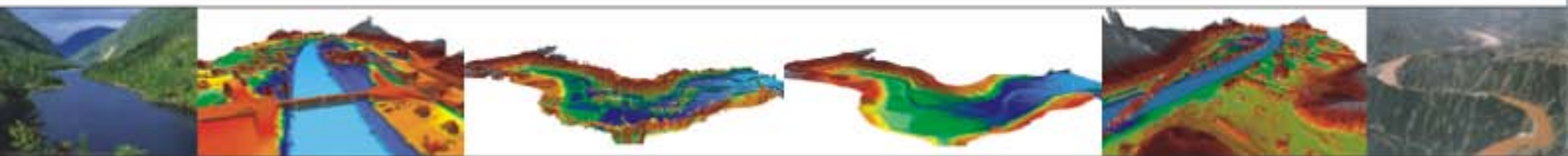




Développement d'une procédure automatisée de segmentation de données LIDAR appliquée à la modélisation hydrodynamique



Julien ERNST

Licencié en Sciences Géographiques
option Géomatique et Géométrie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention
du Diplôme d'Études Approfondies en Sciences**

Septembre 2007

Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques

Département ArGEnCo  - Secteur MS'F 





Université de Liège

Faculté des Sciences

Année académique 2006-2007

Mémoire présenté par

Julien Ernst

en vue de l'obtention du Diplôme

d'Études Approfondies en Sciences

Développement d'une procédure automatisée de segmentation de données LIDAR appliquée à la modélisation hydrodynamique

Ce travail de DEA s'inscrit dans une stratégie de préparation à de futures recherches doctorales. Dans ce cadre, nous veillerons à soigner particulièrement l'état de l'art afin de le rendre le plus exhaustif possible dans les différents sujets ayant trait aux données LIDAR et à leur segmentation. Celui-ci pourra, par la suite, nous servir de base de travail intéressante pour nos recherches ultérieures.

Par ce travail, nous tenterons d'apporter une autre vision du traitement des modèles topographiques indispensables à toute modélisation hydrodynamique. Dans ce mémoire, outre la section consacrée à l'état de l'art, nous mettrons au point une méthodologie de segmentation des données LIDAR (*Light Detection And Ranging*) visant à isoler les zones boisées présentes dans les MNS (Modèle Numérique de Surface) initiaux. Ensuite nous permettrons à l'utilisateur d'interpoler les valeurs d'altitudes sous ces zones isolées, et ainsi reconstruire un modèle topographique pertinent à une simulation hydrodynamique.

Pour mener à bien nos objectifs, notre travail bénéficie d'une collaboration innovante et constructive entre les unités de Géomatique (Professeur Roland Billen) et d'Hydraulique Appliquée et Constructions Hydrauliques (Professeur Michel Pirotton) de l'Université de Liège. Chacune met ses compétences et son expertise au service de ce projet pour pouvoir ainsi acquérir une vision globale du problème posé.

Remerciements

Nous voici arrivés à la fin de ce mémoire de DEA... Il est grand temps de penser à vous remercier, vous tous qui m'avez aidé. Mes remerciements vont tout spécialement,

À mes promoteurs, messieurs les Professeurs Michel Pirotton et Roland Billen pour leur soutien et leurs conseils judicieux qu'ils m'ont prodigués tout au long de l'exécution de ce travail,

À monsieur Pierre Archambeau pour ces nombreuses indications qui m'ont permis de trouver la bonne marche à suivre dès le début de mes recherches,

À monsieur François Laplanche pour avoir accepté de faire partie du jury de ce DEA,

Également à toute l'équipe du laboratoire d'Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques - HACH de l'Université de Liège pour leur soutien et leurs conseils durant cette année de travail à leurs cotés,

Nous tenons aussi à remercier l'Institut Géographique National ainsi que le Ministère de l'Équipement et des Transports pour nous avoir autorisés à utiliser leurs données dans le cadre de ce projet.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets si nous ne pensions pas à nos proches, mes parents, mes sœurs, pour leur soutien et pour avoir relu ce travail. Et pour terminer, un merci tout particulier à Mélanie pour son soutien, sa patience et surtout ses prouesses graphiques.

À tous, merci.

Table des matières

Section I : Introduction	11
I.1 Préambule	11
I.2 Données et contexte	12
I.2.1 Introduction	12
I.2.2 Projet appliqué à l'hydrodynamique	12
I.2.2.1 La suite logicielle WOLF	12
I.2.2.2 Type de données requises	13
I.2.3 La solution LIDAR	14
I.2.3.1 Le LIDAR	14
I.2.3.2 Ses avantages	15
Section II : État de l'art	17
II.1 Introduction	17
II.2 Acquisition LIDAR	17
II.2.1 Généralités	17
II.2.2 Altimétrie LIDAR aéroportée	19
II.2.2.1 Principe	19
II.2.2.2 Les moyens techniques de mesure	20
II.2.2.3 Le mode multi-échocs	23
II.2.2.4 Précisions	25
II.3 Segmentation	27
II.3.1 Segmentation des données LIDAR	27
II.3.1.1 Analyse des gradients	27
II.3.1.2 Classification supervisée	32
II.3.1.3 Analyse complète du problème	34
II.3.2 Segmentation par une approche multi sources	37
II.3.2.1 Classification supervisée	37
II.3.2.2 Analyse complète du problème	39
II.4 Vectorisation	40
II.4.1 Introduction	40
II.4.2 Identification des directions dominantes	40
II.4.2.1 Description de la méthode	40
II.4.2.2 Critique	41
II.4.3 Détection des primitives planes	41
II.4.3.1 Description de la méthode	41
II.4.3.2 Critique	43
II.4.4 Complémentarité des deux méthodes	43
II.4.5 Vectorisation de réseaux	43
Section III : Méthode actuelle de nettoyage des données	45
III.1 Introduction	45
III.2 Détection	46
III.2.1 Introduction	46
III.2.2 La palette de couleurs	46
III.2.3 Données complémentaires	47
III.3 Élimination	48
III.3.1 Interpolation entre deux points	49
III.3.2 Interpolation	51
III.4 Application aux zones inondables	53
Section IV : Automatisation du traitement	55

IV.1	Introduction.....	55
IV.2	Segmentation-Classification.....	56
IV.2.1	Introduction	56
IV.2.2	Données disponibles	56
IV.2.2.1	Première segmentation	57
IV.2.2.2	Première classification	60
IV.2.2.3	Seconde segmentation	60
IV.2.2.4	Seconde classification	61
IV.2.2.5	Généralisation du résultat	61
IV.3	Interpolation.....	62
IV.3.1	Préambule.....	62
IV.3.2	Première sélection des méthodes.....	63
IV.3.2.1	Introduction	63
IV.3.2.2	Sélection	63
IV.3.2.3	Rappels théoriques.....	65
IV.3.3	Établissement d'une clé de sélection	68
IV.3.3.1	Introduction	68
IV.3.3.2	Choix de la zone de test.....	68
IV.3.3.3	Méthodologie de test	69
IV.3.3.4	Différentes configurations.....	75
IV.3.3.5	Autres paramètres testés	75
IV.3.4	Mise en œuvre du test	77
IV.3.4.1	Technique	77
IV.3.4.2	Utilisation du Scripter	77
IV.3.5	Résultats	78
IV.3.5.1	Configuration de base.....	78
IV.3.5.2	Configuration supplémentaire – sans point bas.....	79
IV.3.5.3	Configuration supplémentaire – zone oblique	80
IV.3.5.4	Configuration supplémentaire – extension importante.....	80
IV.3.5.5	Autres paramètres testés	81
IV.3.6	Conclusions	82
Section V : Implémentation Visual Basic 6.....		83
V.1	Philosophie	83
V.2	Module 1 : chargement des données	83
V.2.1	Principe	83
V.2.2	Interfaçage.....	84
V.2.3	Codage	85
V.3	Module 2 : segmentation Sol – Sur Sol	85
V.3.1	Principe	85
V.3.2	Interfaçage.....	86
V.3.3	Codage	87
V.4	Module 3 : segmentation SSA – SSN.....	87
V.4.1	Principe	87
V.4.2	Interfaçage.....	87
V.4.3	Codage	88
V.5	Module 4 : généralisation	88
V.5.1	Principe	88
V.5.2	Interfaçage.....	89
V.5.3	Codage	89
V.6	Module 5 : interpolation	89
V.6.1	Principe	89
V.6.2	Interfaçage.....	90
V.6.3	Codage	91
V.7	Intégration dans la suite logicielle Wolf.....	92
V.7.1	Introduction	92

V.7.2 Aspects techniques	93
Section VI : Validations et applications	95
VI.1 Validations	95
VI.1.1 Introduction.....	95
VI.1.2 Comparaison avec la méthode « manuelle »	95
VI.1.2.1 Introduction.....	95
VI.1.2.2 Données utilisées	96
VI.1.2.3 Analyse visuelle préliminaire	97
VI.1.2.4 Analyse des résultats numériques	99
VI.1.2.5 Comparaison des interpolations	101
VI.1.3 Comparaison avec des mesures de terrain	102
VI.2 Applications	103
VI.2.1 Introduction.....	103
VI.2.2 Le barrage d'Eupen.....	103
VI.2.3 L'eau Blanche	105
VI.2.3.1 Procédure.....	105
VI.2.3.2 Résultats.....	105
Section VII : Conclusions	107
VII.1 Conclusions.....	107
VII.2 Perspectives	108
Bibliographie	109
Annexes	113
Annexe 1 : Photos de situation	113
Annexe 2 : segmentation SOL-SSOL	115
Annexe 3 : segmentation SSA-SSN	119
Annexe 4 : généralisation.....	122

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme des modules de calcul de la suite logicielle WOLF.	13
Figure 2 : Illustration de la méthodologie d'un levé LIDAR (Source : Site Internet de l'USGS).	15
Figure 3 : Le spectre électromagnétique et les longueurs d'ondes associées (Source : http://www.seed.slb.com/fr/scictr/watch/fullerenes/spectro.htm).	18
Figure 4 : Principe de fonctionnement des mesures LIDAR (Source : Wikipédia). .	19
Figure 5 : Configuration des points mesurés obtenue par l'utilisation des quatre moyens techniques de mesures (Source : BRETAR 2006).....	21
Figure 6 : Le laser LMS-Q560 de chez REIGL et son principe de fonctionnement (Source : documentation technique du LMS-Q560 - url : http://www.reigl.com/airborne_scanners/lms_q560_/datasheet_lmsq560.pdf)	22
Figure 7 : Principe de fonctionnement du laser FalconII de chez TopoSys (Source : documentation technique du FalconII – url : http://www.toposys.com).	22
Figure 8 : Schématisation de la méthode de scan “swing mode” (Source : documentation technique de chez TopoSys– url : http://www.toposys.com).	23
Figure 9 : a) Schématisation du signal multi-écho réfléchi. b) Exemple de signaux réfléchi lors du survol de couvert végétal. (Source : Ingenieur- Gesellschaft für Interfaces mbH – IGI)	24
Figure 10 : Représentation du premier écho a) et du second écho b) laser (Situation : Bassin de l'Ourthe – Chanxhe).	25
Figure 11 : Pentes et orientation d'un pixel (Source : DONNAY, 2004).....	28
Figure 12 : Représentation des altitudes du second écho de la zone d'expérimentation (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).....	29
Figure 13 : Schématisation d'une différence entre les deux échos laser pouvant apparaître en bordure d'une habitation.....	30
Figure 14 : Visualisation des résultats de la première étape de segmentation (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).....	30
Figure 15 : Visualisation étape de la segmentation et du résultat final obtenu (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).....	31
Figure 16 : Processus de traitement pour la détection des bâtiments d'une part et des arbres d'autre part (Source : AREFI & al., 2003).....	33
Figure 17 : Classification des bâtiments a) et filtrage morphologique b), classification des arbres c) et filtrage morphologique d) (Source : AREFI & al., 2003).	34
Figure 18 : Procédure de filtrage des données LIDAR (Source : SITHOLE, 2005)..	35
Figure 19 : Schématisation de la segmentation d'un nuage de points. Les données sont analysées selon trois profils différents (Source : SITHOLE, 2005).	36
Figure 20 : Exemple de segmentation de profils, par la méthode de « crust curve » (Source : SITHOLE, 2005).....	37
Figure 21 : Données externes utilisées dans la classification supervisée développée par CHARANIYA & al. (2004) (Sources : CHARANIYA & al. 2004).	38

