief terrestre. Ces techniques produisent un semis de point qui n'a pas une structure régulière et dans la plupart des cas ne suit pas le théorème de Shannon. Ce semis sera ensuite rééchantillonné afin d'avoir la structure voulue. Dans la partie suivante, nous exposons les techniques d'échantillonnage utilisées dans cette étude avec les différentes structures d'échantillonnage et les méthodes d'interpolation. Comme ces techniques d'échantillonnage ne respectent pas le théorème de Shannon, la représentation de la morphologie du terrain présente des défauts. Afin d'évaluer ces défauts, nous expliquons aussi dans la partie qui suit les méthodes d'évaluation de la qualité de l'altitude et des indices morphologiques extraits du MNT.

Deuxième partie
Production et évaluation du MNT

Le MNT est par définition une modélisation tridimensionnelle numérique du terrain. Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, ce modèle est représenté par une grille régulière ou irrégulière dont les points sont spatialement localisés et indiquent une valeur de l'altitude. Sur ordinateur, un MNT à grille régulière est représenté en format raster dont les points se situent au centre des pixels.

Afin d'obtenir des échantillons servant à la production d'un MNT, des techniques de mesure in situ telles que les levés GPS ou par station totale et d'autres de télédétection telles que la photogrammétrie sont utilisées. L'avantage des mesures in situ est qu'elles peuvent s'adapter à la morphologie du terrain et donc respecter le théorème de Shannon, mais elles sont coûteuses en temps et difficiles à exécuter surtout dans les zones montagneuses. Par télédétection, de vastes zones peuvent être cartographiées en un temps réduit, mais les échantillons produits s'adaptent moins à la morphologie du terrain. Dans cette partie, nous présentons les méthodes de production de MNT par photogrammétrie et InSAR ainsi que les structures d'échantillonnage et les méthodes d'interpolation.

Une fois le MNT obtenu, une évaluation doit être effectuée afin de vérifier si ce MNT peut satisfaire les exigences d'une application. La méthode d'évaluation la plus utilisée est celle de position. En effet, le MNT est composé de points ayant des coordonnées planimétriques et altimétriques. Ainsi, le but est de vérifier la qualité de ces coordonnées, notamment la composante altimétrique. Dans notre étude, nous sommes surtout intéressés par les formes du terrain décrites par les indices morphologiques. Comme ces indices sont calculés par les points du MNT, il existe une relation entre leur qualité. Ainsi, nous présentons aussi dans cette partie la méthode d'évaluation de position et des formes du MNT adoptée dans l'étude.

III. Production du MNT

Pour produire un MNT, il existe plusieurs techniques d'acquisition de données sources tels que la photogrammétrie, l'InSAR (interférométrie d'images RSO) et le LIDAR. Chacune de ces techniques produit un nuage de points qui a besoin ensuite d'être rééchantillonné pour obtenir la structure souhaitée du MNT. Ainsi, le MNT produit possède des caractéristiques, telles que la taille de maille et la qualité altimétrique. Les caractéristiques de ces modèles affectent la qualité des résultats dans une application donnée. Par exemple, la délimitation des zones inondables n'est pas la même en utilisant des MNT de qualités altimétriques différentes. De plus, le prix d'un MNT est variable.

La photogrammétrie consiste à calculer l'altitude en se basant sur au moins un couple d'images optiques. En effet, la parallaxe est mesurée en tout point et est ensuite convertie en altitude. Ainsi, le calcul de l'altitude d'un point se fait indépendamment de ces voisins. Cette approche permet d'éviter la propagation des erreurs d'un point à l'autre (Polidori, 1995). L'InSAR est une autre technique très connue. Elle consiste à calculer l'altitude du terrain en mesurant le déphasage en tout point entre deux images radar. Ces deux techniques de production sont utilisées dans notre étude.

Un nuage de points est obtenu par chacune de ces techniques et est rééchantillonné pour obtenir la structure souhaitée, puis les trous sont interpolés. Le rééchantillonnage fait intervenir une méthode d'interpolation qui consiste à affecter à chaque point de la grille une altitude calculée en se basant sur des points voisins dont l'altitude est connue. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation comme l'interpolation polynomiale. Elles sont déterministes ou stochastiques. Chacune effectue un calcul différent et pour cela, elles affectent différemment la qualité du MNT. Le choix de la forme et de la taille de la maille est également essentiel pour avoir une représentation fidèle de la morphologie du terrain sur le MNT.

Dans ce chapitre, nous expliquons les deux techniques utilisées dans la thèse : la photogrammétrie et l'INSAR. Ensuite, nous présentons les méthodes d'interpolation les plus utilisées avec les structures d'échantillonnage.

III.1 Photogrammétrie

En photogrammétrie, le premier processus de production d'un MNT est l'appariement des deux images. Ce processus consiste à détecter les pixels homologues de l'image maîtresse et de l'image esclave. Pour cela, une mesure de similarité est effectuée par une fonction telle que le coefficient de corrélation, un coefficient maximal étant un indice de similarité des deux pixels. Une fois les pixels homologues détectés, la parallaxe est déduite puis convertie en altitude à partir des conditions de prises de vue.

Le principe de l'appariement est expliqué par ce qui suit. Soit V_1 un vecteur radiométrique dans l'image I_1 et V_2 dans l'image I_2 (figure III.1). En se basant sur ces vecteurs, le coefficient de corrélation est calculé selon l'équation 3.1. Ce coefficient varie entre -1 et 1 et est réétalé en utilisant l'équation 3.2 pour qu'il varie entre 0 et 1. La taille de la fenêtre de corrélation doit être choisie.

$$r(V_1, V_2) = \frac{\text{cov}(V_1, V_2)}{\sigma_{v_1} \cdot \sigma_{v_2}} \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{1}{2}(r + 1) \quad (3.2)$$

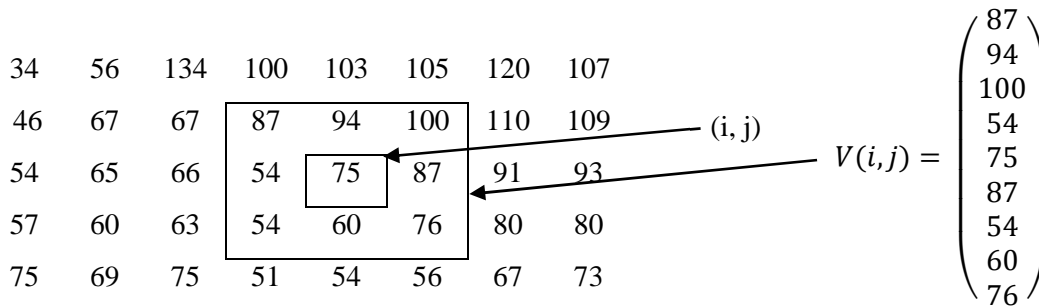


figure III.1. Fenêtre de corrélation de taille 3×3 et vecteur de radiométrie (Paparoditis, 2001).

Pour faciliter la détection de ces pixels homologues, il existe plusieurs contraintes, globales ou locales, dans l'appariement dont on cite les plus importantes ici (Litrico, 2006).

III.1.1.1 Contrainte épipolaire

Le rééchantillonnage des images en géométrie épipolaire réduit le domaine de recherche du point homologue à une droite au lieu de l'image entière. Cette droite est formée par l'intersection entre le plan épipolaire (M, S_1, S_2) et celui de l'image esclave ce qui permet de passer de l'appariement bidimensionnel à celui monodimensionnel (figure III.2).

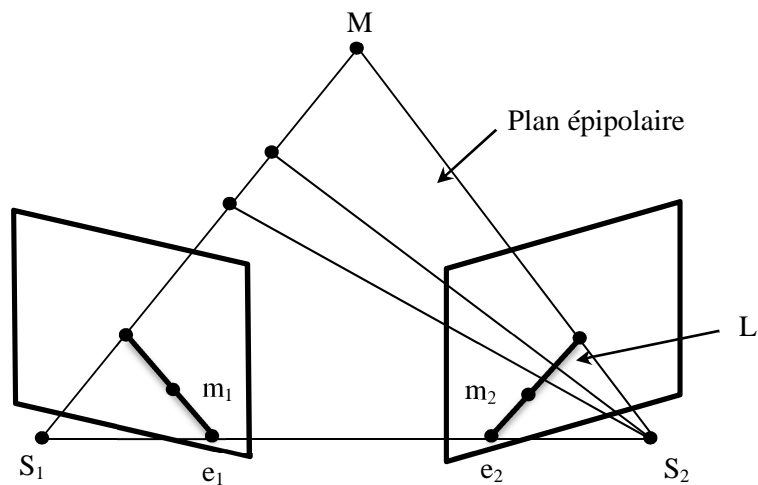


figure III.2. Droite épipolaire (L_1) du point m_1 dans l'image esclave.

S_1 et S_2 sont les sommets de prises de vue, m_1 est un point de l'image gauche, m_2 est son homologue sur l'image droite, L_1 est la droite épipolaire et e_1 et e_2 sont les épipoles.

III.1.1.2 Domaine de recherche en altitude du point homologue

En ayant connaissance de l'altitude minimale et maximale du terrain à modéliser, qui peut être obtenu d'un MNT mondial ou d'autres connaissances, le domaine de recherche du point homologue peut encore être restreint. En effet, sur la droite épipolaire, ce domaine est limité par p_{2min} image du point ayant l'altitude minimale et p_{2max} celle du point ayant l'altitude maximale.

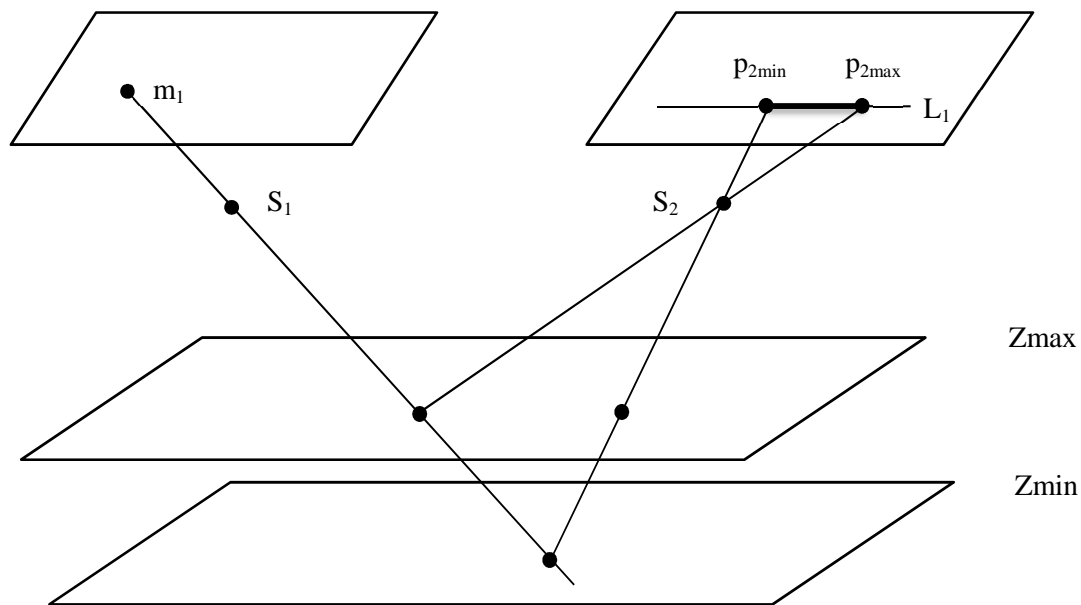


figure III.3. Domaine de recherche en altitude du point homologue.

III.1.1.3 Contrainte d'unicité

Cette contrainte part de l'hypothèse que chaque pixel d'une image a un seul pixel homologue dans l'autre image. Par contre, cette hypothèse n'est pas toujours valable du fait que deux points qui se situent sur la même ligne de visée de l'image maîtresse I_1 auront une seule projection dans I_1 mais deux projections dans I_2 , ce qui peut survenir si un objet est transparent.

III.1.1.4 Contrainte d'ordre

L'ordre des projections doit être le même dans les deux images, c'est-à-dire si le point A est situé à droite du point B dans l'image I_1 , l'homologue de A doit être situé à droite de l'homologue de B dans l'image I_2 . Dans le cas d'objets transparents cette contrainte n'est pas valable (Chehata, 2005).

Il existe d'autres contraintes générales qui facilitent la détection des points homologues telles que la contrainte de réciprocity, la contrainte fronto-parallèle etc.

III.1.2 Profil de corrélation

Le profil de corrélation est la courbe qui représente les coefficients de corrélation réévalés calculés pour les points de l'intervalle de recherche $[p_{2min}, p_{2max}]$ (Paparoditis, 2001). On considère que le point ayant le coefficient de corrélation maximal est considéré comme le point homologue du point (i_1, j_1) de l'image I_1 (figure III.4).

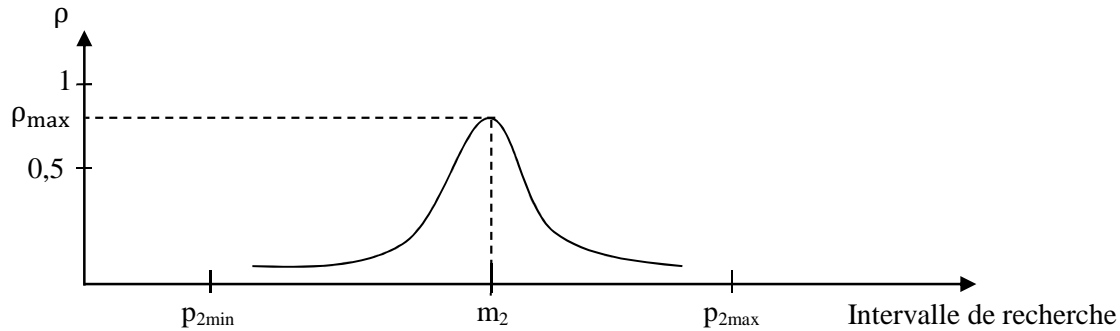


figure III.4. Profil de la corrélation (m_2 : point homologue)

Pour que la décision soit fiable (figure III.5), le pic de la corrélation doit répondre à deux conditions : hauteur et courbure maximales.

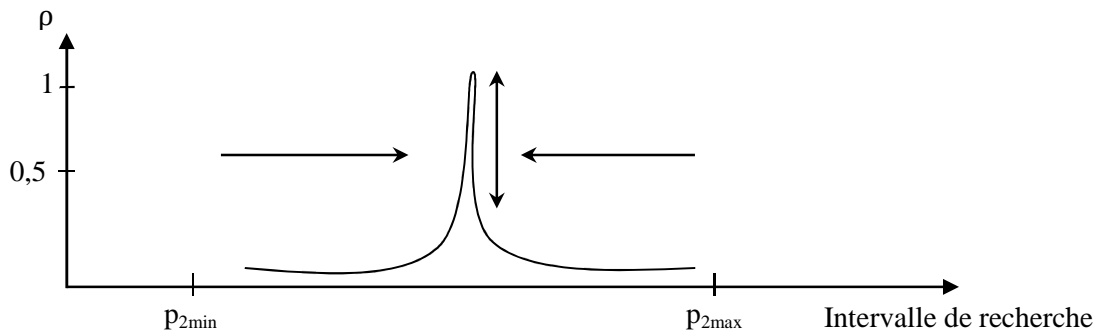


figure III.5. Cas d'une décision fiable.

La périodicité et la multiplicité des pics causent des erreurs de décision (figure III.6). En effet, pour un même point de l'image I_1 , plusieurs points sur la ligne épipolaire de l'image I_2 sont candidats à l'appariement, conduisant à un faux appariement. Ainsi, le résultat obtenu se manifeste par des pics ayant à peu près la même forme que la courbe. Par exemple, si la zone d'étude contient des vergers avec des arbres alignés, un point sur un arbre aura plusieurs candidats possibles. Cela peut entraîner une erreur d'appariement et donc d'altitude du point. Le résultat présente alors des pics d'altitude dans le MNT. Pour éviter ces erreurs, des contraintes sont utilisées : seuil de corrélation, seuil de courbure du pic de corrélation, seuil de la hauteur relative du pic, etc.

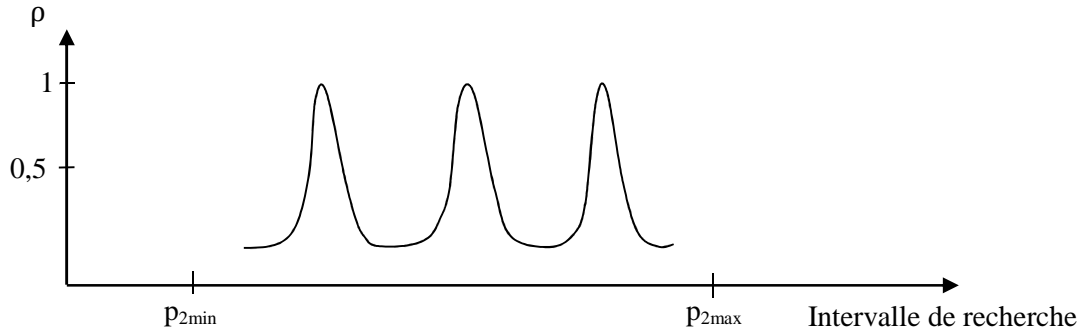


figure III.6. Problème de périodicité des pics de corrélation.

III.1.3 Paramètres contrôlables

Il existe plusieurs paramètres contrôlables durant ce processus. Dans cette étude, nous avons choisi de modifier trois paramètres : la taille de la fenêtre de corrélation (cf. figure III.1), le seuil de corrélation (figure III.4) et le seuil de courbure (figure III.5). L'impact de ces paramètres est étudié sur les altitudes et les formes du terrain dans le chapitre VI.

L'appariement d'images a subi plusieurs développements comme le traitement multi-image, l'utilisation des fenêtres de corrélation adaptatives et l'approche pyramidale. Ces développements ne sont pas présentés dans cette partie car nous ne les utilisons pas.

III.2 Interférométrie radar à synthèse d'ouverture

III.2.1 Acquisition des images

Comme nous avons vu, la production des MNT par photogrammétrie se base sur l'utilisation des images optiques. Or, les capteurs optiques sont passifs et ont plusieurs limites. En effet, les images prises pendant la nuit ne peuvent pas être utilisées pour la production des MNT. De plus, la présence de nuages cache le terrain ce qui provoque des erreurs au niveau du MNT produit. Par contre, les capteurs radar sont actifs et permettent une acquisition des données de jour et de nuit. De plus, l'onde radar peut traverser les nuages ce qui assure une acquisition des données même dans les zones nuageuses. Les images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) sont acquises en visée latérale. La figure III.7 montre le mode d'acquisition de ces images, avec θ l'angle de visée et θ_{loc} l'angle d'incidence locale formé entre la direction de visée et la normale locale de la surface. Ainsi, une onde est émise latéralement à la direction du déplacement du capteur avec une certaine fréquence de répétition. Elle est réfléchiée par le terrain. Les échos rétrodiffusés en direction du capteur sont enregistrés puis traités pour synthétiser l'image RSO. Chaque pixel de cette image est caractérisé par une amplitude et une phase.

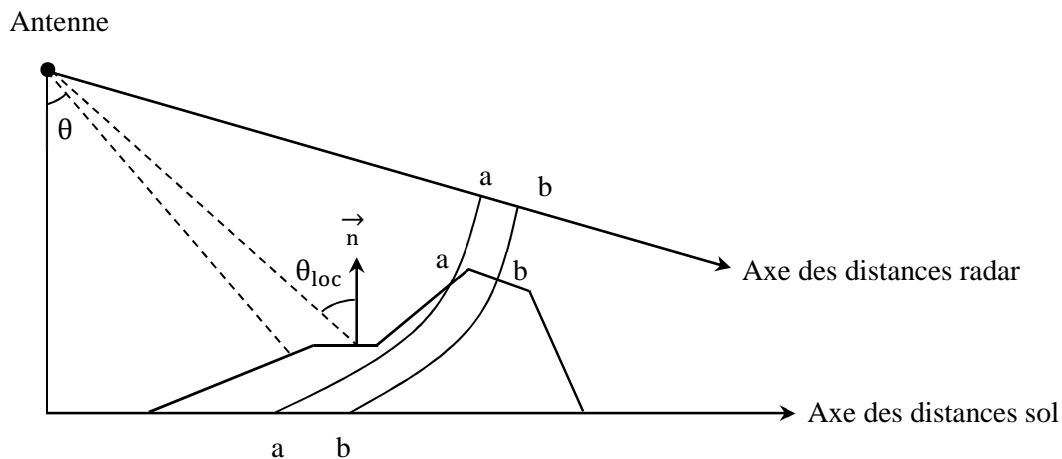


figure III.7. Mode d'acquisition des données RSO.

Plusieurs phénomènes de déformation se produisent dans les images à cause de la visée latérale et du relief (figure III.8). Pour une pente face au capteur, lorsque l'angle de cette pente est inférieur ou égal à l'angle de visée, elle est comprimée sur l'image (compression). Lorsque cet angle est supérieur à l'angle de visée, le relief est inversé (repliement). On a de l'ombre sur la zone du terrain dont un retour d'onde vers le capteur n'est pas possible à cause du relief.

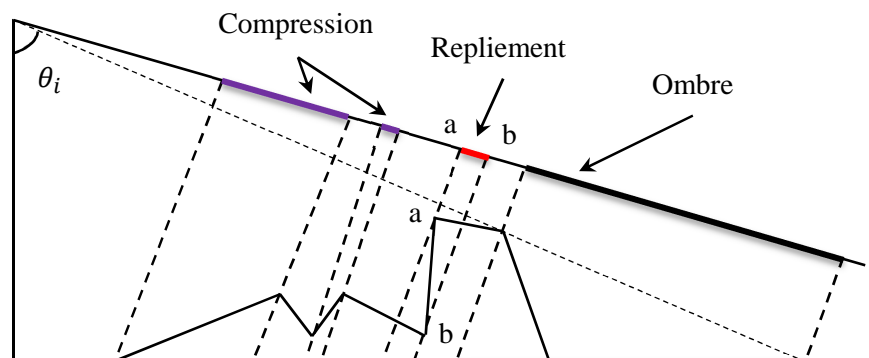


figure III.8. Compression, repliement et ombre.

III.2.2 Traitement interférométrique

Graham (1974) a été le premier à montrer l'utilité de l'InSAR pour l'extraction de la topographie du terrain. Pour produire un MNT avec cette technique, il faut deux images RSO acquises depuis deux positions séparées d'une certaine distance appelée base. Cette base comprend deux composantes, une perpendiculaire et une parallèle à l'axe de visée (figure III.9).

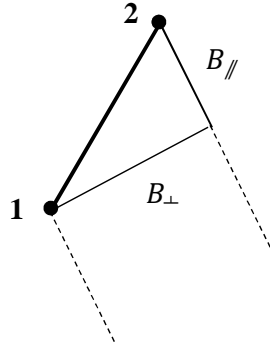


figure III.9. Bases perpendiculaire et parallèle.

Le traitement interférométrique est composé de différentes étapes (figure III.10). Il consiste à utiliser la différence de phase entre deux images RSO pour calculer l'altitude du terrain. La première étape consiste à recalculer l'image esclave sur l'image maîtresse pour ensuite calculer la différence de phase en tout pixel de l'image. Cette différence, qui constitue l'interférogramme, résulte de différentes sources (équation 3.3).

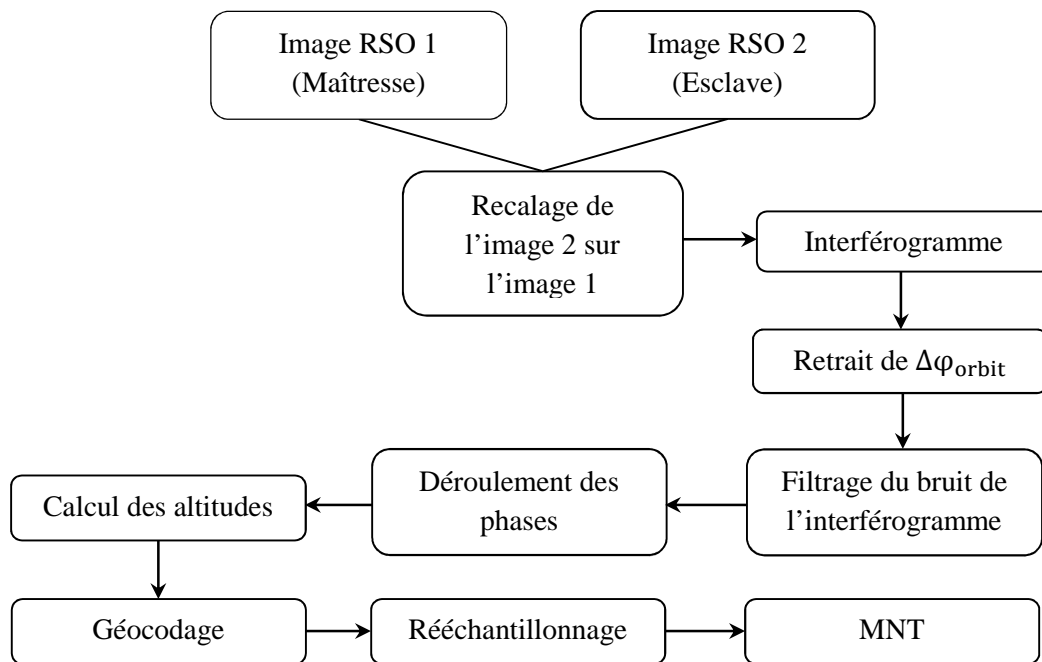


figure III.10. Traitement InSAR pour extraire les altitudes du terrain.

$$\varphi_{\text{interférogramme}} = \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{orbit}} + \Delta\varphi_{\text{mvt}} + \Delta\varphi_{\text{atmo}} + \Delta\varphi_{\text{intrinsèque}} + \text{bruit} [2\pi] \quad (3.3)$$

$\Delta\varphi_{\text{topo}}$: Phase topographique due au relief du terrain

$\Delta\varphi_{\text{orbit}}$: Phase orbitale due à la géométrie des prises de vue

$\Delta\varphi_{\text{mvt}}$: Phase du mouvement due au mouvement du terrain

$\Delta\varphi_{\text{atmo}}$: Phase atmosphérique due à la traversée de l'onde dans l'atmosphère

$\Delta\varphi_{\text{intrinsèque}}$: Phase intrinsèque due à un changement de la nature du terrain entre deux passages

Ce qui nous intéresse est la phase due au relief du terrain ($\Delta\varphi_{\text{topo}}$). Ainsi, des traitements sont exécutés pour supprimer les autres composantes. Cependant, avec deux images, il n'est pas possible d'estimer et de supprimer $\Delta\varphi_{\text{atmo}}$. De plus, les termes $\Delta\varphi_{\text{mvt}}$ et $\Delta\varphi_{\text{intrinsèque}}$ sont supposés négligeables pour le calcul du MNT. Cette hypothèse est plus particulièrement valide pour des images acquises en configuration tandem (base temporelle de 1 jour). La $\Delta\varphi_{\text{orbit}}$ est supprimée à partir des données orbitographiques et le bruit est filtré. Une image de cohérence, qui représente la corrélation entre les deux images RSO, est également calculée. Les phases obtenues sont alors déroulées, converties en altitudes puis les pixels sont géocodés à partir de ces altitudes.

Ces étapes de production comprennent des paramètres de traitement (cf. chapitre VII). Dans cette étude, nous avons choisi de modifier des paramètres au niveau du recalage, du filtrage de l'interférogramme et du calcul des altitudes. L'impact de ces paramètres est étudié sur les altitudes et les formes du terrain dans le chapitre VII.

III.3 Forme de la maille et codage des altitudes

III.3.1 Forme de la maille

Le nuage de points tridimensionnels obtenu n'est pas régulier et contient des trous. Ainsi, il faut le rééchantillonner et utiliser une méthode d'interpolation pour avoir le maillage souhaité. De plus, il faut choisir la forme et la taille de la maille du MNT. Il existe plusieurs structures de maillage dont chacune a des particularités quant à la représentation du terrain (Polidori, 1995) :

Echantillonnage régulier : Cet échantillonnage correspond à une grille régulière, dont la maille a une certaine forme, que ce soit carrée, rectangulaire, triangulaire ou hexagonale. Cet échantillonnage a plusieurs avantages qui sont la simplicité du stockage, la présence implicite des coordonnées planimétriques et la visualisation directe sous forme d'image.

Echantillonnage semi-régulier : il consiste en une grille régulière avec sélection des points utiles. Un exemple très fréquent de cet échantillonnage est celui composite. Il est composé de deux types d'échantillonnage, sélectif et progressif. L'échantillonnage sélectif consiste à sélectionner les lignes importantes à la modélisation du terrain comme les lignes de crête, celles de talweg. Ensuite, l'échantillonnage progressif consiste à fractionner d'une manière itérative les facettes jusqu'à ce que la courbure interne devienne inférieure à un certain seuil. ANUDEM est une méthode d'échantillonnage composite. Il a été développé par (Hutchinson 1988, 1989) en s'appuyant sur la méthode d'interpolation par Spline plaque mince. Il repose sur une approche pyramidale. Ainsi, l'algorithme commence par une maille grossière, et se termine lorsque la taille de la maille voulue est atteinte tout en imposant le réseau hydrographique ou la ligne de crête (Hengl et Evans, 2008).

Echantillonnage irrégulier : c'est un échantillonnage où la maille n'est pas de forme constante. Il permet d'avoir une adaptation totale au relief du fait que les mailles de la grille ont des formes et des tailles différentes. L'exemple le plus employé de ce type d'échantillonnage est le TIN (Triangulated Irregular Network), réseau irrégulier de triangles dont les points connus sont les sommets des triangles. Pour construire les triangles, on utilise généralement l'algorithme de triangulation de Delaunay. Dans cette triangulation, il faut que le cercle circonscrit à chaque triangle ne contienne pas d'autres points de la grille. La figure III.11 explique ce principe (Li et al., 2005).

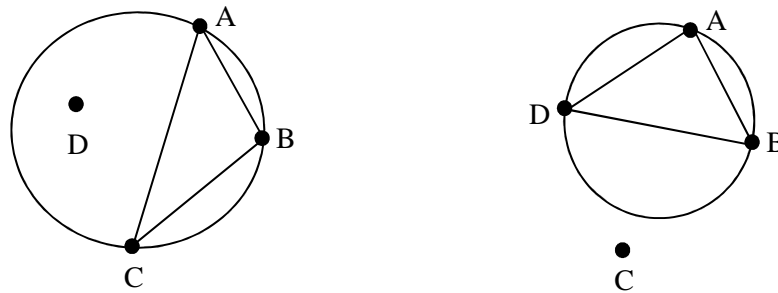


figure III.11. Principe de la triangulation de Delaunay (ABC ne respecte pas la contrainte de Delaunay, ABD le respecte).

Le diagramme de Voronoï est très utilisé pour construire la triangulation de Delaunay. Ce diagramme consiste à décomposer l'espace en zones d'influence. La zone d'influence d'un point i rassemble tous les points plus proches de i que des autres points connus (Pilaud, 2006). La triangulation de Delaunay s'obtient en joignant les points ayant une arête commune dans le diagramme de Voronoï (figure III.12).

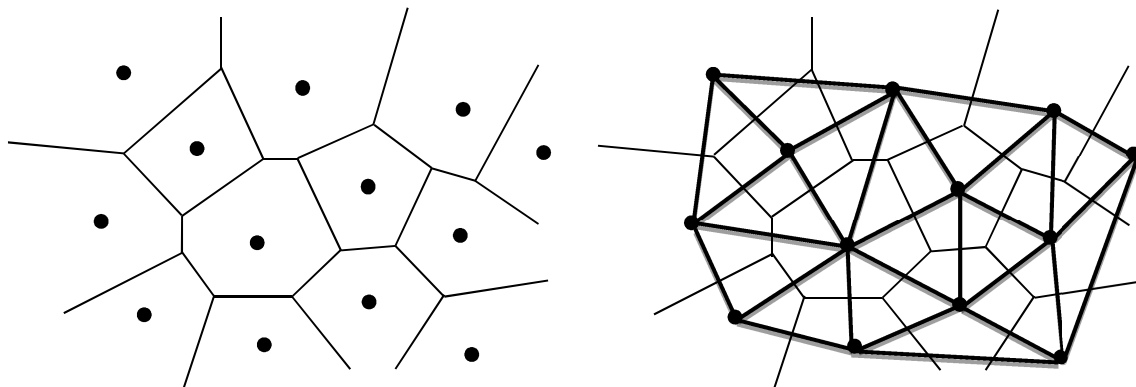


figure III.12. Diagramme de Voronoï (gauche) et triangulation de Delaunay (droite).

Suite à la triangulation, l'interpolation s'effectue de différentes manières telles que l'interpolation linéaire et la Spline.

III.3.2 Choix de la taille de maille en fonction de l'échelle de cartographie

D'une manière générale, chaque application exige une échelle adaptée afin d'avoir les détails répondant à ses besoins. Par exemple, en volcanologie, une échelle de 1:5 000 est utilisée dans

Rodriguez-Gonzalez et al. (2010). Par définition, la superficie lisible minimale d'une carte correspond au plus petit objet discernable sur cette carte. D'après EUROSTAT (2001) et McBratney et al. (2003), on suppose que la superficie minimale lisible sur une carte en papier est de 1×1 mm (c'est-à-dire $L = 1$ mm). Nous utilisons cette valeur dans la suite de notre travail. Puisque l'échelle est définie comme étant le rapport entre la dimension de la carte et celle du terrain, la valeur de la superficie lisible minimale au sol dépend de l'échelle utilisée comme le montre la figure III.13.

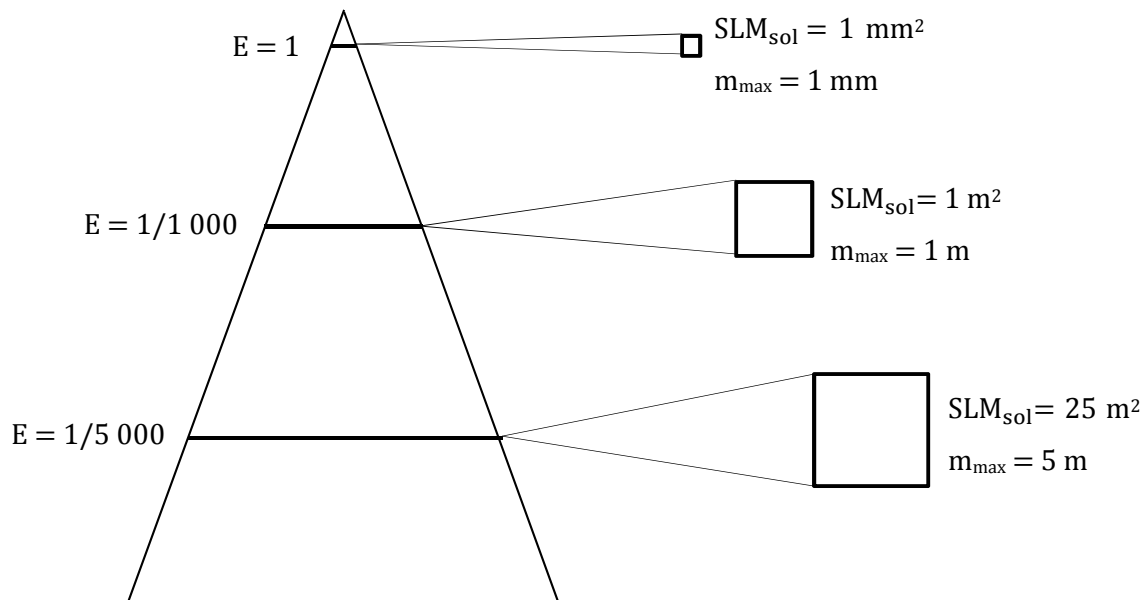


figure III.13. Superficie lisible minimale (SLM) au sol et taille de maille maximale (m_{\max}) selon différente échelle (E).

On peut se demander quelle est la taille de maille du MNT à produire en fonction de l'échelle de la carte à produire pour une application donnée. Considérons qu'on a un MNT ayant une maille carrée ($m \times m$) et que le plus petit objet discernable de la carte est aussi carré ($L \times L$). Selon Kimerling (2009), pour pouvoir créer une carte il faut avoir des données ayant une résolution spatiale au sol plus élevée ou égale à celle de la carte à générer. Ainsi, la taille de la maille du MNT a pour valeur maximale :

$$m_{\max} = L/E \quad (3.4)$$

La taille de maille maximale représente la limite au-dessus de laquelle le MNT ne sera pas utile pour une application donnée.

III.3.3 Codage des altitudes

Les altitudes dans un MNT sont codées numériquement en octets. Le nombre d'octets est fixé en fonction de recommandations telles que la précision numérique requise. Ainsi, si les données sont entières, deux octets peuvent suffire pour les stocker et si ces données sont réelles, il faut un nombre plus élevé d'octets. Par exemple, sur un octet, $2^8 = 256$ niveaux peuvent être utilisés pour coder

l'altitude. Sur 2 octets ce nombre s'élève à $2^{16} = 65536$ niveaux. Si le terrain a une altitude maximale de 6553 m, pour stocker toutes les altitudes avec un octet, chaque niveau doit représenter un domaine d'altitudes de 26 m ($\frac{6553}{8}$). Avec 2 octets, ces domaines seront de l'ordre de 10 cm ($\frac{6553}{65536}$). Dans ce cas, le stockage des données sur un octet déforme fortement la morphologie du MNT. En effet, on aura des formes en marche d'escalier. Ainsi, ce paramètre fait aussi partie des facteurs qui influencent la qualité de la représentation morphologique du terrain.

III.4 Méthode d'interpolation

Il existe différentes méthodes d'interpolation ayant différentes propriétés. Ces méthodes sont déterministes ou stochastiques. Les dernières se basent sur la théorie des probabilités (Baillargeon, 2005). La question qui se pose intuitivement est : comment choisir l'interpolateur qui fournit la meilleure représentation du terrain ? Dans ce qui suit, nous représentons les méthodes d'interpolation les plus utilisées.

III.4.1 Interpolation linéaire

Cette interpolation consiste à déterminer l'altitude d'un point en utilisant l'équation du plan. Pour déterminer un plan, il faut trois points connus et son équation est définie par la fonction suivante :

$$\hat{Z}(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (3.5)$$

Selon (Li et al., 2005), les coefficients a_0 , a_1 et a_2 sont la solution du système linéaire de trois équations :

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

III.4.2 Interpolation des voisins naturels

Cette méthode d'interpolation consiste à calculer l'altitude d'un point en se basant sur les polygones de Thiessen (ou diagramme de Voronoï). Ainsi, après la construction de ce diagramme, la construction de la triangulation de Delaunay est possible. Comme nous avons vu, la contrainte de Delaunay est que le cercle circonscrit à chaque triangle ne doit pas contenir un point de l'échantillon autre que les sommets du triangle. En incorporant un point dans les polygones de Thiessen, si ce point appartient à l'échantillon, ces voisins naturels sont les sommets des triangles formés avec ce point (triangulation de Delaunay). En revanche, si ce point n'appartient pas à l'échantillon et s'il appartient au cercle circonscrit à un triangle, les trois sommets de ce triangle sont les voisins naturels de ce nouveau point (Sukumar et al., 2001). L'estimation de l'altitude du nouveau point est une fonction pondérée des altitudes des voisins naturels.

$$\hat{z}_k = \sum_{i=1}^N w_i z_i \quad (3.7)$$

\hat{z}_k : Altitude estimée au point k

z_i : Altitude du point voisin i

w_i : Poids de ce point

En outre, le poids se calcule en fonction de la superficie plutôt qu'en fonction de la distance (Mitas et Mitasova, 1999). Par exemple, le calcul de l'altitude du point k s'effectue en se basant sur la superficie des triangles S_1 , S_2 et S_3 opposés respectivement aux sommets A_1 , A_2 et A_3 selon l'équation suivante (figure III.14) :

$$\hat{z}_k = \frac{S_1 z_{A_1} + S_2 z_{A_2} + S_3 z_{A_3}}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (3.8)$$

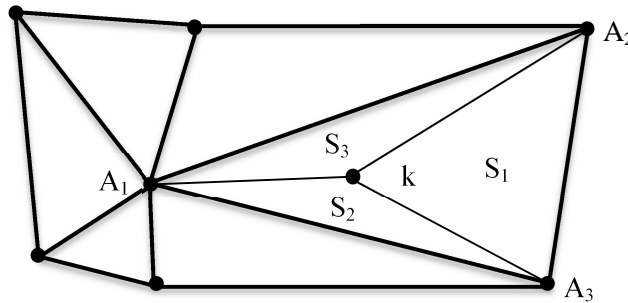


figure III.14. Triangulation de Delaunay et voisins naturels du point k.

III.4.3 Interpolation bilinéaire

Le terme bilinéaire signifie que la fonction est linéaire suivant les deux axes de coordonnées mais l'interpolation elle-même n'est pas linéaire. Elle consiste à interpoler linéairement dans la première direction, ensuite dans la seconde direction. La fonction mathématique de cette interpolation est la suivante :

$$\hat{Z}(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (3.9)$$

Afin de calculer les quatre coefficients, il faut avoir quatre points connus. Le produit matriciel suivant est donc utilisé pour résoudre le système d'équations (Li et al., 2005) :

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4y_4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Pour une grille à maille carrée, l'altitude d'un point k est estimée en utilisant l'équation suivante (Li et al., 2005) :

$$\hat{z}_k = z_1 \left(1 - \frac{\Delta x}{m}\right) \left(1 - \frac{\Delta y}{m}\right) + z_2 \left(1 - \frac{\Delta y}{m}\right) \left(\frac{\Delta x}{m}\right) + z_3 \left(\frac{\Delta x}{m}\right) \left(\frac{\Delta y}{m}\right) + z_4 \left(1 - \frac{\Delta x}{m}\right) \left(\frac{\Delta y}{m}\right) \quad (3.11)$$

Où m est la taille de la maille, Δx et Δy sont les distances en x et en y .