Figure 22 : Étapes du processus d'extraction des emprunts vectorielles des bâtiments par la méthode des directions dominantes (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).....	41
Figure 23 : Régularisation du MNT par détection des primitives planes (Source : BRETAR, 2006).....	43
Figure 24 : Classification implicite des éléments anthropiques et de la végétation. (Capture d'écran WOLF 2D).....	47
Figure 25 : Superposition de données complémentaires comme outil d'aide à la décision. (Capture d'écran WOLF 2D).....	48
Figure 26 : Subdivision des zones boisées à interpolation linéaire entre deux points (résolution du maillage 1 mètre). (Capture d'écran WOLF 2D).	50
Figure 27 : Exemple de zones boisées pour laquelle le travail de division par l'opérateur devient plus laborieux. (Capture d'écran WOLF 2D).....	51
Figure 28 : Processus d'interpolation d'une zone sélectionnée.	52
Figure 29 : Interpolation au plus proche voisin (résolution du maillage 1 mètre). (Capture d'écran WOLF 2D).....	53
Figure 30 : schéma de parcours des mailles de la matrice des hauteurs selon les différents profils.	58
Figure 31 : Vue en coupe schématique de la segmentation d'un profil. Les mailles « Sol » sont représentées en brun et les mailles « Sur Sol » en vert. ..	59
Figure 32 : Analyse des méthodes d'interpolation de Surfer 8. En vert, les méthodes retenues et en rouge, celles rejetées (Source : YANG C-S & al., 2004).	64
Figure 33 : interpolation dans un réseau irrégulier de triangles (Source : Donnay, 2004).	67
Figure 34 : Plan de situation (Sources : données Top10r – IGN).....	69
Figure 35 : Masquages des zones de test à interpoler.	70
Figure 36 : Outil de conversion de format.	71
Figure 37 : Visualisations du résultat des traitements dans le logiciel IDRISI Kilimanjaro.	72
Figure 38 : Extraction des statistiques d'une image Idrisi. Exemple de l'expérimentation effectuée avec le Krigeage.	73
Figure 39 : Organigramme du processus conduisant au calcul des statistiques des méthodes d'interpolation.	74
Figure 40 : Visualisations des 3 cas tests supplémentaires a) b) c).	75
Figure 41 : Extrait d'un fichier .bln et visualisation des <i>breaklines</i> avant l'interpolation (orange).	76
Figure 42 : Module de chargement des données et choix d'un répertoire de travail.	84
Figure 43 : Sélection interactive des fichiers de données.....	85
Figure 44 : Module de segmentation (SOL – SUR).....	86
Figure 45 : Visualisation du résultat de segmentation utile pour le choix de la valeur seuil de la somme.....	86
Figure 46 : Deuxième module de segmentation (SSA - SSN).	88
Figure 47 : Module de généralisation du résultat des deux segmentations successives.....	89
Figure 48 : Module de paramétrage de l'interpolation Surfer 8.	90
Figure 49 : Visualisation tridimensionnelle interactive du premier et du second écho laser ainsi que du résultat de l'interpolation.....	91
Figure 50 : Plan de Situation (Sources : données Top10r – IGN).	96

Figure 51 : Données utilisées pour la validation de notre méthodologie. a) écho 1 b) écho 2.	97
Figure 52 : Résultat du traitement avec l'application développée. a) interpolation avec la méthode de triangulation, b) interpolation avec le krigeage, c) méthode manuelle.	98
Figure 53 : Comparaison de la méthode d'élimination automatisée a) et manuelle b).	99
Figure 54 : Visualisation des différentiels calculés. a) triangulation vs manuelle, b) krigeage vs manuelle.....	100
Figure 55 : Différence entre l'interpolation des altitudes sous un groupe d'arbres, manuellement ou avec le krigeage (échelle comprise entre -0.9 - et 0.1).	102
Figure 56 : Démonstration de la rapidité et de l'efficacité du traitement automatisé des données LIDAR. Second écho laser a), topographie traitée b). ...	104

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des facteurs influençant la précision des levées LIDAR..	25
Tableau 2 : Palette de couleur WOLF recommandée pour le travail topographique.	46
Tableau 3 : Comparatif des paramètres statistiques et du temps de calcul obtenus lors de l'expérimentation (Source : YANG C-S & al., 2004).....	65
Tableau 4 : Résultats des interpolations dans le cas test avec points bas.	79
Tableau 5 : Résultats des interpolations dans le cas test sans points bas.	79
Tableau 6 : Résultats des interpolations dans le cas test oblique.	80
Tableau 7 : Résultats des interpolations dans le cas test zones carrée.....	81
Tableau 8 : Résultats des interpolations dans le cas test autres test.....	81
Tableau 9 : Paramètres de la segmentation de la zone de validation – Chanxhe, Vallée de l'Ourthe.	97
Tableau 10 : Validation de la segmentation automatique par l'interpolation par une comparaison avec la méthode manuelle.	100
Tableau 11 : Paramètres de la segmentation du nettoyage des zones boisées au proche aval du barrage d'Eupen.	104

Section I : *Introduction*

1.1 Préambule

Dans le contexte très actuel de l'évolution climatique, un des défis majeurs du XXI^e siècle est la gestion des ressources hydriques : le préalable à tout outil hydraulique performant passe par une donnée spatialisée de première qualité. C'est dans ce cadre qu'est proposé ce projet en Géomatique s'appuyant sur une expertise en hydraulique dans la perspective d'améliorer la gestion de tout risque lié aux écoulements de surfaces stationnaires ou transitoires.

Dès lors, le projet bénéficie de la collaboration innovante et constructive entre les unités de Géomatique et d'Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques - HACH de l'Université de Liège. Toutes deux sont désireuses d'élargir leur collaboration scientifique en apportant chacune leur contribution complémentaire dans ce projet interdisciplinaire inédit.

Enfin, ce projet doit être considéré comme un préalable intéressant dans l'optique de futures recherches doctorales. Il constituera une base de travail, un état de l'art, sur lesquelles nous pourrons nous appuyer pour entamer des recherches plus poussées dans le domaine de l'extraction de données géographiques, idéalement vectorielles, à partir de données ponctuelles tridimensionnelles LIDAR.

1.2 Données et contexte

1.2.1 Introduction

En 2001, le gouvernement wallon arrête la méthodologie applicable à la détermination des zones inondables en Région wallonne conduisant entre autre à la réalisation de la carte aléa inondation. Une des techniques utilisées pour réaliser cette cartographie est la simulation hydrodynamique quasi tridimensionnelle de plus de 800 kilomètres de rivière. Le laboratoire d'Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques (Université de Liège), développeur et dépositaire de modèles numériques applicables dans ce genre d'application s'est vu confier cette tâche.

Depuis quelques années, la Région wallonne acquiert un modèle numérique de terrain par interférométrie laser aéroportée (ou LIDAR pour *Light Detection And Ranging*). Ce type de données est constitué d'un ensemble de points de topographie géoréférencés dans un repère tridimensionnel. L'échantillonnage de ce phénomène continu qu'est l'orographie permet ensuite de le discrétiser en un maillage de référence à 1 mètre de résolution. Cependant, la méthode laser aéroportée ne permet pas de traverser la surface de l'eau ou encore la végétation dense. C'est ici que notre projet intervient pour offrir une interface d'identification et d'élimination semi-automatisée des zones boisées.

Afin de garder la cohérence entre notre travail et ce projet, nous nous efforcerons d'exploiter exclusivement les données de base dont nous disposons pour mener à bien nos recherches. Notre méthodologie sera donc applicable pour toutes données LIDAR de la région wallonne ou toutes autres données altimétriques de surface discrétisées.

1.2.2 Projet appliqué à l'hydrodynamique

1.2.2.1 La suite logicielle WOLF

Depuis plus de dix ans, les travaux de recherches dans l'unité d'Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques ont mené à l'élaboration d'outils de modélisation de toute la filière des écoulements de surface, de la phase hydrologique de parcours de la goutte d'eau qui tombe à la surface du sol jusqu'aux écoulements quasi tridimensionnels dans un réseau hydrographique. La filière logicielle WOLF, véritable environnement de travail totalement développée au sein du HACH (ARCHAMBEAU, 2006), s'est ainsi imposée au niveau national et international comme véritable outil de prédiction des aléas hydrodynamiques mais également comme outil d'optimisation de la gestion de tout ouvrage hydraulique de stockage et de régulation, notamment grâce à l'organisation modulaire des codes (phases hydrologique et hydrodynamique, transport de constituants, lois de comportement d'ouvrages, calage objectif de problèmes inverses) (Figure 1).

La suite WOLF tend à modéliser le cycle de l'eau dans sa globalité. En commençant par la modélisation du ruissellement hydrologique sur le bassin versant (WOLF HYDRO) jusqu'à la propagation d'ondes de rupture de barrage en topographie réelle érodable à l'aide de modèle quasi 3D intégré sur la hauteur (WOLF 2D) en passant par la modélisation de réseaux de rivières importants par une approche unidimensionnelle (WOLF 1D). Chacun de ces modules peut, en outre, être piloté par un logiciel d'optimisation de paramètres par algorithmes génétiques (WOLF AG) ou bien par d'autres modules spécifiques implémentant des équations complémentaires de transport (eau-polluant, eau-air, eau solide, turbulence).

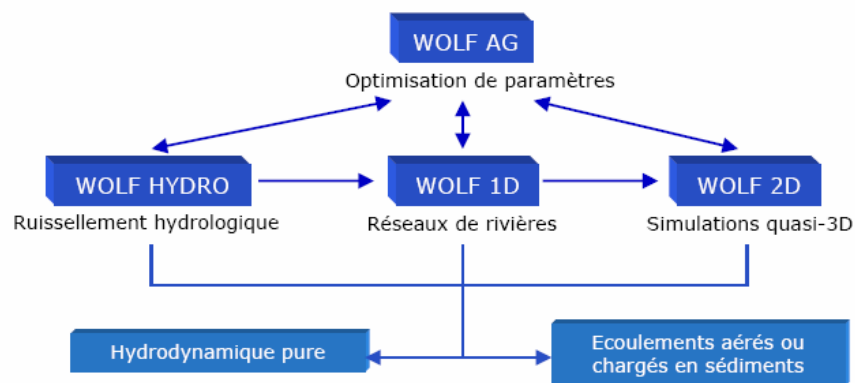


Figure 1 : Organigramme des modules de calcul de la suite logicielle WOLF.

Les simulations engendrées par la suite logicielle WOLF sont basées sur des modèles numériques discrétisés de la topographie. Ces modèles proviennent d'origines diverses et variées, mais conditionnent le bon déroulement et le résultat final de toute simulation, qu'elle soit hydrologique, hydrodynamique ou autre. Leur importance est donc capitale, au même titre que la modélisation proprement dite.

Si on s'intéresse plus particulièrement aux simulations de cours d'eau nécessitant l'utilisation de données à grande échelle et d'extensions spatiales importantes, nous pouvons imaginer l'importance de l'utilisation de données spécifiques combinant les qualités souvent antagonistes de haute précision géométrique et de rapidité d'acquisition et de traitement.

1.2.2.2 Type de données requises

La qualité des simulations hydrodynamiques engendrées par les modèles qui viennent d'être exposés est directement fonction de la qualité géométrique et sémantique des données géographiques qui y sont introduites. Les données relatives au relief du sol (représentées au travers de Modèles Numériques de Terrain – **MNT**) sont distinguées de

celles relatives aux structures anthropiques ou naturelles (Modèles Numériques de Surface – **MNS**) idéalement représentées par des objets vectoriels 2D ou 3D.

L'obtention de ces données a fait l'objet de recherches, de développements et de productions depuis des décennies. La topographie, la photogrammétrie aérienne et plus récemment la photogrammétrie satellitaire, fournissent des données à grande échelle permettant d'alimenter les systèmes de simulation. Un des problèmes majeurs inhérents à l'utilisation de ce type de données est la relation existant entre la précision et la résolution géométrique des données d'une part et la vitesse d'acquisition et de production d'autre part : des modèles moins précis (exemple de la photogrammétrie satellitaire) pouvant être générés relativement rapidement et inversement des modèles de haute précision (levés topographiques) nécessitent une charge de travail excessivement importante. Ceci pose un problème en vue de réaliser des simulations hydrodynamiques fines sur des zones étendues ou bien d'assurer une haute précision temporelle des données (problématique de la mise à jour des données géographiques).

1.2.3 La solution LIDAR

1.2.3.1 Le LIDAR

Le LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) est un système actif de télédétection aéroporté basé sur l'analyse de signaux lumineux rétrodiffusés. L'acronyme LIDAR a été choisi pour son analogie à la technique de télédétection mieux connue, le RADAR (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging). Notons que certains auteurs le désignent par une autre abréviation : ALS pour *Airborn Laser Scanning*. Nous détaillerons plus en détail le fonctionnement du LIDAR dans la suite de notre travail (*cf.* II.1).

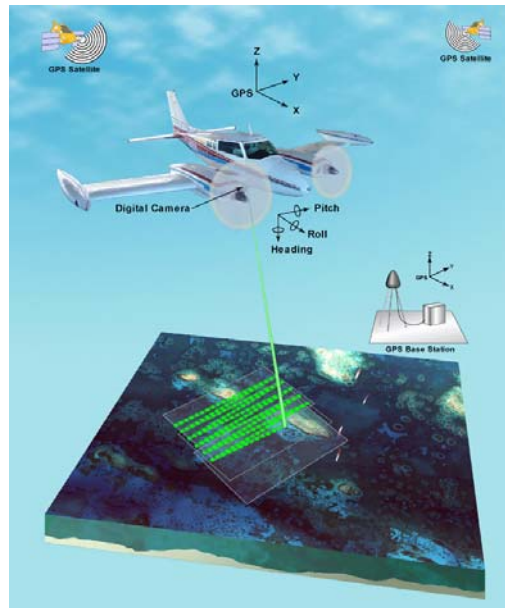


Figure 2 : Illustration de la méthodologie d'un levé LIDAR (Source : Site Internet de l'USGS).

1.2.3.2 Ses avantages

Comme pour beaucoup d'autres spécialistes de la modélisation des événements hydrodynamiques (BATES & al., 2002), le choix de l'utilisation de la technique de télédétection active LIDAR pour l'obtention de données de base à une simulation hydrodynamique s'impose de plus en plus comme étant une référence. Ces avantages (*cf.* infra) en font une technique idéale tant au niveau de la précision géométrique que celui de la flexibilité d'obtention des données.

Le LIDAR n'offre cependant qu'une solution partielle au problème évoqué : une haute précision et résolution géométrique et une grande vitesse d'acquisition. Par contre, le problème de la modélisation, à savoir le « nettoyage » des données, reste une difficulté majeure et nécessite à l'heure actuelle d'énormes ressources (intervention d'opérateurs humains). Une partie de la recherche se concentre depuis quelques années sur le problème de la segmentation automatique des données LIDAR (BRETAR, 2006 et SITHOLE, 2005). À l'heure actuelle, aucune solution optimale n'a pu être développée. Par ailleurs, pour une modélisation hydraulique, la seule information précédente est lacunaire puisqu'elle ne permet pas la génération d'un modèle topographique sous le niveau de la surface libre en rivières.

Section II : État de l'art

II.1 Introduction

Le premier aspect abordé dans notre état de l'art sera bien entendu consacré aux mesures par système LIDAR. Après avoir décrit le fonctionnement et la mise en place d'un tel système, nous nous attacherons à décrire les différentes voies proposées dans la littérature permettant la segmentation et la classification de ces données.

Ce second aspect est scindé en trois chapitres. Tout d'abord, nous traiterons des méthodes se basant exclusivement sur des critères morphologiques extraits du nuage de points tridimensionnels LIDAR (analyse de gradients,...). Ensuite, nous aborderons le problème sous l'angle d'une analyse multi-sources, par l'utilisation de données externes (photos aérienne, image satellitaire VHR,...). Et pour terminer cet état de l'art, nous avons choisi d'aborder le thème de l'extraction d'informations géographiques vectorielles à partir de données LIDAR (identification des directions dominantes, ajustement de plans).

Pour rappel, le terme *segmentation* constitue le fait de diviser l'ensemble de l'information en différents sous-ensembles en se basant sur un ou plusieurs critères tandis que la *classification* est le fait de déterminer à quel type d'objet appartiennent ces sous-ensembles.

II.2 Acquisition LIDAR

II.2.1 Généralités

Le LIDAR est un système d'acquisition de données actif par opposition aux systèmes d'acquisition passifs. C'est-à-dire qu'il émet un signal et en analyse la composante

réfléchi vers la source. Cette technologie est exploitée dans de nombreux domaines scientifiques. Parmi eux, nous pouvons citer la météorologie, l'analyse de l'atmosphère et de ses constituants, mais aussi pour l'acquisition de données topographiques (levé de scènes urbaines (ERNST, 2006 et LAPLANCHE, 2006), altimétrie aéroportée,...)

Dans le cadre de ce dernier domaine d'application, le fonctionnement du LIDAR (*Light Detection And Ranging*) est analogue à celui du RADAR (*Radio Detection And Ranging*), un autre système d'acquisition de données actif. Néanmoins, nous pouvons différencier ces deux méthodes par deux caractéristiques principales :

- Le domaine spectral exploité par le LIDAR se situe entre l'ultraviolet et l'infrarouge en incluant le visible (longueur d'ondes comprises entre 10 nm ($\nu \approx 3.10^7\text{ GHz}$) et $300\text{ }\mu\text{m}$ ($\nu \approx 1.10^3\text{ GHz}$), tandis que le RADAR utilise des ondes de fréquences bien inférieures. Les longueurs d'ondes correspondantes sont en général supérieures à quelques millimètres ($\nu \approx 100\text{ GHz}$) et allant parfois jusqu'à parfois 100 mètres ($\nu \approx 30\text{ MHz}$) (Figure 3).
- Outre la gamme d'ondes utilisées par les deux techniques, le LIDAR envoie un signal laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) et le RADAR un faisceau électromagnétique classique non polarisé.

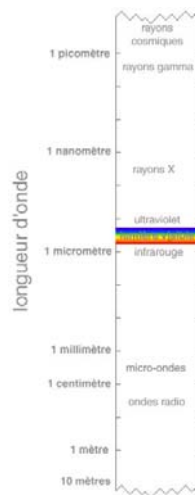


Figure 3 : Le spectre électromagnétique et les longueurs d'ondes associées
(Source : <http://www.seed.slb.com/fr/scictr/watch/fullerenes/spectro.htm>).

Techniquement, tout LIDAR se compose d'un système laser (organe émetteur) et d'un système d'observation, un télescope (organe récepteur). Le laser envoie une onde lumineuse vers une cible (le sol en altimétrie aéroportée). Lorsque celle-ci intercepte un obstacle, une partie est réfléchi et captée par le télescope. Enfin, le signal reçu est traité et analysé par un organe de traitement (Figure 4).

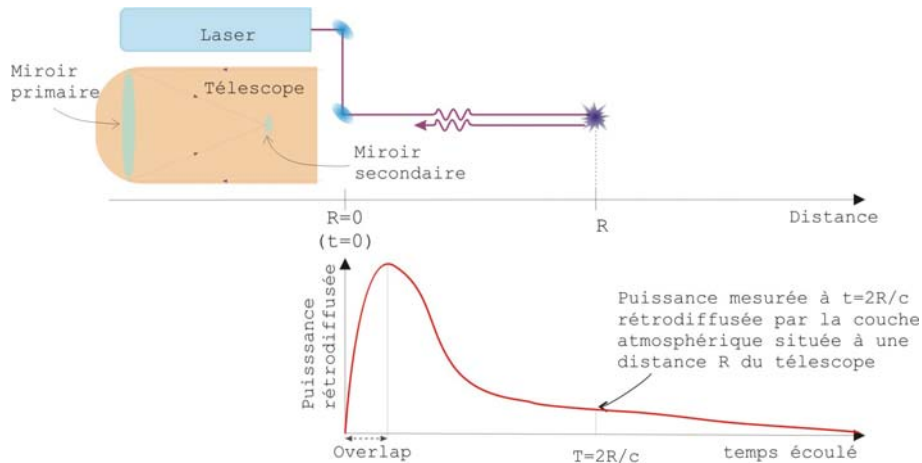


Figure 4 : Principe de fonctionnement des mesures LIDAR (Source : Wikipédia).

À chaque émission d'une onde lumineuse par le laser, celle-ci interagit avec les différents composants qu'elle rencontre. Une partie de cette onde est diffractée et rétrodiffusée vers le télescope. À partir de cette composante rétrodiffusée, l'organe de traitement peut alors déduire des informations quant aux composants qui ont été rencontrés par le signal, par exemple sa concentration et sa distance par rapport au système de mesure.

II.2.2 Altimétrie LIDAR aéroportée

Les différentes considérations techniques que nous avons citées et expliquées dans le chapitre précédent sont bien entendu d'application si nous particularisons l'emploi du LIDAR à des applications altimétriques aéroportées. Comme nous l'avons déjà évoqué plus haut (cf. I.2.3), cette technique d'acquisition de données géographiques est à la base des simulations hydrodynamiques dont la préparation topographique fait l'objet de notre travail.

II.2.2.1 Principe

Le principe de mesure est essentiellement identique au fonctionnement général expliqué ci-dessus (cf. II.2.1). La gamme d'onde utilisée pour des applications topographiques est souvent restreinte au proche infrarouge et l'analyse du signal reçu ne porte que sur le calcul de la distance LIDAR – obstacle (demi-temps de parcours du signal multiplié par la célérité de la lumière dans l'air).

Le système LIDAR est embaqué à bord d'un avion ou d'un hélicoptère, le vecteur. Les vitesses des vecteurs varient entre 40 et 90 km/h pour les hélicoptères et entre 160 et 350 km/h pour des avions. Selon le type de matériel utilisé, la distance au sol entre les différents scans laser peut être évaluée entre 0,1 m et jusqu'à quelques mètres. Pendant les mesures, la position du laser n'est pas connue et est modifiée à chaque instant. Cette nouvelle inconnue trouve sa solution par les observations conjointes d'un récepteur GNSS

(*Global Navigation Satellite System*) - RTK (*Real Time Kinematic*) et d'une station inertielle ou INS (*Inertial Navigation System*).

Cet appareillage permet de suivre en continu la trajectoire du vecteur à environ 200 observations par seconde. L'utilisation d'un récepteur GNSS seul pourrait fournir des observations de positions toutes les demi-secondes, voire tous les dixièmes de seconde à l'aide de technologies adaptées. Nous n'entrerons pas plus dans les détails de ces mesures car elles ne font pas l'objet de ce travail. Nous renvoyons le lecteur à la littérature existante traitant de ce sujet (MERINOD et al., 2004, GONTRAN et al., 2006 et ERNST, 2007).

Le laser effectue des observations à une fréquence de 70 KHz, fréquence nettement supérieure à celle de la station INS. La position exacte du laser est donc calculée pour toutes les mesures par la modélisation de sa trajectoire entre les solutions de position fournies par le couplage des mesures GNSS – RTK et de la station INS. En générale, la fonction utilisée est une spline cubique ou parfois, un autre modèle mathématique de trajectoire.

11.2.2.2 Les moyens techniques de mesure

Il existe sur le marché deux grandes catégories d'appareils de mesure LIDAR. Chaque fabricant défendant avec ferveur les avantages de son matériel. Parmi les plus importants, nous retrouvons :

- Leica – url : <http://www.leica-geosystems.com>
- Optech – url : <http://www.optech.ca>
- Riegl – url : <http://www.riegl.com>
- TopoSys – url : <http://www.toposys.com>

Pour de plus amples informations concernant ces entreprises, nous renvoyons aux sites Internet indiqués.

Les différents systèmes sont divisés en deux catégories suivant leur technique de balayage latéral utilisée, on retrouve trois méthodes mécaniques utilisant un miroir afin de dévier le signal laser (miroir oscillant, polygone rotatif, système à nutation) et une méthode exploitant la fibre optique. Selon le mode de mesure utilisé, l'ouverture angulaire totale du scanner varie de 10 à 60 degrés perpendiculairement à l'axe de vol.