III.4.4 Interpolation bicubique

L'équation de cette méthode d'interpolation est la suivante (Li et al., 2005) :

$$\begin{aligned} \hat{z}(x, y) &= \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 a_{ij} x^i y^j \\ &= a_{00} + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{30}x^3 + a_{01}y + a_{11}xy \\ &\quad + a_{21}x^2y + a_{31}x^3y + a_{02}y^2 + a_{21}xy^2 + a_{22}x^2y^2 \\ &\quad + a_{32}x^3y^2 + a_{03}y^3 + a_{13}xy^3 + a_{23}x^2y^3 + a_{33}x^3y^3 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Pour calculer les 16 coefficients, il nous faut 16 équations d'observations. La méthode suivie consiste à utiliser les dérivées suivant x , y et xy . Si on considère qu'on a 4 points d'altitude connue, les 4 premières équations peuvent être déterminées. Ensuite, les 12 équations restantes s'obtiennent en utilisant les dérivées sur les 4 points connus (Li et al., 2005) :

$$R_{i,j} = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2} \quad (3.13)$$

$$S_{i,j} = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2} \quad (3.14)$$

$$T_{i,j} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{(z_{i-1,j-1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} - z_{i-1,j+1})}{4} \quad (3.15)$$

III.4.5 Interpolation des plus proches voisins

Cette méthode d'interpolation est la plus simple. Elle consiste à calculer l'altitude d'un point en se basant sur les points les plus proches et en utilisant différentes fonctions de calcul (Mitas et Mitasova, 1999). Ces fonctions dépendent du nombre des points utilisés. En effet, si on considère le seul point le plus proche, la valeur du point à interpoler correspond à celle du point voisin. Si on considère les deux points les plus proches, la valeur du point à interpoler correspond au résultat de l'interpolation linéaire de ces deux points (Barbillon, 2008).

III.4.6 Interpolation par pondération inverse à la distance (PID)

Cette méthode représente une moyenne pondérée en fonction de la distance de l'altitude des points entourant le point à interpoler. Ainsi, plus le point est proche, plus il aura du poids dans le calcul de l'altitude du point visé. L'équation de cet interpolateur est la suivante (Mitas et Mitasova, 1999) :

$$\hat{Z}_k = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{Z_i}{d_i^n}}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{1}{d_i^n}} \quad (3.16)$$

\hat{Z}_k : Altitude estimée du point k

z_i : Valeur de l'altitude du point voisin i

d_i : Distance séparant le point concerné et le point i

N : Nombre de points voisins utilisés dans le calcul

n : Paramètre de puissance

III.4.7 Krigeage

Le krigeage est un interpolateur linéaire géostatistique ayant comme but de produire les estimations les plus précises. Quatre contraintes sont à respecter pour construire cette méthode d'interpolation (Arnaud et Emery, 2000) :

1. **Contrainte de linéarité** : cet interpolateur est linéaire et son équation générale est la suivante :

$$\hat{Z}_k = a + \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad (3.17)$$

\hat{Z}_k : Altitude estimée du point k

a : Constante

λ_i : Poids

z_i : Altitude du point i

n : Nombre de points utilisés

Dans le cas du krigeage ordinaire $a = 0$ et $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

2. **Contrainte d'autorisation** : la moyenne et l'écart-type de l'erreur de l'estimation doit exister.
3. **Contrainte de non-biais** : l'erreur de l'estimation doit avoir une espérance nulle.

$$E(\hat{Z}_k - Z_k) = 0 \quad (3.18)$$

4. **Contrainte d'optimalité** : la variance de l'erreur de l'estimation est minimale.

Cette méthode se base sur la configuration spatiale des échantillons pour définir les points qui entrent dans le calcul. En effet, un variogramme est utilisé pour évaluer la variance spatiale des échantillons en fonction de la distance et de la direction. Seuls les points situés dans un voisinage défini par le variogramme sont utilisés dans le calcul de l'altitude du point considéré et leur poids est aussi précisé.

III.4.8 Interpolation par Spline

L'interpolation par Spline est une interpolation polynomiale par morceaux. Afin de construire cet interpolateur, il faut que les dérivées premières et secondes soient continues (Donald, 2010). Cet interpolateur est une fonction de courbure minimale, de ce fait il a tendance à lisser le MNT produit. La Spline se classe en deux catégories : la Spline exacte qui passe par tous les points de l'échantillon et la Spline de lissage qui passe au voisinage de ces derniers (Baillargeon, 2005). Il existe plusieurs types de fonctions Spline tels que la B-Spline qui est une méthode d'interpolation polynomiale construite en se basant sur les courbes de Bézier.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les étapes de production du MNT. Le MNT produit a différentes caractéristiques telles que la taille de maille et son codage. Avant qu'il soit utilisé dans une application, ce MNT doit être évalué afin de vérifier qu'il peut satisfaire aux exigences de l'application. Cette évaluation comprend celle de la position et des formes et cela dépend de la nature d'application. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous présentons la méthodologie d'évaluation de la qualité de position et des formes du MNT.

IV. Evaluation du MNT

La question de la qualité du MNT reste un facteur important pour les différents utilisateurs. Pour être utile à une application particulière, un MNT doit être suffisamment précis (Reuter et al., 2008). La qualité du MNT peut se concevoir selon deux principales approches : qualité de position et qualité de forme (Schneider, 2001). Les deux peuvent affecter les résultats de l'application considérée. Par exemple, la production des orthoimages est influencée par la qualité de position, tandis que les applications hydrologiques ou géomorphologiques exigent une bonne qualité sur les formes (Hengl et Evans, 2008).

Les termes exactitude (*accuracy*) et précision (*precision*) sont souvent utilisés sans distinction pour désigner la qualité du MNT. Il existe deux définitions de ces termes. Dans le manuel terminologique didactique de télédétection et photogrammétrie, l'exactitude est définie comme étant « *l'égalité de la mesure avec la grandeur mesurée* » et la précision comme étant la « *qualité de l'exécution de la mesure d'une grandeur physique qui n'est entachée que d'une faible incertitude* ». Selon Lane et al. (1998) et Charleux-Demargne (2001), l'exactitude « *se définit comme la relation entre une mesure et la réalité qu'elle cherche à représenter ; elle est relative à la détection des erreurs systématiques chiffrées par un biais* » et la précision « *est considérée comme une mesure des erreurs aléatoires pouvant être modélisées statistiquement* ». En d'autres termes, l'exactitude désigne la moyenne de la différence d'altitude entre le MNT et les points de référence alors que la précision désigne son écart-type. Une discussion sur ces définitions est abordée dans Newby (2011). Dans cette étude, nous adoptons les définitions de Lane et al. (1998) et Charleux-Demargne (2001).

L'évaluation de la qualité de position, en particulier celle de l'altitude, est la méthode la plus utilisée pour évaluer les MNT (Temme et al., 2008). L'erreur de l'altitude est composée des erreurs grossières, systématiques et aléatoires (Wise, 2000). Selon Heuvelink (1998), la distribution des erreurs aléatoires est gaussienne mais Höhle et Höhle (2009) affirment que cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée. La méthode d'évaluation consiste à calculer l'erreur moyenne quadratique (EMQ) de la différence d'altitude entre le MNT et les points de référence en écartant les valeurs aberrantes et l'EMQ caractérise l'erreur du MNT (Wise, 2000). Si l'échantillon de points de référence est suffisamment grand, cette méthode peut être efficace pour l'évaluation de la qualité altimétrique du MNT (Li et al., 2005). Cependant, comme elle néglige l'autocorrélation spatiale de l'erreur d'altitude, la qualité de position ne reflète pas la qualité des indices géomorphologiques (Heuvelink, 2002). En effet, une valeur n'est pas suffisante pour caractériser l'erreur du MNT parce qu'elle ne prend pas en considération la distribution spatiale de l'erreur (Heuvelink, 2002 ; Hebel et Purves, 2009).

L'évaluation de la qualité des formes est souvent négligée lors de l'évaluation de la qualité du MNT parce qu'on fait souvent, à tort, l'hypothèse que l'EMQ de position garantit la restitution fidèle des formes. Parce que les formes sont calculées en utilisant les points de la grille du MNT, il y a une relation directe entre la qualité de position et de forme. Cette relation dépend de l'autocorrélation spatiale de l'erreur de l'altitude et la plupart des indices géomorphologiques sont sensibles à cette autocorrélation (Heuvelink, 1998). Ainsi, il est possible d'avoir une mauvaise qualité de position, mais les formes peuvent être correctement modélisées et vice versa. Par ailleurs, la plupart des indices géomorphologiques dépendent de l'échelle, contrairement à l'altitude qui en est presque indépendante (El Hage et al., 2010). Par conséquent, la difficulté de leur évaluation est qu'ils sont relatifs et dépendent de la taille de maille (Evans et al., 2008b). Certains de ces indices sont cependant indépendants de l'échelle à partir d'une échelle donnée, comme le volume d'une dépression fermée (Shary et al., 2002, 2005). Oksanen et Sarjakoski (2005) ont observé que, pour un même MNT, une augmentation de la taille de la maille provoque la diminution de l'erreur de pente. Cela signifie que la qualité de la pente est aussi relative. Ainsi, la taille de maille doit être fixée en fonction de l'application considérée (Takagi et al., 2002). Selon Shary (2008), la meilleure description de la plupart des processus ou phénomènes est faite en utilisant sa propre échelle.

Pour évaluer la propagation des erreurs dans les dérivées de l'altitude, un modèle d'autocorrélation de l'erreur d'altitude est construit. Ce modèle, couplé avec l'erreur d'altitude, constitue le modèle d'erreur du MNT. En se basant sur ce modèle, la propagation de l'erreur de l'altitude dans les indices géomorphologiques peut être évaluée soit analytiquement, si cela est possible, ou en utilisant des simulations de Monte-Carlo (Hunter et Goodchild, 1997).

Il existe deux méthodes de validation de MNT, l'une qui n'a pas besoin de données de référence, nommée validation interne, et l'autre qui exige de données de référence, nommée validation externe (Polidori, 1995). La validation interne vise à vérifier si le MNT est possible tandis que l'externe a pour but d'évaluer l'erreur du modèle, que ce soit la position ou les indices de formes. Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les méthodes de validation externe des positions et des formes. Ensuite, nous abordons la validation interne et ses caractéristiques et nous présentons une méthode originale de validation interne.

IV.1 Validation externe

Comme le définit Polidori (1995), la qualité du MNT est une « *notion fondamentalement liée au besoin de l'utilisateur* ». En effet, chaque application nécessite une qualité du MNT qui répond à ses exigences. La validation externe consiste à utiliser des données externes pour évaluer la qualité du MNT. Elle s'effectue par rapport à n'importe quelles données de référence telles que des points ou des MNT plus précis.

IV.1.1 Qualité de position

L'erreur de l'altitude est définie comme étant la différence entre les valeurs du MNT et les vraies valeurs de l'altitude du terrain. Cette erreur comprend trois composantes (Wise, 2000) : systématiques (biais), aléatoires et grossières. Les erreurs systématiques sont liées à la technique de production surtout la modélisation géométrique mais aussi à la méthode d'interpolation (Hu et al., 2009). Elles sont estimées par le calcul de la moyenne des différences d'altitude entre le MNT et la référence. Les erreurs aléatoires sont surtout dues à la technique de production et sont estimées par le calcul de l'écart-type de cette différence. Les erreurs grossières sont des valeurs aberrantes dues à une faute lors de la production du MNT.

Le descripteur statistique le plus utilisé pour évaluer un MNT est l'erreur moyenne quadratique. Si la valeur de l'EMQ est petite, alors le MNT est considéré comme précis. Pour un échantillon de n points de contrôle, l'EMQ se calcule via la formule suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)^2}{n}} \quad (4.1)$$

\hat{z}_i : Altitude du MNT au point i

z_i : Altitude de référence du point i

La relation entre l'EMQ, la moyenne de l'erreur (μ) et son écart type (σ) est la suivante :

$$EMQ = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (4.2)$$

La moyenne représente l'erreur systématique tandis que l'écart-type représente l'erreur aléatoire. Considérons que le MNT ne contienne pas d'erreurs grossières et considérons que l'erreur totale suit une distribution normale $N(\mu, \sigma)$. Ainsi, les écarts d'altitude appartiennent respectivement aux intervalles $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$ et $[\mu - 1,96\sigma ; \mu + 1,96\sigma]$ pour des pourcentages de confiance de 68% et 95%.

IV.1.2 Qualité des formes

Bien qu'elle soit aléatoire, selon Temme et al. (2008) l'erreur dans un MNT est souvent autocorrélée spatialement. Ainsi, s'il existe une erreur d'altitude sur un point, il est fort probable que le point voisin soit entaché d'une erreur comparable et cela dépend principalement de la méthode de production du MNT (Hunter et Goodchild, 1997). Hengl et Evans (2008) affirment que l'erreur du MNT est la réalisation de deux types de variables aléatoires, l'une corrélée spatialement et l'autre bruit pur. La somme de ces deux composantes avec l'erreur systématique donne l'erreur totale du MNT. Hebel et Purves (2009) ajoutent que cette erreur peut être anisotrope (dépend de la direction). Ainsi, l'altitude d'un point i du MNT est donnée par la formule 4.3.

$$z_{i\text{MNT}} = z_{i\text{terrain}} + \mu_i + \varepsilon'_i + \varepsilon''_i \quad (4.3)$$

$z_{i\text{MNT}}$: Altitude du MNT au point i

$z_{i\text{terrain}}$: Altitude du terrain au point i

μ_i : Erreur systématique

ε'_i : Erreur aléatoire corrélée spatialement

ε''_i : Bruit pur

La plupart des MNT sont délivrés avec une simple valeur de l'EMQ ou de l'écart-type en planimétrie et en altimétrie, ce qui ignore totalement la distribution spatiale de l'erreur (Hebeler et Purves, 2009). Du fait que les dérivées de l'altitude, surtout la pente, sont très sensibles à l'autocorrélation spatiale de l'erreur d'altitude (Heuvelink, 1998), il nous faut un modèle d'autocorrélation de l'erreur du MNT en fonction de la distance et de la direction. Ainsi, après calcul de la différence entre le MNT et les données de référence, il ne faut pas se restreindre au calcul de l'écart moyen quadratique, mais il faut aussi élaborer le modèle d'autocorrélation de l'erreur. Une fois ce modèle d'autocorrélation obtenu, il sera utilisé avec l'erreur de l'altitude pour calculer l'erreur des dérivées de l'altitude (figure IV.1).

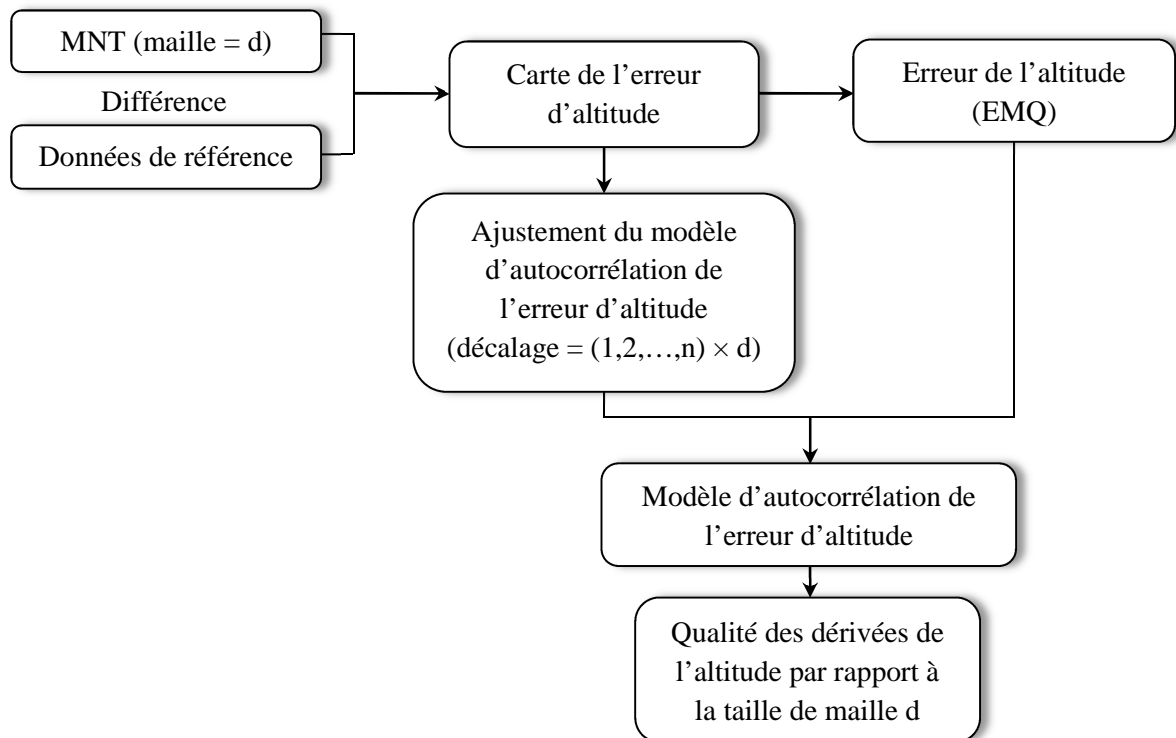


figure IV.1. Méthodologie de la validation externe.

L'équation 4.4 et la figure IV.2 représentent un modèle exponentiel de variance de l'erreur de l'altitude (l'expression « modèle de variance » est plus utilisée dans la littérature que « modèle d'autocorrélation »).

$$\gamma(h) = \sigma_z^2(1 - e^{-\frac{h}{\varphi}}) \quad (4.4)$$

γ : Semivariance

h : Distance horizontale

σ_z^2 : Seuil

φ : Portée

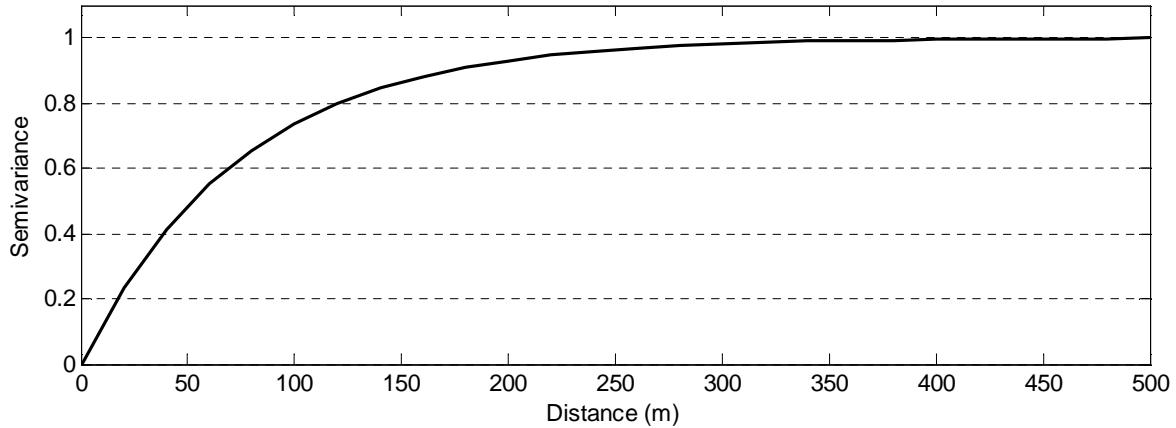


figure IV.2. Modèle de variance de l'erreur d'altitude ($\gamma(h) = (1 - e^{-\frac{h}{75}})$).

L'autocorrélation de l'erreur de l'altitude est calculée en utilisant l'indice de Moran I.

$$I = \frac{n}{\sum \sum W_{ij}} \frac{\sum \sum W_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum (z_i - \bar{z})^2} \quad (4.5)$$

z_i : Altitude du point i

z_j : Altitude du point j

\bar{z} : Moyenne des altitudes des points

n : Nombre de points

W_{ij} : Poids d'un couple de points

Dans ce qui suit, nous utiliserons l'expression « portée pratique » pour désigner la distance correspondant à une valeur de $0,95\sigma_z^2$ du modèle (Oksanen et Sarjakoski, 2005). De plus, la pépite désigne l'ordonnée à l'origine du modèle. L'hypothèse de stationnarité au second ordre, assez utilisée dans la géostatistique pour faciliter la construction du modèle d'erreur, suppose que la moyenne et l'écart-type sont constants sur tout le MNT et que l'autocorrélation de l'erreur dépend uniquement de la distance (isotrope) (Temme et al., 2008). Cette hypothèse est utilisée dans notre étude. Le MNT ayant un modèle d'erreur de pépite nulle avec un seuil minimal et une portée pratique maximale donnera une autocorrélation spatiale forte et des dérivées d'altitude de meilleure qualité (cf. chapitre VI).

IV.1.2.1 Propagation de l'erreur

La propagation de l'erreur est le terme utilisé pour désigner la propagation de l'erreur de l'altitude du MNT dans les dérivées de l'altitude. Considérons qu'on a n points d'altitude $z_1 \dots z_n$ entachés d'erreurs et que nous voulons calculer l'erreur de la pente obtenue sur ces points. L'équation générale de calcul de la pente est la suivante :

$$P = f(z_1 \dots z_n) \quad (4.6)$$

Ainsi, en ayant l'erreur de l'altitude, notre but est d'évaluer l'erreur de la pente. Comme la qualité des dérivées de l'altitude dépend de l'autocorrélation de l'erreur de l'altitude (paragraphe précédent), nous devons avoir, en plus de l'erreur de l'altitude, le modèle d'autocorrélation spatiale de l'erreur. Ensuite, la propagation de l'erreur est obtenue soit analytiquement si possible, soit numériquement par simulation de Monte-Carlo (Hunter et Goodchild, 1997).

IV.1.2.1.1 Méthode analytique de propagation d'erreur sur la pente et l'aspect

En prenant en considération l'autocorrélation spatiale de l'erreur, la qualité de la pente calculée en trigonométrie (P_t) est évaluée par la méthode suivante. Soit z_1 l'altitude du premier point, z_2 l'altitude du second point, d la distance entre les deux points et P la pente. La formule de calcul de la pente est la suivante :

$$P_t = \frac{z_2 - z_1}{d} \quad (4.7)$$

Ainsi, la variance de cette pente sera :

$$V(P_t) = V\left(\frac{z_2}{d} - \frac{z_1}{d}\right) = V\left(\frac{z_2}{d}\right) + V\left(-\frac{z_1}{d}\right) + 2\text{cov}\left(\frac{z_2}{d}, -\frac{z_1}{d}\right) \quad (4.8)$$

$$V(P_t) = \frac{V(z_2)}{d^2} + \frac{V(z_1)}{d^2} - 2\text{cov}\left(\frac{z_1}{d}, \frac{z_2}{d}\right) \quad (4.9)$$

Du fait qu'il existe une autocorrélation entre les erreurs de l'altitude, la covariance n'est pas nulle,

donc on obtient (r est le coefficient de corrélation $r\left(\frac{z_1}{d}, \frac{z_2}{d}\right) = \frac{\text{cov}\left(\frac{z_1}{d}, \frac{z_2}{d}\right)}{\frac{\sigma_{z_1}}{d} \cdot \frac{\sigma_{z_2}}{d}}$) :

$$V(P_t) = \left(\frac{\sigma_{z_1}}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z_2}}{d}\right)^2 - 2\frac{\sigma_{z_1}}{d} \frac{\sigma_{z_2}}{d} r_{z_1 z_2} \quad (4.10)$$

$$V(P_t) = \left(\frac{\sigma_{z_1}}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z_2}}{d}\right)^2 - 2\frac{\sigma_{z_1}}{d} \frac{\sigma_{z_2}}{d} r_{z_1 z_2} \quad (4.11)$$

$$\sigma_{P_t} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{z_1}}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z_2}}{d}\right)^2 - 2\frac{\sigma_{z_1}}{d} \frac{\sigma_{z_2}}{d} r_{z_1 z_2}} \quad (4.12)$$

Si $\sigma_{z_1} = \sigma_{z_2} = \sigma_z$

$$\sigma_{P_t} = \frac{\sigma_z}{d} \sqrt{2(1 - r_{z_1 z_2})} \quad (4.13)$$

Si l'autocorrélation spatiale entre les erreurs de l'altitude (4.13) est totale, l'erreur de la pente sera nulle.

$$\sigma_{p_t} = \frac{\sigma_z}{d} \sqrt{2(1-1)} = 0 \quad (4.14)$$

Nous avons présenté le cas où la pente est calculée par trigonométrie. En géométrie différentielle, une méthode analytique de propagation de l'erreur dans la pente et son aspect est développée par Oksanen et Sarjakoski (2005). Cette méthode évalue l'erreur de la pente calculée par l'algorithme différence finie du troisième ordre pondérée par l'inverse de la distance au carré (cf. tableau II.2), algorithme utilisé dans ArcGIS (Burrough et McDonell, 1998). Comme nous l'avons vu, pour calculer la pente en utilisant cet algorithme, il faut calculer les dérivées partielles de l'altitude suivant les directions de x et y en utilisant les équations suivantes (m est la taille de la maille) :

$$p = \frac{(z_c + 2z_f + z_i) - (z_a + 2z_d + z_g)}{8m} \quad (4.15)$$

$$q = \frac{(z_g + 2z_h + z_i) - (z_a + 2z_b + z_c)}{8m} \quad (4.16)$$

Puis la pente s'écrit :

$$S = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (4.17)$$

$$\theta = \text{atan}(S) \text{ (en radian)} \quad (4.18)$$

et l'aspect s'écrit (en radian) :

$$\psi = \pi - \text{atan}\left(\frac{q}{p}\right) + \frac{\pi}{2} \left(\frac{p}{|p|}\right) \quad (4.19)$$

Dans l'étude d'Oksanen et Sarjakoski (2005), l'erreur est considérée isotrope. Ainsi, la variance de p est égale à celle de q. Enfin, les variances de la pente et de l'aspect sont les suivants :

$$\sigma_S^2 = \sigma_p^2 \quad (4.20)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_p^2}{(1 + p^2 + q^2)^2} \quad (4.21)$$

$$\sigma_\psi^2 = \frac{\sigma_p^2}{p^2 + q^2} \quad (4.22)$$

Avec

$$\sigma_p^2 = \frac{3\sigma_z^2 + 4C(m) - 2C(2m) - 4C(\sqrt{5}m) - C(\sqrt{8}m)}{16m^2} \quad (4.23)$$

$$C(h) = \sigma_z^2 - \gamma(h) = \sigma_z^2 \cdot e^{-\frac{h}{\phi}} \quad (4.24)$$

Ainsi, la connaissance du modèle d'autocorrélation de l'erreur d'altitude permet d'estimer la qualité de la pente et celle de l'aspect : nous pouvons calculer la variance de la pente et celle de l'aspect en chaque point du MNT, une variance minimale étant un signe de bonne qualité.

IV.1.2.1.2 Simulation de Monte Carlo

Comme l'étude de la propagation de l'erreur d'altitude sur certaines dérivées de l'altitude est analytiquement très complexe, il est possible de l'effectuer numériquement en utilisant la simulation de Monte Carlo. Ainsi, en se basant sur le modèle de variance de l'erreur d'altitude, plusieurs réalisations de MNT sont produites, dont la plus précise est supposée faire partie. Pour chaque réalisation, l'indice à analyser est extrait, ce qui constitue un échantillon de réalisations de cet indice. On utilise ensuite une approche probabiliste pour évaluer la qualité de cet indice. Par exemple, Oksanen et Sarjakoski (2005) ont étudié la propagation de l'erreur d'altitude du MNT dans la pente, l'aspect et l'extraction des bassins versants. Holmes et al. (2000) ont évalué l'effet de cette erreur sur l'accumulation de flux, la rugosité du terrain, la courbure et la pente.

IV.1.2.2 Calcul de l'erreur de la pente en utilisant les profils

Dans ce cas, ce n'est pas la pente maximale qu'on cherche à évaluer, mais une pente le long d'un profil de référence. Elle est calculée par trigonométrie. Nous calculons la pente en utilisant les altitudes extraites du MNT et celles du profil de référence à différentes distances d'échantillonnage. Ensuite, la moyenne quadratique de la différence de pentes pour chaque distance d'échantillonnage est calculée :

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_{t_i} - P_{t_i})^2}{n}} \quad (4.25)$$

\hat{P}_{t_i} : Pente au point i calculée en utilisant les altitudes du MNT

P_{t_i} : Pente au point i du profil de référence

n : Taille de l'échantillon

IV.2 Validation interne

IV.2.1 Fondement

La validation interne a pour but d'évaluer le MNT sans utiliser de données externes. Le but de cette validation est de vérifier si le MNT est possible. Par exemple, les erreurs grossières dans le MNT peuvent aussi être détectées visuellement par ombrage (Oksanen, 2003). Notre méthode consiste à

vérifier si les lois naturelles sont respectées dans un MNT et cela ne nécessite pas de données externes (Polidori, 1995). Elle est composée de deux parties, l'une basée les propriétés physiques du terrain comme l'écoulement de l'eau vers le bas et l'autre fondée sur les propriétés statistiques comme l'histogramme des pentes et son autocorrélation spatiale.

Les règles les plus classiques pour la validation interne sont en relation avec le réseau hydrographique. En effet, les rivières descendent toujours vers le bas, et s'il existe des cuvettes ou le long de ces rivières, cela est identifié comme étant un artéfact.

De plus, la première loi de la géographie dictée par Waldo Tobler stipule que « *toutes les choses sont reliées entre elles mais les choses rapprochées le sont davantage que les choses éloignées* » (Tobler, 1970). En expliquant cette loi, Miller (2004) affirme que « *la première loi de Tobler est à la base des statistiques de l'autocorrélation spatiale c'est-à-dire des techniques quantitatives pour l'analyse de corrélation par rapport à la distance ou aux relations de connectivité* ». Nous allons appliquer cette loi pour étudier l'autocorrélation spatiale de la pente du terrain. En effet, cette autocorrélation doit diminuer en fonction de l'augmentation de la distance.

En outre, l'histogramme de la pente locale peut aussi être utilisé pour une telle validation. En effet, cet histogramme a toujours plus ou moins la même forme. Cette forme est caractérisée par un accroissement jusqu'à atteindre un mode unique et ensuite un décroissement (figure IV.3) et est fonction de la taille de maille (cf. partie VIII.2). Ainsi, si cette forme n'est pas respectée, on considère qu'il existe une erreur au niveau de la pente locale du MNT.

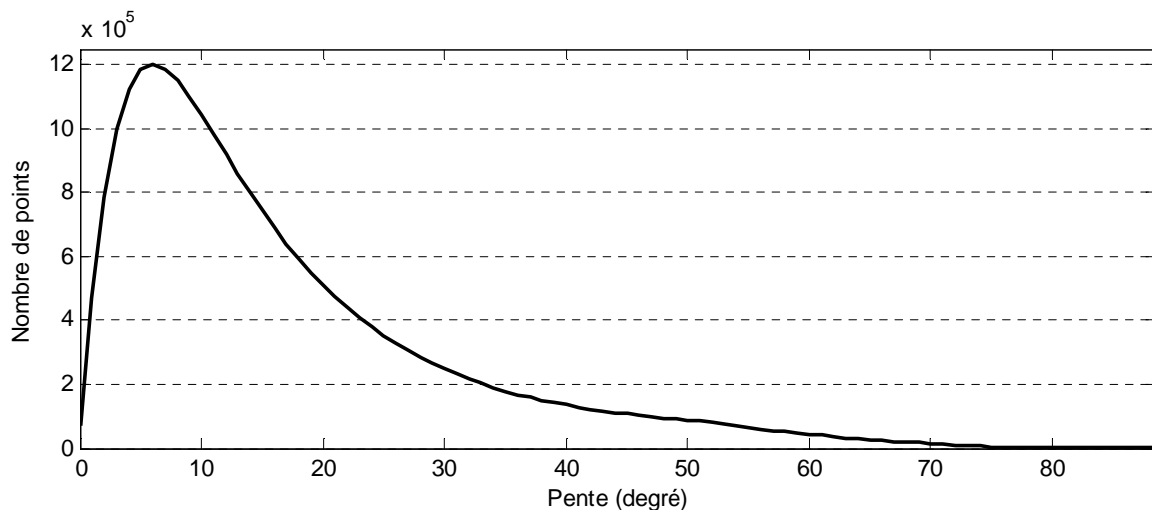


figure IV.3. Histogramme de pentes.

IV.2.2 Méthodologie

Dans notre étude, nous utilisons les méthodes suivantes pour effectuer la validation interne :

- Détection des cuvettes dans le MNT.

- Vérification du respect de la première loi de la géographie.
- Respect de la forme de l'histogramme des pentes.

Nous extrayons les cuvettes du MNT en utilisant le logiciel ArcGIS. De plus, nous effectuons la différence d'altitude sur ces cuvettes entre le MNT rempli (cf. partie II.2.3) et celui non rempli et calculons la moyenne quadratique de cette différence.

Afin de vérifier la première loi de géographie, nous calculons le semivariogramme des pentes en fonction de la distance suivant la direction horizontale. Les paires de points sont collectées comme le montre la figure IV.4 et la semivariance s'écrit (Hengl, 2008) :

$$\text{Semivariance} = \frac{\sum \theta_i^2 + \sum \theta_{i+h}^2 - 2 \sum (\theta_i \times \theta_{i+h})}{2n} \quad (4.26)$$

θ_i : Pente au point i

θ_{i+h} : Pente au point situé à une distance h du point i

n : Nombre total de couples de points

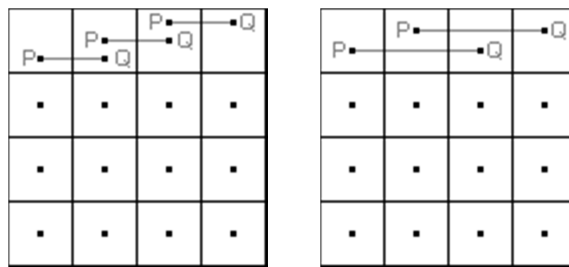


figure IV.4. Choix des paires de points en fonction de la distance dans la direction horizontale (source : Hengl, 2008).

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes d'évaluation externe de la qualité de l'altitude et de la pente. De plus, nous avons proposé une méthode de validation interne. Ces méthodes seront utilisées dans la partie suivante pour évaluer l'impact de paramètres de production sur la qualité de l'altitude et de la pente.

Conclusion de la deuxième partie

Dans cette partie, nous avons présenté les techniques de production de MNT par photogrammétrie et InSAR, les structures d'échantillonnage et les méthodes d'interpolation. De plus, nous avons exposé la méthode d'évaluation interne et externe de l'altitude et de la pente. Comme nous l'avons vu, ces techniques de production comprennent des paramètres contrôlables de traitement des données brutes. Ces paramètres peuvent avoir une incidence sur la qualité du MNT produit. De plus, les méthodes d'interpolation et la taille de maille exercent aussi une influence sur cette qualité. Ainsi, le but de la partie suivante est d'évaluer et d'analyser la sensibilité de l'altitude, de la pente et des descripteurs hydrographiques et de leur qualité à ces facteurs en utilisant les méthodes d'évaluation proposées.

Troisième partie

Facteurs de qualité géomorphologique

Le but de cette partie est d'étudier l'impact des paramètres de production du MNT sur l'altitude et les indices géomorphologiques et hydrographiques. Nous nous intéressons à deux techniques très utilisées, la photogrammétrie et l'InSAR. Pour chacune de ces deux techniques il y a un aspect « modélisation géométrique », dont on suppose qu'il a peu d'influence sur les formes et son influence sur l'erreur de position a été largement étudié, et un aspect « traitement d'image » gouverné par des paramètres. Ces deux aspects sont propres à chaque technique. Nous nous intéressons à l'aspect traitement d'image dans cette étude.

Chacune de ces deux techniques conduisent à un semis de points avec des trous. Ainsi, il faut le rééchantillonner afin d'avoir la structure du MNT voulue. Cette structure est caractérisée par une forme et une taille de la maille. Les altitudes des points de cette nouvelle structure sont obtenues par interpolation des altitudes des points voisins.

Dans cette partie, nous étudions principalement l'impact des paramètres de l'appariement d'images stéréoscopiques, ceux du traitement des données RSO, de quelques méthodes d'interpolation et de la taille de la maille du MNT. L'évaluation est faite en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol. L'étude porte surtout sur la qualité des dérivées de l'altitude telles que la pente, l'aspect et la courbure qui sont les indices basiques décrivant la morphologie du terrain. De plus, nous évaluons l'impact sur la qualité géométrique du réseau hydrographique et des bassins versants et de leurs caractéristiques. Nous présentons tout d'abord la zone d'étude. Ensuite, nous exposons notre étude sur l'impact de ces paramètres sur l'altitude et ses dérivées.

V. Description de la zone d'étude et des données utilisées

Dans ce chapitre, nous présentons la zone d'étude et les données utilisées. Nous avons choisi une zone, située au Liban, parce qu'elle présente différentes topographies et géomorphologies (figure V.1) et différentes occupations du sol. Les résultats dans les chapitres qui suivent dépendent de ces caractéristiques.

V.1 Description de la topographie, la morphologie et l'occupation du sol

Située sur la côte orientale de la mer Méditerranée, son altitude varie de 0 à 3093 m avec une superficie d'environ 2490 km². Elle est caractérisée par la présence d'une chaîne montagneuse orientée du Nord-Est au Sud-Ouest. Plusieurs rivières permanentes et temporaires traversent la zone et se jettent dans la mer. Le relief comprend de nombreuses vallées, crêtes, falaises et plaines.

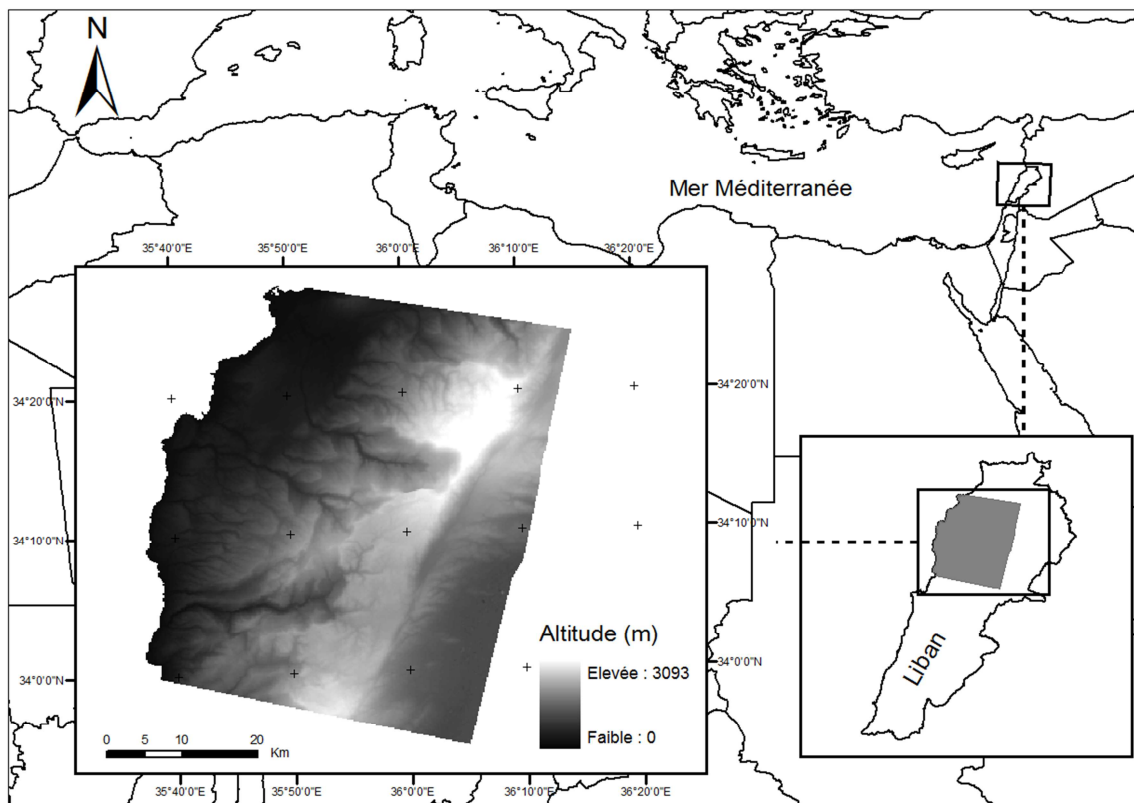


figure V.1. Localisation de la zone d'étude et sa topographie décrite par le MNT SPOT par défaut (cf. chapitre VI).

La distribution de la pente, calculée en utilisant le MNT par défaut ayant une maille de 10 m, est affichée dans la figure V.2.

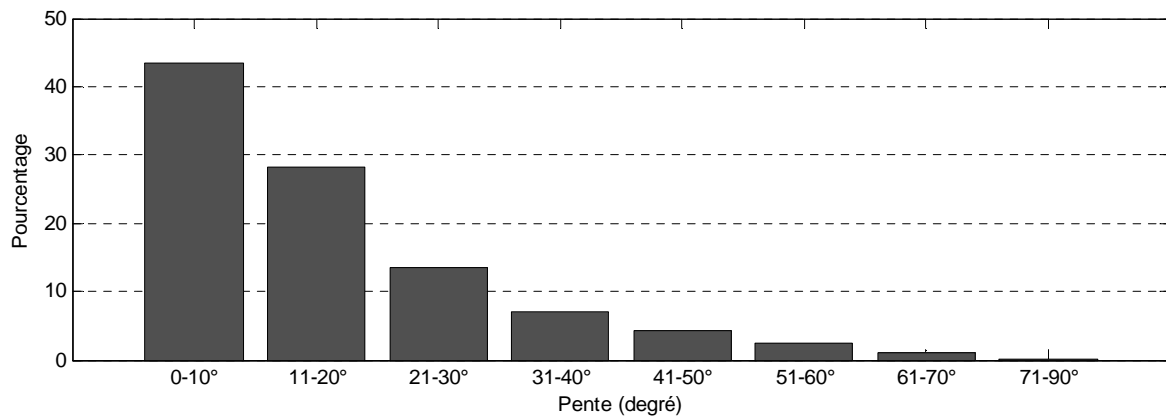


figure V.2. Répartition en pourcentage de la pente calculée en utilisant le MNT par défaut.

Afin d'étudier l'impact de l'occupation du sol, il est intéressant de distinguer les zones artificielles, les zones de végétation et les sols nus. Les zones artificielles et forestières comprennent des objets ayant différentes hauteurs et peuvent générer de fortes pentes sur leur bord d'autant plus que la taille de la maille du MNT est petite. Cet effet sera plus important sur les zones d'objets éparées que dans celles continues. De plus, les textures structurées et périodiques du sursol, tel que sur les vergers, et les zones de radiométrie homogène peuvent influencer la qualité de l'appariement et donc la valeur calculée de l'altitude et de la pente. Ainsi, nous voulons distinguer les zones artificielles de la végétation et du sol nu. En même temps, nous voulons distinguer les zones présentant une continuité de celles discontinues. Dans la nomenclature Mode d'Occupation du Sol (MOS), développée par l'institut d'aménagement et d'urbanisme de l'Île-de-France, ces deux exigences sont remplies. Cette nomenclature comprend quatre niveaux. Le premier, composé de 9 classes, correspond à des éléments identifiables à l'échelle du pays, le second à l'échelle de 1:100 000 (28 classes), le troisième à l'échelle du 1:50 000 (35 classes) et le quatrième à l'échelle de 1:20 000 (22 classes) (El Hage et al., 2011). En se basant sur cette nomenclature, nous générons une nouvelle classification afin de distinguer les occupations du sol continues et discontinues dans les zones artificielles et dans les zones forestières. Nous créons également une classe pour les cultures en plein champ, du fait que leur texture peut changer à cause du diachronisme des images SPOT que nous utilisons par la suite (cf. tableau V.1), et une autre classe pour les sols nus. Nous utilisons les classes du deuxième et du troisième niveau de la nomenclature MOS. Ainsi, notre classification comprend les 6 classes suivantes :

1. Surfaces artificielles continues
2. Surfaces artificielles discontinues
3. Forêts denses
4. Forêts clairsemées

5. Culture en plein champ
6. Sol nu

Une carte d'occupation du sol adoptant la nomenclature MOS et produite par photo-interprétation à partir d'images IKONOS a été utilisée pour élaborer notre classification. Ces images ont une taille de pixel de 0,8 m et datent de 2005. Cette carte a été produite par le Conseil National de la Recherche Scientifique (CNRS) du Liban sous format vecteur. Nous avons élaboré notre classification par fusion des classes de la carte et ensuite converti le fichier obtenu en une image raster dont le pixel est de 10 m (égale à la taille de la maille des MNT SPOT produit). Nous présentons la proportion de chacun des éléments de la nouvelle classification sur la figure V.3. Selon cette figure, plus de la moitié de la zone d'étude est couverte de végétation (56,5%). Les surfaces artificielles constituent 6,2% de la zone d'étude et les sols nus 37,3%, la plupart étant situés dans les montagnes.

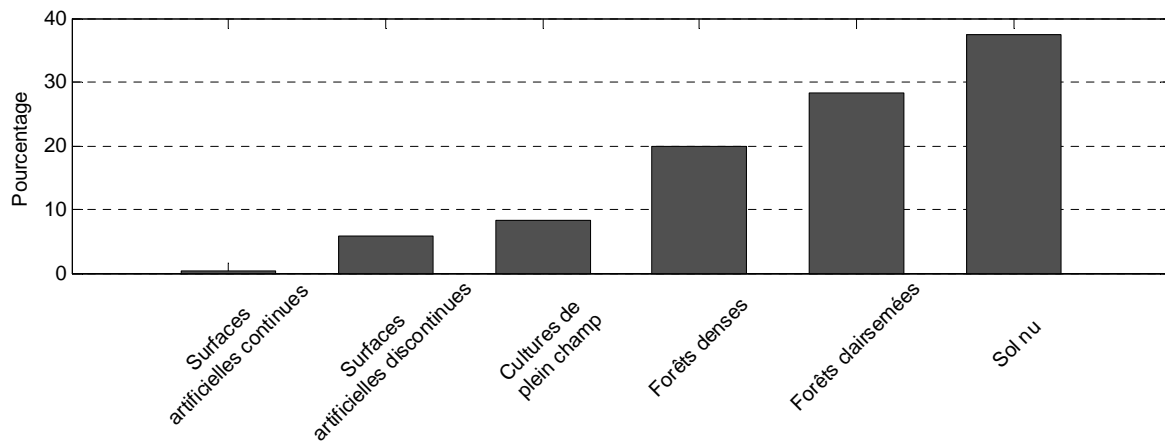


figure V.3. Répartition des classes d'occupations du sol en pourcentage selon la classification utilisée.

La figure V.4 représente la répartition de l'occupation du sol en fonction de la pente, celle-ci étant calculée en utilisant le MNT SPOT produit par les paramètres par défaut (taille de maille égale à 10 m) (cf. chapitre VI). Selon cette figure, la plupart des surfaces artificielles et les cultures de plein champ sont localisées sur de faibles pentes. Les forêts et les sols nus s'étalent sur des pentes plus fortes.

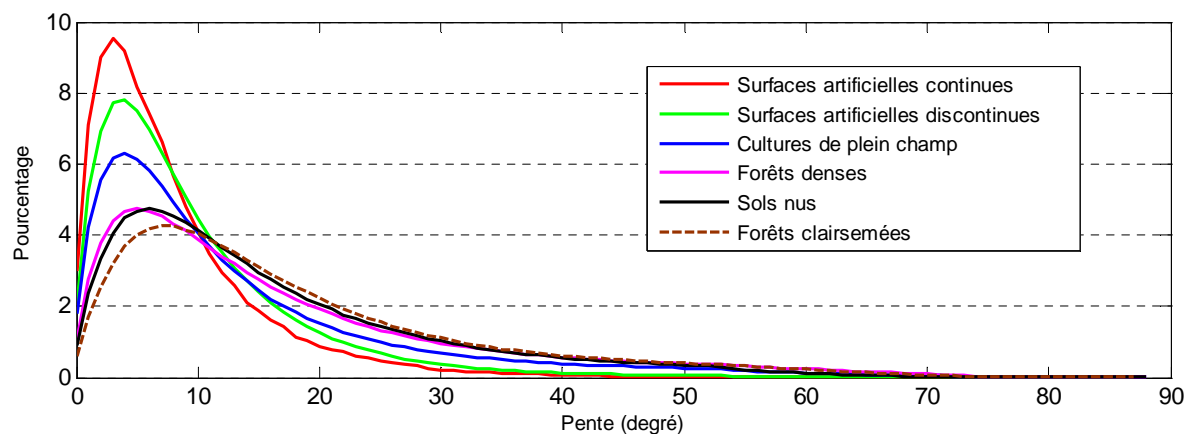


figure V.4. Répartition des classes d'occupations du sol selon la pente du terrain.

De façon générale, il existe plusieurs risques naturels tels que l'érosion, le glissement de terrain et l'inondation au Liban et cela est surtout dû à la topographie montagneuse du territoire libanais (Abdallah, 2012). Selon Bou Kheir (2007), 6% de la zone de Qartaba-Jbeil (située dans la zone d'étude) présente un risque élevé d'érosion, 88% de risque modéré et 6% de risque faible. La zone de Beyrouth et la montagne limitrophe comprend environ 36% de terrains ayant un risque élevé d'érosion hydrique dont 52% sont localisés dans les zones montagneuses (Bou Kheir et al., 2006). En outre, la présence de carrières, environ 14,7 km² répartis sur tout le pays, et la forte précipitation ont causé plusieurs glissements de terrain en 1996, 2000 et 2006 (Abdallah, 2012). De plus, plusieurs zones sont exposées aux risques d'inondation des fleuves parce qu'elles sont de faibles pentes, telles que la plaine d'Akkar et celle de Chekka. L'inondation la plus forte a été celle du fleuve Abou Ali à Tripoli en 1955 qui a affecté une zone de 400 km² et a tué environ 400 personnes (Abdallah, 2012). Les plaines côtières, surtout celles d'Akkar et de Tyr, sont aussi sujettes aux inondations dues à l'élévation du niveau de la mer (El hage et al., 2011).

V.2 Imagerie et logiciels utilisés

En imagerie optique, nous disposons de deux couples SPOT 4 HRV 1 et ASTER VNIR (niveau 1A) composés chacun de deux images panchromatiques. Les images SPOT ont été acquises à deux dates différentes ($\Delta t = 13$ jours) tandis que les images ASTER sont acquises de manière (quasi) simultanée en visée arrière et nadir. Le tableau V.1 représente les caractéristiques de ces couples.

Couple	B/H	Taille du pixel	Date d'acquisition
SPOT	0,601	10 m	31/05/2000 - 13/06/2000
ASTER	0,602	15 m	27/09/2006

tableau V.1. Caractéristiques des couples d'images optiques.

En imagerie radar, nous avons utilisé deux couples d'images ERS en configuration tandem. Ces images sont acquises par deux satellites, ERS 1 et ERS 2, qui passent au-dessus de la même zone avec 1 jour de décalage (tandem). La base perpendiculaire du premier couple (appelé couple 1 dans suite de l'étude) est de 139 m et du deuxième (couple 2) de 100 m. Les dates d'acquisition du premier couple sont les 24/06/1995 – 25/06/1995 et celle du deuxième couple sont les 04/05/1996 – 05/05/1996.

Nous avons utilisé le logiciel Geoview pour générer les MNT à partir des images SPOT et ASTER. Ce logiciel est développé par IGN Espace et est utilisé pour la production des MNT SPOT commercialisés couvrant la plupart de la surface terrestre. Nous avons utilisé le logiciel Doris pour traiter les images RSO. Ce logiciel est développé par l'université de Delft aux Pays-Bas et gratuit pour des fins scientifiques et non commerciales (Kampes et al., 2003).

Tous les MNT produits dans notre étude à partir de ces données ont été rééchantillonnés en maille régulière et interpolés par la méthode de krigeage ordinaire. Les MNT produits par le couple SPOT ont une maille de 10 m, ceux produits par ASTER ont une maille de 15 m et ceux produits par InSAR ont une maille de 50 m. Ils sont tous codés sur 4 octets.

V.3 Données de référence

Plusieurs données de référence sont utilisées. Nous avons utilisé 911 points de nivellement, fournis par le CNRS du Liban, répartis sur toute la zone d'étude pour calculer l'EMQ. De plus, 3635 points issus d'un levé le long d'une route sont utilisés pour évaluer l'autocorrélation spatiale de l'erreur d'altitude. Deux profils, acquis dans une zone dont le sol est nu et ayant un pas d'échantillonnage de 5 m, ont été levés pour évaluer la qualité de la pente (figure V.5). Le levé de ces deux profils a été effectué en utilisant une station totale. La longueur du premier est de 575 m et du deuxième de 345 m. Ils sont un peu courts en raison de contraintes logistiques. Finalement, nous avons numérisé par photo-interprétation le fleuve Nahr El Jawz sur les mêmes images IKONOS utilisées pour produire la carte d'occupation du sol, afin d'analyser la qualité géométrique d'indices hydrographiques.

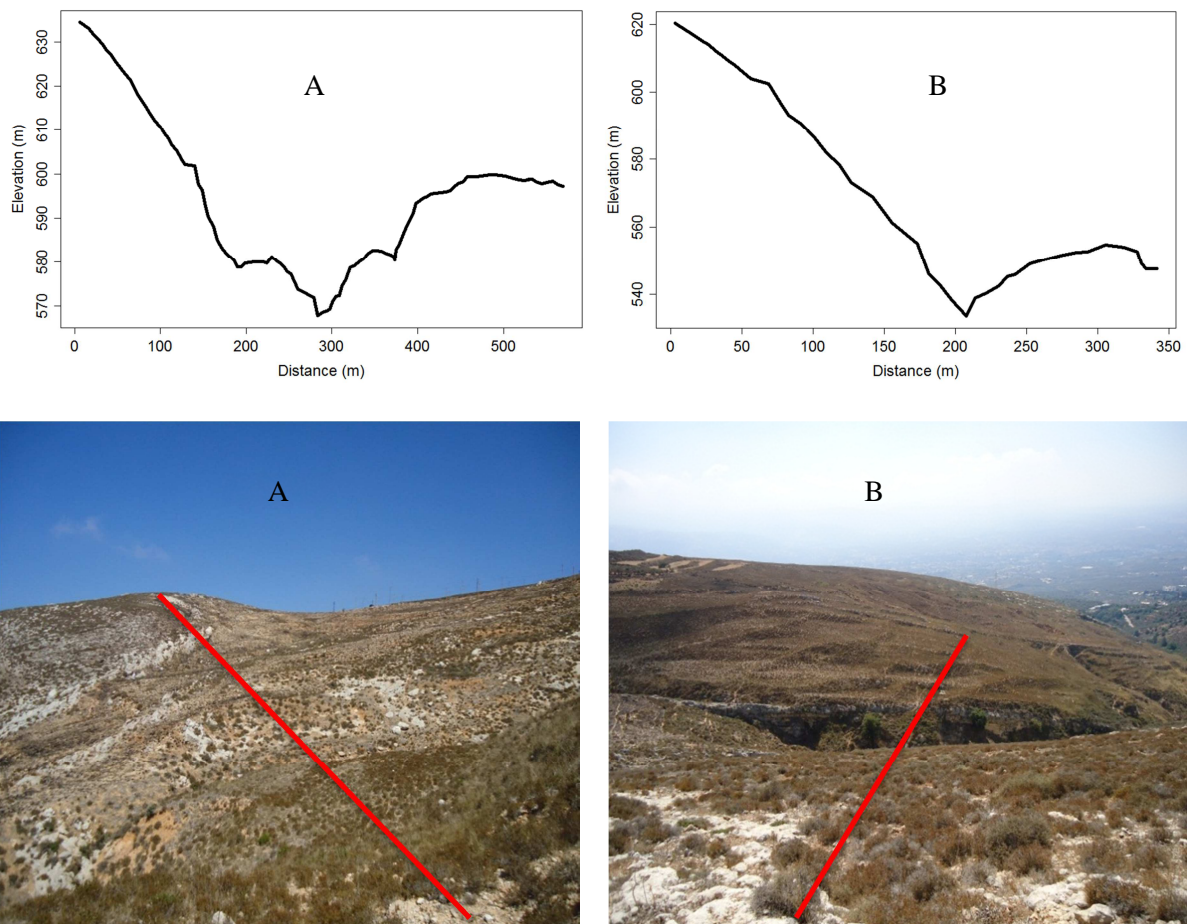


figure V.5. Premier (A) et deuxième (B) profils de référence (en rouge).

VI. Influence des paramètres de l'appariement d'images optiques

La photogrammétrie, basée sur le principe de la stéréoscopie pour extraire les altitudes de terrain, est l'une des méthodes les plus employées pour la cartographie du relief. Un grand nombre de capteurs spatiaux fournissent des images optiques dans une configuration permettant le traitement photogrammétrique, par exemple, les images acquises par le satellite SPOT (Guichard et al., 1983). Chaque couple d'images est caractérisé par plusieurs paramètres d'acquisition, comme la résolution spatiale et le rapport base sur hauteur (B/H). Ces paramètres ont un impact sur l'erreur de l'altitude du MNT obtenu. Renouard (1992), Krupnik (2000), Hashemian et al. (2004), Cuartero et al. (2004), Poon et al. (2005), Evans et al. (2008a) et Bignone (2008) ont étudié la qualité des MNT issus des couples stéréo SPOT, ASTER, IKONOS, Cartosat-1 et ALOS PRISM. Par exemple, l'erreur moyenne quadratique (EMQ) observée dans une zone d'étude particulière pour un MNT ASTER est de 13 m et pour SPOT HRV est de 7,3 m (Cuartero et al., 2005).

La production de MNT en utilisant ces images est composée de plusieurs étapes dans laquelle plusieurs paramètres de traitement doivent être spécifiés. Ces paramètres peuvent affecter l'erreur de position du MNT et se propager dans les indices géomorphologiques. Par conséquent, pour analyser la sensibilité des indices géomorphologiques au changement de ces paramètres, l'impact de chaque paramètre doit être étudié séparément. L'influence des paramètres d'appariement sur l'erreur de l'altitude du MNT a été évalué dans plusieurs études (Gooch et Chandler, 1999; Lane et al., 2000). Ces deux études utilisent des couples stéréoscopiques de photographies aériennes comme données sources. Gooch et Chandler (1999) affirment que les valeurs optimales de ces paramètres peuvent conduire à une amélioration de 35% de la qualité de l'altitude. Lane et al. (2000) affirment que le processus photogrammétrique (calibration de la caméra, échelle de l'image...) a l'impact le plus important sur la qualité de l'altitude et que les paramètres d'appariement ont une influence moindre. En outre, selon la même étude, l'influence des paramètres d'appariement est plus importante sur les dérivées de l'altitude. Plus on dérive, plus l'influence d'une erreur d'altitude sur les dérivées est importante, même si cette erreur reste négligeable (Holmes et al., 2000 ; Shary et al., 2002). Ainsi, cela signifie que le changement d'un paramètre peut avoir un impact léger sur la mesure de l'altitude et qu'il peut facilement être ignoré, mais son impact peut influencer significativement les dérivées de l'altitude. De plus, il existe une autocorrélation spatiale des erreurs d'altitude du MNT (Temme et al., 2008). La plupart des dérivées de l'altitude sont très sensibles à cette autocorrélation (Heuvelink, 1998). Puisque cette autocorrélation spatiale dépend de la méthode de production (Hunter et

Goodchild, 1997), elle peut être affectée par les paramètres de l'appariement et par conséquent les dérivées de l'altitude le seront aussi. La qualité de la position néglige cette autocorrélation spatiale de l'erreur d'altitude et donc elle ne garantit pas la qualité des indices géomorphologiques. Ainsi, nous avons besoin d'autres critères de qualité.

Dans ce chapitre nous étudions l'influence des paramètres de l'appariement en photogrammétrie sur les indices géomorphologiques en fonction de la morphologie et de l'occupation du sol. Ce travail constitue un prolongement des travaux réalisés par Gooch et Chandler (1999) et Lane et al. (2000). Cependant, ici, en plus de l'altitude, nous nous intéressons à la pente et à la courbure selon la morphologie du terrain et l'occupation du sol. Nous utilisons des couples d'images satellitales couvrant une large zone ce qui permet d'aller plus loin dans l'analyse géomorphologique. De plus, ces images ont des caractéristiques différentes de celles aériennes, par exemple le diachronisme pour des images SPOT 4. Nous finirons par répondre à ces questions : Est-ce que les paramètres d'appariement affectent le MNT et ses dérivées ? Si oui, quels sont les indices les plus fortement influencés ? Comment cette influence se manifeste ? Sur quel type de morphologie du terrain et d'occupation du sol l'impact est-il plus important ?

VI.1 Influence de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol

Le paysage d'une zone comprend le terrain et le sursol. Le terrain est caractérisé par sa morphologie et sa topographie et le sursol par sa diversité. Ces caractéristiques peuvent influencer la qualité du MNT. En effet, le terrain n'est pas toujours nu et présente une couverture ayant différentes hauteurs. Cette couverture va être modélisée dans le MNT produit (par exemple les arbres forment des bosses dans le MNT (figure VI.1)) et la morphologie du MNT en sera affectée.



figure VI.1. Modélisation des arbres dans un MNT issu des images simulées du satellite Pléiades (Durupt et al., 2006).

La morphologie du terrain contribue également à la qualité du MNT. Selon Li (1992), Gao (1995, 1997) et Weng (2002), la qualité du MNT peut être influencée d'une façon importante par la géomorphologie du terrain et le pas d'échantillonnage. En outre, Toutin (2002, 2006), Felicísimo (1992) et Papasaika et Baltsavias (2009) affirment qu'il existe une relation presque linéaire entre l'erreur de l'altitude du MNT et la pente du terrain. En d'autres termes, plus la pente d'une zone est importante, plus l'erreur de l'altitude est élevée. Pour confirmer cela, nous avons construit le graphe de la différence d'altitude entre le MNT et les points de contrôle en valeur absolue, en fonction de la pente locale du terrain (calculée avec un MNT SPOT ayant une maille de 10 m) (figure VI.2).

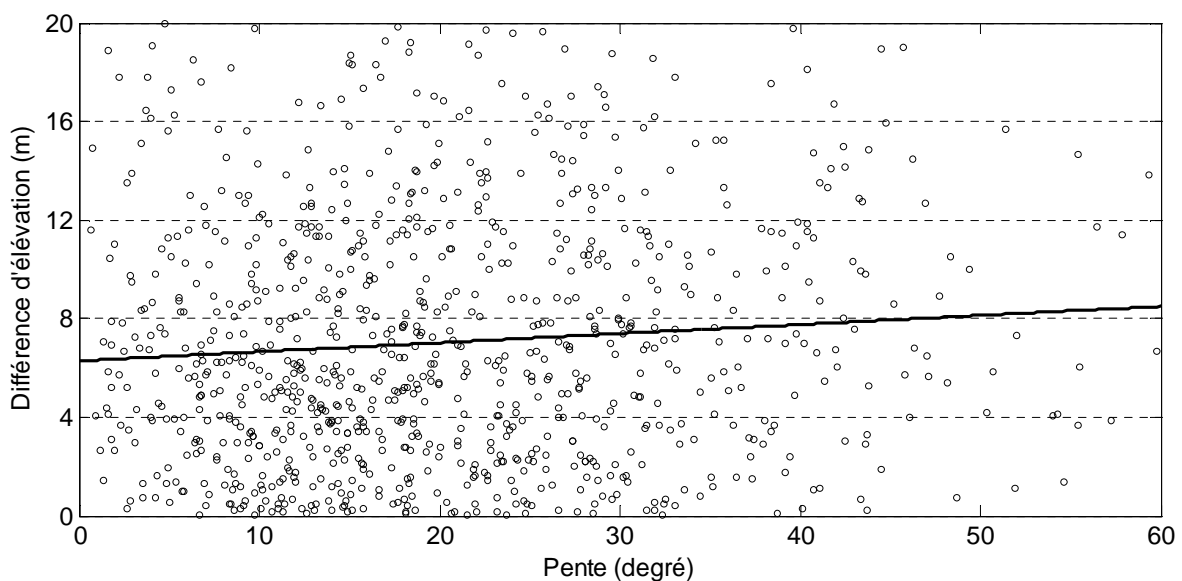


figure VI.2. Différence d'altitude en fonction de la pente du terrain.

A l'exception de quelques points qui présentent des différences très élevées, nous observons bien une tendance générale où la différence d'altitude augmente lorsque la pente augmente. De plus, Oksanen et Sarjakoski (2005) ont conclu que, contrairement à l'altitude, l'erreur de la pente est plus élevée dans les zones de faibles pentes que dans celles de fortes pentes. En nous basant sur ces études, nous avons décidé d'évaluer l'impact des paramètres d'appariement sur le taux d'échec d'appariement et la pente moyenne selon la géomorphologie du terrain et l'occupation du sol.

VI.2 Données utilisées et méthodologie

Les couples SPOT 4 HRV et ASTER VNIR présentés dans le chapitre V sont utilisés pour extraire des MNT. La taille du pixel des images est 10 m et 15 m respectivement et les couples ont un même rapport B/H. Nous avons fait l'étude sur la zone commune aux deux couples. Notre méthodologie consiste en différentes étapes. Tout d'abord, nous définissons un ensemble de valeurs de

paramètres par défaut et nous générons un MNT par défaut en utilisant ces paramètres. Deuxièmement, à chaque fois nous faisons varier la valeur d'un seul paramètre, et générons un nouveau MNT. Ainsi, la différence entre le nouveau MNT et celui par défaut est uniquement liée à la modification d'un paramètre et son impact peut être évalué. Cette méthode appelée One factor At Time (OAT) est utilisée pour évaluer la sensibilité des estimations à la perturbation des facteurs (Lane et al., 1994). Troisièmement, le MNT obtenu en sortie du processus d'appariement contient des trous. Ils sont dus aux échecs d'appariement entre les deux images. Ces trous sont remplis par interpolation. En se référant à Kim et al. (1999), les interpolations par krigeage et gaussienne fournissent la meilleure EMQ de l'altitude quand elles sont utilisées pour interpoler les altitudes extraites à partir d'images SPOT. Ainsi, nous utilisons le krigeage ordinaire fourni par le logiciel SAGA GIS. Nous fixons une taille de maille de 10 m pour les MNT SPOT et 15 m pour les MNT ASTER. Enfin, l'extraction des indices géomorphologiques des MNT est réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS.

Les résultats sont interprétés selon une approche statistique en utilisant des histogrammes normalisés en divisant les occurrences par le nombre total des pixels. Nous évaluons d'abord le taux d'échec de l'appariement en fonction de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol. Ensuite, nous soulignons le fait qu'un changement de paramètres a une influence minimale sur les statistiques de l'altitude, mais que l'impact est significatif sur les statistiques des dérivées de l'altitude. Nous évaluons cet impact en fonction de la pente et de l'occupation du sol. Nous évaluons aussi les effets sur la qualité du MNT par validations interne et externe. Finalement, nous étudions l'impact sur le réseau hydrographique et les bassins versants.

Le processus d'appariement vise à détecter les points homologues entre les images du couple. Un certain nombre de paramètres peuvent être ajustés afin d'aider le corrélateur à trouver les points homologues. Ces paramètres peuvent être contrôlés dans plusieurs logiciels tels que ERDAS, PCI Geomatics, ENVI. GeoView est l'un de ces logiciels développé par l'Institut Géographique National de la France (IGN Espace). Ce logiciel étant fourni gratuitement pour l'enseignement et la recherche, nous l'avons choisi pour réaliser notre étude. De plus, c'est le logiciel utilisé pour la production des MNT SPOT commercialisés. Il fournit donc des MNT susceptibles de répondre à des besoins variés. Son choix est donc pertinent pour notre étude. Le processus d'appariement dans ce logiciel utilise un algorithme appelé DAUPHIN (Détermination AUTomatique de Points Homologues sur des Images Numériques) basé sur la géométrie épipolaire (GeoView, 2005). Ainsi, les images sont rééchantillonnées en géométrie épipolaire, puis l'appariement est effectué ligne par ligne. Une carte des valeurs de parallaxe est obtenue en géométrie épipolaire. Elle est ensuite convertie en altitude et projetée dans la même projection que les images de départ.

Selon M. Gooch et Chandler (1999), quatre paramètres d'appariement suivants, contrôlables dans ERDAS, ont un impact important sur les altitudes du MNT :

1. Taille de la fenêtre de corrélation
2. Seuil de corrélation
3. Précision minimale
4. Facteur de sous-échantillonnage

La fenêtre de corrélation est une matrice carrée de valeurs de radiométrie avec laquelle est calculé le coefficient de corrélation. Le seuil de corrélation est la valeur minimale que le coefficient de corrélation doit atteindre pour que l'appariement soit accepté. De même, la précision minimale est un seuil basé sur la précision de l'appariement (en pixels). Le facteur de sous-échantillonnage est utilisé dans le processus pyramidal d'appariement d'image. Les deux premiers paramètres, communs à tous les logiciels, sont disponibles dans GeoView et les deux derniers ne le sont pas. Toutefois, GeoView utilise un paramètre équivalent à la précision minimale, appelé seuil de courbure, qui limite l'appariement selon la courbure de la courbe des coefficients de corrélation. Plus le pic est étroit, meilleure est la fiabilité de l'appariement. Nous choisissons des valeurs par défaut de ces paramètres de telle sorte à obtenir le plus grand nombre de pixels appariés. Le tableau VI.1 présente les valeurs retenues par défaut et celles testées dans notre analyse.

Paramètres	Valeurs
Taille de la fenêtre de corrélation (en pixels)	5×5 – 9×9 – <u>13×13</u> – 17×17 – 21×21
Seuil de corrélation	<u>0,5</u> – 0,6 – 0,7 – 0,8 – 0,9
Seuil de courbure	<u>0,0001</u> – 0,001 – 0,01 – 0,1 – 0,2

tableau VI.1. Valeurs des paramètres d'appariement utilisées dans l'étude (valeurs par défaut soulignées).

VI.3 Analyse de sensibilité

VI.3.1 Impact sur le taux d'échec d'appariement

Le taux d'échec d'appariement est défini ici par la proportion de points dont l'appariement a échoué et où une interpolation a donc été appliquée pour remplir le MNT. Dans les zones d'échec de l'appariement, c'est l'interpolateur qui modélise le relief et lorsqu'il y a beaucoup d'échec, les formes dépendent plus de l'interpolateur que des données. Ainsi, il peut causer des déformations de la morphologie. Par conséquent, ce taux peut avoir un impact important sur la représentation de la morphologie du terrain. Dans la suite, nous présentons l'effet des paramètres de l'appariement, de la morphologie locale et de l'occupation du sol sur ce taux. Nous utilisons l'expression « taux d'échec » pour désigner le taux d'échec de l'appariement.

VI.3.1.1 Effet des paramètres d'appariement

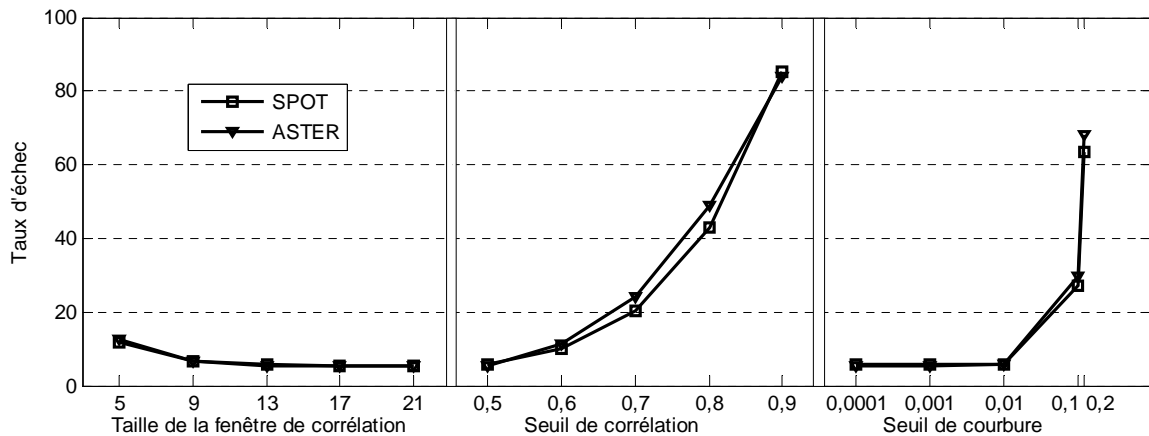


figure VI.3. Taux d'échec en fonction des paramètres d'appariement (SPOT et ASTER).

La figure VI.3 représente le taux d'échec en fonction des différentes valeurs des paramètres pour les MNT SPOT et ASTER. Cette figure montre que l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation conduit à une diminution du taux d'échec. Le changement est surtout visible entre la fenêtre 5×5 et la fenêtre 9×9. Une part élevée de la différence de taux d'échec entre la fenêtre 5×5 et 21×21 a lieu pour des points isolés (17,34%) pour le couple SPOT. L'interpolation de ces points donnera des résultats plus précis que dans le cas de trous étendus. De plus, les zones d'échecs obtenues avec la fenêtre 5×5 incluent la plupart de celles obtenues avec la fenêtre 21×21 et d'autres points dont la plupart sont isolés. Ainsi, lorsque la taille de la fenêtre de corrélation augmente, les points isolés sont appariés mais il reste toujours des grandes zones de trous. Cela est dû au fait que la texture de ces grandes zones est différente sur les deux images, le plus souvent due à des ombres ou une occupation du sol modifiée entre les deux passages du satellite. Dans ces cas, même une grande fenêtre de corrélation ne permet pas de valider la contrainte du seuil de corrélation fixée.

L'augmentation du seuil de corrélation et celui de la courbure augmentent le taux d'échec, ce qui était prévisible, car l'acceptation de l'appariement devient plus restrictive. Entre les seuils de corrélation 0,5 et 0,7, le taux change peu puis il augmente fortement au-delà. Ainsi, pour une fenêtre 13×13 (valeur par défaut), plus de 80% des points appariés pour les couples SPOT et ASTER ont un coefficient de corrélation supérieur ou égal à 0,7. Ce taux subit un changement négligeable avec les trois premières valeurs de seuil de courbure, puis augmente de façon significative.

Dans la suite, nous évaluons l'effet de la morphologie locale et de l'occupation du sol sur le taux d'échec.

VI.3.1.2 Effet de la morphologie locale

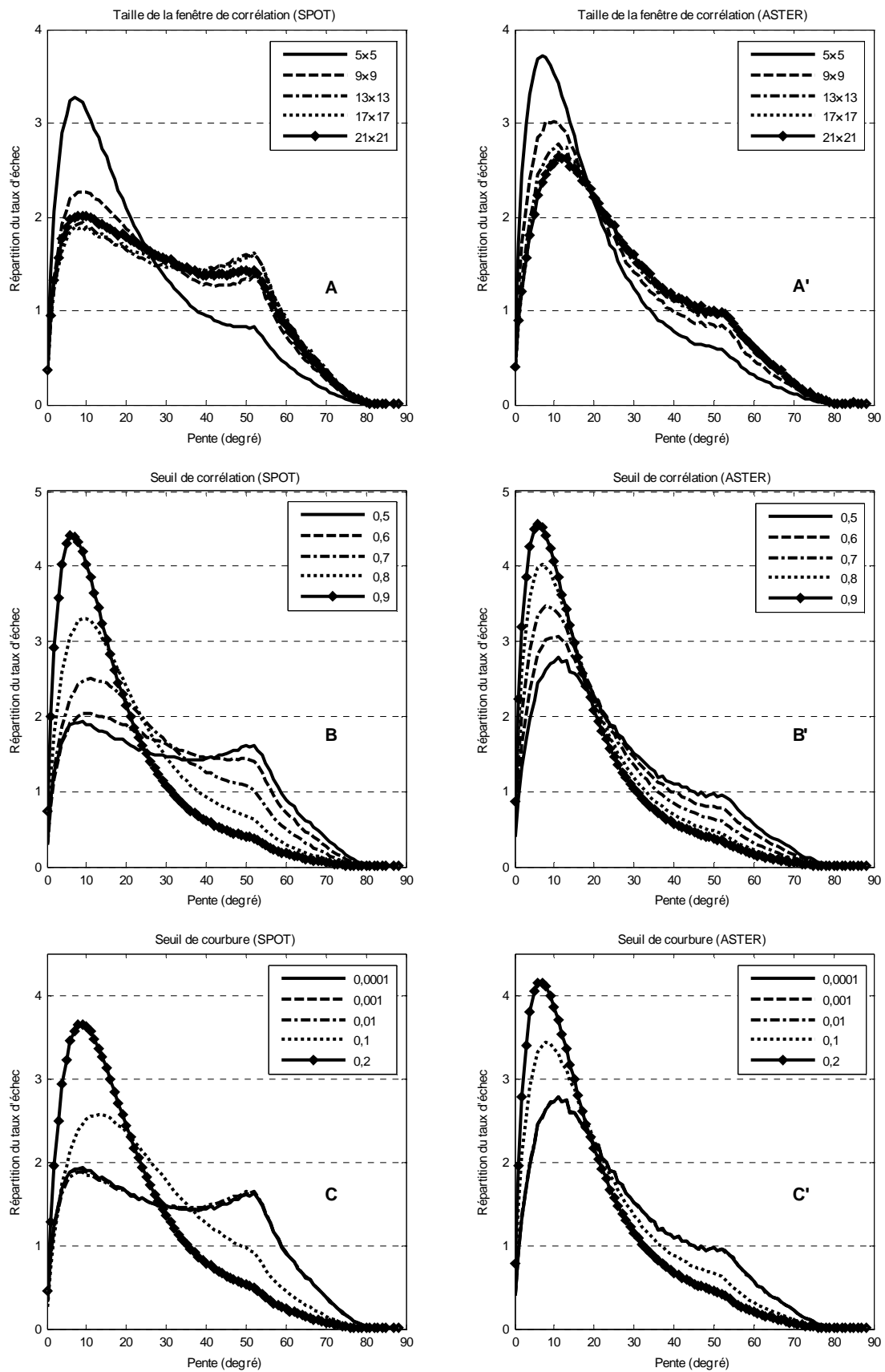
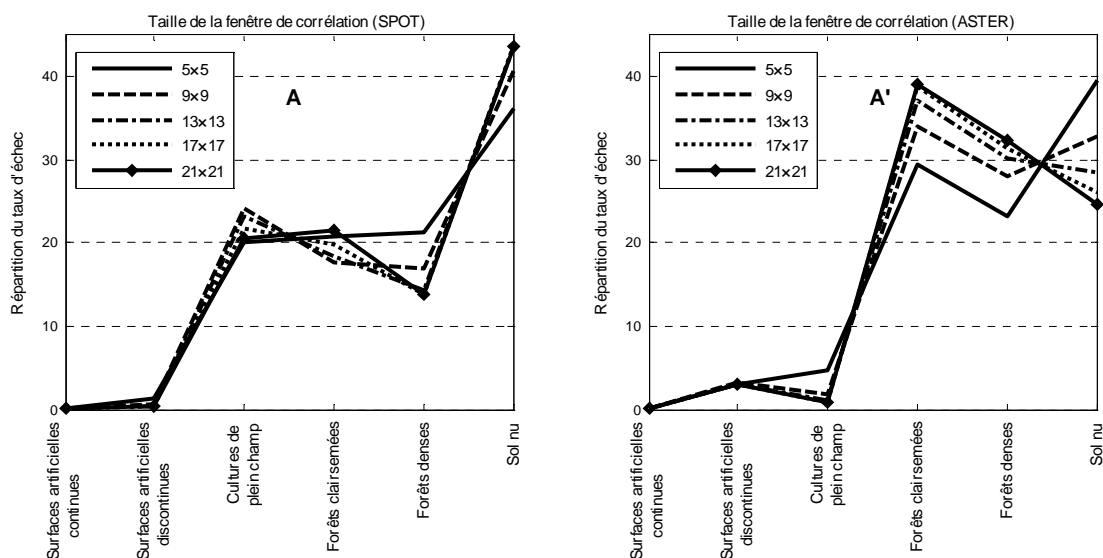


figure VI.4. Impact des paramètres d'appariement sur le taux d'échec en fonction de la pente du MNT SPOT par défaut.

La figure VI.4 montre le taux d'échec pour chaque paramètre d'appariement en fonction des pentes calculées sur le MNT SPOT par défaut. Celui-ci contient environ 5% de points interpolés. En conséquence, de nombreux points utilisés dans le calcul de la pente sont des points interpolés et les pentes sont légèrement sous-estimées. Cependant, la comparaison proposée reste pertinente. Les résultats montrent qu'une petite fenêtre de corrélation donne un taux d'échec plus élevé sur les faibles pentes et cela est vrai pour les MNT SPOT et ASTER. Cela implique que, même si le taux d'échec est élevé par rapport aux autres fenêtres, une grande proportion de ces points interpolés se trouve sur les faibles pentes. Or, l'interpolation de ces zones n'a pas un effet important sur la morphologie. L'augmentation de la taille de la fenêtre diminue le taux d'échec sur les faibles pentes et l'augmente sur les fortes pentes. De plus, le taux d'échec devient plus élevé sur les faibles pentes lorsque les seuils de corrélation et de courbure augmentent. Ce qui est notable dans les histogrammes est la présence de deux pics. Ceux-ci s'accroissent lorsque la fenêtre de corrélation augmente et le second tend à disparaître lorsque le seuil de corrélation augmente. Nous n'observons pas un tel phénomène avec l'interpolation par pondération inverse à la distance. Ainsi, nous pouvons conclure qu'il s'agit d'un artéfact dû à la méthode d'interpolation utilisée (krigeage ordinaire). Ce facteur pourra être étudié dans le futur.

VI.3.1.3 Effet de l'occupation du sol



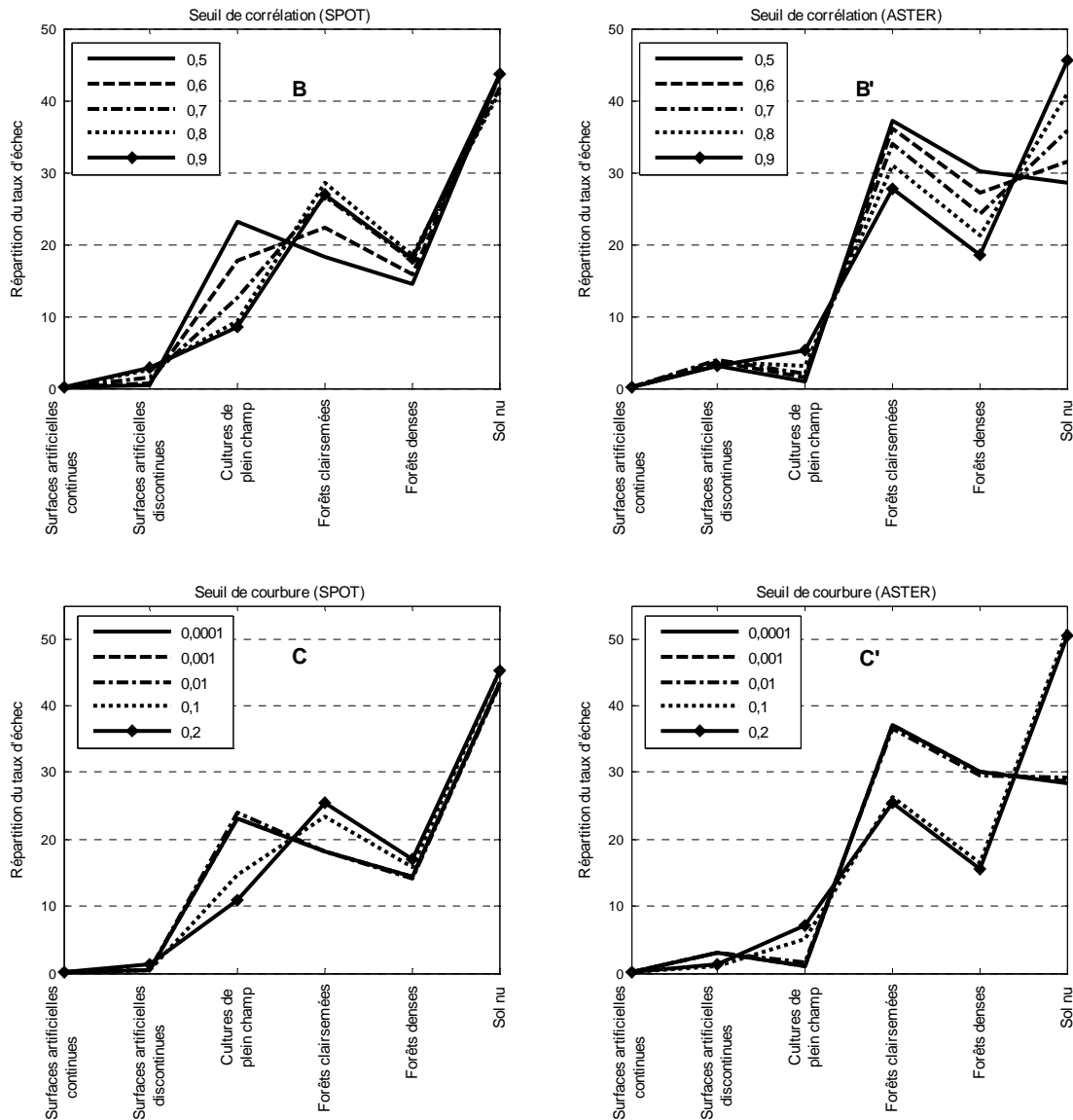


figure VI.5. Impact des paramètres d'appariement sur le taux d'échec en fonction de l'occupation du sol.

En confrontant le taux d'échec à l'occupation du sol, nous observons qu'il existe bien une relation. En effet, la texture de l'image dépend du type de couverture sur le terrain. Le processus d'appariement basé sur les pixels est influencé par la texture et les changements de radiométrie, car la dynamique des valeurs de similarité varie. La figure VI.5 montre que le taux d'échec le plus faible pour l'ensemble des paramètres est situé sur les surfaces artificielles. Cela est causé par le fait que les détails sont facilement détectables entre les deux images sur ces surfaces. Le taux d'échec le plus élevé se trouve sur le sol nu pour le couple SPOT. Cela est dû en partie au fait que deux semaines séparent l'acquisition des deux images SPOT. En effet, dans la première image, une grande surface du sol nu est couverte par la neige et dans la seconde, cette surface est réduite. Ainsi, les deux images ont des textures différentes sur ces zones et les points non appariés y sont nombreux. Pour le couple ASTER, les deux images sont acquises en même temps et une augmentation de la fenêtre de

corrélation fournit moins de points interpolés. Vu que les pentes dans ces zones sont fortes (zones montagneuses), une interpolation peut affecter la morphologie du terrain et cela dépend de l'étendue de la zone interpolée.