En fonction du mode de balayage, chaque système induit une empreinte au sol des points laser mesurés qui varie suivant l'axe du vol. Ces différentes distributions sont illustrées à la figure suivante (Figure 5) :

- Figure 5 a) empreinte du système à miroir oscillant ;
- Figure 5 b) empreinte du système à polygone rotatif ;
- Figure 5 c) Certains systèmes utilisent un miroir à nutation, il induit une empreinte au sol de forme elliptique, mais ceux-ci semblent moins employés que les trois systèmes précédents.

- Figure 5 d) empreinte du système à fibre optique ;

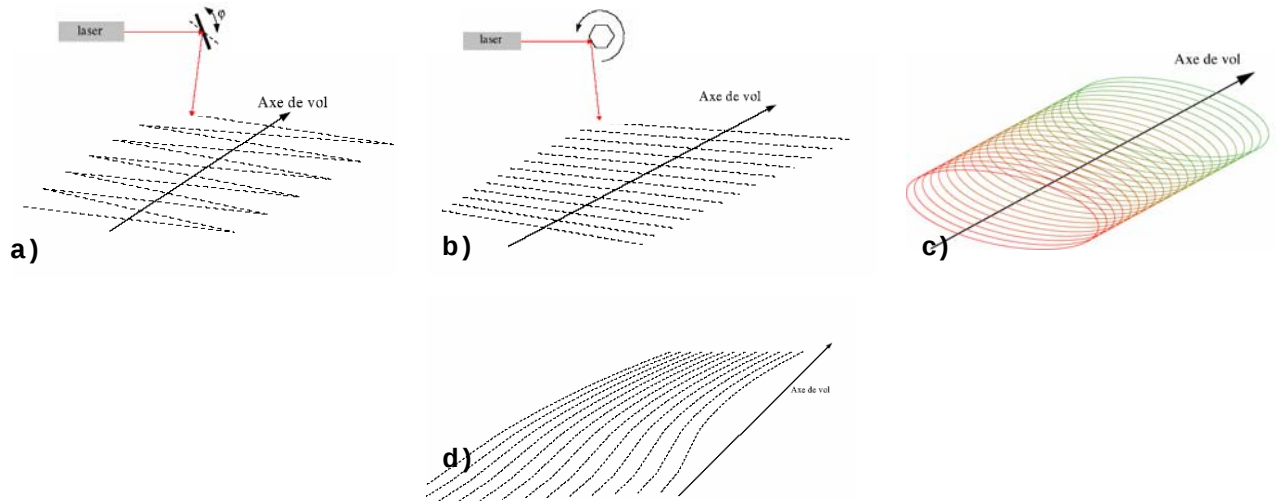


Figure 5 : Configuration des points mesurés obtenue par l'utilisation des quatre moyens techniques de mesures (Source : BRETAR 2006).

Le scanner à miroir oscillant crée au sol une empreinte en forme de zigzag, la densité du nuage de points n'est donc pas constante aux limites de la bande de scannage. Par contre, le système par polygone rotatif induit la répartition du nuage de points la plus homogène. En ce qui concerne de l'utilisation du système par fibre optique, son désavantage principal est l'étroitesse de la bande de scannage induite par le nombre relativement faible de fibres optiques. La densité du nuage de points au sol induite par chacun de ces systèmes dépend bien entendu de la hauteur de vol, de la fréquence de mesure et de l'ouverture angulaire du laser (TOVARI, 2006).

II.2.2.2.1 Les systèmes mécaniques

Les systèmes mécaniques sont les plus répandus parmi les moyens de levé LIDAR. Comme nous l'avons évoqué plus haut, il en existe trois : le miroir oscillant, le polygone rotatif et le miroir à nutation (ce dernier étant moins utilisé que les deux autres).

Les sociétés Leica (modèle « ALS 50 ») et Optech (modèle « ALTM 3100 ») utilisent la technique du miroir oscillant. Il s'agit du système le plus simple mais la distribution des points mesurés au sol est de moins bonne qualité. Reigl opte plutôt pour les systèmes à polygone rotatif, parmi lesquels nous trouvons le LMS-Q560. Ce modèle et son fonctionnement sont illustrés à la figure suivante (Figure 6). Il s'agit d'un système permettant d'acquérir l'entièreté du signal réfléchi pour une analyse plus fine des résultats.

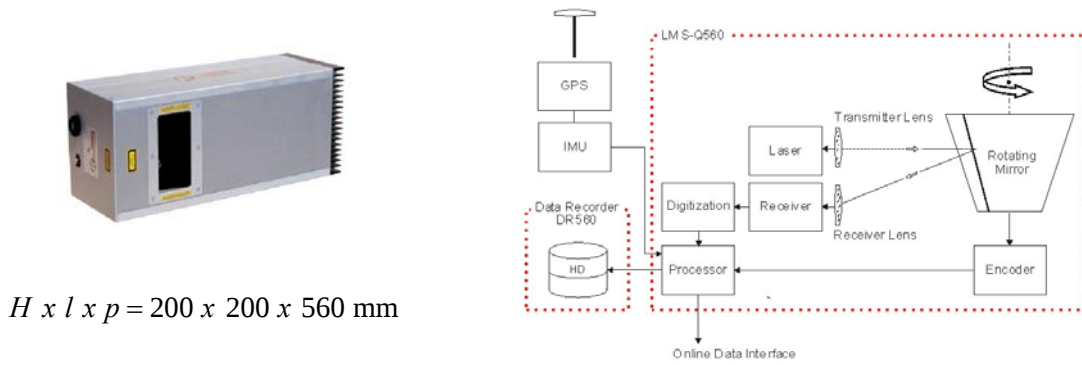


Figure 6 : Le laser LMS-Q560 de chez REIGL et son principe de fonctionnement
(Source : documentation technique du LMS-Q560 - url : http://www.reigl.com/airborne_scanners/lms_q560/_datasheet_lmsq560.pdf)

II.2.2.2.2 Les systèmes à fibres optiques

La firme allemande TopoSys a choisi d'exploiter cette technologie. Son avantage majeur est de pouvoir éliminer totalement toutes sources d'erreurs provenant du système mécanique de déviation du signal laser.

Le principe général de mesures par fibres optiques est le suivant : le système est composé de deux rangées d'une centaine de fibres (127 pour le système Falcon schématisé à la Figure 7). La première émet le signal et l'autre sert de récepteur.

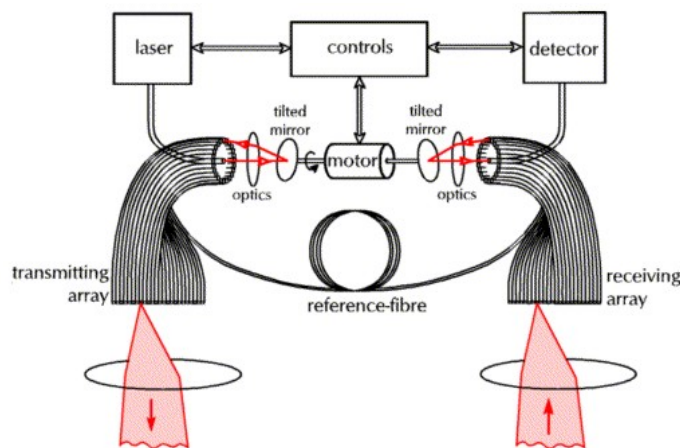


Figure 7 : Principe de fonctionnement du laser FalconII de chez TopoSys
(Source : documentation technique du FalconII – url : <http://www.toposys.com>).

Depuis peu, cette même société a introduit sur le marché un nouveau mécanisme permettant d'obtenir une résolution au sol beaucoup plus fine qu'avec les techniques mécaniques (cf. II.2.2.2.1) ou de fibres optiques classiques. Ce nouveau mode de mesure exploite une modification de l'orientation des fibres optiques durant le vol ; il est nommé

“swing mode”. La figure suivante (Figure 8) illustre très bien les avantages obtenus sur la répartition du nuage de points par cette méthode de mesures en comparaison à l'utilisation de la fibre optique classique.

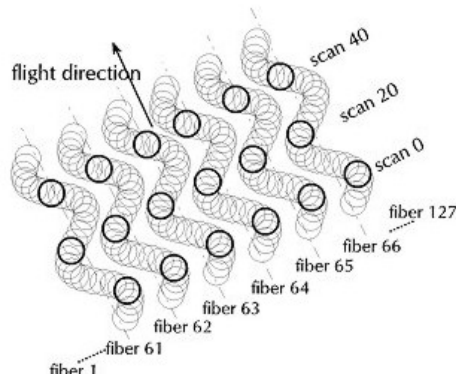


Figure 8 : Schématisation de la méthode de scan “swing mode” (Source : documentation technique de chez TopoSys– url : <http://www.toposys.com>).

II.2.2.2.3 Conclusion

Les nombreux systèmes de mesures LIDAR aéroportées présentent tous des avantages et des défauts. Chaque modèle permet d’obtenir une répartition des points au sol différente, et bien qu’elle soit irrégulière pour toutes les méthodes, les récentes avancées techniques proposées par la société TopoSys semblent présenter une distribution des mesures plus stable et mieux répartie.

II.2.2.3 Le mode multi-échocs

L’utilisation de la technologie LIDAR aéroportée dans le domaine de l’altimétrie a permis, par l’utilisation de laser à haute fréquence, d’exploiter non plus l’entièreté du signal réfléchi, mais certains pics d’intensité supérieure. La figure suivante (Figure 9 a)) schématise l’intensité du signal réfléchi par le télescope au cours du temps lors d’un levé d’une zone boisée. La figure illustre également un cas réel de la schématisation précédente dans les mêmes conditions de levé (Figure 9 b)). Une forte intensité y est représentée par une couleur verte claire avec un dégradé allant vers le plus foncé pour des intensités plus faibles.

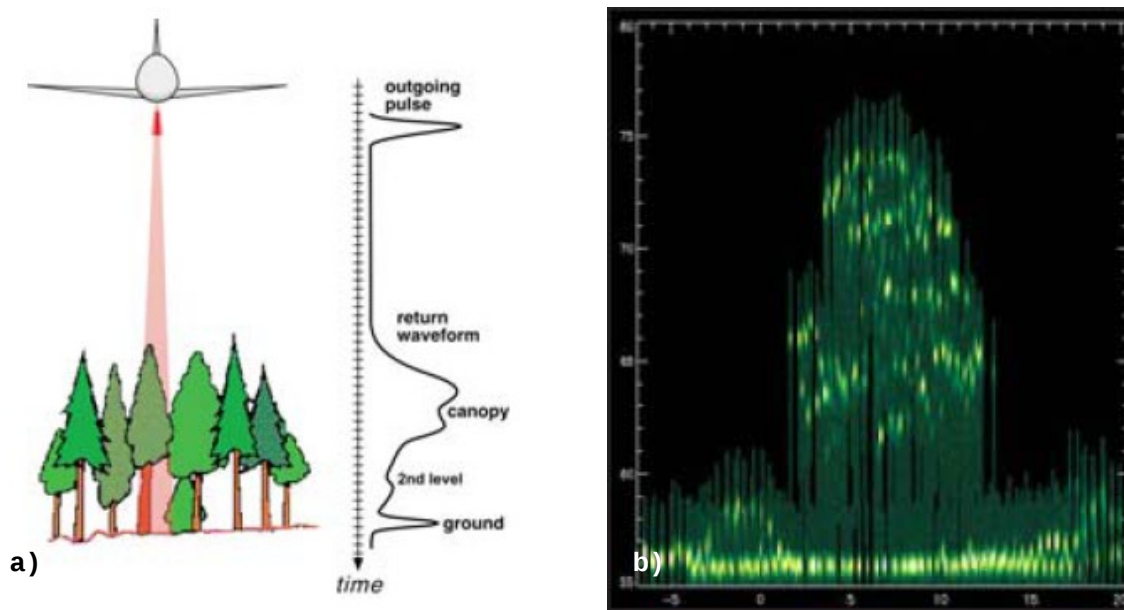


Figure 9 : a) Schématisation du signal multi-écho réfléchi. b) Exemple de signaux réfléchis lors du survol de couvert végétal. (Source : Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH – IGI)

Ces pics d'intensité, ou *échos* laser sont définis arbitrairement comme étant supérieurs à un seuil fixé. En fonction du type de terrain levé, le LIDAR identifie de deux à cinq échos pour chaque mesure. Pratiquement, seuls un ou deux de ces pics représentant la majeure partie de l'énergie réfléchie sont exploités en fonction du paysage étudié. S'il s'agit d'un paysage pour lequel la couverture végétale est nulle, le signal réfléchi présentera la forme d'une gaussienne. Au contraire, si nous sommes en présence de paysages fortement végétalisés, nous pourrions observer plusieurs pics d'énergie différents (Figure 9 a)). Dans ce cas, les deux pics de plus forte amplitude seront enregistrés. Le premier écho laser sera associé à la surface de la végétation et le second théoriquement au sol. La figure suivante illustre un exemple des différences d'altitudes enregistrées entre le premier et le deuxième écho laser.

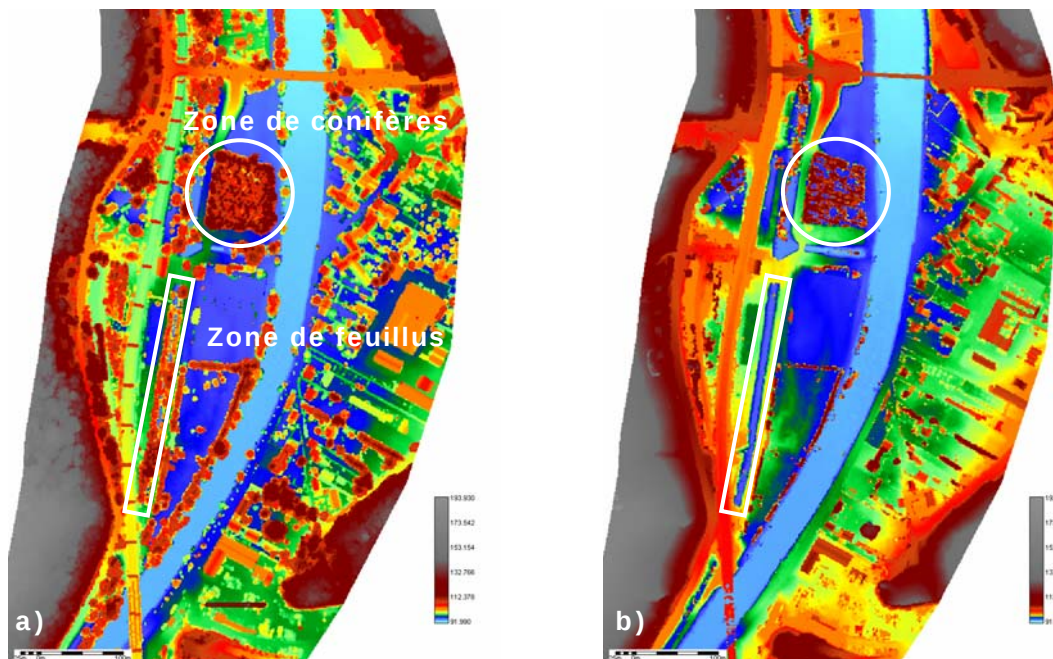


Figure 10 : Représentation du premier écho a) et du second écho b) laser
(Situation : Bassin de l'Ourthe – Chauxhe).

Nous pouvons remarquer assez aisément les endroits où la végétation est plus dense (zones de conifères) et là où le second écho laser a atteint le sol malgré la présence de végétation sur le premier écho (zone de feuillus). Une autre remarque importante qui nous sera utile dans nos développements ultérieurs concerne le fait que certaines essences d'arbres telles que les conifères sont quelques fois totalement opaques au signal laser. Ils ne présentent donc pas de différence d'altitude entre les deux échos (certaines mailles de la zone de conifères illustrées à la figure ci-dessus (Figure 10)).

II.2.2.4 Précisions

Les différents facteurs influençant la précision des mesures LIDAR peuvent être divisés en deux catégories : les facteurs internes liés aux appareils de mesures et les facteurs externes. Le tableau suivant (Tableau 1) inventorie les principaux facteurs suivant les deux catégories (BRETAR, 2006).

Facteurs internes	Facteurs externes
- Positionnement GNSS-INS - Distance LIDAR - sol - Précision du guidage laser	- Hauteur de vol - Pente du terrain - Réflectivité du matériau

Tableau 1 : Classification des facteurs influençant la précision des levées LIDAR

Nous expliquons brièvement l'ensemble des facteurs qui ont été cités dans le tableau précédent (Tableau 1). Tout d'abord, les facteurs internes :

Positionnement GNSS-INS. Imprécisions dues à l'instabilité de la station accélérométrique, à une mauvaise configuration satellitaire, irrégularités géomagnétiques ou tout autre facteur influençant les signaux GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Distance LIDAR - sol. Est influencé par le pouvoir de séparation de l'organe de traitement lors de l'analyse du signal réfléchi, en d'autres termes, la capacité à détecter exactement les pics de plus forte intensité.

Précision du guidage laser. la précision du mécanisme d'orientation (systèmes mécaniques) du laser induit des imprécisions sur la position des points laser dans le plan horizontal, mais aussi selon la composante z.

Et ensuite, les facteurs externes :

Hauteur de vol. A une influence sur la propagation des signaux laser. En effet, le signal parcourt une plus grande partie de l'atmosphère susceptible de le modifier (direction,...) et d'en n'atténuer la puissance. Le signal réfléchi sera d'autant plus difficile à analyser que la hauteur de vol est importante.

Pente du terrain. Lorsque les pentes du terrain sont très importantes (environnement montagneux par exemple) toutes erreurs de positionnement planimétrique a une influence sur l'exactitude du calcul de la composante z de la position tridimensionnelle du point laser. Cette erreur est quantifiée par la relation suivante liant l'erreur induite en altimétrie (Δz) en fonction de la pente locale du terrain (i) et de l'erreur planimétrique (Δxy) :

$$\Delta z = \Delta xy \tan i$$

(Cette peut atteindre des valeurs extrêmes proches de 1.5 mètres entre deux bandes parallèles lors d'un levé en milieu montagneux.)

Réflectivité du matériau. Des études (PARIAN et al., 2005) ont montré que la précision des mesures de distances effectuées avec un système laser est influencée par la réflectance de matériau. Ainsi, un matériau absorbant l'énergie lumineuse modifiera les caractéristiques des ondes réfléchies induisant une incertitude sur la détermination de la date de réception du signal par l'organe récepteur.

Généralement, lorsque toutes ces erreurs sont prises en compte, les précisions du LIDAR aéroporté sont évaluées à 15 centimètres en altimétrie (précision qui varie proportionnellement avec l'altitude de vol) et 40 centimètres en planimétrie. Ces valeurs sont d'application pour des conditions normales d'utilisation et pour un levé effectué à 1000 mètres d'altitude.

II.3 Segmentation

Nous retrouvons dans la littérature de nombreuses références traitant de la segmentation automatique des modèles numériques de surface obtenus par des techniques d'acquisition LIDAR. Parmi ces méthodes, nous avons identifié deux catégories distinctes classées sur base des données utilisées pour l'analyse. Premièrement, nous retrouvons les méthodes de segmentation uniquement basées sur l'exploitation des données altimétriques LIDAR. Ensuite nous abordons celles qui exploitent plusieurs sources de données complémentaires (imagerie satellitaire, photogrammétrie aérienne, modèle numérique de terrain,...), ce sont les approches multi-sources.

Tandis que d'autres auteurs se penchent en particulier sur la génération de Modèle Numérique de Terrain – MNT dans des zones boisées uniquement (KRZYTEK, 2003 et KRAUS & al., 2001). Mais nous n'entrerons pas dans les détails de ces techniques, puisqu'elles ne permettent pas l'extraction des éléments anthropiques du modèle de surface initial.

II.3.1 Segmentation des données LIDAR

II.3.1.1 Analyse des gradients

II.3.1.1.1 Définition d'un gradient de pente

Le gradient est défini comme étant l'angle que fait la normale à une surface avec la verticale (Figure 11). Dans un espace discrétisé, une image (matrice) par exemple, un gradient de pente peut être défini pour chaque pixel. Sur la figure suivante, le gradient de pente γ est l'angle positif compris entre 0 et $\pi/2$ tel que :

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

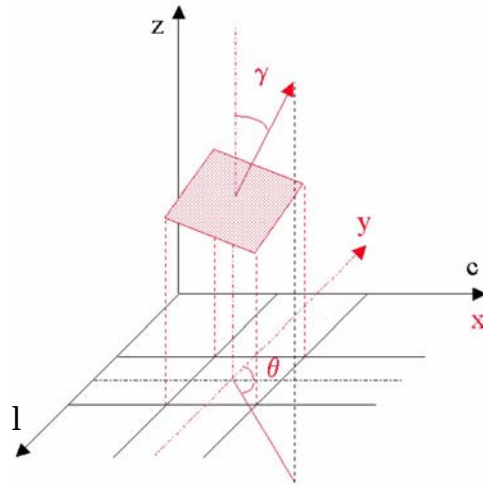


Figure 11 : Pentes et orientation d'un pixel (Source : DONNAY, 2004)

Dans un espace discrétisé (comme les matrices altimétriques LIDAR), le calcul des gradients de pente s'apparente à celui des dérivées partielles de la composante d'altitude selon x et y. Soit dans une fenêtre de convolution de 3 mailles de côté, le gradient de pente à la maille de coordonnées (c, l) vaut :

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{(z_{c+1,l-1} + 2z_{c,l} + z_{c+1,l+1}) - (z_{c-1,l-1} + 2z_{c,l} + z_{c-1,l+1})}{8\text{resol}} \right)^2 + \left(\frac{(z_{c-1,l+1} + 2z_{c,l+1} + z_{c+1,l+1}) - (z_{c-1,l-1} + 2z_{c,l-1} + z_{c+1,l-1})}{8\text{resol}} \right)^2}$$

II.3.1.1.2 Le filtre de Sobel

Le filtre de *Sobel* est un algorithme de calcul de gradients de pente très largement répandu dans les études en mode raster (ou image par opposition au mode vecteur). Il s'agit d'une application directe des aspects théoriques qui viennent d'être exposés (cf. II.3.1.1.1). Les similitudes entre le filtre de *Sobel* et le calcul des dérivées partielles de la composante z selon x et y sont flagrantes.

La valeur (V) du filtre de *Sobel* est définie par l'équation suivante:

$$V = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \text{où}$$

X = L'image résultant de l'application de la fenêtre de convolution suivante :

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Y = L'image résultant de l'application de la fenêtre de convolution suivante :

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

II.3.1.1.3 Exposé de la méthode

La segmentation de données altimétriques LIDAR par analyse de gradient est une méthode fortement répandue. Dans la littérature, nous trouvons de nombreuses déclinaisons de cette méthode de base. Dans l'analyse qui suit, les auteurs (ALBARTHY & al., 2002) ont par exemple introduit le calcul de la différence entre le premier et le second écho laser comme paramètre supplémentaire pour la détection des bâtiments. Leur objectif est uniquement d'identifier les bâtiments et d'éliminer tous les autres bruits (végétation,...) du modèle de surface initial (Figure 12).

La segmentation entre les bâtiments et les autres objets est effectuée en deux étapes distinctes. La première consiste à éliminer du modèle de surface la majeure portion des zones boisées. Et la seconde permet de lisser le reste la topographie par une méthode statistique. Son objectif est d'éliminer les éléments appartenant à la végétation n'ayant pas pu être éliminés lors de la première étape du traitement.

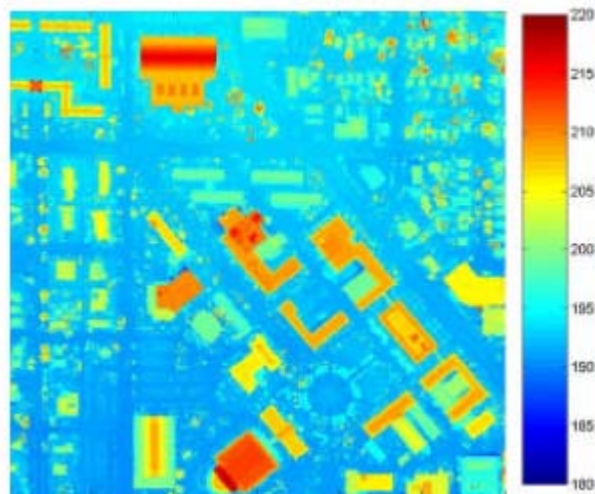


Figure 12 : Représentation des altitudes du second écho de la zone d'expérimentation (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002)

Comme la plupart des algorithmes de segmentation des données LIDAR, l'auteur exploite essentiellement les données provenant du second écho. En effet, celui-ci est déjà exempt d'un nombre variable mais souvent non négligeable de données altimétriques de « Sur Sol ».