Par ailleurs, la plus grande différence entre la plus petite et la plus grande fenêtre de corrélation pour les images SPOT est située sur les forêts, où une grande fenêtre produit moins de points interpolés. Cela est normal du fait de la texture aléatoire sur ce type de couverture. Une grande fenêtre permet d'obtenir des coefficients de corrélation plus élevés. On observe l'inverse sur les images ASTER. En effet, une augmentation de la fenêtre de corrélation tend à augmenter le taux d'échec. Cela est dû à la présence d'ombre dans ces zones du fait qu'elles se situent principalement en zone montagneuse (figure V.3). L'emprise de ces zones d'ombre n'est pas la même dans les deux images à cause de la direction de prise de vue (nadir et arrière), ce qui ne permet pas l'appariement même avec une grande fenêtre. Ainsi, le nombre de points non appariés sur ces zones varie peu avec la taille de fenêtre de corrélation. Le taux d'échec augmente donc relativement sur ces zones du fait que le nombre total de points non appariés diminue (figure VI.3).

Sur les cultures de plein champ, le taux d'échec pour les images SPOT change peu et augmente du fait que la radiométrie sur ces zones a changé et que même avec une grande fenêtre de corrélation le processus d'appariement n'arrive pas à retenir des points homologues. Sur les images ASTER, on observe la tendance inverse parce que les deux images ont été acquises en même temps et donc une grande fenêtre tend à diminuer le taux d'échec.

La répartition du taux d'échec sur le MNT SPOT augmente avec les deux seuils principalement sur les surfaces artificielles discontinues et sur les forêts clairsemées, ce qui signifie que les points ont une plus faible valeur de corrélation sur ces zones. Au contraire, il diminue dans les cultures de plein champ, ce qui montre que les coefficients de corrélation des pixels dont l'appariement a réussi sont plus élevés dans ces zones, ce qui est dû à des textures structurées et des zones de radiométrie très homogène. Cependant, nous allons voir que les appariements acceptés sur les zones de cultures de plein champ sont souvent faux. Pour les images ASTER, nous observons une diminution du taux d'échec sur les forêts ce qui est dû encore une fois à la présence d'ombre sur ces zones. En fait, le nombre de points non appariés sur ces zones varie peu du fait qu'avec un seuil faible il est déjà élevé. Le taux d'échec diminue relativement sur ces zones car le nombre total de points non appariés augmente (figure VI.3).

L'effet de l'interpolation dépend de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol. Elle peut améliorer la qualité du MNT quand elle est appliquée sur les lisières des zones boisées et des bâtiments (Lane et al., 2000). En effet, la pente a des valeurs élevées en ces points. De plus, si cette végétation se trouve sur de faibles pentes, l'interpolation diminue davantage l'erreur de la pente du

terrain. En effet, une même erreur d'altitude cause plus de changement sur la pente des points de faibles pentes que de fortes pentes.

VI.3.2 Impact sur l'altitude et sur ses dérivées

VI.3.2.1 Effet des paramètres d'appariement

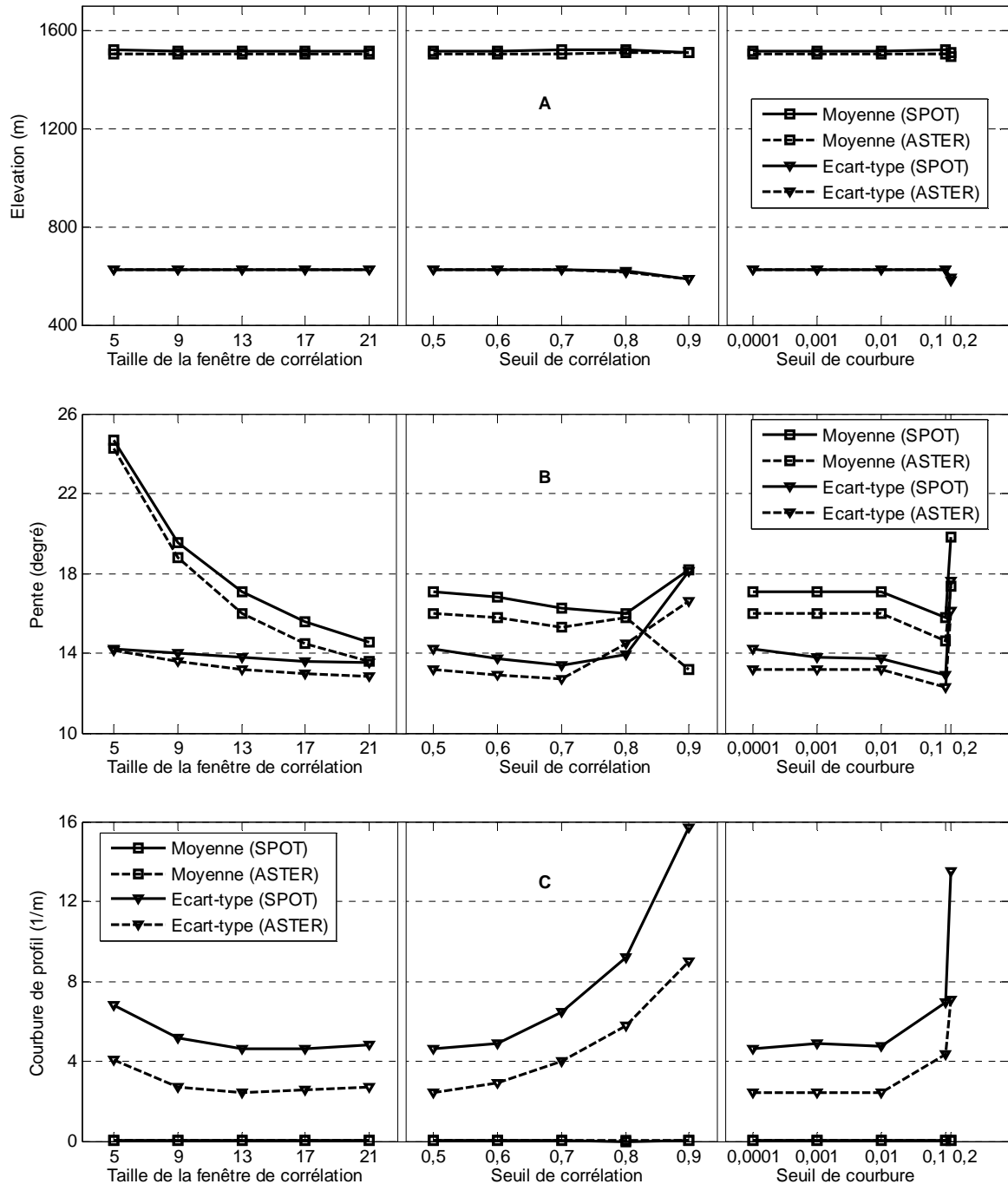
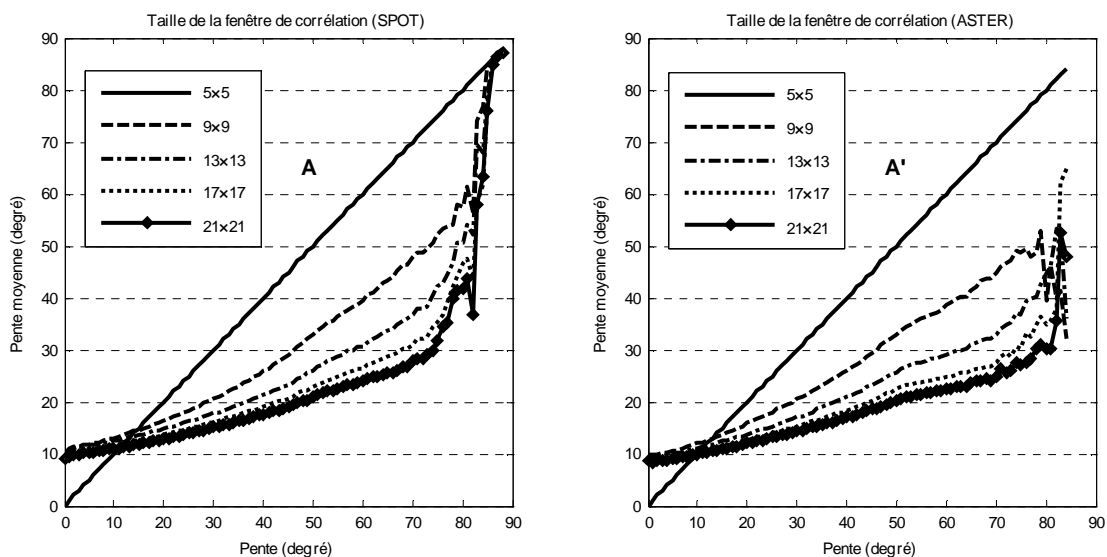


figure VI.6. Impact des paramètres d'appariement sur l'altitude, la pente et la courbure de profil des MNT SPOT et ASTER.

La figure VI.6 montre que l'impact des paramètres d'appariement sur la moyenne et l'écart-type de l'altitude est négligeable pour les MNT SPOT et ASTER. Par contre, l'impact sur la moyenne et l'écart-type de la pente et de la courbure est beaucoup plus important. En effet, en augmentant la taille de la fenêtre de corrélation, la pente moyenne du terrain décroît de 10° entre les fenêtres 5×5 et 21×21 . En outre, le seuil de corrélation donne les mêmes résultats sauf pour le seuil le plus élevé. Cependant, la pente moyenne varie moins que précédemment. Ceci peut être expliqué par le fait que la taille de la fenêtre par défaut est 13×13 et pour cette taille, le MNT contient moins de bruit et de microrelief. Ainsi, si la valeur par défaut de la taille de la fenêtre avait été inférieure à 13×13 , la diminution de la pente moyenne due à l'augmentation du seuil de corrélation avait été plus importante. Par conséquent, le choix de la taille de la fenêtre est de la plus grande importance. Le seuil de courbure n'affecte pas la pente pour les valeurs comprises entre 0,0001 et 0,01 mais avec une valeur de 0,1 le MNT commence à se lisser. En effet, pour des valeurs supérieures à 0,01, le taux d'échec augmente et une interpolation est appliquée.

La figure VI.6 C représente la courbure dans la direction de la pente maximale, appelée courbure de profil. La valeur nulle pour la courbure moyenne indique que les courbures convexes et concaves sont également réparties dans le MNT pour tous les paramètres. La diminution de l'écart-type avec l'augmentation de la taille de la fenêtre renforce l'argument que la surface du terrain se lisse. Au contraire, cet écart-type devient plus grand avec l'augmentation des seuils de corrélation et de courbure. Cela est dû au nombre et à la taille des zones étendues de pixels non appariés. En effet, le krigeage ordinaire ne minimise pas la pente comme le font beaucoup d'interpolation. Ainsi, l'écart-type de la courbure devient plus élevé lorsque ces zones deviennent plus grandes et plus nombreuses. Cela explique encore l'augmentation de la pente moyenne après une certaine valeur des seuils de corrélation et de courbure.

VI.3.2.2 Effet de la morphologie locale



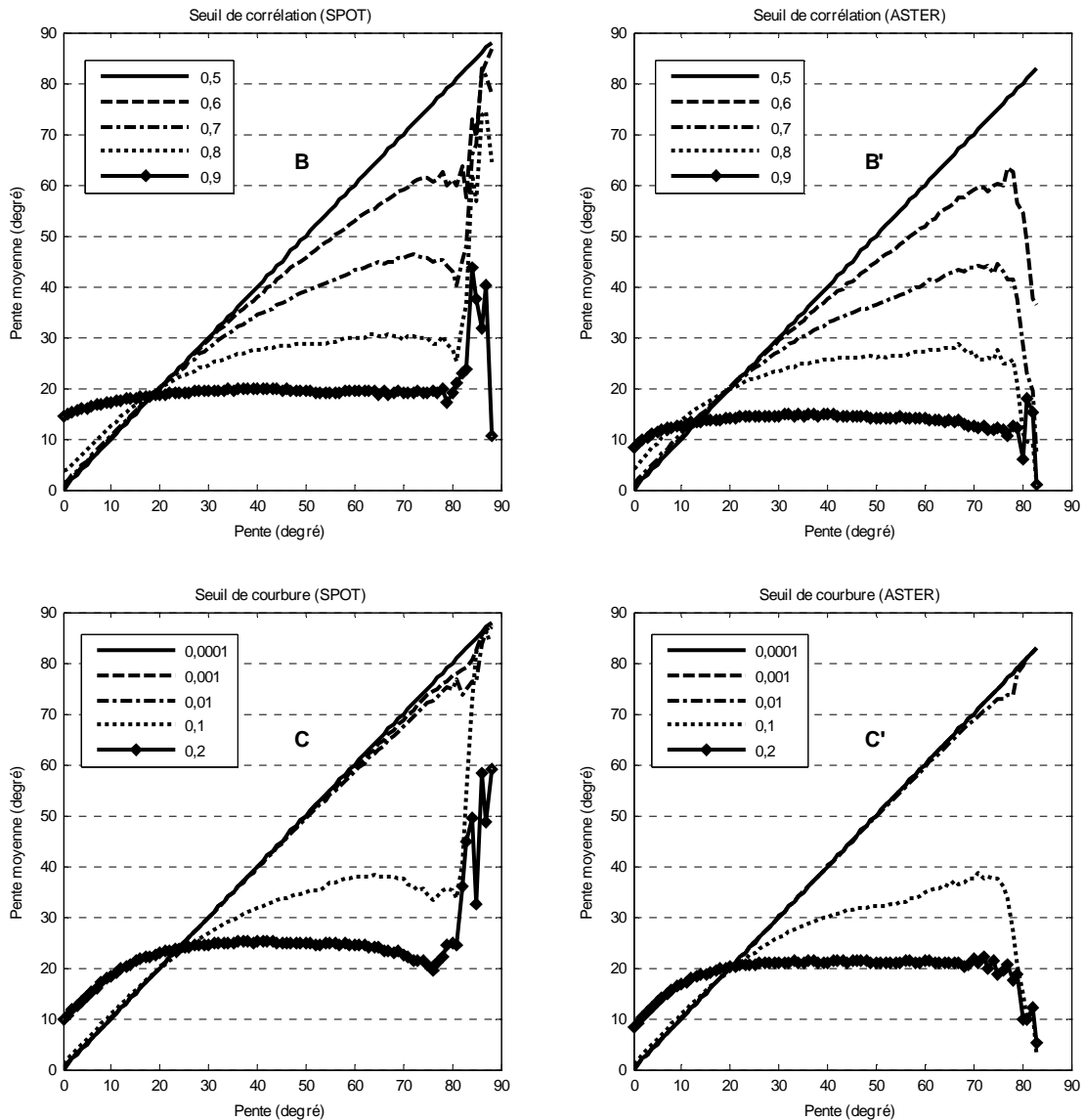


figure VI.7. Impact des paramètres d'appariement sur la pente moyenne en fonction de la pente du premier MNT.

Le graphe de la pente moyenne en fonction de la pente du premier MNT est présenté dans la figure VI.7. Comme le montre la figure VI.6 B, l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation tend à lisser le terrain, et selon la figure VI.7, ce lissage dépend de la morphologie locale. En effet, l'effet de lissage diminue sur les faibles pentes et augmente pour les pentes fortes. La figure VI.7 B et B' montre que la majorité des points interpolés ont une pente supérieure à 18° pour les seuils de corrélation inférieurs à 0,9, et il existe peu de changement pour les pentes faibles. Cela implique que les points appariés ont un coefficient de corrélation faible sur les pentes fortes. La même chose se produit avec le seuil de courbure, mais la pente au-dessus de laquelle le lissage est plus important se situe entre 22° et 23° . Il est à noter que la variation de la pente moyenne pour les pentes les plus fortes n'est statistiquement pas représentative car ces pentes sont peu présentes.

VI.3.2.3 Effet de l'occupation du sol

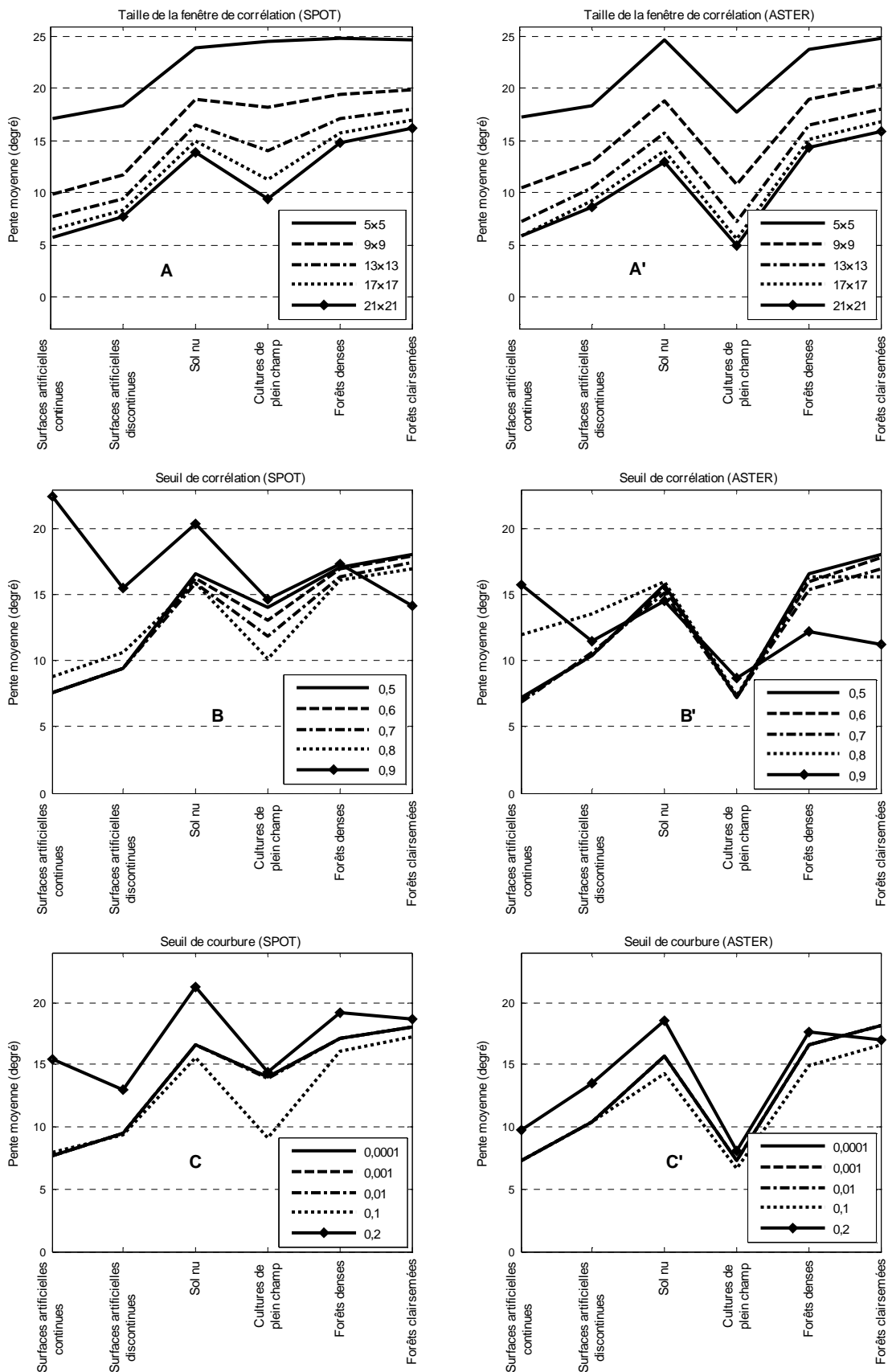


figure VI.8. Impact des paramètres d'appariement sur la pente moyenne en fonction de l'occupation du sol.

La pente moyenne est calculée pour différentes classes d'occupation du sol. Les résultats montrent que la pente moyenne la plus élevée pour l'ensemble des valeurs des paramètres se trouve dans les forêts et la plus basse dans les surfaces artificielles. Ceci parce que la plupart des surfaces artificielles sont situées sur des zones de faibles pentes près de la côte, tandis que les forêts sont principalement situées dans les montagnes (cf. figure V.4). Toutefois, la pente moyenne globale diminue avec l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation. Cette diminution au-delà de la fenêtre 13×13 est non linéaire. Ce qui est notable est que la plus grande différence est située dans les cultures en plein champ pour le MNT SPOT. En comparant les résultats du seuil de corrélation sur cette classe, nous observons que l'augmentation de ce paramètre a aussi tendance à lisser les pentes du MNT. Sur ces zones, une petite fenêtre donne de nombreux pics, en raison de faux appariements dus aux deux semaines séparant l'acquisition des images. Ensuite, une augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation ou du seuil de corrélation supprime ces pics et la pente moyenne diminue. Ce phénomène n'est pas observé pour le MNT ASTER dont les images ont été acquises simultanément. Par ailleurs, en comparant les résultats sur les forêts denses et clairsemées pour le MNT SPOT, nous remarquons approximativement la même pente moyenne avec la fenêtre 5×5. Lorsque cette fenêtre augmente, la pente moyenne devient plus faible sur les forêts denses que sur celles clairsemées. Ceci n'est pas vrai pour le MNT ASTER. L'explication en est à nouveau le diachronisme des images SPOT. De plus, les lisières des zones boisées qui génèrent des pentes élevées sont plus nombreuses sur forêts clairsemées, ce qui augmente aussi la pente moyenne.

On remarque que les tendances sont inversées pour des seuils de corrélation de 0,9 et de courbure de 0,2. La surface semble totalement changée. Cela est dû à un taux élevé d'interpolation.

VI.4 Validation

VI.4.1 Validation externe

La validation externe utilise les mesures terrain pour évaluer la qualité du MNT (cf. chapitre IV). Elle est réalisée sur les MNT SPOT produits par différentes tailles de la fenêtre de corrélation. Nous avons écarté les valeurs aberrantes (environ 20%) de l'échantillon de points de référence.

VI.4.1.1 Erreur de l'altitude

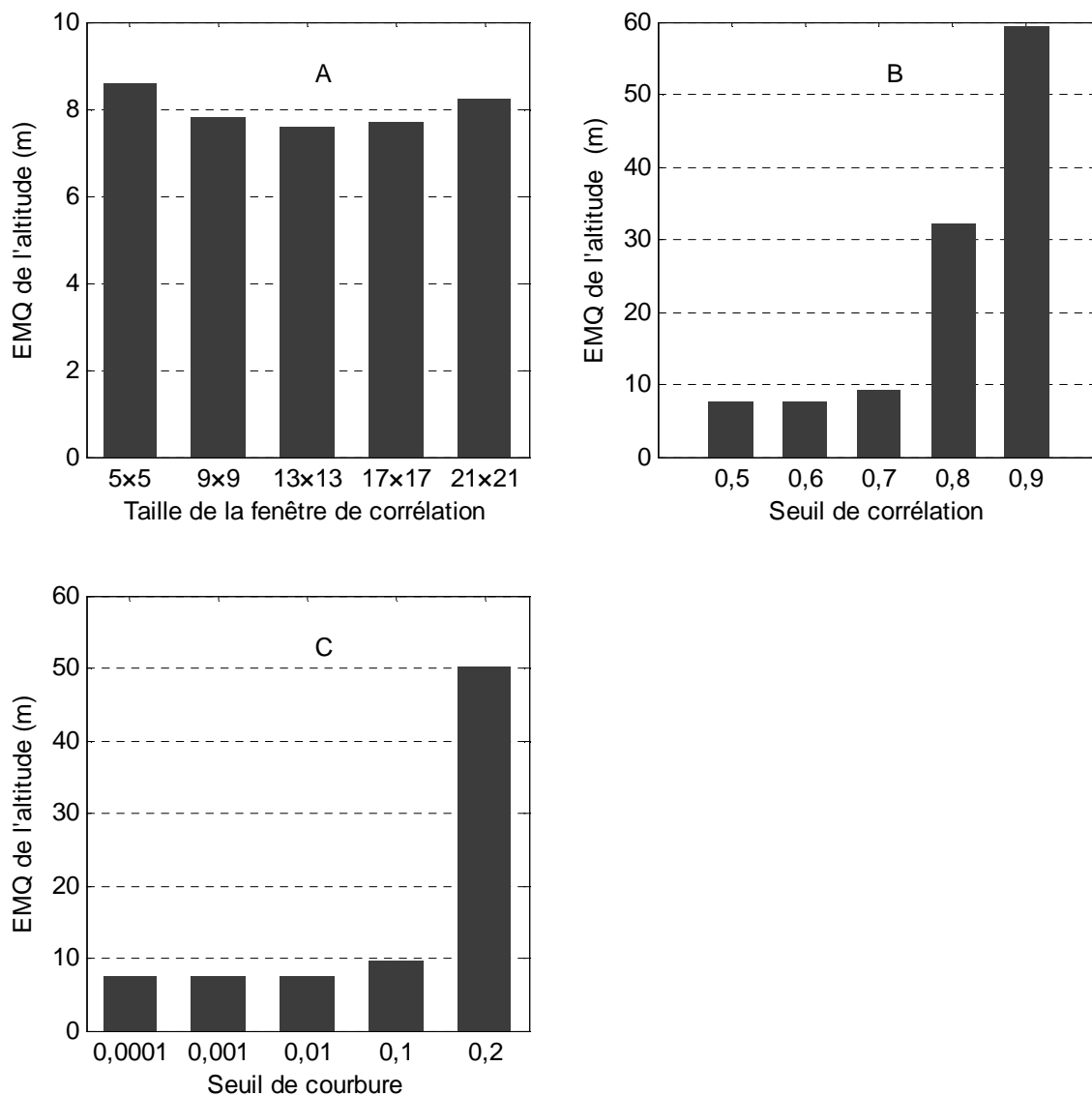


figure VI.9. EMQ de l'altitude en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation (A), du seuil de corrélation (B) et du seuil de courbure (C).

L'évaluation de l'erreur de l'altitude des MNT produits avec les différents paramètres est présentée dans la figure VI.9. L'EMQ de l'altitude de tous les MNT varie entre 7,6 m à 8,6 m. Ces valeurs sont plus petites que la taille de pixel (10 m). Dans Cuartero et al. (2005), l'EMQ de l'altitude évaluée en utilisant 91 MNT SPOT HRV est de 7,3 m. Les valeurs obtenues dans notre étude sont comparables. Elles dépendent de nombreux facteurs tels que la pente du terrain (Toutin, 2002 ; 2006) et l'occupation du sol de la zone d'étude mais aussi des paramètres qui affectent la modélisation géométrique (par exemple B/H). Selon cette figure, l'EMQ de l'altitude est la plus élevée avec la fenêtre 5x5 et minimale avec la fenêtre 13x13. L'influence de ce paramètre est faible (environ 1 m) pour une erreur de l'ordre de 8 m. Cette erreur augmente avec l'augmentation des seuils de corrélation et de courbure.

En conclusion, les valeurs optimales de ces paramètres pour l'altitude sont 13×13 pour la fenêtre de corrélation, 0,5 ou 0,6 pour le seuil de corrélation et 0,0001, 0,001 ou 0,01 pour le seuil de courbure.

VI.4.1.2 Modèle d'autocorrélation de l'erreur de l'altitude

Dans cette partie nous étudions l'influence de la taille de la fenêtre de corrélation sur l'autocorrélation de l'erreur de l'altitude. En effet, les dérivées de l'altitude y sont très sensibles (Heuvelink, 1998). Pour étudier la propagation de l'erreur d'altitude dans ses dérivées, un modèle d'autocorrélation de l'erreur doit être construit. Nous avons considéré que l'hypothèse de stationnarité au second ordre est respectée (cf. partie IV.1.2). La figure VI.10 représente les courbes pour les différentes fenêtres de corrélation respectant au mieux l'équation (4.4).

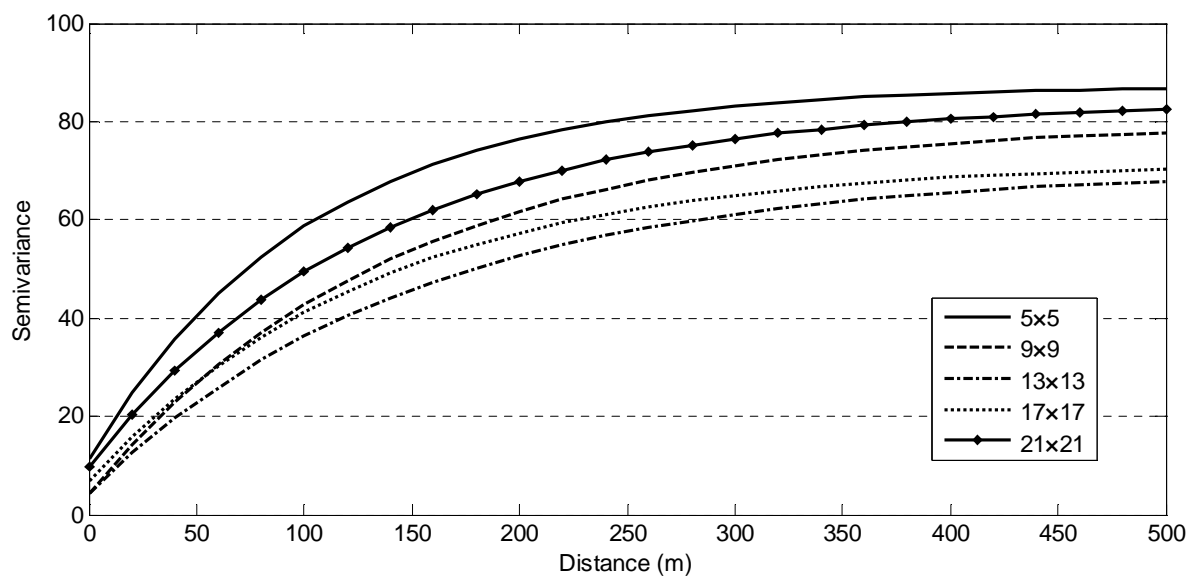


figure VI.10. Variogramme de l'erreur d'altitude.

Cette figure montre que la fenêtre la plus petite engendre une forte variance de l'erreur d'altitude. Cela s'explique par la présence de faux appariements conduisant à du bruit peu autocorrélé spatialement. De plus, la fenêtre 21×21 produit aussi une variance élevée bien qu'elle tende à lisser la surface et la fenêtre 13×13 produit la variance la moins élevée. Cela signifie que la fenêtre 21×21 produit un lissage tellement fort que l'erreur est non autocorrélée alors que la valeur optimale est située au milieu entre la fenêtre la plus petite et celle la plus grande. Les équations de ces modèles, ajustées par moindres carrées, sont présentées dans le tableau (tableau VI.2).

On peut noter que tous les modèles présentent un effet de pépite (variance non nulle à des très courtes distances), avec une valeur minimale pour les fenêtres 9×9 et 13×13 . De plus, la fenêtre 13×13 présente aussi un seuil minimal et une portée pratique maximale.

Fenêtre de corrélation	Equation	Pépité (m)	Seuil (m ²)	Portée pratique (m)
5×5	$87,28(1 - 0,87e^{\frac{-x}{102,25}})$	11,35	87,28	306,75
9×9	$80,04(1 - 0,94e^{\frac{-x}{141,24}})$	4,80	80,04	423,72
13×13	$70,27(1 - 0,94e^{\frac{-x}{151,29}})$	4,80	70,27	453,87
17×17	$71,84(1 - 0,90e^{\frac{-x}{133,16}})$	7,18	71,84	399,48
21×21	$84,09(1 - 0,88e^{\frac{-x}{131,41}})$	10,09	84,09	394,23

tableau VI.2. Equations des modèles d'erreur avec les pépites, seuils et portées pratiques correspondantes.

VI.4.1.3 Propagation de l'erreur de l'altitude sur la pente et l'aspect

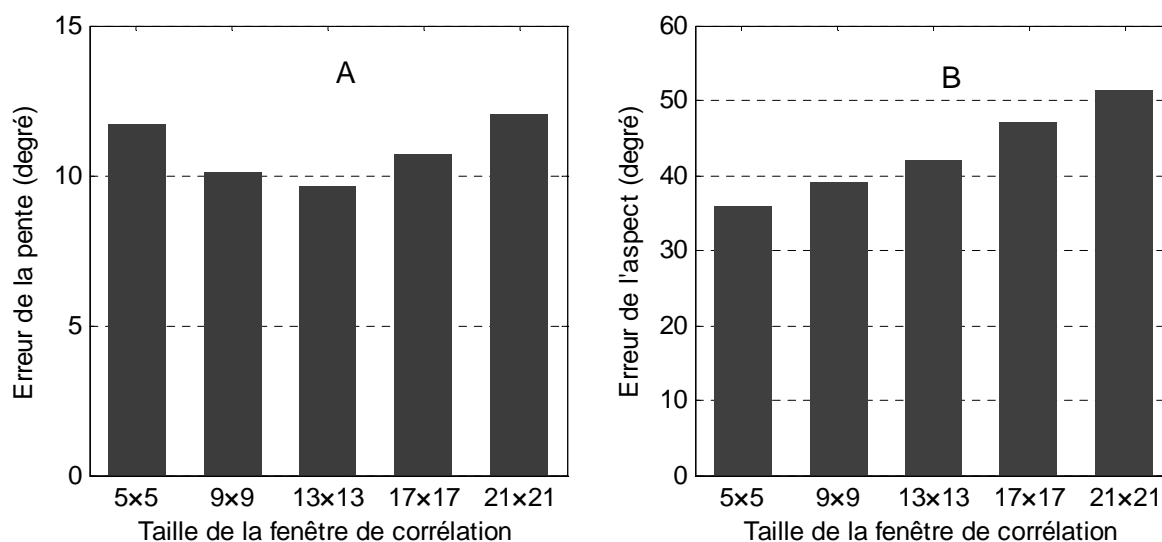


figure VI.11. Erreur de la pente (A) et de l'aspect (B) en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation.

En se basant sur la figure VI.11, une différence d'environ 3° est obtenue entre l'erreur maximale et minimale de la pente pour une erreur de l'ordre de 10°. La fenêtre 13×13 produit l'erreur de la pente la moins élevée et celle 21×21 produit celle la plus élevée. Cette figure montre aussi que l'erreur de l'aspect augmente lorsque la taille de la fenêtre de corrélation augmente. Cela est dû au fait que le terrain est lissé et le nombre de points de faibles pentes augmente, là où l'aspect présente le plus d'erreur.

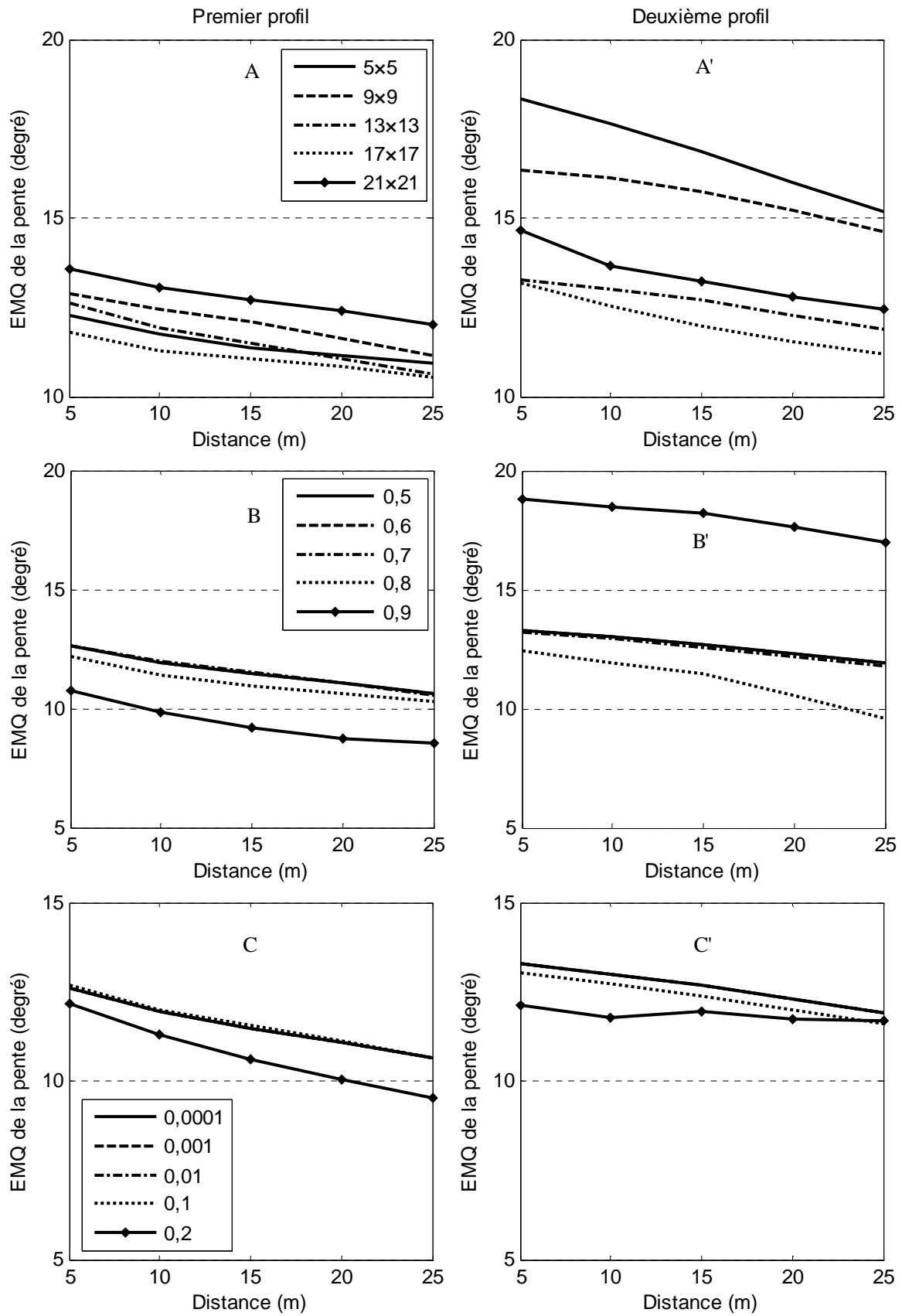


figure VI.12. EMQ de la pente en fonction de la distance de calcul de la pente, de la taille de la fenêtre de corrélation (A, A'), du seuil de corrélation (B, B') et du seuil de courbure (C, C') pour les deux profils.

La figure VI.12 représente l'EMQ de la pente pour les deux profils et en fonction des différents paramètres d'appariement sur les MNT SPOT. L'EMQ tend à diminuer avec l'augmentation de la distance de calcul de la pente. Cela signifie que la qualité de la pente dépend du pas d'échantillonnage (cf. partie VIII.2.2). La fenêtre 17×17 produit l'EMQ la moins élevée de la pente pour les deux profils. L'EMQ globale est plus élevée pour le deuxième profil que pour le premier. Une amélioration de 5° est obtenue pour ce profil entre la fenêtre de corrélation 5×5 et 17×17. Les pentes les plus précises sont obtenues avec les seuils de corrélation 0,9 et 0,8 pour le premier et le deuxième profil respectivement et un seuil de courbure de 0,2 pour les deux profils. Cela est dû à la présence de valeurs aberrantes sur ces profils qui disparaissent en augmentant la valeur des seuils.

L'ordre de grandeur de l'EMQ de la pente est comparable avec l'erreur de la pente obtenue avec la méthode de propagation surtout pour le premier profil. Cela valide bien cette méthode pour l'évaluation de la qualité de la pente. La différence entre les deux est que dans la méthode de propagation de l'erreur, on évalue la qualité de la pente maximale calculée en se basant sur la géométrie différentielle, tandis qu'ici on évalue la qualité de la pente du profil qui n'est pas forcément la pente maximale et elle est calculée par trigonométrie. Or, selon Warren et al., (2004) la géométrie différentielle fournit des estimations de pentes plus précises que la trigonométrie. Ceci peut expliquer que l'erreur de pente obtenue par la méthode de propagation de l'erreur est légèrement plus faible que celle obtenue avec les profils. De plus, la méthode de propagation de l'erreur fournit une évaluation globale de la qualité de la pente tandis que les deux profils en donnent une estimation locale.

VI.4.2 Validation interne

Nous avons montré que la fenêtre de corrélation exerce une influence importante sur la morphologie du MNT et intervient le premier dans le processus d'appariement. Nous allons donc évaluer les MNT produits avec différentes tailles de la fenêtre de corrélation.

VI.4.2.1 Première loi de géographie

La figure VI.13 montre la semivariance de la pente en fonction de la distance. Selon cette figure, l'augmentation de la distance produit une augmentation de la semivariance, ce qui est bien en accord avec la première loi de la géographie. De plus, la semivariance diminue lorsque la taille de la fenêtre de corrélation augmente. Cela est dû au fait que le MNT est moins bruité avec une grande fenêtre de corrélation.

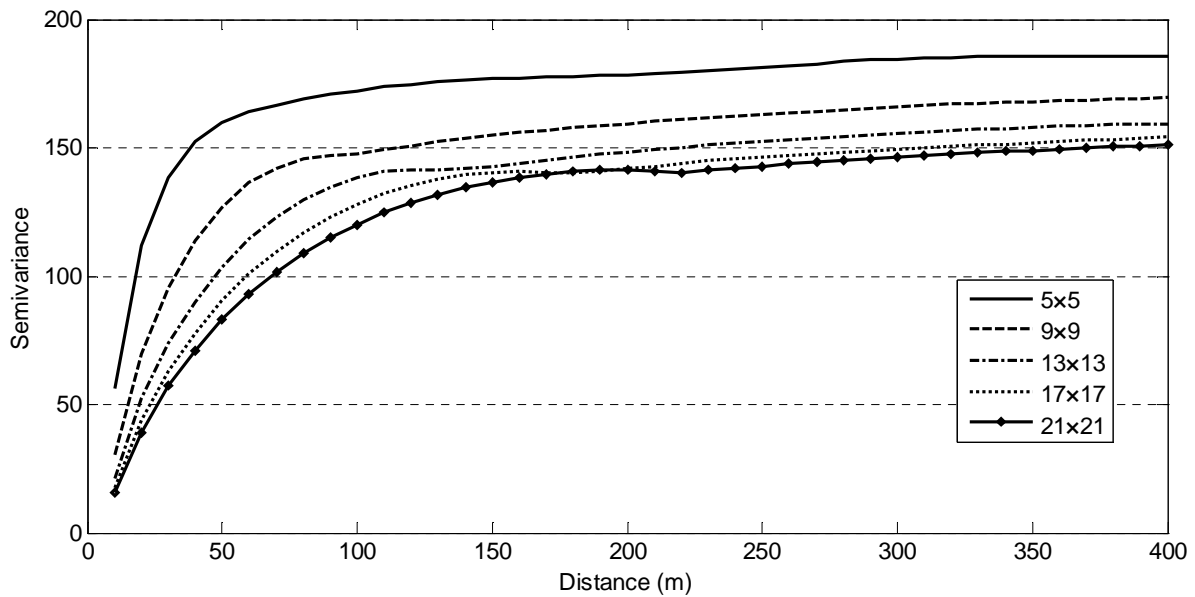


figure VI.13. Variogramme de la pente en fonction de la distance pour les différentes tailles de fenêtre de corrélation.