La détection des zones boisées est effectuée sur deux critères :

- la différence entre le premier et le second écho laser doit être supérieure à un certain seuil ;
- le gradient doit être inférieur à une limite fixée par l'utilisateur.

Le premier critère est simple, il est construit sur l'hypothèse que toute surface boisée n'est pas totalement imperméable au signal laser, de ce fait, il existe une différence entre les deux échos détectés par le système LIDAR (Figure 14 a)).

Le second est plus subtil, il se fonde sur l'hypothèse selon laquelle le diamètre du signal lumineux lors de l'interception avec un obstacle n'est pas négligeable. L'implication de cette caractéristique technique des signaux LIDAR est la suivante : comme nous pouvons le remarquer sur la Figure 14 a) et b), les objets qui présentent des forts gradients de pentes en leurs frontières (les bâtiments par exemple) sont aussi caractérisés par une différence significative entre les deux échos (Figure 13).

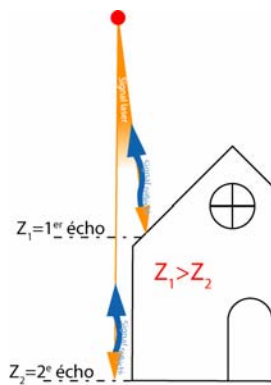


Figure 13 : Schématisation d'une différence entre les deux échos laser pouvant apparaître en bordure d'une habitation.

En conclusion, la combinaison de ces critères est opérée de la manière suivante. Si les gradients sont plus importants qu'une certaine valeur seuil, la différence entre les deux échos laser est considérée comme étant nulle. Par cette manipulation, l'auteur élimine les mailles en bordure des bâtiments qui présentent très souvent une différence importante entre les valeurs d'altitude des deux échos. Les résultats de cette première étape de traitements sont présentés à la figure suivante (Figure 14 c)).



Figure 14 : Visualisation des résultats de la première étape de segmentation (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).

Figure 14 a) : visualisation du différentiel entre les altitudes du premier et du second écho LIDAR.

Figure 14 b) : calcul des gardiens présents dans l'image par application d'un filtrage de type *Sobel* (cf. II.3.1.1.2).

Figure 14 c) : construction de l'image finale par intégration des deux résultats précédents, en utilisant la condition suivante :

$$C_{image} = A_{image} \text{ SI } B_{image} < \text{Seuil SINON } C_{image} = 0$$

La seconde partie du traitement consiste à éliminer le bruit résiduel par l'application d'une méthode de lissage par calcul de statistique local de la matrice. La surface finale est obtenue par le passage d'une fenêtre de convolution. Pour chaque position de cette fenêtre, un plan est ajusté par moindres carrés. Un poids est ensuite attribué pour chaque maille de la fenêtre en fonction des résidus, l'ensemble de la matrice est ainsi parcourue. L'étape suivante consiste à calculer l'erreur quadratique totale pour chaque maille dans la même fenêtre de convolution. Les mailles présentant une erreur quadratique élevée indiquent que la surface est irrégulière telle que de la végétation, alors que la plupart des bâtiments présentent des surfaces de toit assez lisses.

La figure ci-dessous (Figure 15) nous montre les résultats obtenus lors des différentes étapes du processus de segmentation que nous venons de décrire.

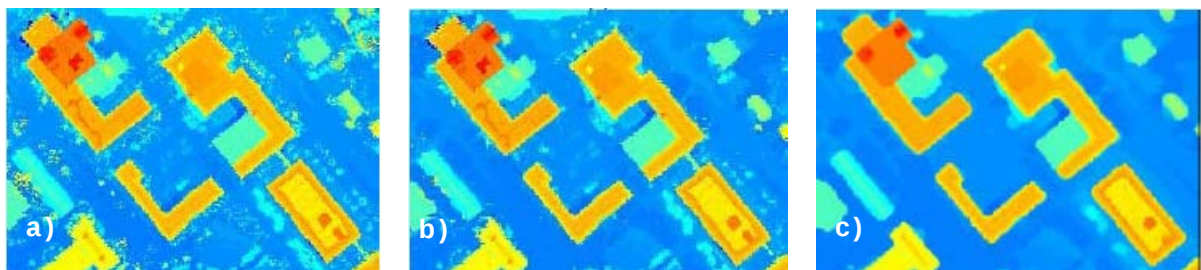


Figure 15 : Visualisation étape de la segmentation et du résultat final obtenu
(Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).

Figure 15 a) : visualisation du modèle de surface initial.

Figure 15 b) : première étape du processus (analyse de gradient et différence echo1 et 2), élimination de la majorité de la végétation existante.

Figure 15 c) : dernière étape du processus, élimination du bruit résiduel par application itérative d'un algorithme de lissage statistique.

II.3.1.1.4 Critique

Bien que visuellement efficace (Figure 15), cette méthodologie de traitement a été appliquée dans un environnement urbain ne présentant pas de structures particulières

(ponts, reliefs abrupts,...) comme nous pouvons en rencontrer dans d'autres types de paysage. De plus, les zones boisées identifiées ne présentent jamais de superficie comparable à ce qui peut exister sur les modèles de surface LIDAR en région rurale.

D'autres critiques portant sur la méthodologie proprement dite sont aussi à mentionner. Plus particulièrement en ce qui concerne les hypothèses de travail :

- L'auteur a une vision restrictive de ce qu'il peut y avoir sur le MNS, il ne tient compte que de la présence des objets « végétation » et « bâtiments » dans la catégorie « Sur Sol ». Les autres objets existants sont assimilés à une de ces deux classes.
- L'analyse est basée sur l'hypothèse d'une différence entre premier et second pour les zones boisées. Or, comme nous l'avons vu précédemment, ce postulat n'est pas vérifié pas dans tous les cas (*cf.* II.2.2.3).
- L'identification des contours des constructions par application du filtre sur le gradient de pentes peut aussi éliminer, à tort, les mailles situées en bordure de conifères. En effet, celles-ci satisfont aux mêmes critères que les mailles de bordure des bâtiments : gradient élevé et différence entre les deux échos importante.
- Le filtre statistique se révèle être une bonne méthode dans la configuration de l'expérimentation (relief plat et peu complexe). Mais son efficacité reste à prouver dans le cas d'une configuration de relief plus complexe.

Toutefois, cette expérimentation nous montre que la segmentation des données altimétriques LIDAR peut être simplifiée lorsque l'analyse est restreinte à certaines configurations. Dans ces conditions d'utilisation, les données LIDAR peuvent apporter des résultats très satisfaisants.

II.3.1.2 Classification supervisée

Nous retrouvons dans la littérature de nombreuses références traitant de l'analyse de modèles numériques de surface qui sont basées sur les méthodes classiques de traitement d'image utilisées depuis de nombreuses années dans des domaines tels que la télédétection. L'étude qui est expliquée ici utilise la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood).

Notons que l'utilisation d'une classification supervisée, implique nécessairement la définition de zones d'entraînements. Pour rappel, une zone d'entraînement est un ensemble de mailles que l'utilisateur définit comme appartenant à une classe. Par la suite l'algorithme de classification extrait des informations de ces zones d'entraînements afin d'identifier les autres mailles présentant les mêmes caractéristiques dans le reste de l'image.

L'auteur propose ici deux classifications (les bâtiments d'une part et la végétation d'une autre) basées sur l'analyse du premier et du second écho, mais il intègre un autre paramètre supplémentaire : la différence normalisée entre ces deux échos (ND). Il

construit en fait un indice semblable au Normalized Difference Vegetation Index - NDVI couramment utilisé en traitement d'imagerie satellitaire multi spectrale avec la bande du proche infrarouge et celle du rouge. Ici, c'est le premier (*FP*) et le second écho (*LP*) laser qui seront exploités de la manière suivante :

$$ND = \frac{FP - LP}{FP + LP}$$

Cet index sera exploité comme données complémentaires aux deux échos dans la classification. À la suite de ces traitements, les arbres et la végétation seront isolés dans deux classes distinctes.

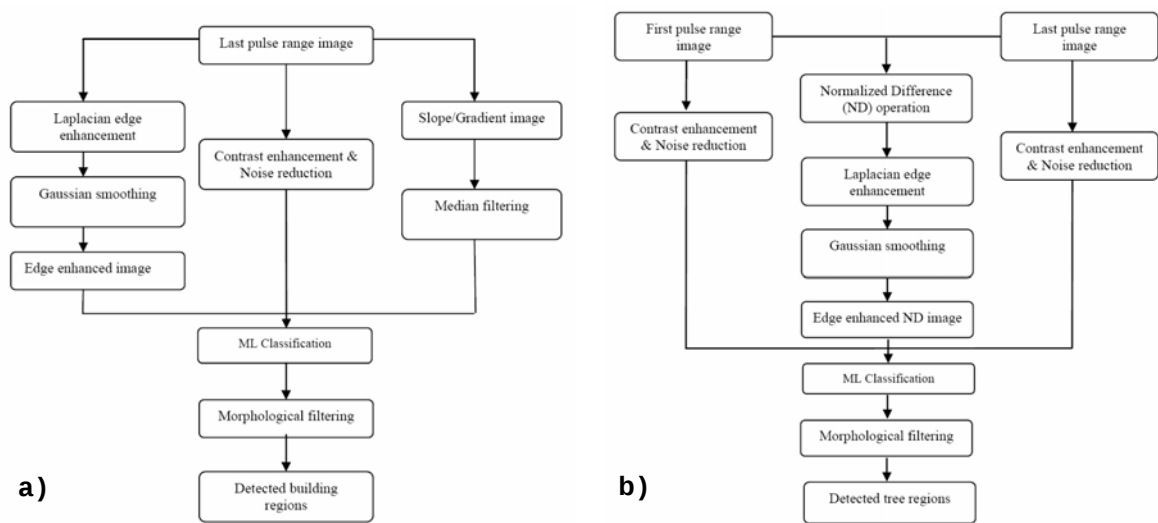


Figure 16 : Processus de traitement pour la détection des bâtiments d'une part et des arbres d'autre part (Source : AREFI & al., 2003).

Les deux classifications apparaissent comme étant assez simples, les traitements qui sont appliqués aux trois sources de données utilisent les principes classiques du traitement d'images, et ne requièrent pas de plus amples informations dans le cadre de ce travail. À titre d'exemple nous fournissons un exemple de résultats obtenus pour chacune des classifications à la figure ci-dessous (Figure 17) :

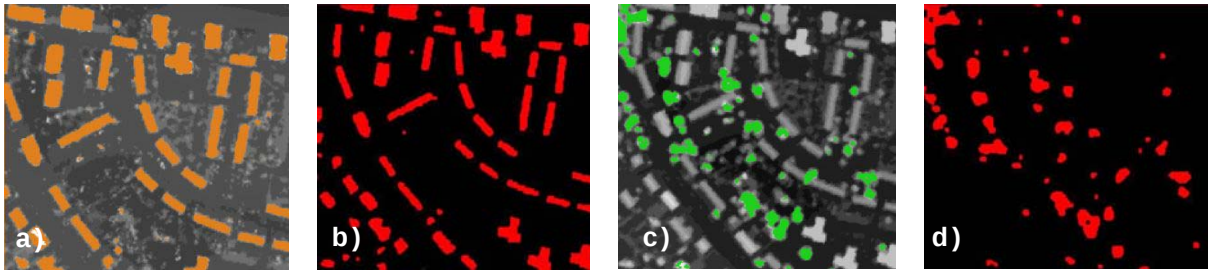


Figure 17 : Classification des bâtiments a) et filtrage morphologique b), classification des arbres c) et filtrage morphologique d) (Source : AREFI & al., 2003).

II.3.1.3 Analyse complète du problème

II.3.1.3.1 Introduction

Le travail de thèse de SITHOLE (2005) consiste à segmenter le nuage de points en 4 classes. Sa méthodologie de segmentation est essentiellement fondée sur une définition sémantique exhaustive. Elle est entièrement basée sur des critères morphologiques de l'ensemble des objets pouvant être interprétés sur le MNS LIDAR initial. Afin d'effectuer sa classification, il procède à une succession de segmentations et de classifications. L'aboutissement de ce processus est l'obtention d'une classification du nuage de points en 4 classes distinctes :

- sol nu ;
- ponts ;
- objets anthropiques ;
- objets naturels.

La compréhension du processus amenant à la classification des données initiales peut être aisément appréhendée par la figure suivante (Figure 18). L'auteur y détaille la succession des segmentations et des classifications nécessaires à l'obtention du résultat final.

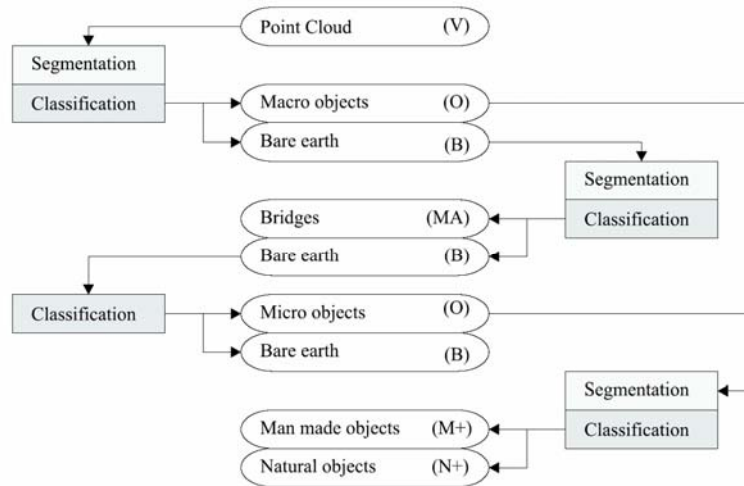


Figure 18 : Procédure de filtrage des données LIDAR (Source : SITHOLE, 2005).

Toutes les segmentations sont basées sur l'analyse des gradients de pentes et l'intersection de profils (*cf.* II.3.1.3.2), mais diffèrent par les moyens utilisés pour l'analyse des gradients

II.3.1.3.2 Intersection de profils

Les méthodes de segmentation ne sont pas identiques pour l'ensemble des étapes de la classification. Néanmoins, elles sont toutes basées sur le même algorithme : l'intersection des profils. L'intersection de profils consiste, premièrement, à diviser la matrice initiale dans un plan horizontal en plusieurs bandes d'une largeur donnée (fonction de la résolution des données LIDAR) et selon différentes directions. Les différentes bandes formées sont appelées des profils. L'ensemble des points contenus dans le profil est segmenté en deux classes par l'application d'une des méthodes expliquées dans la suite de ce chapitre. Ensuite, les différents profils segmentés sont combinés par la méthode « d'intersection des profils » afin de créer la matrice finale segmentée.

Le développement que nous venons de décrire brièvement est schématisé à la figure suivante (Figure 19) :

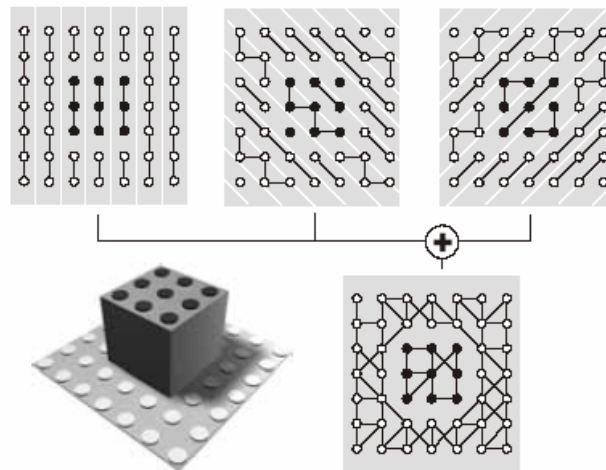


Figure 19 : Schématisation de la segmentation d'un nuage de points. Les données sont analysées selon trois profils différents (Source : SITHOLE, 2005).

Nous retrouvons 5 types de segmentations différentes que l'utilisateur met en œuvre en fonction de la classification à réaliser ou du type de données analysées. Les méthodes sont toutes basées l'analyse des gradients, mais diffèrent par leur manière de segmenter le profil, autrement dit, par le critère utilisé pour déterminer l'appartenance d'une maille à une classe.

- Curve fitting: cette méthode est basée sur l'ajustement d'une fonction paramétrique, les points appartenant à une même surface sont supposés être modélisables par une telle fonction ;
- Consecutive labelling: les points sont testés successivement par paires et la segmentation est basée sur le gradient existant entre eux ;
- Crust curve: cette méthode est création du diagramme de *Voronoi* des points originaux (Figure 20 a)), triangulation des points originaux et des nœuds du diagramme de *Voronoi* (Figure 20 b)) liaison de tous les points originaux reliés par un segment de la triangulation de *Delaunay* (Figure 20 c))
- By proximity: cette méthode se base sur l'hypothèse selon laquelle deux points appartenant à une même surface sont plus proches qu'un autre appartenant à une autre.
- Minimum spanning tree: Après avoir calculé la triangulation de *Delaunay* du réseau de points, on attribue à chaque arc un poids. On construit ensuite l'arbre couvrant de poids minimal - *minimum spanning tree* qui est l'arbre qui connecte tous les sommets et dont la somme des sommets est plus petite ou égale à tous autres arbres. Enfin, on élimine les arcs pendants.

Toutes ces analyses sont réalisées dans un plan vertical tel qu'illustré à la figure suivante (Figure 20) :

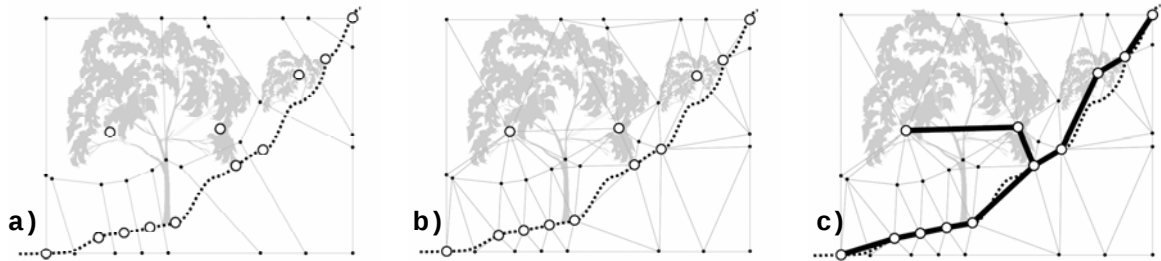


Figure 20 : Exemple de segmentation de profils, par la méthode de « crust curve » (Source : SITHOLE, 2005).

Étant donné que chaque segmentation divise un groupe de N points en deux groupes distincts, la classification est implicite et ne nécessite pas de commentaires supplémentaires.

II.3.1.3.3 Critique

La méthodologie présentée par SITHOLE (2005) est extrêmement bien détaillée et permet une segmentation très précise de données de base. Le choix de l'algorithme est réalisé par l'utilisateur en fonction de la classification à réaliser et des caractéristiques des données traitées. Par contre, le désavantage principal de ces algorithmes est qu'ils nécessitent de nombreux ajustements de paramètres. Le processus est fortement conditionné par une succession d'essais – erreurs permettant au final d'atteindre un résultat optimisé.

II.3.2 Segmentation par une approche multi sources

II.3.2.1 Classification supervisée

Auparavant, nous avons abordé une méthode de classification s'appuyant sur les techniques classiques du traitement d'images satellitaires, les classifications supervisées, mais n'exploitant que les données LIDAR ou dérivées de celles-ci (*cf.* II.3.1.2). Nous allons maintenant introduire de nouvelles données dans l'analyse, typiquement appelée données externes.

II.3.2.1.1 Méthode de classification

Les auteurs (CHARANIYA & al. 2004) proposent ici une méthode de segmentation uniquement basée sur la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). L'originalité de la recherche est fondée sur l'utilisation de données externes provenant de sources diverses (MNT satellitaire, photo aérienne, intensité du signal LIDAR rétrodiffusé,...). Les différentes sources utilisées sont décrites plus en détail et illustrées (Figure 21) ci-dessous :

- hauteurs normalisées : image construite par la soustraction d'un modèle numérique de terrain satellitaire de l'USGS - United States Geological Survey et des données altimétrique LIDAR (Figure 21 a)) ;
- variation des hauteurs : différence entre le maximum et le minimum présents dans une fenêtre de convolution de 3 mailles de coté (Figure 21 b)) ;
- différence entre les deux échos : (Figure 21 c)) ;
- Luminance : Image dans le spectre du visible en niveaux de gris (Figure 21 d)) ;
- intensité du signal LIDAR : étant donné que les signaux LIDAR utilisés pour l'altimétrie aéroportée se situent dans le proche infra rouge (*cf.* II.2.2.1), les données d'intensité du signal réfléchi peuvent apporter des informations complémentaires aux données de luminance (Figure 21 e)).

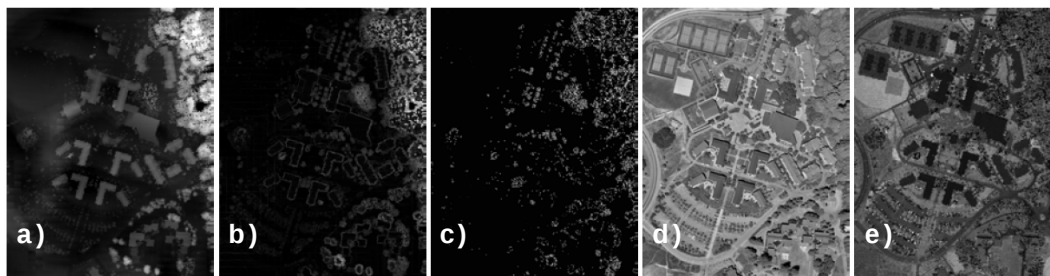


Figure 21 : Données externes utilisées dans la classification supervisée développée par CHARANIYA & al. (2004) (Sources : CHARANIYA & al. 2004).

II.3.2.1.2 Critique

Il s'agit d'une méthode intéressante sur le plan de l'intégration de données externes d'origines diverses dans une méthode de segmentation.

Certains aspects négatifs apparaissent tout de même après analyse de la méthode. Le premier est que l'auteur utilise une classification supervisée, ce qui implique comme nous l'avons précisé auparavant, la définition par l'utilisateur d'aires d'entraînements et donc un pas en arrière dans l'optique de l'automatisation du traitement. Le second point négatif est que les auteurs n'exploitent pas directement les informations morphologiques des données LIDAR, elles pourraient cependant apporter des données supplémentaires de premier plan dans la segmentation.

II.3.2.2 Analyse complète du problème

II.3.2.2.1 Introduction

D'autres analyses utilisent des données complémentaires aux données LIDAR dans le but de réaliser la segmentation de ces dernières mais en exploitant des techniques différentes et inédites. Nous retrouvons plusieurs auteurs qui publient des recherches dans ce sens. TEO & al. (2004) utilisent des données satellitaires à haute résolution afin d'obtenir des informations radiométriques sur les objets à extraire dans la gamme de longueur d'onde du visible et dans le proche infrarouge.

D'autres auteurs comme BRETAR (2006) exploitent quant à eux des orthophotos aériennes en complément du LIDAR pour en extraire les géométries vectorielles de certains objets comme les bâtiments.

II.3.2.2.2 Principaux obstacles rencontrés

Le problème majeur rencontré dans ce type d'analyse est la différence entre la résolution ponctuelle des données LIDAR et zonale des photographies aériennes. Elle nécessite en effet une phase de calage du nuage de point tridimensionnel sur les données discrétisées en mode image. Cette différence dans le formatage entre les données (d'une part vectorielle et d'autre part image) implique l'utilisation de techniques spécifiques pour assurer la conflation entre chaque source de données.

II.3.2.2.3 Solution possible

Une des solutions qui pourrait être envisagée pour l'intégration de ces données dans un outil de segmentation de données LIDAR est la création préalable d'un Système d'Information Géographique. Celui-ci permettrait de trouver une solution au problème de résolution des différentes sources de données et autoriserait ainsi d'effectuer une segmentation plus correcte.

De telles recherches concernant l'intégration préalable de données externes n'ont pas encore vraiment abouties. Nul doute que ce sujet deviendra, dans un futur assez proche, une nouvelle voie de développements dans l'optique de la segmentation et de la classification des données LIDAR. Nous sommes persuadés que c'est dans ce type d'analyse inédite que seront développés de nouveaux outils d'analyse de données LIDAR.