On remarque également que la semivariance atteint un palier et subit une légère diminution pour les distances correspondant environ à la longueur de l'arête de la fenêtre de corrélation. Par exemple, pour la fenêtre 13x13, cette diminution est localisée sur la distance 130 m, ce qui correspond bien à la longueur au sol de l'arête de la fenêtre car le pixel des images est de 10 m de côté au sol. En examinant la carte de pentes, nous remarquons la présence d'artéfacts de formes carrées de fortes pentes dont l'arête est approximativement égale au côté de la fenêtre de corrélation (figure VI.14). En comparant avec la carte des valeurs de corrélation, nous nous sommes assurés que ces points ne sont pas interpolés. De plus, cet effet est observé quel que soit le système imageur (SPOT ou ASTER) et quel que soit le logiciel utilisé (ENVI ou GeoView). Ainsi, ce n'est pas lié ni aux données ni aux logiciels mais bien à la taille de la fenêtre de corrélation.

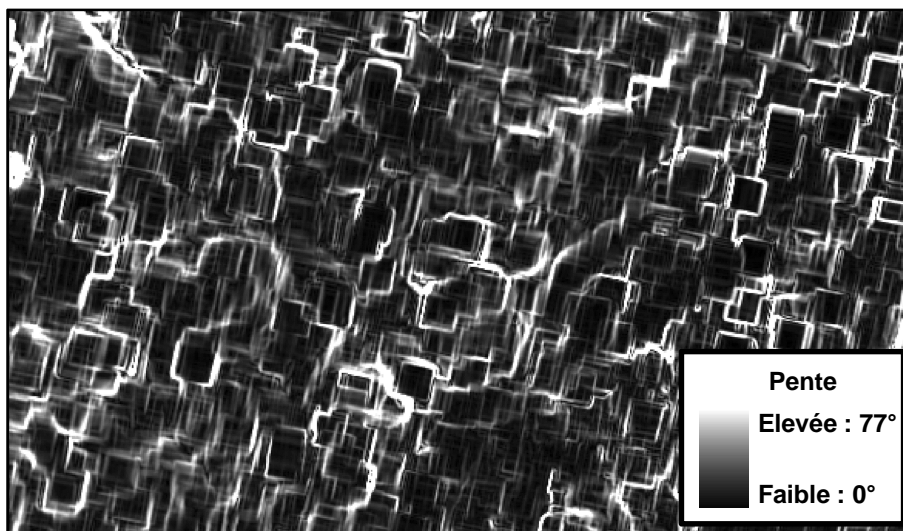


figure VI.14. Présence d'artéfacts de formes carrées de fortes pentes sur les zones de faibles pentes.

Ces artefacts correspondent à des dépressions et des collines. On peut en déduire que la fenêtre de corrélation à partir d'une certaine taille (9×9) aboutit à des points dont les altitudes sont proches et cela sur une distance similaire à celle de la taille de la fenêtre de corrélation. Cela est dû au fait que la texture de la fenêtre de corrélation change d'autant moins entre points voisins que la fenêtre de corrélation est grande. Ainsi, les points homologues sont proches sur l'image épipolaire et par conséquent la valeur de parallaxe et d'altitude changent peu. Cela cause la diminution de la valeur de la pente et de la courbure à l'intérieur de ces formes et explique la diminution de la pente moyenne du MNT lorsque ce paramètre augmente. Ainsi, des formes du terrain en une marche d'escalier apparaissent.

VI.4.2.2 Toutes les rivières descendent

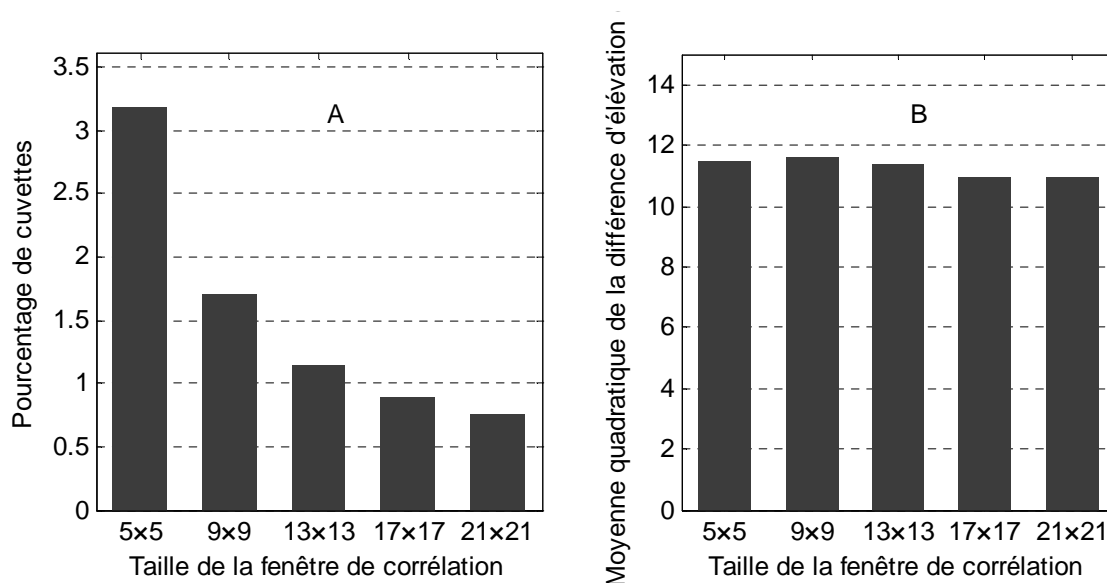


figure VI.15. Pourcentage de cuvettes (A) et moyenne quadratique de la différence d'altitude sur les cuvettes (B).

Comme la surface des cours d'eau est souvent lisse à cause de l'écoulement de l'eau et comme l'eau s'écoule toujours vers le bas, la présence des cuvettes le long de ces rivières est considérée comme un artefact. Selon la figure VI.15, le pourcentage de cuvettes diminue avec l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation. Cette diminution est un critère de qualité pour le MNT. Le pourcentage le plus élevé est obtenu avec une fenêtre 5×5. Cela est dû aux nombreux faux appariements, notamment dans les zones de végétation. En outre, la moyenne quadratique de la différence d'altitude sur ces cuvettes entre le MNT rempli et le MNT non rempli est de l'ordre de 11 m et change peu en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation. Cette valeur est proche de l'EMQ de l'altitude (environ 8 m, cf. partie VI.4.1). Ainsi, cette méthode peut être utilisée pour estimer en grossièrement l'erreur de l'altitude.

Le but de la validation interne est de vérifier que le MNT représente un terrain possible. Elle fournit une condition nécessaire mais pas suffisante pour juger la qualité du MNT. La présence de nombreuses cuvettes est un signe de mauvaise qualité surtout pour l'hydrographie et la moyenne quadratique de la différence d'altitude sur ces cuvettes donne une idée sur l'erreur de l'altitude du MNT. Ainsi, on peut considérer que la fenêtre 5×5 fournit un MNT moins précis. Cependant, nous ne pouvons pas juger laquelle des autres fenêtres fournit le MNT le plus précis.

VI.5 Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique

Ayant étudié l'impact des paramètres d'appariement sur l'altitude et sur la pente, nous abordons ici l'étude des indices hydrographiques. Seul l'impact de la taille de la fenêtre de corrélation sur les bassins versants et le réseau hydrographique est analysé car les seuils de corrélation et de courbure n'affectent pas l'appariement en lui-même.

VI.5.1 Effet sur les bassins versants

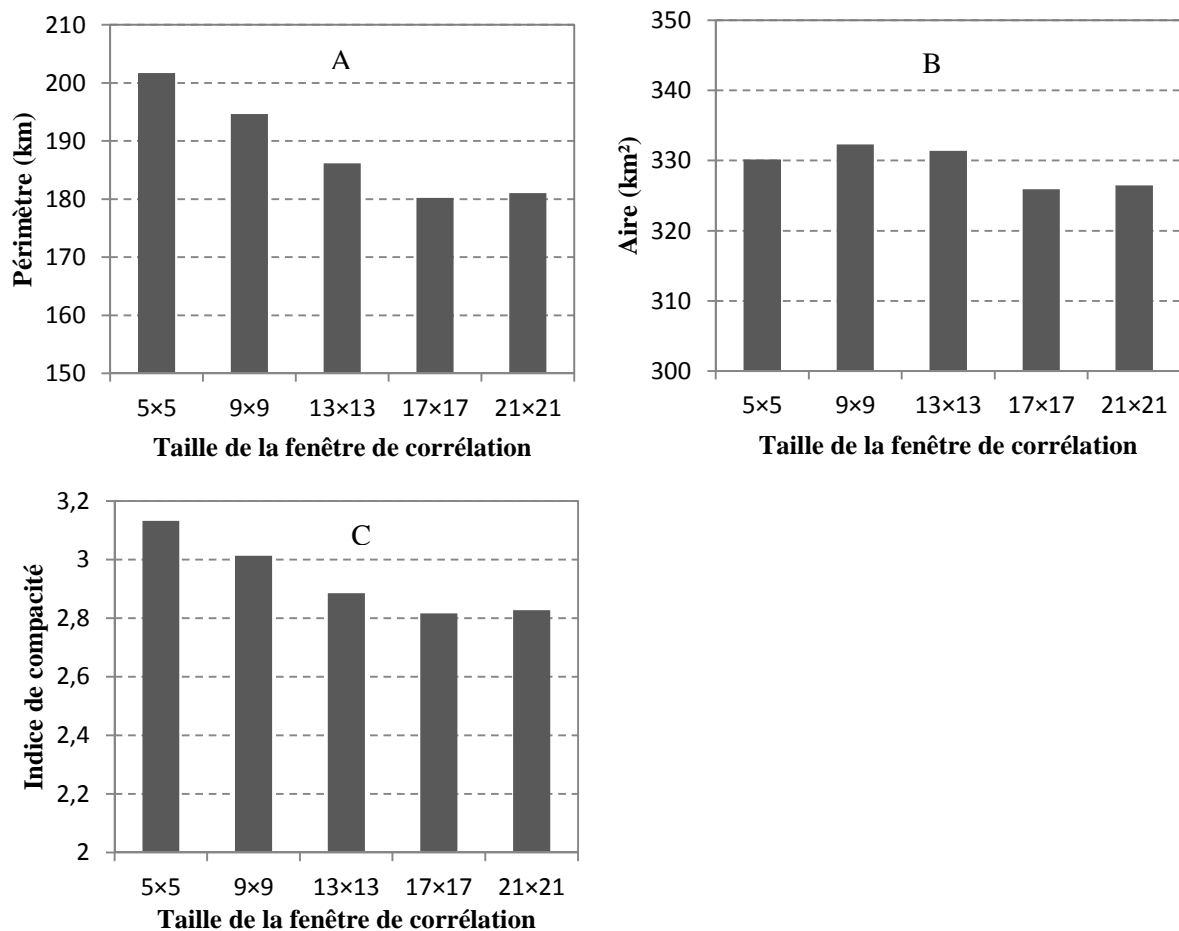


figure VI.16. Impact des paramètres d'appariement sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité (C) du bassin versant Nahr Ibrahim.

La figure VI.16 montre que l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation induit une diminution du périmètre du bassin. Cela est dû en partie au fait que l'augmentation de ce paramètre induit un lissage du terrain. Ainsi, la ligne des crêtes devient moins complexe et par conséquent le périmètre du bassin diminue. Egalement, ce lissage fait disparaître des détails et donc produit de légères modifications le long de la limite du bassin versant. Par conséquent, l'aire du bassin varie peu. L'augmentation de la fenêtre de corrélation diminue la valeur de l'indice de compacité parce que le périmètre du bassin diminue.

Comme la limite du bassin versant correspond à la ligne de crête et que cette ligne résulte des points ayant l'altitude maximale autour de l'exutoire, cette limite est affectée par les changements de l'altitude. Nous avons observé que l'impact de ce paramètre d'appariement était faible sur l'altitude, d'où l'influence minimale constatée sur la limite du bassin versant. Pourtant, l'impact de la taille de la fenêtre de corrélation est important sur la longueur de cette limite.

VI.5.2 Effet sur le réseau hydrographique et ses attributs

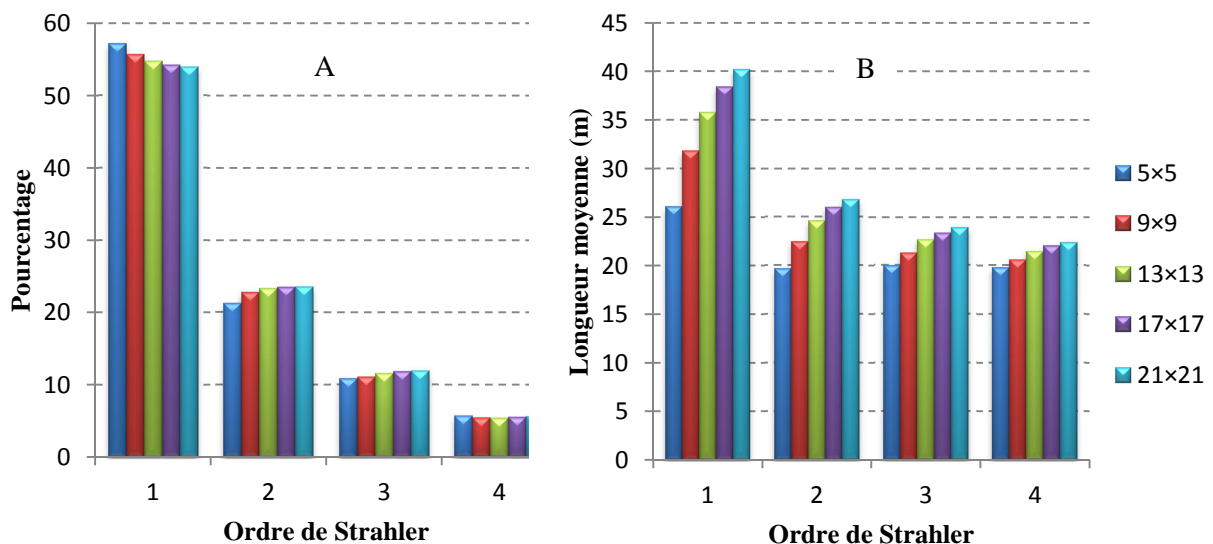


figure VI.17. Impact de taille de la fenêtre de corrélation et du seuil de corrélation sur le pourcentage (A) et la longueur moyenne (B) des chenaux ayant un ordre de Strahler entre 1 et 4.

La figure VI.17 montre que l'augmentation de la taille de la fenêtre de corrélation produit une diminution du pourcentage de chenaux ayant un ordre de Strahler 1 et une augmentation du pourcentage de chenaux ayant un ordre supérieur. De plus, la longueur moyenne des chenaux augmente pour tous les ordres et l'amplitude de cette augmentation diminue progressivement avec l'ordre de Strahler. Cela implique que les chenaux d'ordre 1 se combinent en augmentant la taille de la fenêtre de corrélation et par conséquent la topologie du réseau se modifie également. Ceci est dû au bruit et au microrelief que la fenêtre 5x5 produit, qui augmentent la ramification au niveau des

chenaux sources. Le lissage de ce bruit et du microrelief, suite à l'augmentation de ce paramètre, diminue le nombre des chenaux d'ordre 1 et augmente leur longueur.

Afin d'étudier l'impact de ce paramètre sur la qualité géométrique du réseau hydrographique, nous comparons la dimension fractale de la rivière Nahr El Jawz extraite du MNT et celle numérisée sur les images IKONOS (cf. chapitre V).

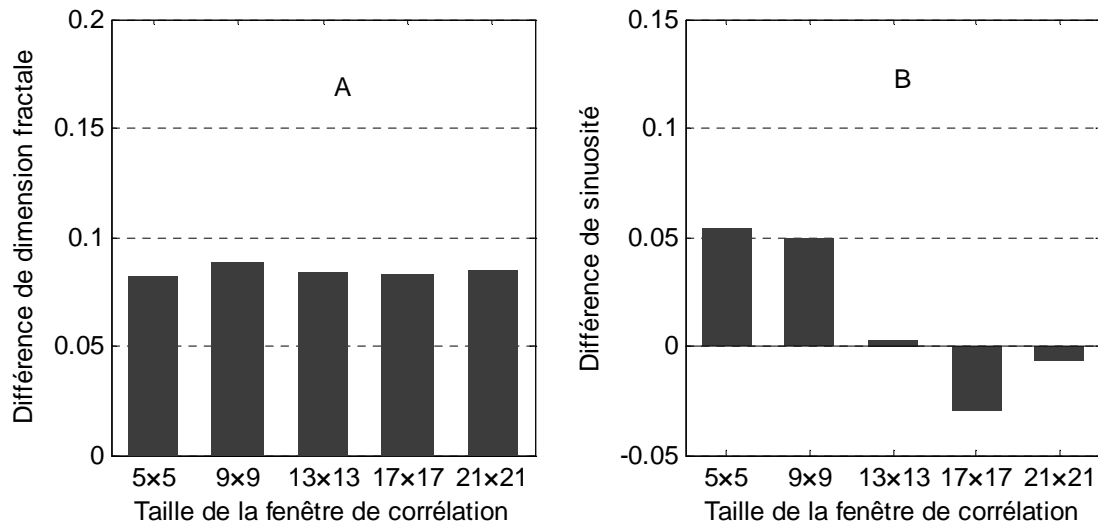


figure VI.18. Différence de la dimension fractale (A) et de la sinuosité (B) en fonction de la taille de la fenêtre de corrélation.

Cette dimension présente une différence systématique de l'ordre de 0,1 peu affectée par la taille de la fenêtre de corrélation. La dimension fractale des rivières extraites du MNT présente une valeur plus élevée que celles des rivières de référence. La conversion de raster en vecteur au cours du processus d'extraction produit un tracé de rivières qui n'est pas lisse et contribue à cette différence, la plupart des rivières étant naturellement lisses.

La sinuosité présente également une variation et la fenêtre 13x13 fournit la sinuosité la plus proche de la rivière de référence. Cette fenêtre fournissait également la variance la plus faible dans les modèles de variance de l'erreur d'altitude (figure VI.10). Ainsi, la pente maximale, utilisée pour préciser le tracé de la rivière, est plus précise avec cette fenêtre. Par conséquent, le tracé de la rivière est plus précis et donc sa longueur est plus proche de celle de la référence et sa sinuosité l'est aussi.

VI.6 Synthèse de l'étude et discussion

Pour évaluer l'impact des paramètres de l'appariement sur la géomorphologie du MNT, notre étude portait tout d'abord sur l'impact de ces paramètres sur le taux d'échec. Nous avons estimé le taux d'échec et étudié les causes possibles en considérant la morphologie et l'occupation du sol. Ensuite, nous avons évalué l'impact sur la pente qui est un descripteur élémentaire de la morphologie du terrain, donné les causes possibles en considérant également la morphologie locale et l'occupation du

sol. Ensuite, nous avons évalué l'influence de ces paramètres sur la qualité interne et externe de l'altitude et de la pente, ceci nous permet de conclure sur les paramètres préférables.

Le taux d'échec est généralement réduit en utilisant des grandes fenêtres de corrélation et de faibles seuils de corrélation et de courbure. Les zones d'échec pour une petite fenêtre incluent celles pour une grande fenêtre. Les autres zones sont des points isolés pour la plupart. Sur ces points, l'impact de l'interpolation est moins important que sur des trous étendus.

Toutefois, l'effet de cette interpolation dépend des propriétés spécifiques du paysage local, en particulier la pente et l'occupation du sol. Ainsi, la plupart des points interpolés sont situés sur les faibles pentes pour les petites fenêtres de corrélation et les seuils élevés. Toutefois, pour les faibles pentes, l'interpolation de points non appariés a peu d'effet sur la qualité des formes. De plus, nous observons un taux d'échec faible dans les surfaces artificielles et un taux élevé dans les forêts. Si les images ont été acquises à différentes dates, le taux d'échec augmente surtout dans les zones où le sol a changé, en particulier sur la végétation, conséquence d'un changement de radiométrie. Cette influence est cependant limitée sur ces zones. De plus, l'interpolation dans ces zones fournit quelquefois des résultats plus précis surtout sur les lisières des zones boisées qui induisent de fortes pentes.

Les résultats montrent que les trois paramètres testés ont plus d'impact sur les dérivées de l'altitude que sur l'altitude elle-même. Un agrandissement de la fenêtre de corrélation diminue la pente moyenne d'environ 10 degrés entre la plus petite et la plus grande fenêtre. Cette valeur dépend de la taille de la maille du MNT, qui est 10 m pour le MNT SPOT et 15 m pour le MNT ASTER : la plus petite maille aboutit à une plus grande différence. L'impact des deux autres paramètres dépend de la taille de la fenêtre de corrélation. En effet, une augmentation des seuils de corrélation et de courbure conduit évidemment à une augmentation du taux d'échec et donc à une surface plus lisse, mais si le MNT est déjà lisse, la variation des seuils a moins d'effet.

Les résultats montrent aussi que l'impact dépend de la pente du terrain. L'effet le plus important est observé sur les pentes les plus fortes. Sur ces points, une grande fenêtre produit un fort lissage. Une influence similaire peut être observée avec les valeurs des seuils. Cela est particulièrement vrai pour le seuil de courbure, avec une différence très marquée entre 0,01 et 0,1.

L'occupation du sol affecte également la pente moyenne. Une grande fenêtre de corrélation produit un lissage plus important sur les forêts denses et sur les cultures de plein champ pour les images SPOT. Cela résulte du fait qu'une grande proportion de fortes pentes, dues à des faux appariements sur les structures homogènes et périodiques des vergers et sur les zones du changement de radiométrie (acquisition diachronique des images), sont obtenues avec une petite fenêtre de corrélation. Ainsi, entre les fenêtres 5×5 et 13×13, l'occupation du sol joue un rôle très important. Au-delà de 13×13, l'impact de l'occupation du sol est moins significatif et la représentation du terrain lui-même commence à changer (cf. figure VI.14).

En conséquence, le paramètre le plus déterminant dans le processus d'appariement est la taille de la fenêtre de corrélation. Comme nous avons déjà observé, une petite fenêtre provoque moins de lissage dans le MNT et elle augmente le nombre de points interpolés dont la plupart sont situés sur de faibles pentes ou sont isolés. Elle peut générer des erreurs de pentes, surtout sur la végétation et les surfaces artificielles et lorsque les deux images sont acquises à des dates différentes. Ainsi, elle est préférable pour les fortes pentes et le terrain rugueux (parce qu'elle conserve le microrelief) notamment les sols nus. Par contre, elle peut conduire à des valeurs aberrantes même sur ces zones car l'appariement est moins fiable. Une grande fenêtre lisse le terrain et donne un taux inférieur de points interpolés. Elle est préférable pour les zones de faibles pentes. Les trop petites fenêtres donnent un appariement qui n'est pas fiable et produit un fort bruit dans le MNT alors que les grandes fenêtres donnent une meilleure fiabilité (Okada et Saitoh, 2011).

Ce qui est remarquable est que la variance de l'erreur de l'altitude diminue tout comme l'erreur de l'altitude. En comparant l'exactitude et la précision de l'altitude globales et locales entre la fenêtre 5×5 et 13×13 (produisant le MNT le plus précis), nous trouvons que la différence d'exactitude est de 0,2 m et celle de la précision est de 1 m. Cela signifie que la partie aléatoire de l'erreur diminue globalement et localement et son autocorrélation augmente. Ainsi, l'impact de ce paramètre affecte surtout la partie aléatoire de l'erreur d'altitude et son autocorrélation spatiale. En effet, une petite fenêtre de corrélation fournit une erreur aléatoire moins autocorrélée spatialement dont l'écart-type est plus élevé alors qu'une taille optimale de cette fenêtre fournit une erreur davantage autocorrélée et dont l'écart-type est moins élevé.

La qualité de la pente dépend aussi de la taille de la fenêtre de corrélation. L'erreur de la pente est réduite d'environ 3 degrés. Ainsi, le choix de ce paramètre est important et constitue l'un des nombreux paramètres de production qui peuvent influencer la qualité morphologique du MNT. Dans cette étude, la taille de la fenêtre de corrélation optimale pour l'altitude, la pente et la description du réseau hydrographique est comprise entre 13×13 et 17×17. Ces tailles de fenêtre de corrélation permettent de réduire le bruit observé avec une fenêtre 5×5, et ne produit pas un très fort lissage, comme celui obtenu avec la fenêtre 21×21.

Les seuils de corrélation et de courbure ont un impact important sur les fortes pentes à cause des faibles coefficients de corrélation observés dans ces zones. Ainsi, ils doivent être suffisamment petits pour éviter tout effet supplémentaire de lissage dû à l'interpolation, l'exception étant les zones composées d'éléments clairsemés (que ce soit des bâtiments ou des forêts), sur du bruit et si les points interpolés sont isolés et ne constituent pas des zones étendues. Sur les faibles pentes, l'augmentation de ces seuils entraîne des surfaces lissées par l'interpolation, de sorte que la géométrie de la surface modélisée peut être améliorée. L'effet de ces paramètres dépend de la taille de la fenêtre de corrélation. Par exemple, si nous utilisons une petite fenêtre, l'augmentation de l'un des seuils, qui rend

l'appariement plus fiable, provoque un effet de lissage prononcé, que ce soit un filtrage du bruit ou des microreliefs.

En conclusion, le choix des paramètres est un compromis entre les détails de forme du terrain et la fiabilité de l'appariement. Pour les applications géomorphologiques, les détails de forme du terrain sont exigés. Par ailleurs, pour ces applications, ces paramètres doivent être choisis avec soin en tenant compte de la morphologie et l'occupation du sol en présence, afin d'assurer une meilleure qualité géomorphologique.

VI.7 Conclusion

Cette étude visait à évaluer la sensibilité des indices géomorphologiques à la perturbation des paramètres d'appariement. Elle est basée sur trois paramètres disponibles dans le logiciel GeoView, à savoir, la taille de la fenêtre de corrélation, le seuil de corrélation et le seuil de courbure. Les résultats montrent un impact limité de ces paramètres sur l'altitude et une plus grande influence sur les dérivées de l'altitude. Cette influence dépend de la géomorphologie du terrain et de l'occupation du sol. Ainsi, les paramètres d'appariement doivent être choisis avec soin lorsque le MNT est utilisé dans des études exploitant la géomorphologie. Nous avons démontré ce qui suit :

1. Une différence de radiométrie entre les images, due à un diachronisme ou autre, influence le taux d'échec et la morphologie du MNT.
2. Une petite fenêtre de corrélation préserve les détails de forme du terrain. Elle est conseillée pour les fortes pentes et le terrain rugueux dont le sol est nu. Même si elle donne plus de points interpolés, ces points sont pour la plupart isolés et situés sur des pentes faibles. Elle ne doit pas être choisie trop petite pour limiter les erreurs d'appariements. Cependant, elle peut modifier la morphologie du terrain lorsqu'elle est utilisée sur la végétation, sur les surfaces artificielles et sur les zones où la radiométrie change. Une grande fenêtre donne un appariement plus fiable, diminue le bruit dans le MNT et le taux d'échec. Mais, elle tend à produire un lissage fort du microrelief et peut générer des formes du terrain qui ne sont pas réalistes si elle est très grande. Ainsi, elle peut être préférable sur les faibles pentes. Elle peut aussi avoir moins d'effet sur la géomorphologie qu'une petite fenêtre quand elle est utilisée sur la végétation et les surfaces artificielles surtout sur les faibles pentes. Enfin, la taille de la fenêtre de corrélation influence surtout la partie aléatoire de l'erreur de l'altitude.
3. L'augmentation des seuils de corrélation donne un appariement plus fiable, mais il augmente également le taux d'échec, ce qui peut avoir un impact négatif sur la géomorphologie. Finalement, elle peut être utile sur les faibles pentes.
4. La méthode de validation interne semble efficace pour distinguer les formes non réalistes dans le MNT. D'une part, on a observé, grâce à la semivariance des pentes, des artefacts en marche

d'escalier. D'autre part, la moyenne quadratique de la différence d'altitudes sur les cuvettes est du même ordre de grandeur de l'EMQ des altitudes. Après comparaison avec les pentes des deux profils, la méthode de propagation de l'erreur est aussi efficace pour évaluer la qualité des dérivées de l'altitude.

D'autres recherches doivent être menées pour évaluer l'impact des méthodes d'interpolation sur les formes du terrain en fonction de la morphologie du terrain (cf. chapitre VIII). Cet impact doit également être étudié en fonction de la taille de la zone interpolée, car le MNT obtenu à partir de la stéréocorrélation peut contenir de vastes zones de pixels non appariés produisant une déformation de la morphologie après interpolation. Ce sujet, ainsi que l'approfondissement de l'étude de la validation interne constitue des perspectives intéressantes à nos futures recherches.

VII. Influence des paramètres de traitement interférométrique des données RSO

De même que le traitement photogrammétrique d'images optiques, le traitement interférométrique d'images radar conduit à une description du relief où l'altitude, la pente et l'hydrographie peuvent être affectés par les paramètres du traitement. Ainsi, nous évaluons l'impact de ces paramètres dans ce chapitre. Ce travail a été effectué dans le cadre d'un travail de fin d'études d'ingénieur ESGT par Alexandre Hervé et encadré par nous-mêmes.

Le traitement interférométrique des données RSO, comme la photogrammétrie, est utilisé pour générer des MNT (Polidori et Toutin, 1998 ; Toutin et Gray, 2000). Son avantage est que les capteurs radar sont actifs ce qui permet une acquisition des données jour et nuit, et que l'emploi de micro-ondes permet une acquisition même en présence de nuages. La mission SRTM lancée en 2000 a utilisé cette technique pour produire un MNT couvrant la plus grande partie des terres émergées et disponible gratuitement sur internet (Rabus et al., 2003 ; Jarvis et al., 2004). De ce fait, les MNT interférométriques sont largement utilisés dans plusieurs applications, notamment pour la géomorphologie et hydrologie (Smith, 2002 ; Catani et al., 2005).

Durant le processus de traitement des données RSO, plusieurs paramètres peuvent être réglés. Ces paramètres interviennent à différents stades de la chaîne de traitement, depuis le recalage des images jusqu'au calcul des altitudes. Certains peuvent affecter le niveau de bruit de l'interférogramme, source principale de l'erreur du MNT. Quelques études se sont intéressées à l'évaluation de leur impact sur la décorrélation et l'erreur de l'altitude. Ainsi, Hanssen et Bamler (1999) et Slacikova et Potuckov (2011) ont évalué l'impact des méthodes d'interpolation de l'image esclave sur la cohérence et le bruit de phase et ont conclu que la méthode d'interpolation cubique fournissait les meilleurs résultats. De plus, Slacikova et Potuckov (2011) ont conclu que ces méthodes d'interpolation influencent peu la précision de l'altitude (écart-type de l'écart d'altitude).

Par contre, on ne trouve pas dans la littérature d'études évaluant l'impact de ces paramètres sur les dérivées de l'altitude. C'est pourquoi, nous avons choisi d'évaluer cette influence sur l'altitude puis sur la pente et le réseau hydrographique. Nous montrons que l'impact de ces paramètres est plus important sur l'altitude que sur ses dérivées parce qu'ils provoquent des erreurs de sauts de phase. Ainsi, l'exactitude du MNT est plus affectée que sa précision. Par conséquent, les dérivées de l'altitude, sensibles à l'erreur aléatoire du MNT et à son autocorrélation spatiale, présentent peu de changements en fonction de ces paramètres. Les dérivées sont davantage influencées par le phénomène de compression.

VII.1 Méthodologie

Nous utilisons les deux couples ERS et le logiciel Doris présentés dans le chapitre V pour produire les MNT. Nous avons choisi d'étudier l'effet des paramètres les plus susceptibles de modifier la cohérence, le bruit de phase et le calcul de l'altitude. Ces paramètres avec leur valeur sont présentés dans le tableau VII.1 et les valeurs par défaut dans Doris sont soulignées.

Étape	Processus	Paramètre	Valeurs	Libellé
Recalage	<i>Coarscorr</i>	<i>CC_WINSIZE</i>	<u>256</u> ×128 / 512×256	Fenêtre256 Fenêtre512
	<i>Fine</i>	<i>FC_Nwin</i>	100 / 250 / <u>400</u> / 600 / 800	FC100 / FC250 / FC400 / FC600 / FC800
	<i>Coregpm</i>	<i>CPM-DEGREE</i>	1 et <u>2</u>	Polynôme1 Polynôme2
	<i>Resample</i>	<i>RS_METHOD</i>	<u>Rect</u> / Tri / CC6P / TS6P / RC6P	Near / Linear / Truncated / Raised / Cubic convol
Filtrage du bruit de l'interférogramme	<i>Filtphase</i>	<i>PF_ALPHA</i>	0,2 / <u>0,5</u> / 0,7 /1	Alpha02 / Alpha05 / Alpha07 / Alpha1
Calcul de l'altitude	<i>Slant2h</i>	<i>S2H_METHOD</i>	Ambiguïté / <u>Schwabisch</u> / Rodriguez	Ambiguïté / Schwabisch / Rodriguez
	<i>Slant2h</i>	<i>S2H_NPOINT</i> <i>Schwabisch</i>	100 / <u>200</u> / 300 / 400	Schw100 / Schw200 / Schw300 / Schw400

tableau VII.1. Valeurs des paramètres de traitement.

Le processus du recalage de l'image esclave sur l'image maîtresse comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, il est grossier en utilisant les orbites précises avec une précision de 30 pixels. Ensuite, ce recalage est affiné avec le processus *Coarscorr* (précision 1 pixel) et le processus *Fine* (précision 1/10 du pixel) qui se basent sur la corrélation entre les deux images. Le paramètre *CC_WINSIZE* correspond à la taille de la fenêtre de corrélation utilisée au niveau du processus *Coarscorr*. *FC_Nwin* correspond au nombre de fenêtres de corrélation utilisées dans le processus *Fine*. Ensuite, le processus *Coregpm* élabore un modèle polynomial de rééchantillonnage qui sert à recalculer l'image esclave sur l'image maîtresse. Ce polynôme est de degré 1 ou 2. La dernière étape dans le recalage consiste à calculer l'image esclave recalée. Cette étape nécessite le choix d'une méthode d'interpolation (paramètre *RS_METHOD*).

Ensuite, la différence de phase entre les deux images est calculée, ce qui fournit l'interférogramme. Cet interférogramme a besoin d'être filtré du bruit de phase, pour obtenir un meilleur déroulement de phase. Le filtrage est fait en utilisant le filtre de Goldstein qui comprend le paramètre de filtrage *PF_ALPHA*. La valeur de ce paramètre est comprise entre 0 (pas de filtrage) et 1 (fort filtrage). Après déroulement de phase, le calcul de l'altitude se fait par l'une des trois méthodes citées dans le tableau. Une description détaillée de chaque processus avec ses paramètres est disponible dans le guide d'utilisation du Doris (Doris, 2008).

Une fois les paramètres définis, nous appliquons la même méthodologie qu'avec les images optiques. Le semis des points obtenu est interpolé par le krigeage ordinaire fourni par le logiciel SAGA GIS et la taille de la maille des MNT produits est 50 m. Les indices géomorphologiques et hydrographiques sont extraits en utilisant le logiciel ArcGIS.

VII.2 Analyse de sensibilité

VII.2.1 Impact sur l'altitude et la pente

En premier lieu, nous étudions l'impact des paramètres sur l'altitude. La figure VII.1 présente la moyenne et l'écart-type de l'altitude en fonction des différentes valeurs de ces paramètres.

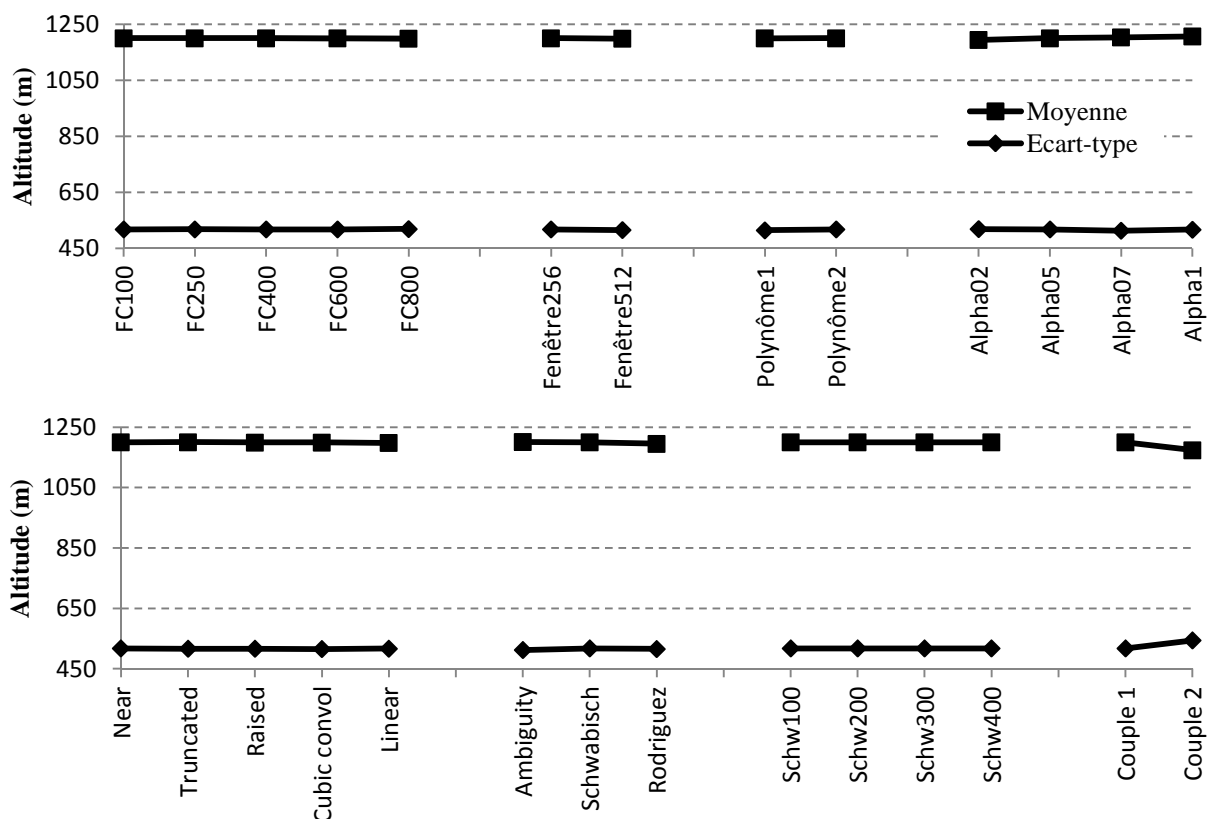


figure VII.1. Impact des paramètres du traitement des images RSO du couple 1 sur l'altitude moyenne et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.

D'après cette figure, nous observons que le filtrage et les méthodes de calcul de l'altitude exercent une influence faible sur l'altitude moyenne. L'influence des autres paramètres est très faible. De plus, la moyenne et l'écart-type d'altitude du MNT du couple 2 sont différents de ceux du MNT du couple 1 (produits par les paramètres par défaut). Cela est dû au fait que la base perpendiculaire n'est pas la même pour les deux couples.

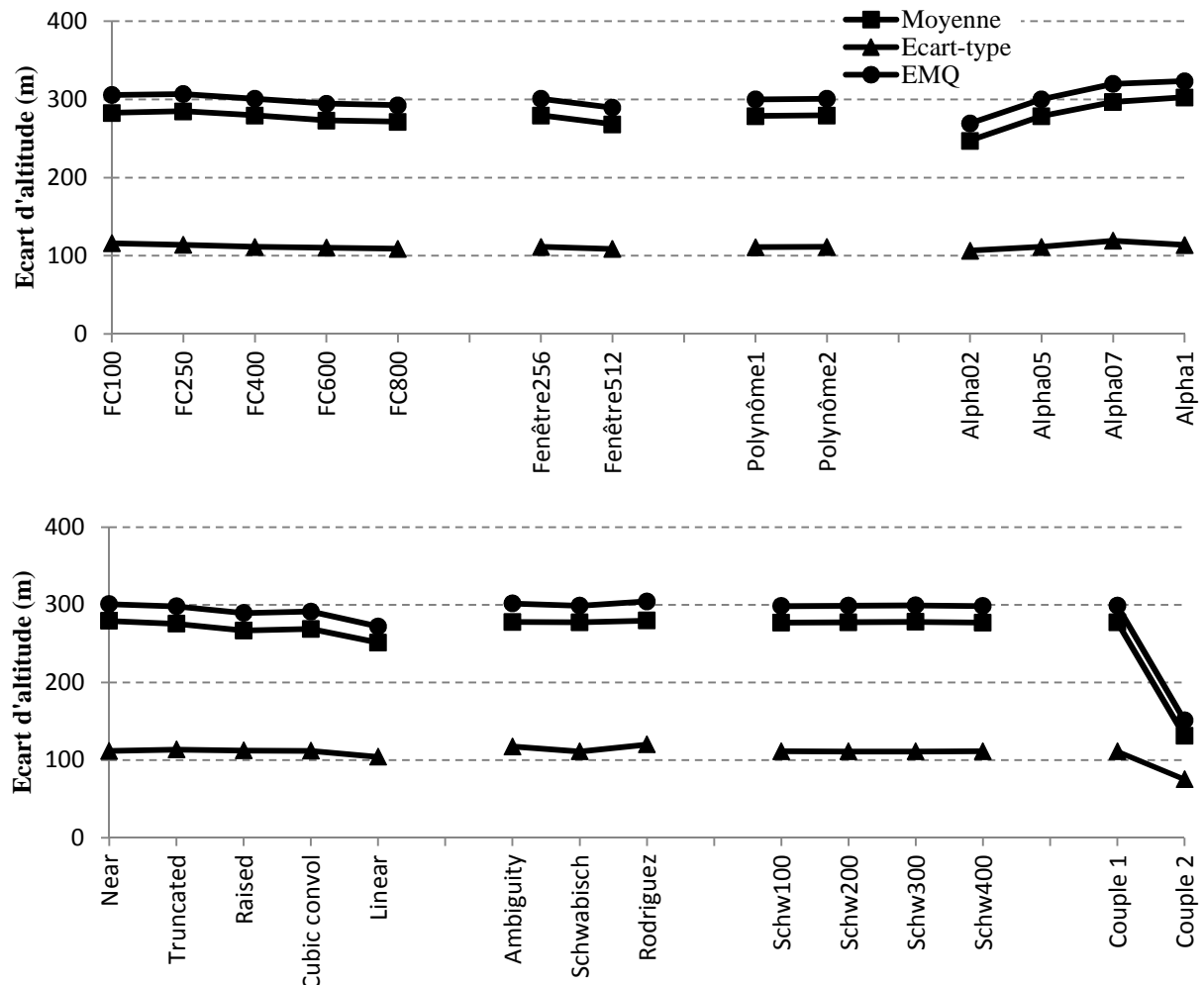


figure VII.2. Impact des paramètres sur l'erreur de l'altitude du couple 1 et erreur sur les deux couples avec les paramètres par défaut.

Ces paramètres présentent un impact plus clair sur l'erreur de l'altitude comme le montre la figure VII.2. La valeur élevée de la moyenne provient du fait que le déroulement des phases n'utilise pas de points de référence. Le but de cette étude étant d'intercomparer l'impact des paramètres, la présence de ce biais n'est pas gênant parce qu'il est le même dans tous les MNT.

Le paramètre alpha du filtrage de Goldstein augmente la moyenne et l'écart-type de l'écart d'altitude mais l'impact sur la moyenne est plus élevé. Les méthodes d'interpolation affectent peu l'erreur du MNT sauf la méthode d'interpolation linéaire. Leur impact est plus fort sur la moyenne alors que l'écart-type présente peu de changement. Cela est en accord avec Slacikova et Potuckova (2011) qui montrent que ces méthodes d'interpolation affectent peu la précision de l'altitude. Les méthodes de

calcul de l'altitude montrent aussi une influence au niveau de la précision et la méthode Schwabisch produit la valeur minimale. Une grande partie de l'augmentation de l'erreur de l'altitude est due à une augmentation de la moyenne ce qui montre qu'une erreur systématique s'ajoute au MNT. Afin de chercher la source de cette erreur, nous avons comparé le comportement des paramètres du filtre de Goldstein et des méthodes d'interpolation, qui peuvent affecter la cohérence, en utilisant le couple 2 (figure VII.3).

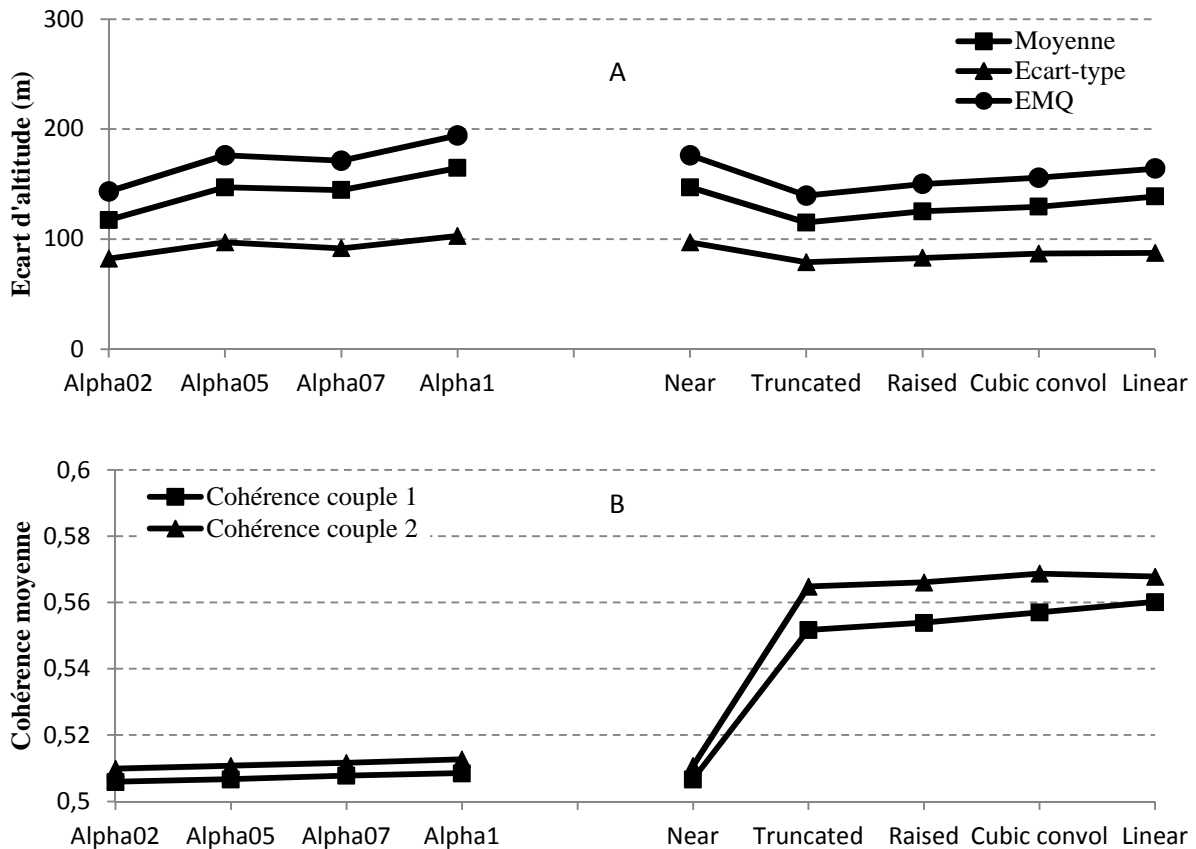


figure VII.3. Impact du filtrage et de la méthode d'interpolation sur l'erreur de l'altitude du couple 2 (A) et sur la cohérence moyenne des couples 1 et 2 (B).

Pour le couple 2, une valeur alpha égale à 0,2 du filtre Goldstein et la méthode d'interpolation par sinus tronqué fournissent le MNT le plus précis. Pour les deux couples, la méthode d'interpolation par plus proche voisin fournit l'EMQ la plus élevée. En se référant à la figure VII.3, cela peut être expliqué par le fait que la cohérence moyenne est la plus petite avec cette méthode pour les deux couples. Ceci est en accord avec les études de Hanssen et Bamler (1999) et Slacikova et Potuckov (2011). La méthode linéaire fournit une meilleure qualité d'altitude avec le couple 1 et présente une valeur élevée de la cohérence moyenne. Mais cela n'est pas vrai pour le couple 2 bien que cette même méthode d'interpolation fournisse aussi une cohérence moyenne élevée avec ce couple. En effet, l'écart moyen (biais) de l'altitude augmente et produit une augmentation de l'EMQ. Nous calculons la

différence de MNT et des cohérences produits par les méthodes d'interpolation linéaire et cubique pour observer visuellement les effets au niveau du MNT (figure VII.4).

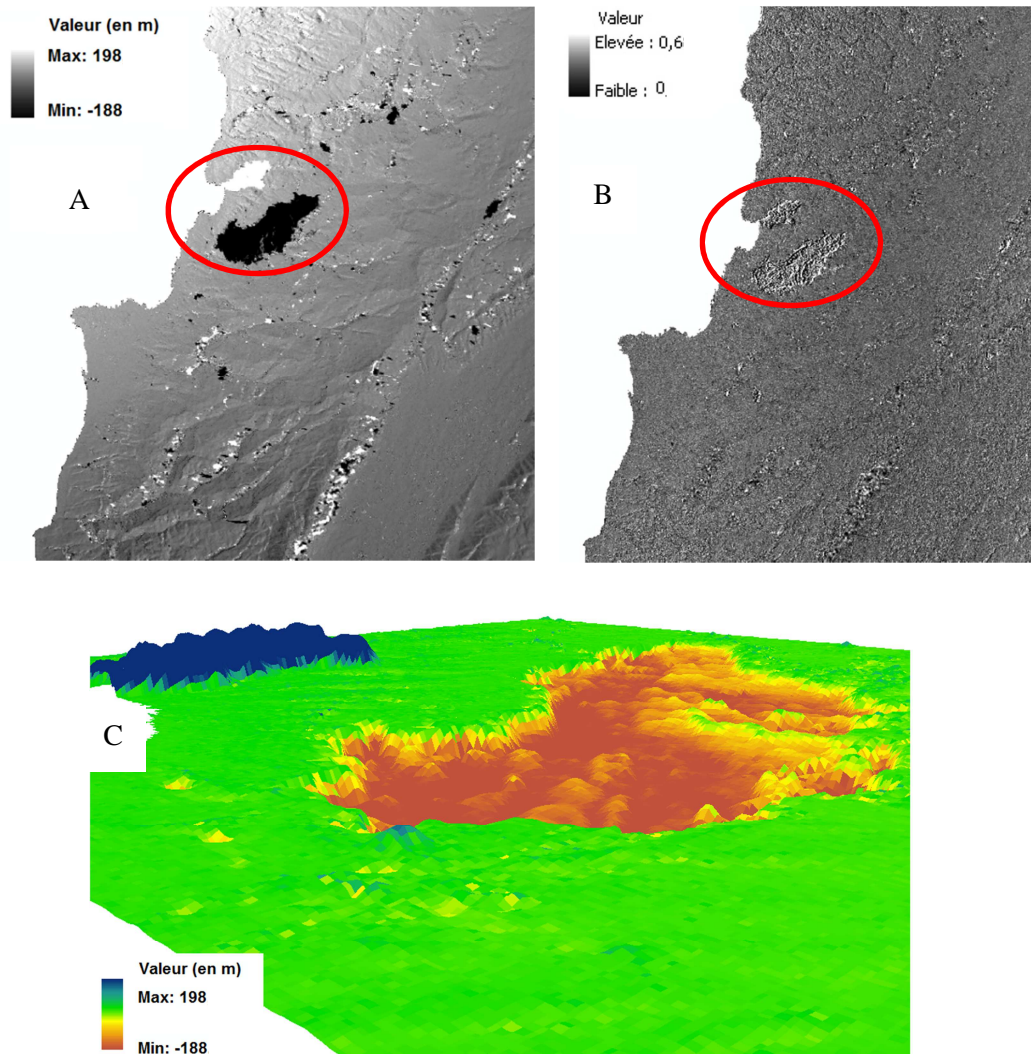


figure VII.4. Différence de l'altitude (A) et de la cohérence (B) entre les méthodes d'interpolation cubique et linéaire du couple 1 et représentation 3D de la différence d'altitude (C). La dépression de terrain est visible sur le MNT produit avec la méthode d'interpolation linéaire.

La figure VII.4 montre la présence de deux zones (entourées en rouge) qui représentent une dépression fermée et une colline. Une différence d'altitude de -60 m est mesurée dans la dépression et d'environ 120 m sur la colline. Ces valeurs correspondent à la hauteur d'ambiguïté (60 m) multipliée par 1 et par 2 respectivement. La hauteur d'ambiguïté est la dénivellée correspondant à une variation de phase de 2π sur l'interférogramme non déroulé. Sur ces mêmes zones, nous observons aussi une différence de cohérence. Ainsi, on observe une erreur de saut de phase produite par une erreur de déroulement de phase qui peut survenir en cas de cohérence faible ou de pente élevée. Par conséquent, nous obtenons une augmentation ou une diminution de la valeur de l'altitude dans ces zones. De plus, nous avons calculé la différence de cohérences obtenues par la méthode cosinus surélevé et celle cubique (figure VII.5). Cette figure ne montre pas le phénomène de saut de phase. Ainsi, nous pouvons

conclure que seule la méthode d'interpolation linéaire a affecté la cohérence et fait apparaître l'erreur de saut de phase. Ce saut n'a pas affecté l'EMQ de l'altitude car les points de référence sont localisés dans une autre zone.

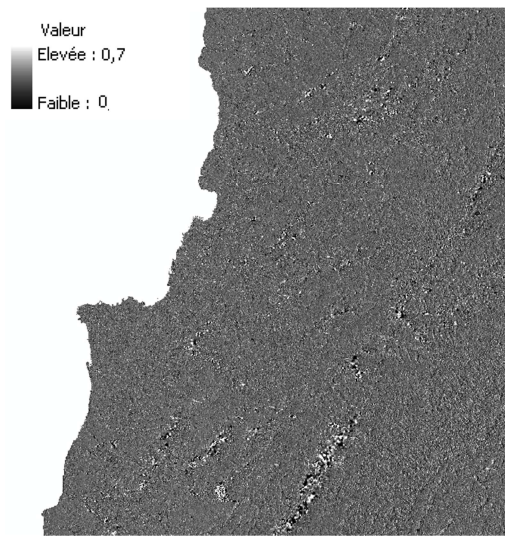


figure VII.5. Différence de la cohérence entre les méthodes d'interpolation cubique et par cosinus surélevé.

La figure VII.6 montre la différence d'altitudes et de cohérences entre les valeurs alpha égales à 1 et 0,2 du filtre de Goldstein. Cette figure montre plusieurs erreurs de sauts de phase affectant la plus grande partie des deux MNT. Chaque saut correspond à une différence d'altitude de 60 m correspondant bien à la hauteur d'ambiguïté. Ainsi, l'augmentation de ce paramètre augmente la cohérence moyenne mais augmente l'EMQ à cause des effets de lissage et d'erreurs de saut de phase.

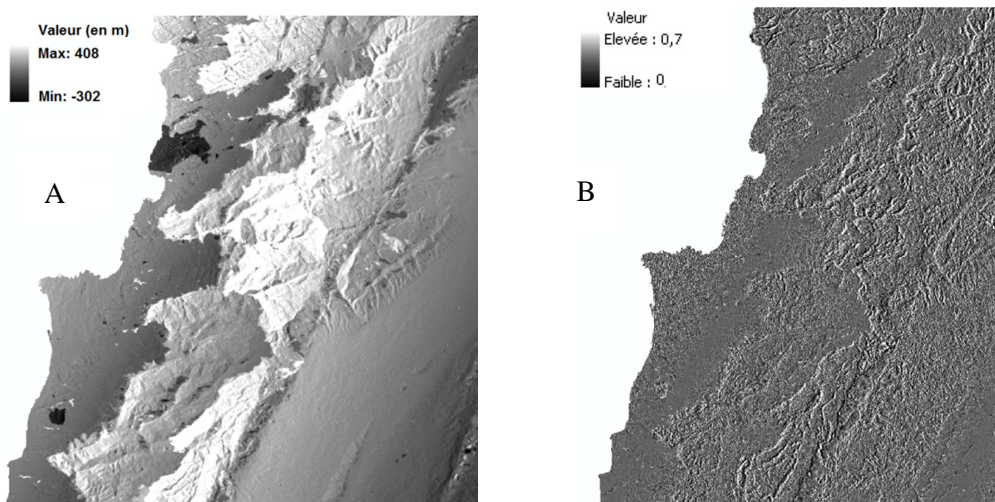


figure VII.6. Différence de l'altitude (A) et de la cohérence (B) produits avec les valeurs alpha 1 et 0,2 du filtre de Goldstein.

Pour savoir si le terrain ou l'occupation du sol favorise ces sauts, nous avons confronté ces zones avec une image satellitaire. D'après la figure VII.7, il est clair que les lignes de talwegs délimitent ces zones

surtout la zone B. Ces talwegs peuvent être la source de cohérence faible en raison de la présence de végétation et d'eau mais aussi de fortes pentes.

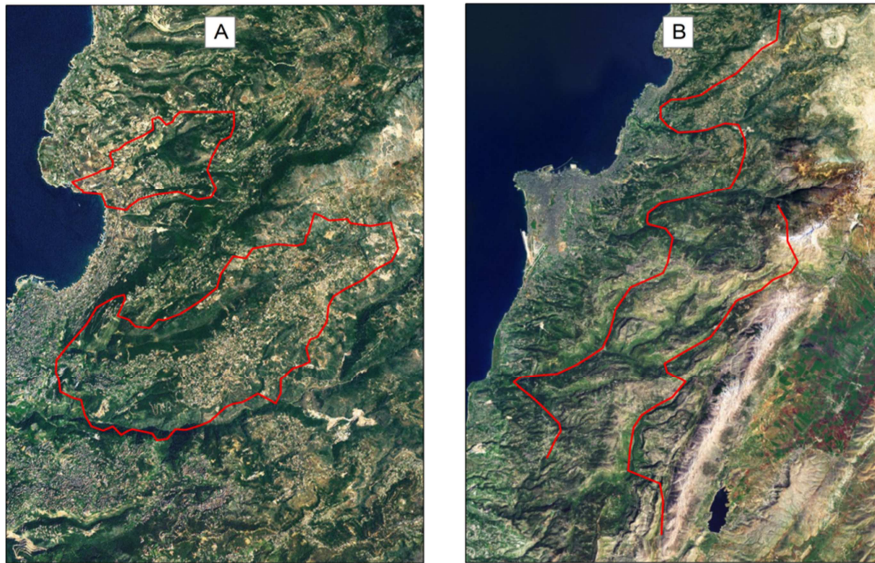


figure VII.7. Localisation du saut de phase (en rouge) avec la méthode d'interpolation linéaire (A) et avec les valeurs alpha 1 et 0,2 du filtrage (B).

Comme nous avons vu dans le chapitre III, le phénomène de compression se produit lorsque la pente du terrain face au capteur et est inférieure à l'angle de visée. Cette pente subit une forte compression lorsque sa valeur est proche de l'angle de visée, et donc l'angle d'incidence locale est presque nul. La figure VII.8 montre la différence d'altitude et de pente (calculée avec une maille de 50 m) des MNT produits avec les méthodes d'interpolation cubique et linéaire, confrontées avec les angles d'incidence locale nuls (affichés en rouges).

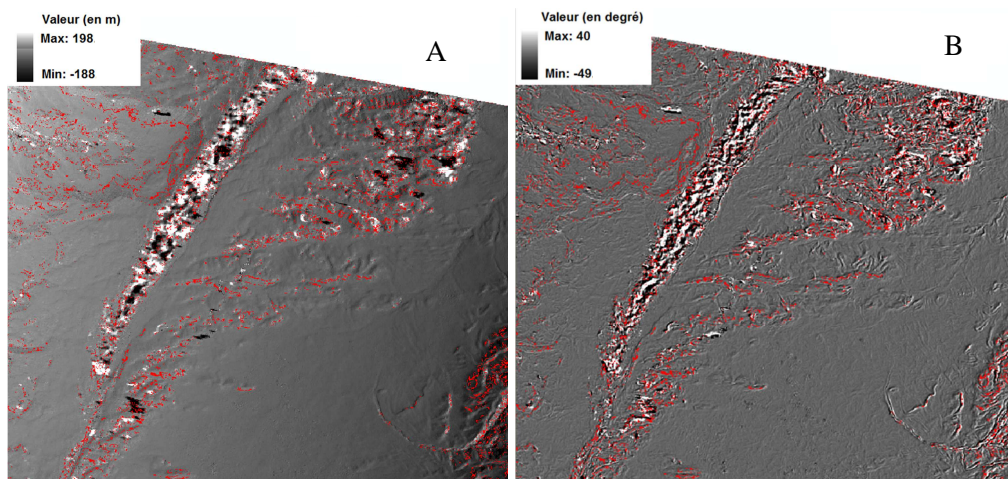


figure VII.8. Différence de l'altitude (A) et de la pente (B) des MNT produits avec les méthodes d'interpolation cubique et linéaire et angle d'incidence locale nul (en rouge).

Cette figure montre que les différences de l'altitude et de la pente sont élevées sur les zones de compression. En effet, les points calculés sont concentrés sur une petite zone et une interpolation est

appliquée pour remplir le reste. Cette interpolation affecte l'altitude mais surtout la pente du MNT parce que ce sont des zones dont la pente du terrain est généralement élevée (autour de l'angle de visée qui est de 23° pour ERS) et une interpolation peut produire un effet de lissage important.

Les paramètres de traitement produisent une faible influence sur la pente comme le montre la figure VII.9 parce que leur effet n'est pas important sur la partie aléatoire de l'erreur d'altitude.

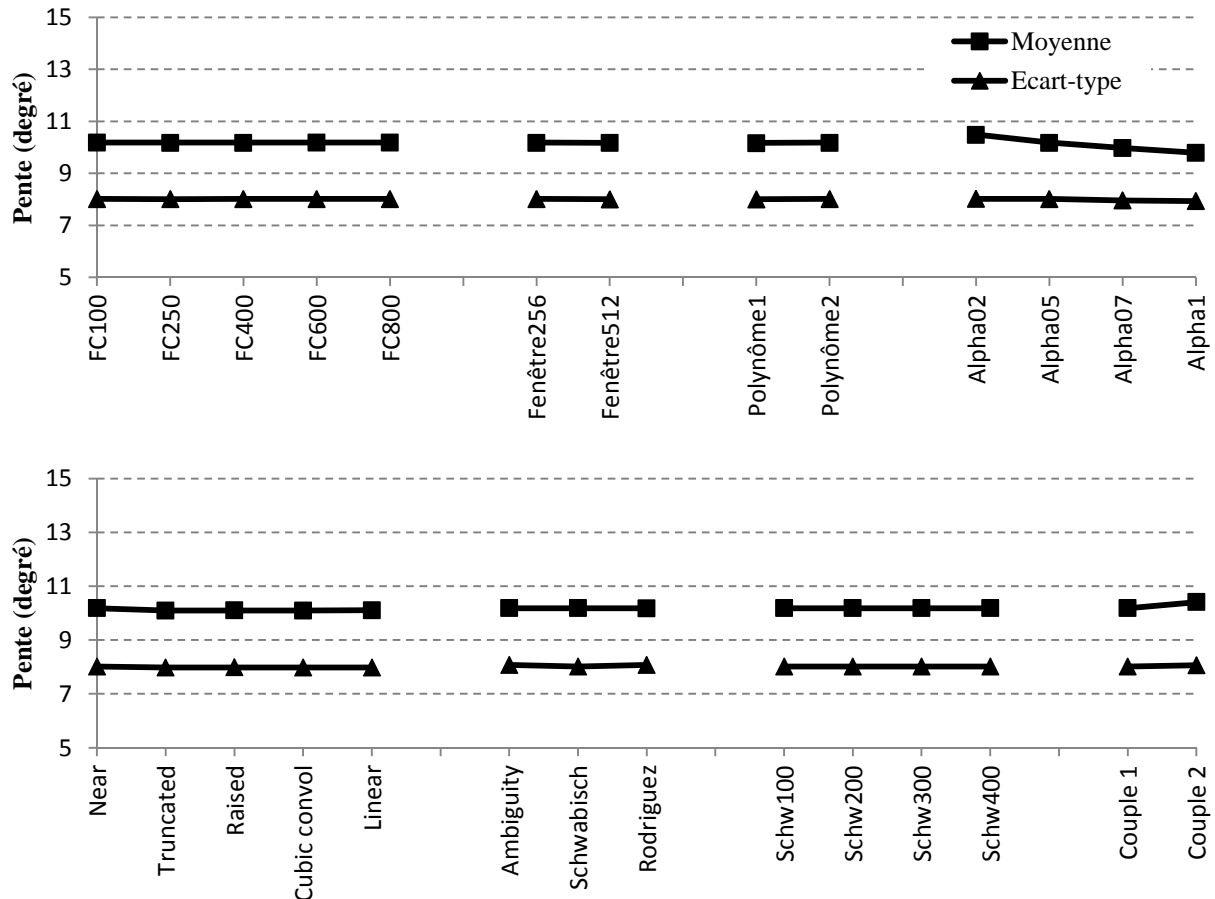
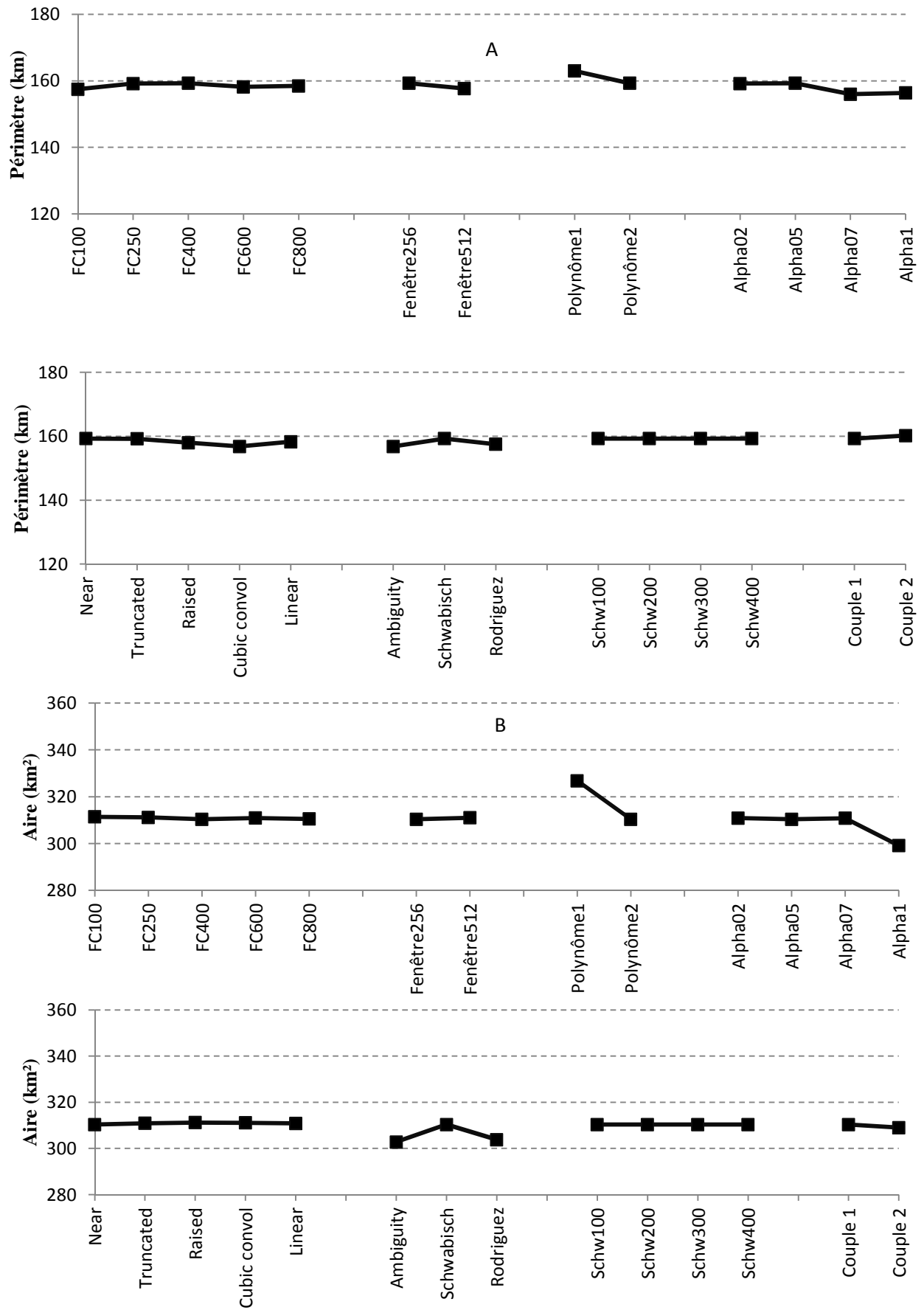


figure VII.9. Impact des paramètres sur la moyenne et l'écart-type de la pente pour le couple 1 et valeurs pour les deux couples avec les paramètres par défaut.

VII.2.2 Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique

Après avoir étudié l'impact des paramètres de traitement d'images RSO sur l'altitude et la pente, nous évaluons dans cette partie l'impact de ces paramètres sur la géométrie du bassin versant Nahr Ibrahim et son réseau hydrographique.

VII.2.2.1 Effet sur les bassins versants



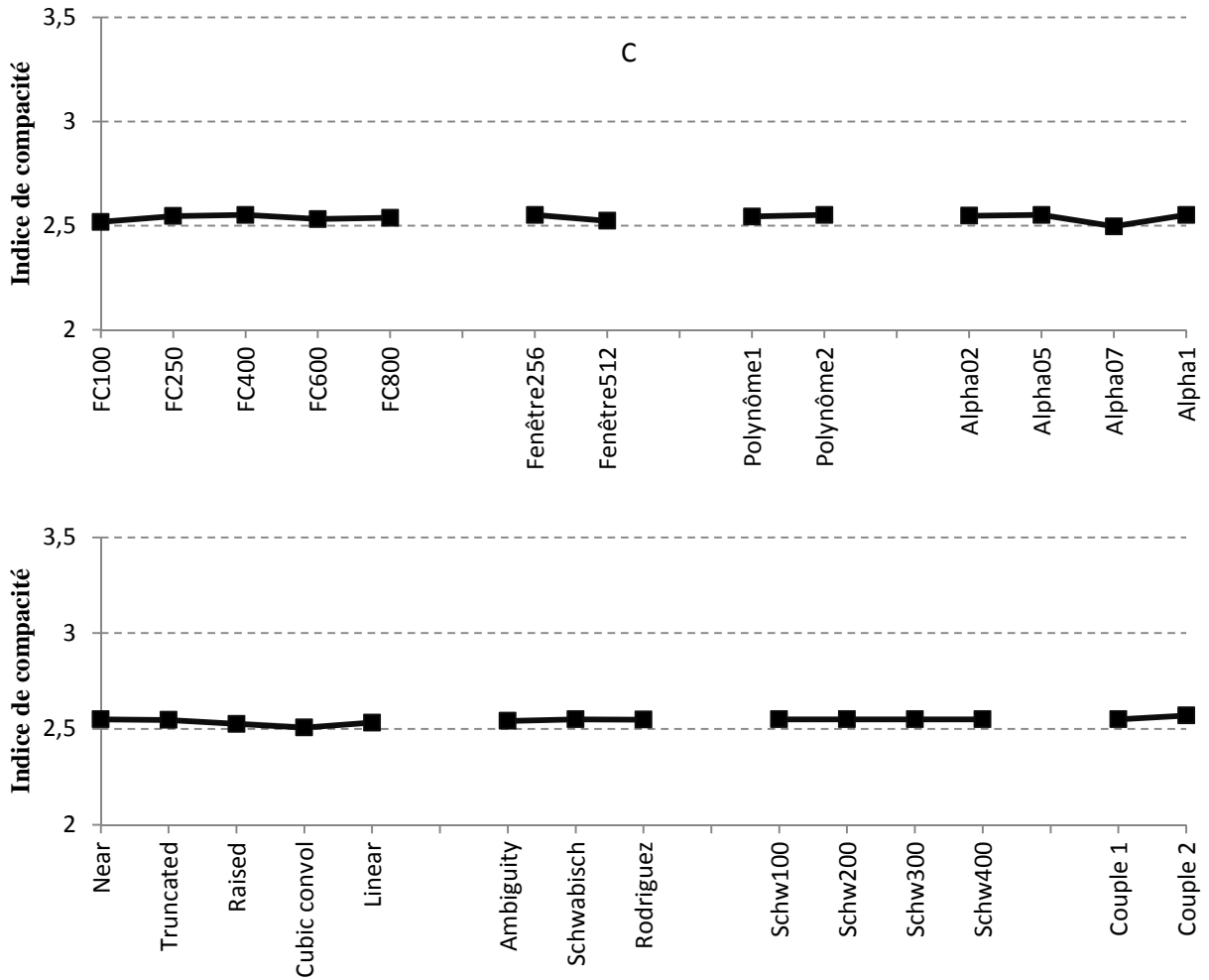


figure VII.10. Impact des paramètres sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité du bassin Nahr Ibrahim (C) pour le couple 1 et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.

Selon la figure VII.10, les paramètres de traitement InSAR exerce une influence faible sur le périmètre, sur l'aire et sur l'indice de compacité du bassin versant. Cela est dû au fait que l'altitude ne présente pas de fort changement sauf sur des zones bien délimitées conséquence d'une erreur de saut de phase. Ainsi, si un saut de phase est produit sur la limite du bassin, on peut avoir un changement de la limite du bassin si ce saut de phase modifie l'altitude maximale autour de l'exutoire. Le polynôme de degré 1, une valeur alpha égale à 1 du filtre de Goldstein, et les méthodes de calcul d'altitude *Ambiguity* et *Rodriguez* présentent le changement le plus important au niveau du périmètre et de l'aire du bassin. Cela est dû au fait que la partie supérieure du bassin est constituée d'une zone de faible pente et un faible changement de l'altitude se propage et modifie plus fortement la limite du bassin.

VII.2.2.2 Effet sur le réseau hydrographique

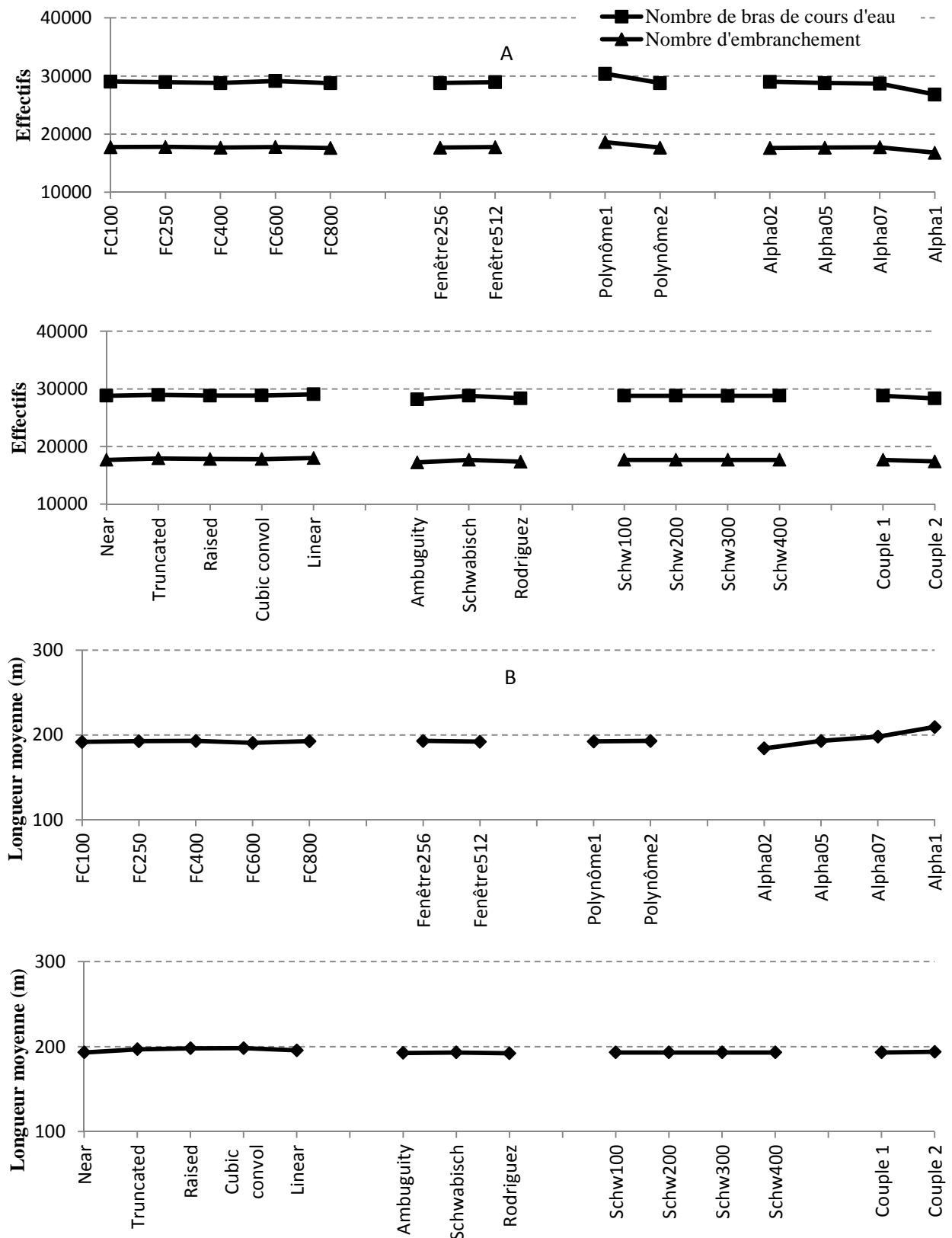


figure VII.11. Impact sur le nombre de bras de cours d'eau et d'embranchements (A) et sur la longueur moyenne des bras de cours d'eau (B) pour le couple 1 et résultats pour les deux couples avec les paramètres par défaut.

La figure VII.11 montre que le nombre de bras de cours d'eau augmente légèrement avec le polynôme de degré 1 et diminue avec une valeur alpha égale à 1 du filtre de Goldstein. Cette augmentation est due à une augmentation de l'aire du bassin versant qui a ajouté de nouveaux cours d'eau. La diminution est due non seulement au fait que ce filtre diminue l'aire du bassin mais aussi parce qu'il tend à lisser le bruit de l'interférogramme ce qui diminue le bruit du MNT et par conséquent le nombre des chenaux d'ordre 1. Ce lissage provoque aussi une augmentation de la longueur moyenne des bras de cours d'eau ce qui est bien en accord avec ce que nous avons obtenu dans le chapitre VI.

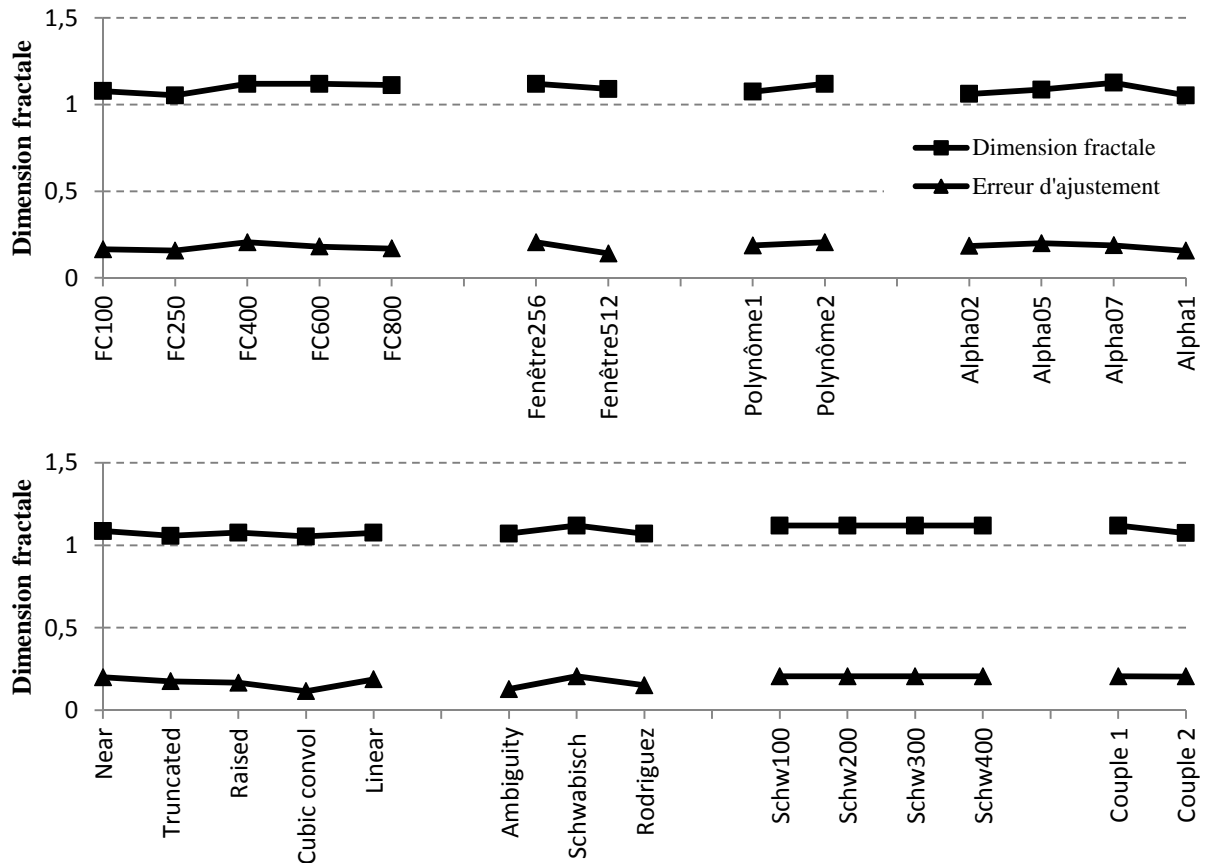


figure VII.12. Impact sur la dimension fractale du réseau hydrographique ayant l'ordre de Strahler maximal pour le couple 1 et résultats sur les deux couples avec les paramètres par défaut.

Finalement, nous avons évalué l'influence des paramètres sur la dimension fractale du réseau hydrographique (figure VII.12). A son tour, cette dimension présente des changements faibles. Comme le réseau hydrographique est déterminé par les pentes locales maximales et comme ces pentes sont peu affectées par les paramètres, la complexité du réseau hydrographique caractérisée par la dimension fractale ne présente pas de changement significatif.

VII.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons produit des MNT par traitement InSAR en faisant varier certains paramètres de traitement et nous avons évalué l'impact de ces paramètres sur l'altitude, la pente et

l'hydrographie. On peut conclure que quelques paramètres de traitement des données RSO, tels que le paramètre alpha du filtre Goldstein et la méthode d'interpolation, induisent des changements au niveau des cohérences. Ces changements, bien que faibles, peuvent causer des erreurs de déroulement de phase surtout le long des lignes de talweg. L'erreur dépend de la hauteur d'ambiguïté, et donc de la base perpendiculaire. En conséquence, la précision de l'altitude n'est pas très affectée, contrairement à son exactitude. Comme la pente est sensible à la précision de l'altitude, elle est donc peu influencée par ces changements. Elle est plutôt affectée par le phénomène de compression conséquence d'un angle d'incidence locale nul, qui arrive plutôt en zones montagneuses. En effet, sur les zones de compression, la méthode d'interpolation du MNT affecte la morphologie. De plus, la limite des bassins versants et le réseau hydrographique sont peu affectés par le choix de ces paramètres.

Le déroulement des phases lui-même est contrôlé par des paramètres que nous n'avons pas étudiés et dont la modification peut produire des résultats différents. Ce point pourra être approfondi dans nos prochaines études.

VIII. Influence des méthodes de rééchantillonnage

Nous avons montré que la photogrammétrie et l'interférométrie radar produisent un semis de points comprenant des trous. Quelle que soit la technique mise en œuvre, l'obtention du MNT final passe par une étape de rééchantillonnage qui consiste à convertir ce semis de points en une grille de structure donnée ce qui nécessite une interpolation de altitudes. Chaque méthode d'interpolation a ses propres caractéristiques de modélisation de la surface du terrain et son choix est primordial. Elles n'influencent pas seulement la qualité de l'altitude mais aussi les indices morphologiques (Schwendel et al., 2010). Leur impact dépend de la morphologie locale du terrain (Chaplot et al., 2006 ; Binh et Thuy, 2008). Les structures de rééchantillonnage et la taille de maille ont aussi une influence sur les indices morphologiques.

Dans ce chapitre, nous estimons l'impact des méthodes d'interpolation sur l'altitude et la pente. Nous évaluons aussi l'influence de la taille de la maille sur l'altitude, la pente, la courbure, les courbes de niveaux ainsi que sur le réseau hydrographique.

VIII.1 Impact des méthodes d'interpolation

VIII.1.1 Choix et performance des méthodes d'interpolation

Selon Weibel et Heller (1991), Pain (2005) et Li et al. (2005), la qualité de chaque interpolateur, dépend non seulement de la technique de production du MNT mais aussi de la nature de l'application. Hengl et Evans (2008) distinguent trois aspects pour classifier les méthodes d'interpolation qui sont l'effet de lissage (exact ou approximatif), l'effet de proximité (local ou global) et l'hypothèse stochastique. Par exemple, une méthode d'interpolation exacte, comme l'interpolation linéaire, est recommandée si les données sont très précises alors qu'une méthode lissante doit être utilisée si les données sont bruitées (Hengl et Evans, 2008). Mitas et Mitasova (1999) affirment que la description du lissage et de tension et la prise en compte des crêtes et des cours d'eau sont les critères d'évaluation les plus importants qui permettent de caractériser une méthode d'interpolation.

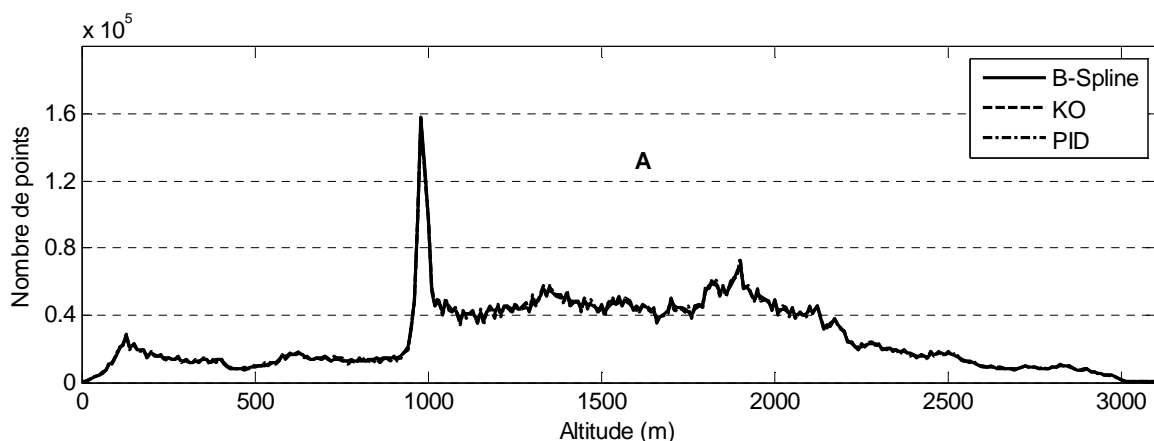
La pertinence de ces méthodes dépend de la géomorphologie du terrain. Deux études ont évalué l'impact des méthodes d'interpolation sur la qualité des MNT en fonction de la morphologie du terrain. Ces deux études ont utilisé l'EMQ de l'altitude comme critère de qualité du MNT. Ainsi, Binh et Thuy (2008) ont évalué trois méthodes d'interpolation pour différents types du relief, à savoir la pondération inverse à la distance, la Spline régularisée et le krigeage. Selon cette étude, la PID et le krigeage ordinaire (KO) avec un modèle exponentiel du variogramme sont meilleurs pour les zones planes et sur les collines, tandis que la Spline régularisée est meilleure pour les zones montagneuses.

Une autre étude effectuée par Chaplot et al. (2006) avait aussi comme objet de tester la pertinence, à des échelles différentes et selon la morphologie du terrain, de cinq types d'interpolation, à savoir la pondération inverse à la distance, le krigeage ordinaire et celui universel (KU), la fonction multiquadratique de base radiale (FMBR) et la Spline régularisée avec tension (SRT). Cette étude a conclu que l'impact des différentes méthodes d'interpolation dépend de la densité de l'échantillon d'origine. En effet, avec une densité élevée de l'échantillon, les méthodes d'interpolation présentent de faibles différences alors que cette différence devient plus importante lorsque la densité de l'échantillon est faible. En effet, avec une faible densité, le calcul de l'altitude d'un point dépend plus de l'interpolateur que des données. Sur un échantillon de faible densité et sur différentes échelles, la FMBR fournit des résultats plus précis dans les régions montagneuses alors que le KO est le plus performant sur les régions ayant un relief lisse, ce qui est bien en accord avec Binh et Thuy (2008). Enfin, les auteurs ont déduit que trois critères doivent être pris en considération lors du choix de la méthode d'interpolation : le type de relief, la densité de l'échantillon et l'applicabilité à des échelles spatiales différentes.

Dans ces études, c'est la qualité des altitudes qui s'est évaluée. Bien que ces études tiennent compte de la morphologie du terrain pour distinguer la pertinence de chaque interpolateur, la qualité de l'altitude n'est pas adaptée pour évaluer la qualité des formes, comme nous l'avons vu dans les chapitres IV et VI.

VIII.1.2 Impact sur l'altitude et la pente

Afin d'étudier l'impact de ces méthodes sur la morphologie, nous avons choisi de comparer trois méthodes d'interpolation à savoir la B-Spline, le krigeage ordinaire et la pondération inverse à la distance. L'impact est évalué sur les altitudes et les pentes (figure VIII.1).



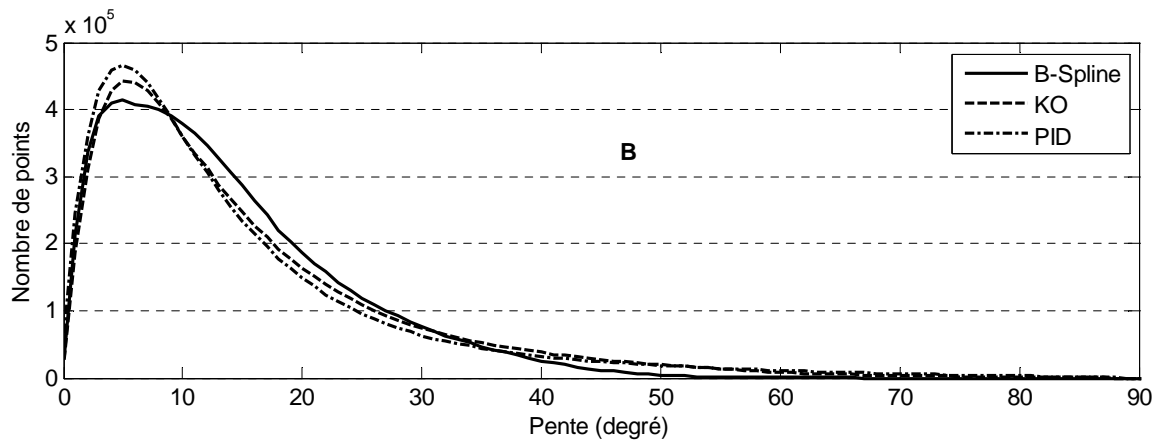


figure VIII.1. Histogrammes des altitudes (A) et des pentes (B) pour les trois méthodes d'interpolation.

Les histogrammes des altitudes présentent un changement faible alors que les histogrammes des pentes montrent un changement plus important. Ceci montre que ces méthodes d'interpolation peuvent affecter la morphologie du MNT plus que l'altitude. Elles ont des degrés de lissage différents qui dépendent de la méthode de calcul et de ses contraintes. Une analyse plus approfondie pourra faire objet de futures études.

VIII.2 Impact de la taille de maille

VIII.2.1 Impact sur l'altitude et la pente

La structure d'échantillonnage et la taille de maille sont deux autres facteurs qui peuvent affecter la qualité des indices géomorphologiques extraits du MNT. Il existe peu d'articles qui ont étudié les différentes structures d'échantillonnage (Makarovic, 1973 ; Charif, 1992). Par contre, plusieurs études ont évalué l'impact de la taille de la maille sur différents indices géomorphologiques. Ainsi, Erskine et al. (2007), Kienzle (2004), Tang (2003), Thompson et al., (2001), Vaze et Teng (2007), Vaze et al. (2010) et Wu et al. (2007) ont évalué l'impact de la taille de la maille sur des indices géomorphologiques et hydrographiques. Toutes ces études ont montré que l'augmentation de la taille de la maille tend à lisser le MNT.

Afin d'étudier l'impact de la taille de maille sur l'altitude et ses dérivées, nous avons dégradé les MNT produits avec les fenêtres de corrélation 5×5 et 13×13 , en adoptant des facteurs de sous-échantillonnage 2, 4 et 8. La figure VIII.2 représente les histogrammes de l'altitude, de la pente et de la courbure de ces MNT. Dans ce chapitre, nous avons utilisé les abréviations suivantes :

1. PR : Pleine résolution
2. SEF 2 : Sous-échantillonnage d'un facteur 2
3. SEF 4 : Sous-échantillonnage d'un facteur 4
4. SEF 8 : Sous-échantillonnage d'un facteur 8

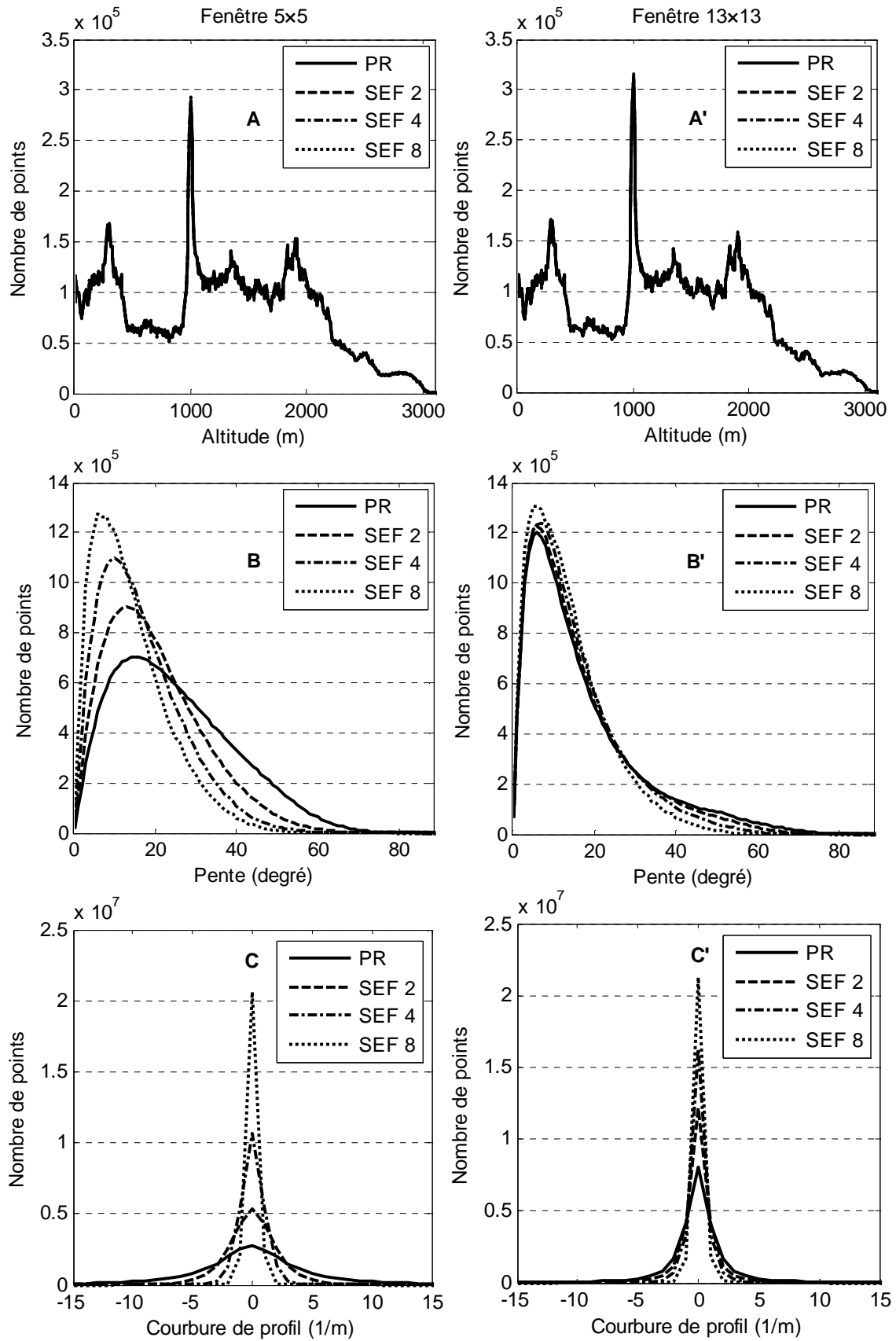


figure VIII.2. Histogrammes de l'altitude (A), de la pente (B) et de la courbure (C) des MNT produits par les fenêtres de corrélation 5x5 et 13x13.

D'après la figure VIII.2, lorsque la taille de la maille augmente, l'histogramme des altitudes change peu. Au contraire, l'histogramme des pentes change et les fortes pentes ont tendance à disparaître lorsque la taille de maille augmente, ce qui est aussi vrai pour la courbure. En comparant les pentes des MNT produits par les fenêtres 5×5 et 13×13, nous remarquons que le lissage est plus important pour la fenêtre 5×5. Cela est dû au bruit et aux microreliefs présents dans le MNT avec cette fenêtre qui sont lissés avec la fenêtre 13×13. De plus, la variation des histogrammes obtenus avec la fenêtre 5×5 semble suivre une tendance régulière. Cette régularité est liée au lissage du bruit et du microrelief lorsque la taille de maille augmente. Ceci montre que la forme de l'histogramme des pentes peut donner une idée sur la qualité du MNT. Plus exactement, la variation de la forme des histogrammes pourrait constituer une méthode de validation interne. Finalement, avec un facteur de sous-échantillonnage égal à 8, les histogrammes des pentes des deux MNT sont quasi égaux, ce qui montre qu'après une certaine valeur de sous-échantillonnage le bruit et les microreliefs du MNT tendent à disparaître. Cela signifie aussi que l'impact de la taille de la fenêtre de corrélation dépend de la taille de maille. En effet, plus la taille de la maille est grande, moins la taille de cette fenêtre influencera la morphologie du terrain.

Afin de mieux étudier l'impact sur la pente, nous avons extrait toutes les pentes supérieures à 20 degrés du MNT en pleine résolution et celui sous-échantillonné avec un facteur de 8. Nous avons choisi une zone montagneuse incluse dans le bassin versant Nahr Ibrahim. Les cartes obtenues sont présentées dans la figure VIII.3.

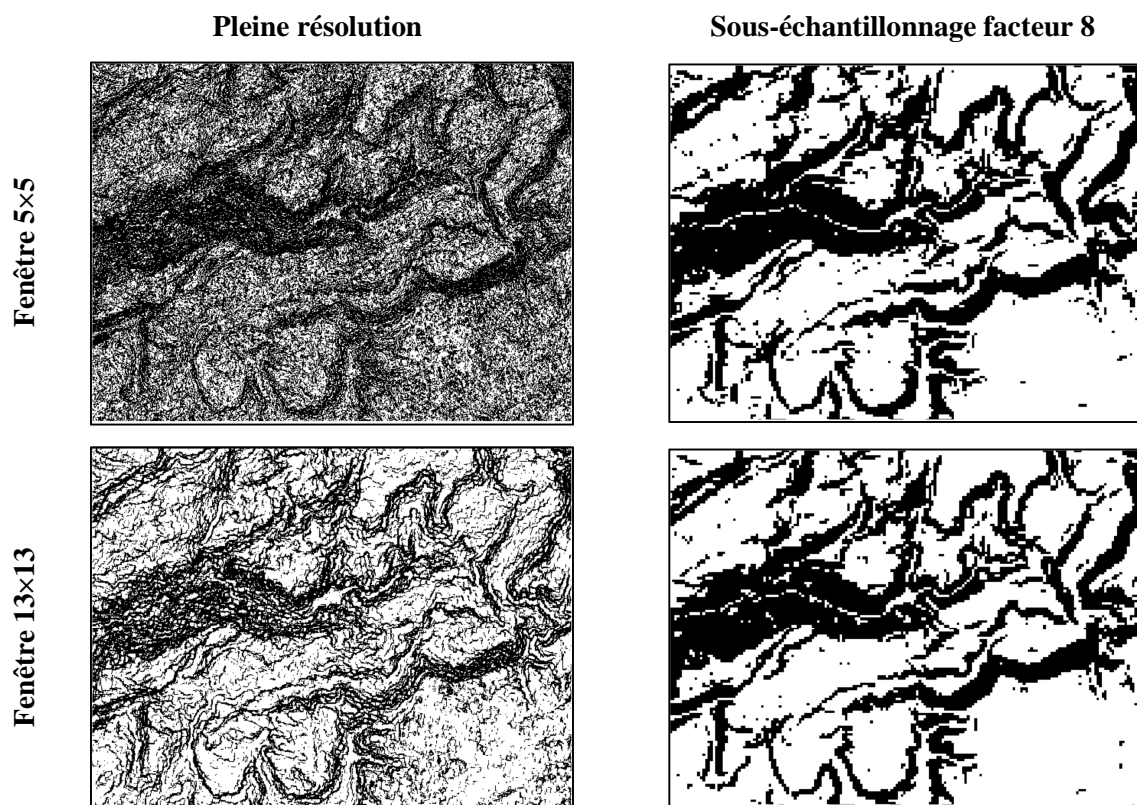


figure VIII.3. Pentes supérieures à 20 degrés (en noir).

Cette figure montre le bruit et le microrelief du MNT en pleine résolution avec la fenêtre 5×5. La quantité de ce bruit et du microrelief a clairement diminué avec la fenêtre 13×13. Une dégradation d'un facteur 8 produit une disparition d'environ 10% de pentes supérieures à 20°, 30° et 40° avec la fenêtre 13×13 comme le montre la figure VIII.4. Comme plusieurs études sont basées sur l'utilisation de la pente telle que l'évaluation du glissement de terrain, la diminution du nombre de points ayant une pente élevée peut provoquer une sous-estimation de ce risque. De plus, la figure VIII.3 montre bien que la surface des zones ayant une pente supérieure à 20° est comparable pour les deux fenêtres avec un facteur de dégradation égal à 8.

La même comparaison a été réalisée avec d'autres seuils de pente, respectivement 20, 30 et 40 degrés. La figure VIII.4 montre que la diminution du nombre de points est abrupte avec une fenêtre 5×5 surtout avec les facteurs 2 et 4 de sous-échantillonnage alors que cette diminution est moins forte avec une fenêtre 13×13 et elle est presque logarithmique.

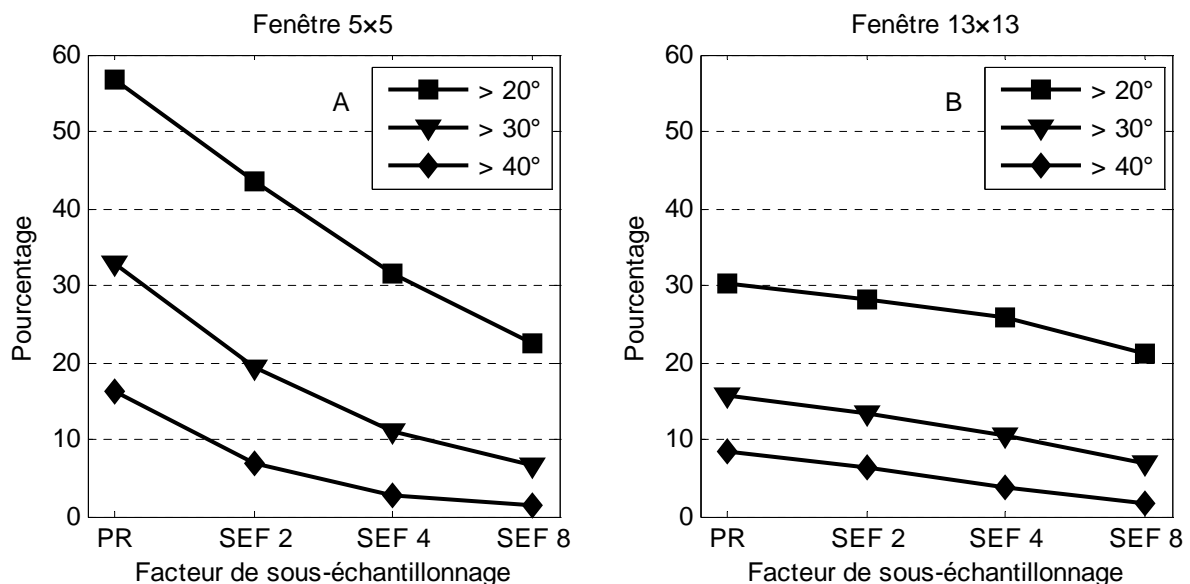


figure VIII.4. Pourcentage de cellules ayant une pente supérieure à 20, 30 et 40 degrés selon différentes tailles de maille.

La figure VIII.5 représente les courbes de niveau de 200 m générées avec différentes tailles de maille. Cette figure montre que les courbes de niveau principales sont conservées avec l'augmentation de la taille de maille parce que l'altitude est peu affectée par ce paramètre. Par contre, les plus hautes fréquences spatiales et les plus petites formes disparaissent suite à la diminution du bruit et du microrelief dans le MNT. Ainsi, ces courbes deviennent plus lisses et moins complexes. Donc, la position des courbes est conservée mais pas la forme.

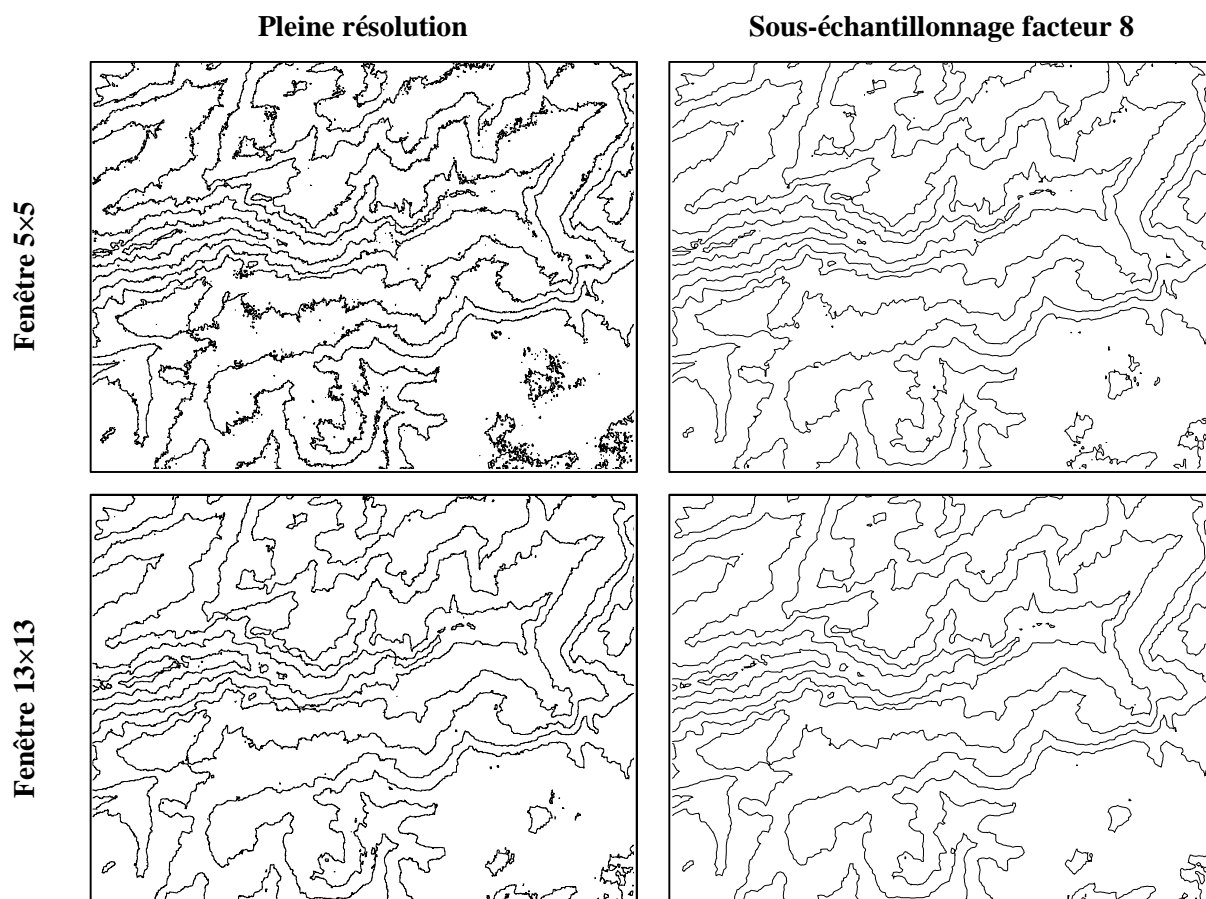


figure VIII.5. Courbes de niveau générées avec différentes tailles de maille.

VIII.2.2 Impact sur l'erreur de l'altitude et de la pente

Dans cette partie, nous évaluons l'influence de la taille de maille sur l'erreur de l'altitude et celle de la pente. Pour cela, nous avons utilisé les points de nivellement et les deux profils ainsi que l'équation de l'erreur de la dérivée partielle (cf. chapitre IV).

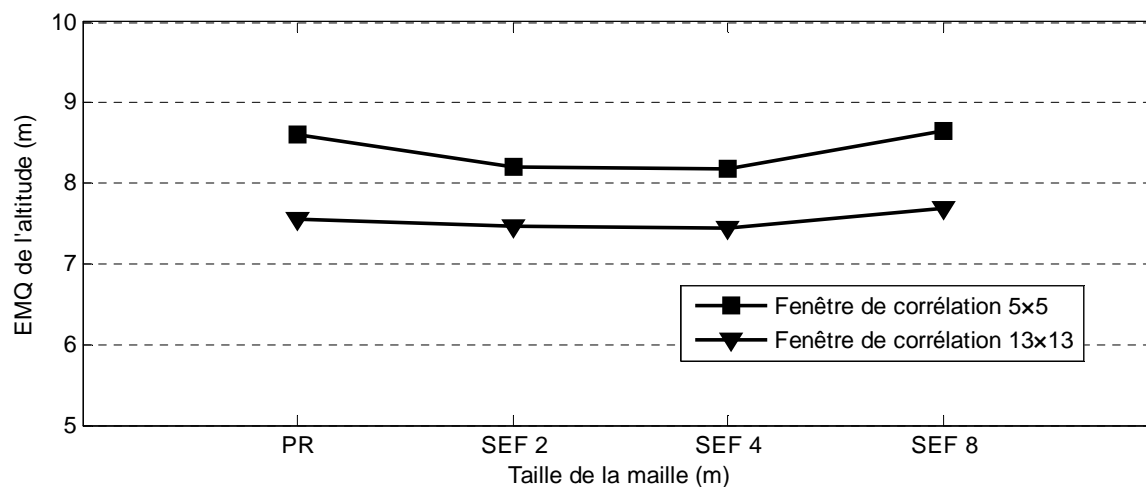


figure VIII.6. L'EMQ de l'altitude en fonction de la taille de maille.

Selon la figure VIII.6, nous observons que l'EMQ de l'altitude varie peu. De plus, la sensibilité de cette EMQ est moins importante avec une fenêtre de corrélation 13×13. Cela signifie que la taille de maille a un effet faible sur l'erreur de l'altitude.

Afin d'évaluer l'effet du sous-échantillonnage sur l'erreur de la pente, nous avons tracé la fonction modélisant l'erreur de la dérivée partielle selon la taille de maille. De plus, nous avons calculé l'EMQ de la différence de pente du MNT par rapport au premier profil de référence pour des distances allant de 5 à 50 m (figure VIII.7).

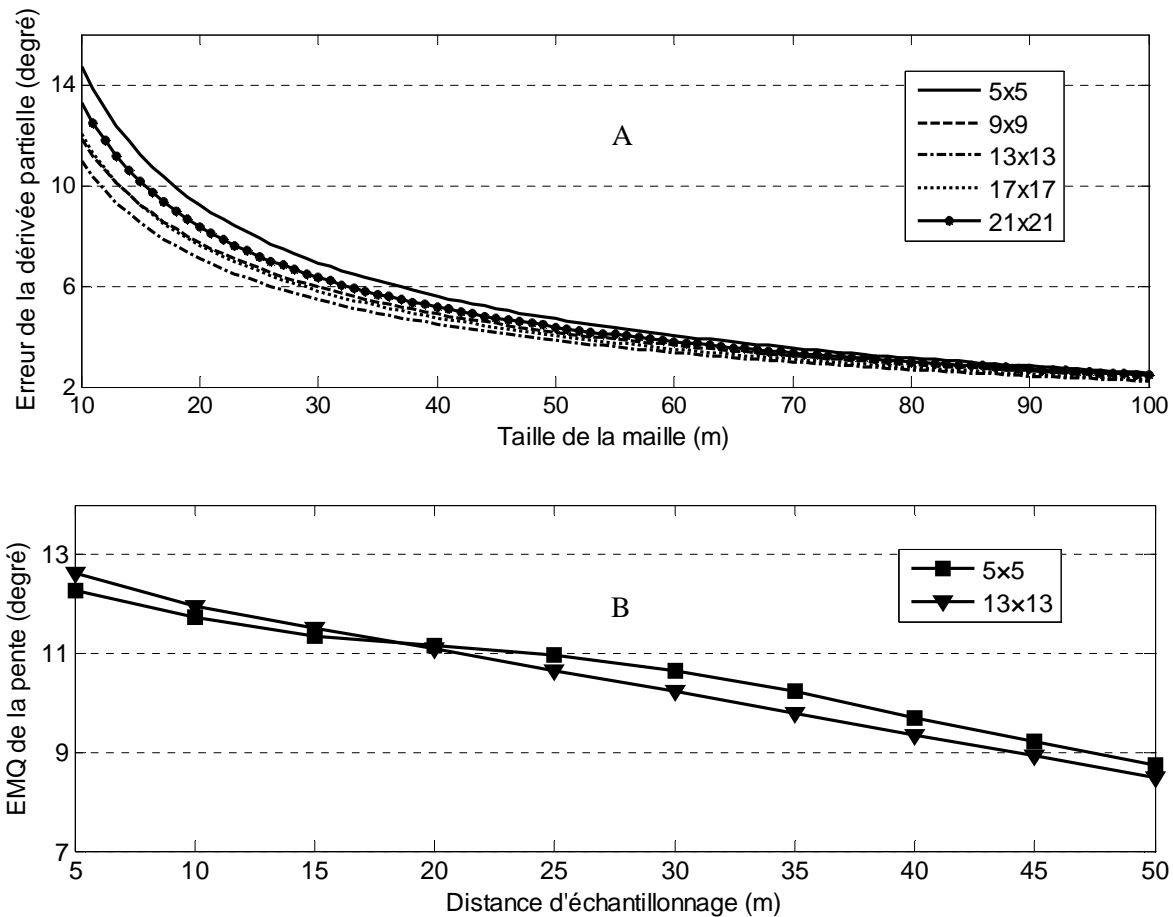


figure VIII.7. Erreur de la dérivée partielle (A) et celle de la pente du profil (B) en fonction de la taille de maille.

Il est clair que l'erreur de pente diminue nettement lorsque la taille de maille et la distance d'échantillonnage augmentent, résultat également observé par Oksanen et Sarjakoski (2005). Cette diminution est non linéaire pour la dérivée partielle alors que pour le profil elle est presque linéaire. Cela signifie que l'erreur de la pente est relative à la taille de maille.

VIII.2.3 Impact sur la géométrie des bassins versants et du réseau hydrographique

Dans cette partie, nous utilisons le MNT produit avec la fenêtre 13×13 pour évaluer l'impact de la taille de la maille sur l'hydrographie parce que ce MNT est plus précis et contient moins de bruit (cf. chapitre VI).

VIII.2.3.1 Effet sur les bassins versants

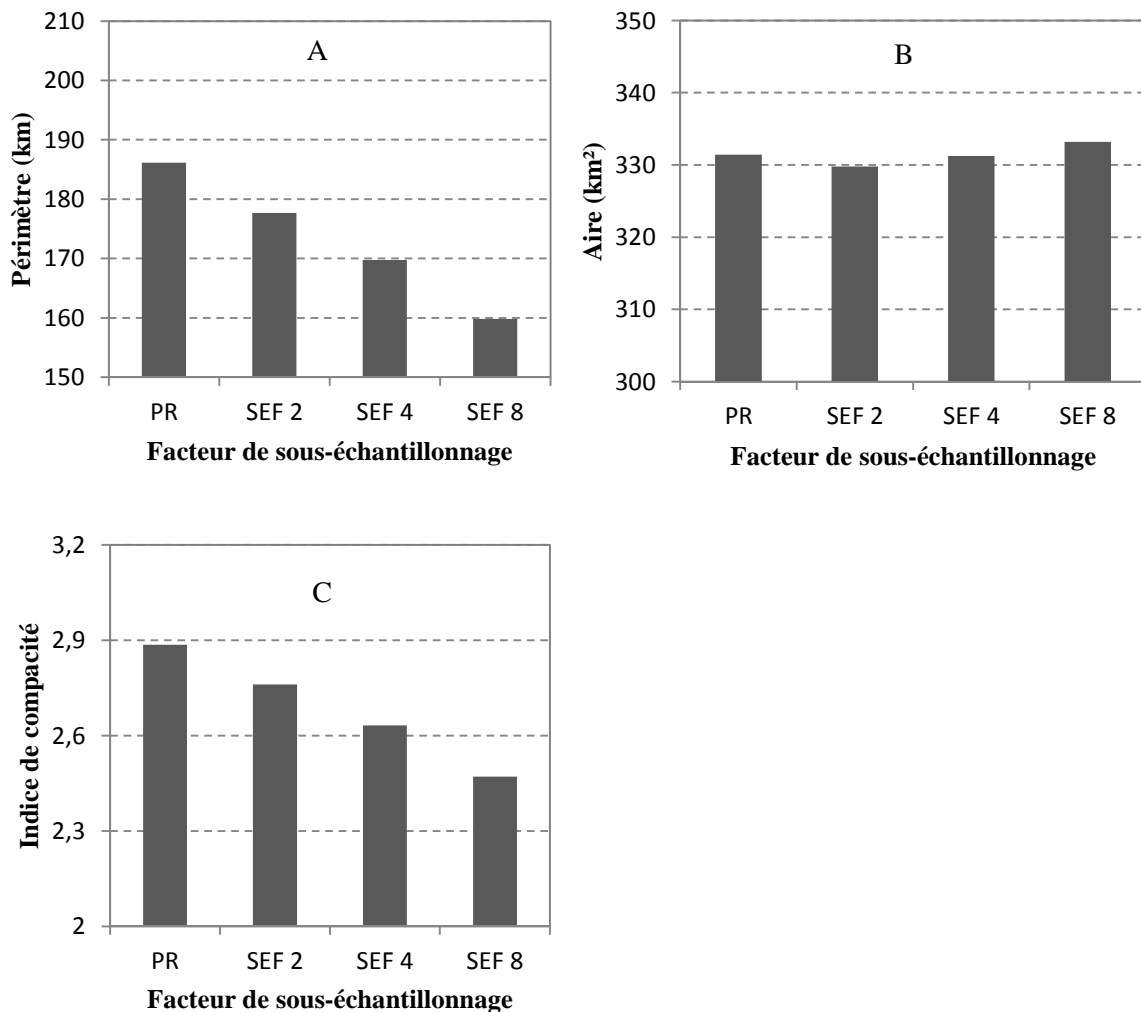


figure VIII.8. Impact de la taille de maille sur le périmètre (A), l'aire (B) et l'indice de compacité (C) du bassin versant Nahr Ibrahim.

D'après la figure VIII.8, le périmètre du bassin versant diminue avec l'augmentation de la taille de maille parce que la ligne de crête devient moins complexe comme nous l'avons vu dans la figure VIII.5. Vu que l'impact de la taille de maille sur l'altitude est faible, son influence sur la limite du bassin versant n'est pas très importante et l'aire du bassin versant change peu. Par conséquent, la valeur de l'indice de compacité diminue peu suite à la diminution du périmètre.

VIII.2.3.2 Effet sur le réseau hydrographique

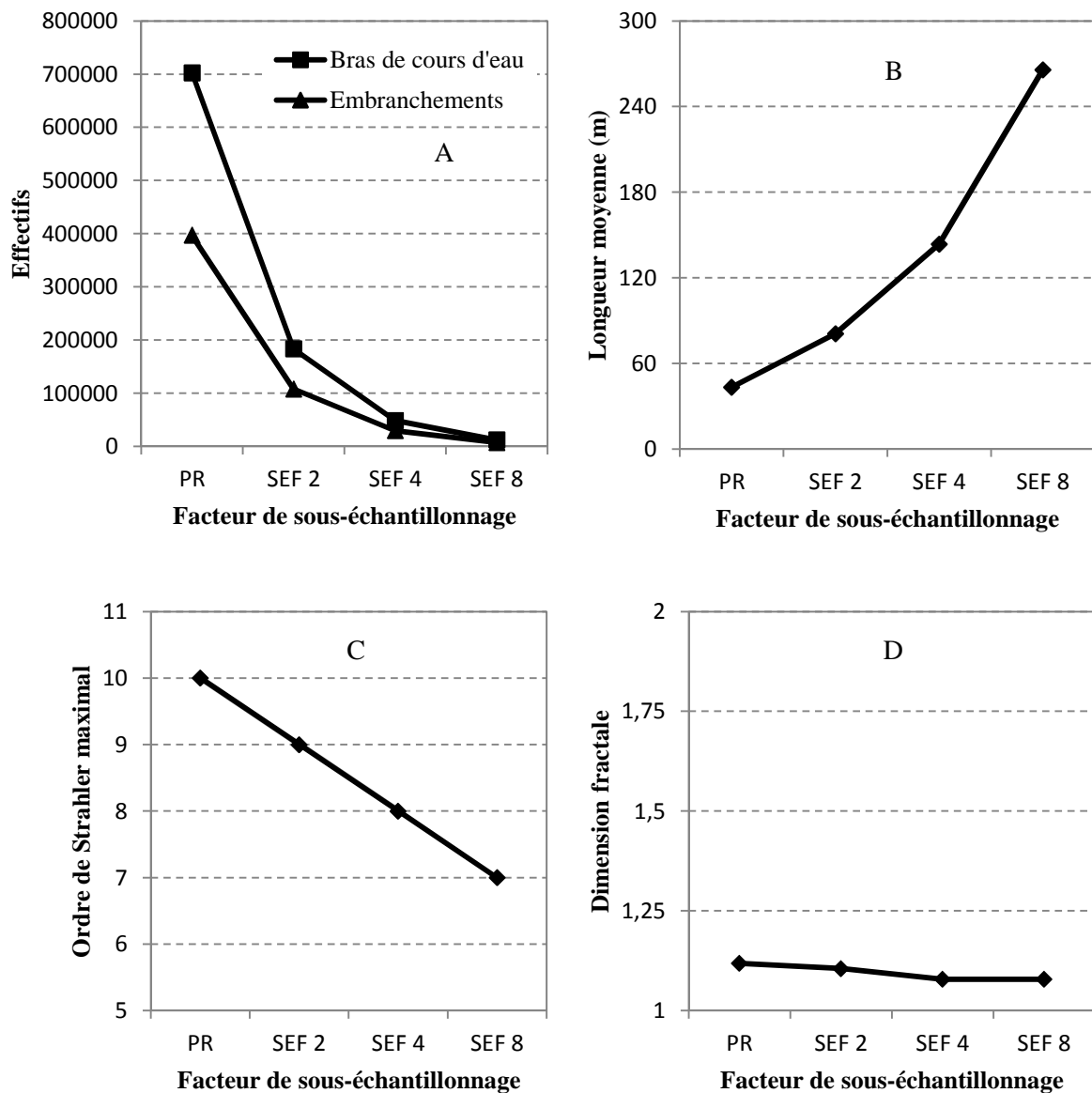


figure VIII.9. Impact du sous-échantillonnage sur le nombre de bras de cours d'eau et d'embranchements (A), sur la longueur moyenne de ces bras (B), sur l'ordre de Strahler maximal (C) et sur la dimension fractale du réseau hydrographique ayant l'ordre de Strahler maximal (D).

D'après la figure VIII.9, le nombre de bras de cours d'eau et celui d'embranchement de ces bras est fortement affecté par la taille de maille. A cause du lissage produit par la dégradation de taille de maille, la rugosité du MNT diminue. Ainsi, le nombre de bras tend à diminuer. Mais, le nombre d'embranchements diminue aussi et la longueur des bras augmente. Cela signifie que la topologie du réseau change à cause du changement de ce paramètre. L'augmentation de la longueur des bras confirme le fait que la longueur d'un fleuve (comme celle qu'on trouve dans un dictionnaire) n'a pas de sens si on ne précise pas l'échelle. De plus, l'ordre de Strahler maximal à son tour subit une

diminution logarithmique en fonction des facteurs de dégradation du MNT. Enfin, la dimension fractale diminue peu suite à une diminution au niveau de la complexité du réseau principal.

VIII.3 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre confirment le fait que le choix de l'interpolateur et de la taille de la maille du MNT affecte la qualité géomorphologique du MNT. En effet, nous montrons que la pente, la courbure et les indices hydrographiques sont les plus affectés alors que l'influence sur l'altitude n'est pas si importante. Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, la dégradation de la taille de la maille est équivalente à un changement d'échelle. Ainsi, nous pouvons conclure que l'altitude et sa qualité sont presque indépendantes de l'échelle et que la pente et sa qualité dépendent de l'échelle. Cette dépendance peut influencer sur les résultats finaux des applications se basant sur la pente. Par exemple, si la pente est considérée comme un critère d'instabilité pour la cartographie des risques de glissement de terrain, les conclusions tirées peuvent être erronées si l'échelle n'a pas été prise en considération. En effet, l'étendue spatiale des zones dangereuses peut être sous-estimée. C'est pourquoi, à chaque fois que le MNT est utilisé pour une analyse géomorphologique, la taille de la maille doit être fixée en fonction de l'application considérée (Takagi et al., 2002). Cela est justifié par le fait que la meilleure description de la plupart des processus ou phénomènes est faite en utilisant son échelle propre (Shary, 2008).

De plus, en comparant l'impact de la taille de maille sur les MNT produits par les fenêtres 5×5 et 13×13, nous concluons que l'influence de la fenêtre de corrélation sur la morphologie dépend de la taille de la maille. En effet, si la taille de la maille est petite, le choix de la fenêtre de corrélation est critique et exerce une influence importante sur la morphologie du terrain. Par contre, si la taille de la maille est grande, l'influence de ce paramètre est moindre.

Lorsque la taille de la maille augmente, les histogrammes des pentes changent de forme pour un MNT qui contient du bruit et du microrelief de manière différente d'un MNT qui en contient peu. Nous supposons que ce changement de forme est principalement dû à la présence de bruit. De ce point de vue, ce changement de forme d'histogramme peut constituer une autre méthode de validation interne. Cette idée sera approfondie dans nos prochaines études.

IX. Vers une meilleure représentation morphologique

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, la qualité morphologique des MNT issus de différentes techniques de production est affectée par les paramètres de production de ces techniques y compris lors du rééchantillonnage. L'impact de ces paramètres n'est pas le même et affecte surtout les indices morphologiques locaux. De plus, il dépend souvent de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol.

Dans ce chapitre, nous montrons l'importance de l'évaluation de la qualité morphologique du MNT. Nous résumons l'impact des paramètres de production et nous discutons la manière de les choisir afin d'obtenir une meilleure qualité morphologique.

IX.1 L'importance de l'évaluation de la qualité morphologique

Comme affirmé par Heuvelink (2002), la seule valeur de l'EMQ des altitudes n'est pas suffisante pour caractériser l'erreur du MNT du fait qu'elle néglige l'autocorrélation spatiale de l'erreur. Cette autocorrélation joue un rôle important dans le calcul des dérivées de l'altitude. Ainsi, si on dispose de deux MNT ayant différentes EMQ, il existe plusieurs possibilités :

- 1- Si la différence de l'erreur est due à un biais d'altitude, cela n'influe pas sur les dérivées. Dans ce cas, les deux MNT donnent la même qualité morphologique.
- 2- Si la différence est due à une erreur aléatoire
 - a. En global
 - Cela ne donne pas une estimation précise des dérivées de l'altitude, car ces dérivées sont influencées par l'erreur locale de l'altitude.
 - b. En local
 - Si l'autocorrélation est forte, l'influence de l'écart-type de l'écart d'altitude sur les dérivées est négligeable. Dans ce cas, l'EMQ ne reflète pas la qualité morphologique.
 - Si l'autocorrélation était faible, l'influence de l'écart-type dépend de la valeur d'autocorrélation. Par exemple, si l'erreur est un bruit pur (pas d'autocorrélation), sa diminution dans le MNT améliore la qualité des formes. Dans ce cas, la valeur de l'EMQ peut caractériser la qualité morphologique.

D'après cela, évaluer l'autocorrélation de l'erreur de l'altitude pour les applications utilisant la morphologie extraite du MNT s'avère indispensable. Ainsi, un modèle d'autocorrélation de cette

erreur en fonction de la distance est recommandé. Comme nous l'avons vu dans le chapitre IV, ce modèle avec l'EMQ de l'altitude constitue le modèle d'erreur du MNT. Il sera ensuite utilisé dans l'évaluation de l'erreur des dérivées de l'altitude. Par ailleurs, il faudrait idéalement que les points de référence ne soient pas trop distants afin que l'on puisse détecter l'autocorrélation sur des distances proches de la taille de fenêtre de calcul de la dérivée.

Notre étude a montré que l'écart-type de l'erreur d'altitude diminue lorsque la taille de la fenêtre de corrélation augmente (entre 5×5 et 13×13) et l'autocorrélation de cette erreur augmente aussi. Or, ce sont deux critères de qualité des dérivées de l'altitude et donc des formes. C'est pour cela que nous avons obtenu une diminution de l'erreur de l'altitude et de l'erreur de la pente en même temps entre les fenêtres 5×5 et 13×13.

Le fait que l'on travaille sur les formes du terrain nous permet d'utiliser une autre méthode de validation basée sur les propriétés connues de ces formes. Cette méthode de validation n'a pas besoin de données externes et peut être basée sur le voisinage pour évaluer si une forme est possible ou si elle respecte les lois qui régissent les formes du terrain. Notre méthode consiste ainsi à l'évaluation de l'autocorrélation spatiale de la pente, à la vérification de l'écoulement de l'eau vers le bas et au respect de la forme de l'histogramme des pentes. Ces histogrammes présentent de formes différentes suivant l'erreur de la pente dans le MNT et le relief du terrain. De plus, la pente moyenne diminue d'une façon logarithmique en fonction de la taille de maille lorsque le MNT est entaché d'erreurs, ce qui n'est pas le cas pour une MNT contenant moins d'erreurs.

IX.2 Synthèse de l'influence des paramètres

En photogrammétrie, notre étude a montré l'importante sensibilité des indices morphologiques et de leur qualité au changement des paramètres de production. De plus, l'impact du paysage sur les dérivées de l'altitude n'est pas négligeable et son ampleur est liée aux paramètres de production. Ainsi, nous avons évalué l'impact des paramètres en fonction de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol. Le tableau IX.1 récapitule l'influence des paramètres sur le taux d'échec. Ainsi, nous cherchons à savoir ce qui provoque l'échec de l'appariement et si l'interpolation dans ce cas améliore la représentation morphologique. Les tableaux IX.2 et IX.3 résument l'influence des paramètres de production sur la morphologie du MNT en fonction de la morphologie du terrain et son occupation du sol. Dans ces tableaux, l'influence des seuils de corrélation et de courbure n'est pas distinguée car leur influence s'est avérée relativement similaire.

Paramètre	Valeur	Appariement	Taux d'échec				
			Taux	En fonction de la morphologie du terrain	Impact sur la morphologie	En fonction de l'occupation du sol	Impact sur la morphologie
Taille de la fenêtre de corrélation	Petite	Moins fiable	Elevé et comprend des points isolés et des zones étendues Principalement dû à un fort changement de radiométrie (ombre, diachronisme)	Plutôt sur les faibles pentes	Faible sur les points isolés et les faibles pentes et fort sur les zones d'échec étendues	Elevé sur les textures aléatoires et sur les zones de changement de radiométrie (végétation telle qu'avec diachronisme)	Peut améliorer la qualité morphologique sur les lisières des zones boisées et sur la végétation située sur des faibles pentes
	Grande	Plus fiable	Faible Comprend principalement des zones étendues	Reparti sur les différentes pentes	Faible du fait que la plupart des points sont appariés mais fort sur les zones d'échec étendues	Moins sensible aux textures aléatoires Ne permet pas de valider la contrainte de seuil de corrélation fixé si le changement de radiométrie est fort	Fort dans les zones où la radiométrie a fortement changé (zones étendues)
Seuil de corrélation ou de courbure	Faible	Moins fiable	Faible	Reparti sur les différentes pentes	Dépend de l'étendue de la zone d'échec	Valide l'appariement de plus de points même sur les textures aléatoires et les changements de radiométrie	Faible sur les zones nues Fort sur les zones de textures aléatoires et de changement de radiométrie
	Elevée	Plus fiable	Elevé	Plutôt sur les faibles pentes	Faible sur les faibles pentes Dépend de l'étendue de la zone d'échec	Diminue le nombre d'appariements sur les zones de texture aléatoire et de changement de radiométrie	Fort sur les zones nues surtout celle situées sur les pentes fortes Faible sur les zones de textures aléatoires et de changement de radiométrie

tableau IX.1. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement sur le taux d'échec en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol.

Paramètre	Valeur	Appariement	Morphologie		
			Impact sur la morphologie	En fonction de la morphologie du terrain	En fonction de l'occupation du sol
Taille de la fenêtre de corrélation	Petite	Moins fiable	Microrelief, ligne de crête et de talweg conservés Fortement affectée par la taille de maille	Faible sur les fortes pentes (terrain rugueux) Fort sur les faibles pentes ayant différents types de couverture (bâtiments et végétations)	Faible sur les sols nus Fort sur les textures structurées et les zones de radiométrie très homogène et les zones de changement de radiométrie
	Grande	Plus fiable	Lisse les détails du terrain Peu changer la morphologie du terrain si elle est très grande Moins affectée par la taille de maille	Faible sur les faibles pentes Fort sur les fortes pentes	Fort sur les sols nus Faible sur les zones ayant différents types de couverture surtout celle de faibles pentes
Seuil de corrélation ou de courbure	Faible	Moins fiable	Dépend de la taille de la fenêtre de corrélation : Conserve le microrelief mais aussi le bruit avec une petite fenêtre Faible avec une grande fenêtre	Faible sur les fortes pentes et peut être fort sur les faibles pentes (dépend de l'occupation du sol)	Faible sur les sols nus Fort sur les textures structurées et les zones de radiométrie très homogène et les zones de changement de radiométrie
	Elevé	Plus fiable	Dépend de la taille de la fenêtre de corrélation : Lisse le microrelief mais aussi le bruit avec une petite fenêtre Faible avec une grande fenêtre	Fort surtout pour les fortes pentes Faibles pour les zones de faibles pentes	Peut être fort sur les sols nus Moins fort sur les zones ayant différents types de couverture surtout celles de faibles pentes
Taille de maille	Petite		Conserve les détails des formes du terrain	Faible sur les fortes pentes Dépend de l'erreur d'altitude sur les faibles pentes : Fort si l'erreur d'altitude est élevée et faible si l'inverse est vrai	Faible sur les sols nus Fort sur les sols non nus situés sur des faibles pentes
	Grande		Lisse les détails des formes du terrain	Fort sur les fortes pentes	Fort sur toutes les occupations de sols

tableau IX.2. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement et de la taille de maille sur la morphologie du MNT en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol : bilan des impacts.

Paramètre	Valeur	Morphologie locale			
		Faibles pentes		Fortes pentes	
		Occupation du sol			
		Sursol	Sol nu	Sursol	Sol nu
Taille de la fenêtre de corrélation	Petite	Impact fort	Impact modéré	Impact modéré	Impact modéré
	Grande	Impact modéré	Impact modéré	Impact modéré	Impact fort
Seuil de corrélation ou de courbure	Faible	Impact fort	Impact modéré	Impact modéré	Impact modéré
	Elevé	Impact modéré	Impact modéré	Impact fort	Impact fort
Taille de maille	Petite	Impact fort	Impact modéré	Impact modéré	Impact modéré
	Grande	Impact modéré	Impact modéré	Impact fort	Impact fort

Impact fort	Impact modéré	Impact faible

tableau IX.3. Tableau récapitulatif de l'impact des paramètres de l'appariement et de la taille de maille sur la morphologie du MNT en fonction de la morphologie du terrain et de son occupation du sol : vue synoptique.

D'après ces tableaux, les paramètres d'appariement présentent un impact important sur la morphologie et doivent être choisis avec soin lors de la production du MNT. Ils peuvent générer des erreurs aléatoires qui affectent la qualité des indices morphologiques locaux. Leur impact dépend de la morphologie du terrain modélisé et de son occupation du sol. Ainsi, pour avoir une meilleure représentation morphologique, ces paramètres doivent s'adapter à la morphologie du terrain et son occupation du sol. Par conséquent, la zone d'étude peut être découpée en différentes portions suivant

ces deux facteurs. Afin de détecter les différentes occupations du sol, nous proposons d'appliquer une classification non-supervisée d'une image du couple. Pour obtenir la pente du terrain à une certaine échelle, un premier MNT peut être produit avec le couple d'image en utilisant une grande fenêtre de corrélation afin de minimiser le bruit.

L'effet des paramètres de traitement des données RSO est différent. En effet, ces paramètres ont une influence négligeable sur la précision (partie aléatoire de l'erreur) d'altitude. Leur impact se manifeste plutôt par des erreurs de saut de phase. Cette influence est accidentelle et forte sur l'altitude mais son impact sur la pente est localisé sur la limite des zones d'erreurs de saut de phase.

IX.3 Choix des paramètres selon l'application

Le choix des paramètres peut être relié à l'application utilisant le MNT. En effet, chaque application utilise les indices de manière différente. Ainsi, les résultats finaux ne seront pas affectés de la même manière. Nous évaluons cet impact pour deux types d'étude : extraction du réseau hydrographique et détection des zones à risque de glissement du terrain.

L'impact sur l'hydrographie dépend de l'algorithme d'extraction du réseau. La plupart de ces algorithmes fournissent la direction du flux en fonction de la pente maximale. L'algorithme D8 qui permet l'écoulement vers les 8 directions voisines se base sur la trigonométrie pour calculer la pente maximale. Ainsi, les pentes sont calculées dans les 8 directions et la valeur maximale donne la direction de l'écoulement. L'algorithme D_{∞} se base sur la géométrie différentielle pour calculer la pente et l'aspect et donne la direction de l'écoulement entre 0 et 360°. La sensibilité de la direction du flux à une erreur d'altitude n'est pas très élevée avec l'algorithme D8. Par contre, cette sensibilité est plus grande avec l'algorithme D_{∞} pour la même erreur.

L'impact sur l'hydrographie dépend aussi de la morphologie et de l'occupation du sol. Ainsi, sur les faibles pentes, même une erreur négligeable de l'altitude, due à la présence de la végétation ou à une erreur d'appariement, peut affecter la pente maximale et causer un changement de la direction d'écoulement surtout avec l'algorithme D_{∞} . Par conséquent, une petite fenêtre de corrélation peut avoir un fort impact sur la direction de flux dans les zones où le sol n'est pas nu. Une grande fenêtre peut lisser les détails de la surface ce qui rend plus difficile la détection de la direction du flux. Ainsi, sur les faibles pentes, une petite fenêtre est recommandée pour les sols nus et une fenêtre plus grande pour les sols non nus. L'effet de cette même erreur d'altitude est moins important sur les fortes pentes et donc l'impact de ce paramètre est moins fort.

Le glissement de terrain est principalement dû à une instabilité de la pente du terrain. Cette instabilité est directement liée à la valeur de la pente du terrain et à sa courbure. En effet, un tel phénomène est fréquemment observé sur les fortes pentes et les surfaces convexes. Cette application exige une information sur la pente de bonne qualité. Sur un sol nu, une petite fenêtre de corrélation permet une

détection plus fiable des détails de formes du terrain et donc elle fournit une meilleure estimation du risque de glissement de terrain. De même, la pente et surtout la courbure sont sous-estimées et donc le risque aussi avec une grande fenêtre de corrélation et une grande taille de maille.

IX.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu l'importance de l'évaluation de la qualité morphologique d'un MNT. De plus, nous avons fait le bilan de l'impact des paramètres de production afin de formuler des recommandations quant aux choix de ces paramètres pour des applications qui exigent une représentation fidèle des formes du terrain.

Comme nous l'avons vu, la qualité des indices géomorphologiques dépend de la morphologie du terrain et de l'occupation du sol. De plus, certaines applications présentent plus de sensibilité à l'erreur des indices sur une morphologie particulière. D'autres se focalisent sur un type de morphologie du terrain. Ainsi, le choix des paramètres de production doit dépendre à la fois de l'application concernée, de la morphologie du terrain et de son occupation du sol afin de minimiser l'erreur des conclusions de l'application.

Conclusion de la troisième partie

Cette partie visait à étudier l'impact des différents paramètres de production sur l'altitude la pente et l'hydrographie et sur leur qualité. En effet, nous avons évalué l'impact des paramètres d'appariement des images optiques, de traitement des images RSO, des méthodes d'interpolation et de la taille de maille. Nous avons appliqué la méthode d'évaluation expliquée dans le chapitre IV.

Nous avons mis en évidence l'impact du paysage sur la qualité du MNT surtout celle de forme. De plus, nous avons démontré la pertinence de la méthode de propagation de l'erreur dans l'évaluation de la qualité de la pente et de l'aspect. Cette méthode est basée sur un modèle de variance de l'erreur d'altitude qui représente l'autocorrélation spatiale de cette erreur. Nous avons également pu dégager des pistes à approfondir pour définir de nouvelles méthodes d'évaluation interne de la qualité des formes : l'une est basée sur l'histogramme des pentes du MNT observé pour différentes tailles de maille, l'autre utilise l'autocorrélation spatiale de la pente et la troisième fournit un ordre de grandeur de l'erreur d'altitude à partir des écarts mesurés sur les cuvettes avant et après remplissage du MNT.

A l'exception des paramètres testés dans le traitement interférométrique des images RSO, les paramètres ont un impact non négligeable sur les indices morphologiques et hydrographiques et doivent être considérés lors de la production du MNT. De plus, l'influence d'un paramètre dépend des autres paramètres et son ampleur varie d'un paramètre à l'autre. Leur impact est aussi lié à la morphologie du terrain et à son occupation du sol. Ainsi, leur choix doit prendre en considération aussi bien ces facteurs que l'application envisagée afin d'aboutir aux meilleurs résultats.

Conclusion générale

L'industrie de la production des MNT a subi d'importants développements durant les dernières années suite à une demande croissante et au développement des techniques d'acquisition. Les applications utilisant les MNT sont devenues beaucoup plus importantes et plus exigeantes sur la qualité. Ainsi, le nombre d'études visant à évaluer la qualité de ces modèles a augmenté en réponse à cette exigence. La qualité d'un MNT peut se concevoir selon deux principales approches : qualité de position et qualité de forme. L'évaluation de la qualité de position, surtout celle de l'altitude, est pertinente pour les applications basées sur la position comme la production des orthophotos. Mais, elle n'est pas adaptée pour l'évaluation de la qualité des dérivées de l'altitude principalement utilisées dans les études basées sur la géomorphologie. En effet, elle néglige l'autocorrélation spatiale de l'erreur d'altitude or les dérivées d'altitude y sont sensibles. Ainsi, les critères de qualité ne sont pas les mêmes pour ces applications. Malgré cela, on trouve des applications exploitant la géomorphologie qui se basent toujours sur la qualité de l'altitude pour juger la pertinence d'un MNT dans leur étude.

Pour l'évaluation de la qualité de l'altitude, l'EMQ peut suffire. Par contre, pour évaluer la qualité des dérivées, il faut un modèle d'erreur comprenant l'erreur d'altitude avec son autocorrélation spatiale. Ainsi, les points de référence ne doivent pas être trop distants afin de pouvoir estimer cette autocorrélation à de faibles distances. Ceci n'est souvent pas respecté par les producteurs des MNT qui utilisent plutôt des points répartis sur tout le MNT. Dans le cas où ces données de référence ne sont pas disponibles, la validation interne peut être utilisée pour vérifier si les formes dans le MNT sont possibles. Cette validation consiste en une évaluation basée sur des propriétés connues des formes du terrain et des lois qui les régissent et peut être appliquée sur n'importe quel MNT. Elle nous a permis de découvrir des artefacts dus à la taille de la fenêtre de corrélation et cela en évaluant l'autocorrélation spatiale des pentes (chapitre VI).

Dans cette étude, nous avons évalué l'impact des paramètres de production sur la qualité géomorphologique du MNT. Les paramètres évalués sont ceux de l'appariement d'images optiques, du traitement interférométrique d'images RSO et de rééchantillonnage en fonction de la morphologie et de l'occupation du sol. L'étude montre que ces paramètres sont interdépendants et peuvent avoir des effets similaires.

Le premier facteur de qualité du MNT est le terrain lui-même, sa morphologie et son occupation du sol. Il a un impact non seulement sur la qualité de l'altitude, mais aussi sur la qualité des dérivées de l'altitude. En effet, l'erreur de l'altitude est plus élevée sur les fortes pentes là où l'erreur de la pente est moins élevée (dû au calcul de la pente en géométrie différentielle). Par contre, l'erreur de la pente est plus élevée sur les faibles pentes. Sur ces pentes, les objets du sursol peuvent générer de fortes pentes sur leur bord d'autant plus que la taille de la maille du MNT est petite.

Le deuxième facteur est la technique de production et ses paramètres. Nous avons étudié l'impact des paramètres de l'appariement stéréoscopique et du traitement interférométrique sur l'altitude et ses

dérivées. Nous avons observé un impact négligeable des paramètres d'appariement sur l'altitude et important sur les dérivées. Cet impact a montré une dépendance avec la morphologie du terrain et de l'occupation de sol. Ainsi, le choix de ces paramètres doit être effectué en prenant en considération ces deux facteurs. L'effet des paramètres du traitement interférométrique affecte plutôt l'altitude et se manifeste par des erreurs de saut de phase.

Le troisième facteur est le rééchantillonnage du semi de points obtenu par les différentes techniques pour obtenir une structure régulière. Les méthodes d'interpolation ont un impact sur la morphologie du modèle généré. En effet, si l'interpolation est lissante, les pentes et les courbures locales seront sous-estimées. L'impact de ces méthodes dépend aussi de la superficie de la zone à interpoler. Par exemple, si cette superficie était grande et de forme compacte, alors les points interpolés sont souvent loin d'un point d'appui et la forme du terrain risque d'être erronée. De plus, la valeur des indices morphologiques et de leur qualité dépend de la taille de maille. Une petite maille conserve les détails de forme du terrain et un grande tend à lisser ces détails. Ainsi, le choix de cette taille doit s'effectuer selon les besoins de l'application visée.

Une grande partie des utilisateurs achètent les données brutes et produisent les MNT eux-mêmes en utilisant les paramètres de production par défaut des logiciels de production et la plupart d'entre eux ont une connaissance limitée des méthodes de production du MNT. Comme nous l'avons vu, la plupart des paramètres de production affectent surtout la qualité des dérivées de l'altitude. Ainsi, un mauvais choix de ces paramètres peut affecter les résultats et par suite les conclusions d'une application basée sur les indices géomorphologiques.

Comme le montre notre étude, une influence notable est observée des paramètres de production sur les indices géomorphologiques. Cependant, ceci a été mis en évidence pour les données spécifiques utilisées dans cette expérience. Ce jeu de données est caractérisé par des valeurs particulières des paramètres d'acquisition tels que le rapport B/H et la base perpendiculaire, tout en étant considérés comme des paramètres par défaut. Comme cette étude s'est intéressée à étudier l'impact des paramètres de production et non pas ceux d'acquisition, nous nous sommes limités à deux couples d'images optiques et d'images RSO ayant des paramètres d'acquisition comparables.

Comme perspective, nous visons à approfondir l'étude de l'impact des méthodes d'interpolation sur les formes du terrain en fonction de la morphologie du terrain. Cet impact doit également être étudié en fonction de la taille et de la forme de la zone interpolée.

Comme nous avons vu dans le chapitre VII, l'erreur de saut de phase est à l'origine de l'erreur d'altitude dans les MNT produit par InSAR. L'étape de déroulement de phase comprend plusieurs paramètres qui peuvent limiter ces erreurs. L'étude de ces paramètres fait aussi partie de nos perspectives.

La méthode proposée de validation interne a montré un intérêt dans la détection des artéfacts sur le MNT. Le fait qu'on cherche à évaluer la qualité des formes et non pas de l'altitude nous a permis d'utiliser les propriétés et les lois qui régissent ces formes pour effectuer la validation. La pertinence de cette méthode a besoin d'être consolidée en utilisant d'autres types de données et sur d'autres types de relief.

Finalement, les algorithmes d'extraction des indices géomorphologiques ont aussi un impact sur la qualité de l'indice extrait. L'évaluation de cet impact en fonction de la morphologie du terrain a été entamée pendant la thèse mais n'a pas été achevée. Elle constitue aussi l'une de nos futures recherches.

Liste des articles publiés :

Polidori, L. et El Hage, M. Interprétation géomorphologique du théorème de Shannon. *Revue XYZ*. N°133, pp. 21-23, 4^e trimestre 2012.

El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G. et Polidori, L., 2012. Evaluation of elevation, slope and stream network quality of SPOT DEMs. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne, Australia, Volume I-2, pp. 63–67.

El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G. et Polidori, L., 2010. Impact of DEM reconstruction parameters on topographic indices. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Paris, France, volume XXXVIII, part 3B, pp. 40–44.

Liste des articles soumis :

El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G. et Polidori, L. Influence of image matching parameters on the geomorphological quality of SPOT DEMs. *Soumis à la revue International Journal of Geographic Information Science*.

Communications orales :

Polidori, L., El Hage, M., Simonetto, E. et Faour, G., 2012. Scale effects in the assessment of digital terrain models and slope maps. *Geotunis*, 26–30 Mars 2012, Tunis.

Bibliographie

- Abdallah, C., 2012. Assessment of erosion, mass movements, and flood risks in Lebanon. In: H. Kouyoumjian et M. Hamzé, ed. *Review and perspectives of environmental studies in Lebanon*. INCAL-EU/CNRS Lebanon, 225–246.
- Arnaud, M. et Emery, X., 2000. Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatique. Hermès Éditeur, France, Paris, Science Publications.
- Baillargeon, S. 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de fin d'études. Université Laval, Québec. (<http://www.theses.ulaval.ca/2005/22636/22636.pdf>).
- Barbillon, 2008. Interpolation et régression.
http://www.math.u-psud.fr/~ecdect/ecdect/infos/science_ac/PierreCyrill_science_ac.pdf.
- Bates, R.L et Jackson, J.A., 2005. Glossary of Geology. 5th edition. American Geological Institute, New York, 800 pp.
- Beyer, H., 2009. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS.
<http://www.spataleecology.com/htools/index.php>.
- Bignone, F., Umakawa, H., 2008. Assessment of ALOS Prism Digital Elevation Model Extraction over Japan. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, Vol. XXXVII, Part B1, pp. 1135–1138.
- Binh, T.Q. et Thuy, N.T., 2008. Assessment of the influence of interpolation techniques on the accuracy of digital elevation model. *VNU Journal of Science, Earth Sciences*, 24, 176–183.
- Bou Kheir, R., Cerdan, O. et Abdallah, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82, 347–359.
- Bou Kheir, R., 2007. Analyse satellitaire sous système d'information géographique appliquée à l'érosion hydrique des sols et à d'autres risques naturels (mouvements de terrain et incendies des forêts) – Exemples au Liban. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 (France), 93 pp. + annexes.
- Burrough, P. A. et McDonnell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), p. 190.

- Catani, F., Farina, P., Moretti, S., Nico, G. et Strozzi T. 2005. On the application of SAR interferometry to geomorphological studies: estimation of landform attributes and mass movements. *Geomorphology*, 66, 119–131.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguedois, S., Silvera, N. and Phachomphon, K., 2006. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77, 126–141.
- Charif, M., 1992. Optimum Sampling for Digital Terrain Modelling, *ISPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 29, Part B4, pp. 77-86.
- Charleux-Demargne, Julie, 2001. Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues des bassins versants. Thèse de Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne la Vallée, France.
- Chehata, N., 2005. Modélisation 3D de scènes urbaines à partir d'images satellitaires à très haute résolution. Thèse de doctorat de l'université Paris 5.
- Cuartero, A., Felicísimo A.M., Ariza, F.J., 2004. Accuracy of DEM generation from Terra-Aster stereo data. *IAPRS & SIS*, Vol. 35, Part B6, pp. 225-260.
- Cuartero, A., Felicísimo, A. M. et Ariza, F.J., 2005. Accuracy, reliability, and depuration of SPOT HRV and Terra ASTER digital elevation models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43 (2), 404–407.
- Donald, H, 2010. Spline Curves. <http://www.cs.clemson.edu/~dhouse/courses/405/notes/splines.pdf>
- Doris, 2008. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation, version v4.02. http://doris.tudelft.nl/software/doris_v4.02.pdf
- Durupt, M., Flamanc, D., Le Bris, A., Iovan, C. et Champion, N., 2006. Evaluation of the potential of Pleiades system for 3D city models production: building, vegetation and DTM extraction. In: *Proceedings of the ISPRS Commission I Symposium*.
- El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G. et Polidori, L., 2010. Impact of DEM reconstruction parameters on topographic indices. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Paris, France, vol. XXXVIII, part 3B, 40–44.
- El Hage, M., Faour, G. et Polidori, L., 2011. L'impact de l'altitude du niveau de la mer (2000-2100) sur le littoral libanais une approche par télédétection et cartographie diachronique. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, vol. 194, pp. 36–44.
- Erskine, R.H., Green, T.R., Ramirez, J.A. et MacDonald, L.H., 2007. Digital elevation accuracy and grid cell size: effects on estimated terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1371–1380.

- EUROSTAT, 2001. Manual of concepts on land cover and land use information systems. European Communities, Luxembourg, p 106.
- Evans, I.S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, In Chorley, R.J. (ed.): *Spatial Analysis in Geomorphology*, London: Methuen & Co., Ltd.: 17–90.
- Evans, G., Ramachandran, B., Zhang, Z., Bailey, G., Cheng, P. 2008a. An Accuracy Assessment of Cartosat-1 Stereo Image Data-Derived Digital Elevation Models: A Case Study of the Drum Mountains, Utah. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume 37, Part B1. Beijing, 2008.
- Evans, I.S., Hengl, T. et Gorsevski, P., 2008b. Applications in Geomorphology. In: T. Hengl and H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 497–525.
- Felicísimo, A.M., 1992. Digital Terrain Models and their Application to Environmental Sciences. Ph.D. Thesis, University of Oviedo, Spain, 235 p.
- Gao J., 1995, Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps. *ITC Journal*, 1: 18-22.
- Gao, J., 1997, Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale, *International Journal of Geographical Information Science*, 11(2): 199-212.
- Gaucherel, C., Salomon, L. et Labonne, J., 2011. Variable self-similar sinuosity properties within simulated river networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1313–1320.
- GeoView, 2005. Corrélation automatique. *GeoView user's manual*, version 6.4Δ6.
- Gooch, M., Chandler, J. et Stojic, M., 1999. Accuracy assessment of digital elevation models generated using the Erdas Imagine OrthoMAX digital photogrammetric system. *Photogrammetric Record*, 16 (93), 519–531.
- Graham, C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping. *Proceedings of the IEEE*. 62, 763-768.
- Gravelius, H., 1914. Grundrifi der gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde Compendium of Hydrology. *Goschen*, Berlin, Germany.
- Gruber, S. et Peckham, S., 2008. Land-Surface parameters and objects in hydrology. In: T. Hengl and H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 171–194.
- Guichard, H., Kirsner, D., Lestringand, G. et de Masson d'Autume, G., 1983. Utilisation photogrammétrique et cartographique de SPOT. *Semaines internationales de photogrammétrie*, Stuttgart, RFA, Septembre 1983.

- Hanssen, R. et Bamler R., 1999. Evaluation of interpolation kernels for SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (1): 318-321.
- Hashemian, S. M. , Abootalebi A. , Kianifar F., 2004. Accuracy Evaluation of Dem Generated From Spot 5 Hrs Imageries. *XXth ISPRS Congress, Proceedings of Commission I*, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey.
- Hebeler, F. et Purves R., 2009. The influence of elevation uncertainty on derivation of topographic indices. *Geomorphology*, 111(1–2), 4–16.
- Hengl, T., 2008. Ilwis help. <http://spatial-analyst.net/ILWIS/help.html>
- Hengl, T. et MacMillan, R.A., 2008. Geomorphometry. A key to landscape mapping and modelling. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 433–460.
- Hengl, T. et Evans, I.S., 2008. Mathematical and digital models of the land surface. In: T. Hengl and H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 31–63.
- Heuvelink, G.B.M., 1998. Error Propagation in Environmental Modelling with GIS. Taylor & Francis, London, UK.
- Heuvelink, G.B.M., 2002. Analysing Uncertainty Propagation in GIS: Why is it not that simple? In: G.M. Foody et P.M. Atkinson, ed. *Uncertainty in Remote Sensing and GIS*. John Wiley & Sons, West Sussex, England, 155–165.
- Hodgson, M.E., et Bresnahan, P., 2004. Accuracy of airborne lidar-derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70 (3), 331–339.
- Höhle, J. et Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, pp. 398–406.
- Holmes, K.W., Chadwick, O.A. et Kyriakidis, P.C., 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *Journal of Hydrology*, 233, 154–173.
- Hu, P., X. Liu, et H. Hu, 2009. Accuracy assessment of digital elevation models based on approximation theory. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 75 (1):49–56.
- Hugget, R. J., 2003. What is geomorphology? In: *Fundamentals of Geomorphology*. Routledge, London, New York, pp. 214–222.
- Hunter, G.J. et Goodchild, M.F., 1997. Modelling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. *Geographical Analysis*, 29 (1), 35–49.

- Hutchinson, M.F., 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: *Third International Symposium on Spatial Data Handling*. Columbus, OH. International Geographical Union, Sydney, pp. 117–133.
- Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211–232.
- Jarvis, A., Rubiano, J., Nelson, A., Farrow, A. and Mulligan, M., 2004. Practical Use of SRTM Data in the Tropics: Comparisons with Digital Elevation Models Generated from Cartographic Data. *Working Document vol. 198, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)*, Cali, Columbia.
- Kampes, B.M., Ramon, F. et Zbigniew P., 2003. Radar interferometry with public domain tools. In *Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03'*, Frascati, Italy, 1-5 Dec 2003, page 6 pp.
- Kienzle, S., 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8, 83–111.
- Kim, S.B., Kim, T., Park, W. et Lee, H.K., 1999. An optimal interpolation scheme for producing a DEM from the automated stereo-matching of full-scale SPOT images. *International Society of Photogrammetry and Surveying Joint Workshop*, Hanover, Germany.
- Kimerling, 2009. Mathematical Relationships among Map Scale, Raster Data Resolution, and Map Display Resolution.
http://blogs.esri.com/Support/blogs/mappingcenter/archive/2009/12/03/Mathematical-Relationships-among-Map-Scale_2C00_-Raster-Data-Resolution_2C00_-and-Map-Display-Resolution.aspx
- Krupnik, A., 2000. Accuracy assessment of automatically derived digital elevation models from SPOT images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, pp. 1017-1023.
- Lane, S.N., Richards, K.S. et Chandler, J.H., 1994. Applications of distributed sensitivity analysis to a model of turbulent open channel flow in a natural river channel. *Proceedings of the Royal Society, Series A*, 447 (1929), 49–63.
- Lane, S.N., Richards, K.S. et Chandler, J.H., 1998. *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*, 1, Chichester, 454 p.
- Lane, S.N., James, T.D. et Cowell, M.S., 2000. Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *Photogrammetric Record*, 16 (95), 793–821.
- Li Z., 1992. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. *Photogrammetric Record*, 14 (79): 113-128.

- Li, Z., Q. Zhu et C. Gold, 2005. Interpolation techniques for terrain surface modeling. In: *Digital Terrain Modeling Principles and Methodology*. CRC Press, New York, pp. 115-132.
- Litrico, 2006. Appariement stéréoscopique.
<http://www.cnam.fr/math/Stagiaires/CS/ArnaudLitrico/IMG/pdf/appariement.pdf>
- Liu, X., et Bian, L., 2008. Accuracy assessment of DEM slope algorithms related to spatial autocorrelation of DEM Errors. In: Q. Zhou, B. Lees and G.A. Tang, ed. *Advances in Digital Terrain Analysis, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, Springer, 307–322.
- MacMillan, R.A. et Shary, P.A., 2008. Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 227–254.
- Makarovic, B., 1973. Progressive sampling for DTMs. *ITC Journal*, 1973-4:397-416.
- McBratney, A.B., Santos M.L.M. et Minasny B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117(1–2): 3–52. doi: 10.1016/S0016-7061 (03) 00223-4.
- Meade, M., 2008. From the ground up: elevation for the nation.
http://www.pobonline.com/Articles/Column/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000296037
- Miller, H., 2004. Tobler’s First Law and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographers*. 94(2), pages 284–289.
- Mitas, L., Mitasova, H., 1999. Spatial interpolation. In: Longley, P., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, vol. 1. Wiley, pp. 481–492.
- Moore, Grayson et Ladson, 1991. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. *Hydrological processes* 5: 3-30. Copyright © 1991 John Wiley and Sons Ltd.
- Musy, A. et Higy, C., 2004. Hydrologie, une science de la Nature. Ed. *Pressens polytechniques et universitaires romandes, collection gérer l’environnement*. 314 p. ISBN 2-88074-546-2.
- Newby, P.R.T., 2011. Editorial: Accuracy, precision, extraction, citation and valediction. *Photogrammetric Record*, 26 (134): 149–153.
- Okada, K. et Saitoh, F., 2011. High-speed image matching using partial template consisting of multiple rectangular areas extracted by genetic algorithm. *Electronics and Communications in Japan*, 94 (10), 1–9.
- Oksanen, J., 2003. Tracing the Gross Errors of DEM - Visualisation Techniques for Preliminary Quality Analysis, *Proc. of the 21st International Cartographic Conference*, August 10–16, 2003, Durban, South Africa, CD-ROM, pp. 2410–2415.

- Oksanen, J. et Sarjakoski, T., 2005. Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences*, 31, 1015–1027.
- Olaya, 2008. Basic land-surface parameters. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 141–169.
- Pain, C.F., 2005. Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales. In: Zerger, A., Argent, R.M. (Eds.), *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, Melbourne, pp. 1430–1436.
- Paparoditis, N., 2001. Acquisition 3D de données issues d'images visibles. In: M. Kasser et Y. Egels, ed. *photogrammétrie numérique*, Lavoisier, 187–238.
- Papasaïka, H. et Baltsavias, E. P., 2009. Investigations on the relation of geomorphological parameters to DEM accuracy. In *Proc. Geomorphometry Conf.*, R. Purves, S. Gruber, R. Straumann, et T. Hengl, Eds. pp. 162–168.
- Pike, R.J., Evans, I. et Hengl, T., 2008. Geomorphometry: A Brief Guide. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 3–33.
- Pilaud, 2006. Sur le diagramme de Voronoi et la triangulation de Delaunay d'un ensemble de points dans un revêtement du plan euclidien.
<http://people.math.jussieu.fr/~vpilaud/recherche/voronoirev.pdf>
- Polidori, L., 1991. Validation de modèles numériques de terrain, application à la cartographie des risques géologiques. Thèse doctorat, Université de Paris VII, 87 p.
- Polidori, L. 1995. Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 139, pp. 10-19.
- Polidori, L. et Toutin T., 1998. Cartographie du relief par imagerie radar : l'état de l'art. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 152, pp. 12-23.
- Polidori, L. et El Hage, M., 2012. Interprétation géomorphologique du théorème de Shannon. *Revue XYZ*. N°133, pp. 21-23, 4^e trimestre 2012.
- Poon, J., Fraser, C., Zhang, C., Zhang, L., Gruen, A., 2005. Quality assessment of digital surface models generated from IKONOS imagery. *Photogrammetric Record* 20 (110), 162–171.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. et Bamler, R., 2003. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (4), 241–262.

- Rasemann, S., Schmidt, J., Schrott, L. et Dikau, R., 2004. Geomorphometry in mountain terrain. In: M.P. Bishop et J.F. Shroder, ed. *GIS & Mountain Geomorphology*. Springer, Berlin, 101–145.
- Renouard, L., 1992. Extraction automatique de MNT à différentes résolutions. *The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, Washington D. C., USA, Vol. 29/B4, pp. 886 – 893.
- Reuter, H.I., Hengl, T., Gessler, P. et Soille, P., 2008. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 87–120.
- Rodriguez-Gonzalez, A., Fernandez-Turiel, J. L., Perez-Torrado, F.J., Gimeno, D., Aulinas, M., 2010. Geomorphological reconstruction and morphometric modeling applied to past volcanism. *International Journal of Earth Sciences*, 99: 645-660.
- Schneider, B., 2001. On the uncertainty of local form of lines and surfaces. *Cartography and Geographic Information Science*, 28 (4), 237–247.
- Schwendel, A.C., Fuller, I.C. et Death, R.G., 2010. Assessing DEM interpolation methods for effective representation of upland stream morphology for rapid appraisal of bed stability. *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.1475.
- Shary, P.A., Sharaya, L.S. et Mitusov, A.V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 107, 1–32.
- Shary, P.A., Sharaya, L.S. et Mitusov, A.V., 2005. The problem of scalespecific and scale-free approaches in geomorphometry. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 28, 81–101.
- Shary, P.A., 2008. Models of topography. In: Q. Zhou, B. Lees et G.A. Tang, ed. *Advances in Digital Terrain Analysis, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, Springer, 29–57.
- Skidmore, A.K., 1989. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. *International Journal of Geographic Information Science*, 3, 323–334.
- Slacikova, J. et Potuckova, M., 2011. Evaluation of interpolation methods in InSAR DEM derivation from ERS tandem data. *31st EARSeL Symposium*.
- Smith, L.C., 2002. Emerging applications of interferometric synthetic aperture radar (SAR) in geomorphology and hydrology. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(3), 385–398.
- Snyder, M.W., 1983. A comparison of four techniques for the calculation of slope and aspect from digital terrain matrices. M.S. Thesis. University of Illinois, Urbana. 85 pp.
- Srinivasan, R., Engel, B.A., 1991. Effect of slope prediction methods on slope and erosion estimates. *Applied Engineering in Agriculture*, 7, 779– 783.

- Sukumar, N., Moran, B., Semenov, Y. et Belikov, B., 2001. Natural Neighbor Galerkin Methods. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50:1-27.
- Takagi, M., Asano, H. et Kikuchi, Y. 2002. Optimum Spatial Resolution of Digital Elevation Model for Topographical Analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Canada, vol XXXIV, part 4B, 442–446.
- Tang, Guoan, Zhao Mudan, Li Tianwen, Liu Yongmei, Zhang Ting, 2003. Simulation on slope uncertainty derived from DEMs at different resolution levels: a case study in the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 13: 387-394.
- Temme, A., Heuvelink, G., Schoorl, J. et Claessens, L., 2008. Geostatistical simulation and error propagation in geomorphometry. In: T. Hengl et H.I. Reuter, ed. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 121–140.
- Thompson, J.A., Bell, J.C. et Butler, C.A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, 100, 67–89.
- Tobler, W., 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geographer* 46(2) : 234-240.
- Toutin, T. et Gray, L., 2000. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55 (1), pp. 13–33.
- Toutin, T., 2002. Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (10), pp. 2241–2247.
- Toutin, T., 2006. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (3), pp. 170–181.
- Vaze, J. et Teng J., 2007. Impact of DEM Resolution on Topographic Indices and Hydrological Modelling Results. *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 2007.
- Vaze, J., Teng, J. et Spencer, G., 2010. Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software* , 25 (10), 1086–1098.
- Warren, S. D. , Hohmann, M. G. , Auerswald, K. et Mitasova, H. 2004. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. *Catena*, 58, pp. 215-233.
- Weibel, R., Heller, M., 1991. Digital terrain modelling. In: Maguire, D.J., Goodchild, M.F., Rhind, D.W. (Eds.), *Geographical Information Systems*, vol. 1. Longman, London, pp. 269–297.

- Weng, Q., 2002. Quantifying uncertainty of digital elevation models derived from topographic maps. *Advances in Spatial Data Handling* (D. Richardson et P. van Oosterom, editors). Springer, New York, pages 403-418.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), 2000. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York, 303 pp.
- Wise, S.M., 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, 14 (11–12), 1909–1929.
- Wu, S., Li, J. et Huang, G.H., 2007. Modeling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation, *Environmental Modelling & Software*, 22, pp. 1250–1260.
- Zhou, Q. et Liu, X., 2004a. Error analysis on grid-based slope and aspect algorithms. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (8), 957–962.
- Zhou, Q. et Liu, X., 2004b. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. *Computers & Geosciences*, 30, 369–378.