11.4 Vectorisation

11.4.1 Introduction

Les récentes avancées dans la théorie des Systèmes d'Information Géographique tridimensionnelle (**SIG 3D**) conduisent à la production de données vectorielles en trois dimensions (BILLEN & al., 2006). La vectorisation 3D des données LIDAR pourrait à terme apparaître comme un outil incontournable dans la genèse de données géographiques alimentant ce type de système (DASH J. & al. 2003). Il est évident que l'utilisation de telles bases de données apporterait une dimension nouvelle à l'analyse des risques liés à la gestion des ressources hydrauliques.

Dans ce chapitre, nous montrons que la recherche s'intéresse à ce type traitement sur les données LIDAR, De plus, nous mettrons en avant deux techniques complémentaires d'extraction d'empreinte 2D de bâtiments et de détection de primitives planes dans le nuage de points tridimensionnels.

11.4.2 Identification des directions dominantes

11.4.2.1 Description de la méthode

À la suite des différents processus de segmentation ci-dessus (*cf.* II.3), les zones bâties sont supposées être détectées et isolées. À partir de ces données discrètes, l'auteur base son analyse sur l'hypothèse selon laquelle l'emprise d'un bâtiment au sol est composée de segments de droites orientées selon deux directions préférentielles (i.e. toutes les façades d'un bâtiment sont perpendiculaires entre elles). Les étapes amenant à la modélisation des constructions anthropiques sont identifiées et expliquées ci-dessous :

- création d'un masquage binaire des empreintes des bâtiments (Figure 22 a)) ;
- les directions dominantes sont identifiées, en d'autres mots, les orientations des façades qui composent le bâtiment sont estimées par l'utilisation d'un matching de cross corrélation ;
- L'emprunte subit des rotations de deux degrés et pour chacune d'entre elles, la valeur de cross corrélation est calculée et reportée dans un histogramme (Figure 22 b)) ;
- les deux directions sont choisies en fonction des pics de l'histogramme de cross corrélation et à la condition que ces deux directions forment entre elles un angle de 90 degrés ;
- les frontières du bâtiment sont modélisées selon les deux directions dominantes identifiées (Figure 22 c)).

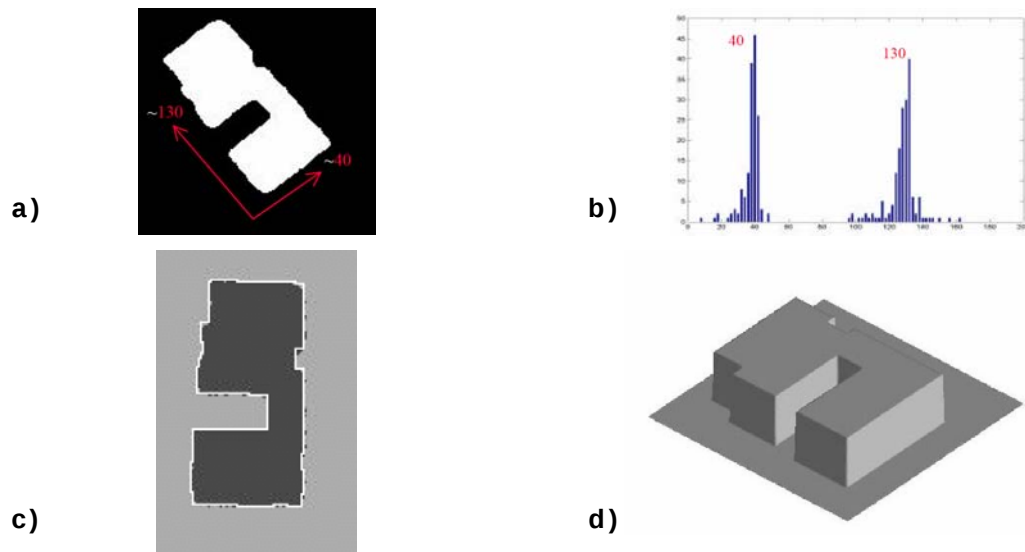


Figure 22 : Étapes du processus d'extraction des empreintes vectorielles des bâtiments par la méthode des directions dominantes (Sources : ALBARTHY & BETHEL, 2002).

Le résultat final obtenu à suite du développement explicité ci-dessus est illustré à la figure précédente (Figure 22 d)).

II.4.2.2 Critique

Si nous partons du principe que la segmentation et la classification du nuage de données tridimensionnelles LIDAR ont été effectuées correctement, cette méthodologie de traitement apparaît comme étant assez rapide et assez simple à mettre en œuvre. De plus, elle permet d'obtenir des résultats satisfaisants en très peu de temps.

Cependant, l'auteur n'expérimente pas sa méthode pour la détection des empreintes de bâtiments qui présentent une plus forte complexité (faces non rectilignes, plus de deux directions dominantes,...). Cette méthode nous paraît tout de même intéressante et mériterait un développement plus poussé, car elle permet d'obtenir une modélisation en deux dimensions des bâtiments présents dans le MNS LIDAR d'une manière assez simple et sans aucun calage de paramètres.

II.4.3 Détection des primitives planes

II.4.3.1 Description de la méthode

L'auteur (BRETAR, 2006) propose dans sa thèse une méthodologie de détection entièrement automatique des primitives planes basée sur l'algorithme de RANSAC. Les applications sont essentiellement dédiées à la modélisation des toits des bâtiments, telles

qu'illustrées à la figure suivante (Figure 23). L'originalité de la démarche repose sur une détermination totalement automatisée des différents paramètres utiles à l'analyse. En effet, ces paramètres sont déterminés de manière empirique dans la plupart des autres méthodologies qui sont proposées dans la littérature. Tandis que pour cette méthodologie, l'ensemble de la procédure de traitement est autogérée par une approche probabiliste optimisant l'ensemble des paramètres.

II.4.3.1.1 RANSAC

L'algorithme de RANSAC (*RANdom Sample Consensus*), introduit par FISHER et BOLLES en 1981, est une méthode « robuste » d'estimation de modèles. On considère qu'une estimation robuste du modèle est atteinte pour le modèle maximisant le nombre de supports (*cf.* infra). L'algorithme utilisé par BRETAR (2006) peut être formulé de la manière suivante :

À partir d'un ensemble P de points 3D, on sélectionne aléatoirement N plans (triplet (t_1, t_2, t_3)). Les points de P situés à une distance inférieure à la distance caractéristique d_{cr} constituent l'ensemble S des supports du plan. Le plan final Π_{final} est le résultat de l'estimation par moindres carrés (ou autre) d'un plan sur l'ensemble S_{final} de cardinal maximum sur l'ensemble des supports S . L'ensemble de points S_{final} est ensuite extrait de l'ensemble initial P et l'algorithme est itéré jusqu'à l'épuisement de P .

II.4.3.1.2 La méthode de détection

L'analyse se base sur l'hypothèse selon laquelle les pixels appartenant à une même facette de toit possèdent une orientation similaire. Les détails de la méthode sont résumés par les trois points ci-dessous (dans son analyse, l'auteur exploite des MNS LIDAR discrétisés à 0.3 mètres) :

- Les normales aux pixels de l'image sont classées selon l'orientation des faces d'une Extended Gaussian Image - EGI. L'EGI est un histogramme en trois dimensions représentant les différentes orientations des normales aux pixels. Cet histogramme prend la forme d'un polyèdre et permet ainsi d'effectuer une classification des pixels en fonction de l'appartenance aux faces de ce dernier. Cette première étape permet de limiter considérablement le nombre de tirages aléatoires dans l'algorithme de RANSAC puisque qu'une primitive plane ne peut être comprise que dans chaque zone discrète d'une facette de l'EGI.
- Pour chaque zone discrète de chaque face de l'EGI, on détecte donc les surfaces planes par la méthode de RANSAC selon l'algorithme explicité précédemment (*cf.* II.4.3.1.1).

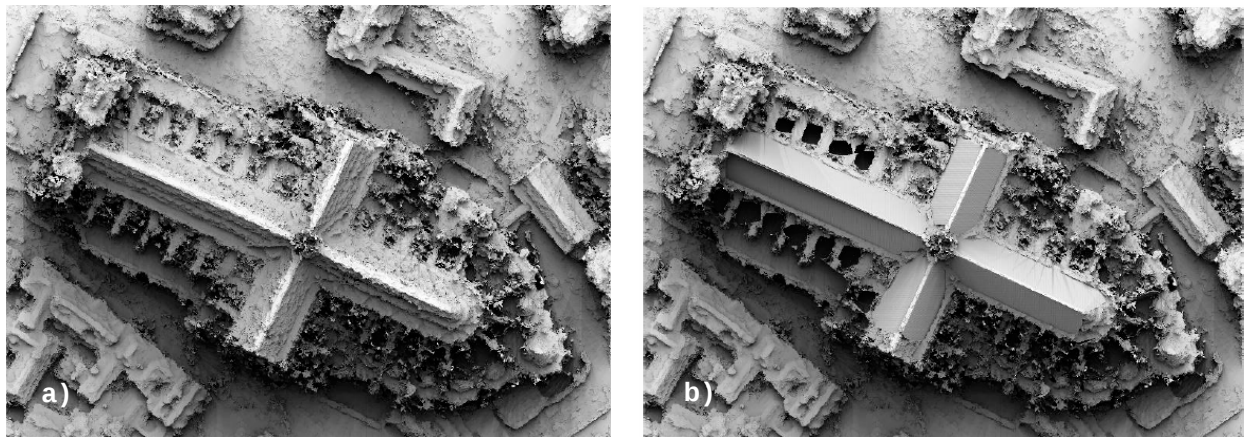


Figure 23 : Régularisation du MNT par détection des primitives planes (Source : BRETAR, 2006).

II.4.3.2 Critique

Un des avantages de cette méthode de détection des primitives planes est qu'elle ne requiert aucune intervention d'un opérateur extérieur. Le processus est automatisé par un ensemble de lois statistiques qui permettent le calage des paramètres (N , d_{cr}). Néanmoins, cette méthodologie de détection des primitives planes n'autorise pas la restitution totale de bâtiment. En effet, ce type reconstruction ne permet pas de modéliser les faces invisibles sur les données LIDAR (façades des bâtiments,...).

II.4.4 Complémentarité des deux méthodes

La complémentarité des deux techniques de vectorisation que nous venons de décrire est réelle. Une intégration et une adaptation de ces processus permettraient d'obtenir un module d'extraction vectorielle d'objets tridimensionnels. Ce domaine de recherche est encore très peu exploré. Une analyse plus poussée du problème pourrait sans aucun doute nous conduire à l'élaboration d'une méthodologie de vectorisation tridimensionnelle exploitant les principes des deux algorithmes qui ont été explicités dans le chapitre précédent.

II.4.5 Vectorisation de réseaux

D'autres études assez récentes elles aussi (CLODE & al., 2005) se concentrent d'avantage sur l'extraction vectorielle des réseaux à partir de données LIDAR exclusivement. Elles sont plutôt orientées vers les réseaux routiers mais pourraient être envisagé aux réseaux hydrographiques et à une plus large échelle, aux lits mineurs.

Section III : Méthode actuelle de nettoyage des données

III.1 Introduction

Dans le cadre du projet de cartographie des zones inondables, les tâches de segmentation et de nettoyage de données topographiques qui sont à la base des simulations hydrodynamiques sont restreintes à l'élimination de l'ensemble des obstacles non pertinents à l'écoulement de surface. En effet, les données LIDAR initiales ont déjà subi un traitement préalable effectué par le Ministère des Équipements et des Transports - MET avant d'être réceptionnées au laboratoire. Parmi eux, nous pouvons citer l'élimination des valeurs aberrantes ou la discrétisation de l'information initiale en mailles carrées d'une résolution au sol de 1 mètre.

L'élimination des zones de végétation dont l'emprise projetée au sol est nettement plus importante que son emprise réelle, constitue la part la plus importante des traitements appliqués aux données topographiques. Nous noterons aussi que divers autres traitements topographiques doivent également être appliqués aux données topographiques de base. Nous nous limiterons à les citer et les expliquer brièvement. Car bien qu'aussi importantes que l'élimination de la végétation pour la modélisation hydrodynamique, ces modifications peuvent difficilement faire l'objet de procédures automatisées et réclament un temps de manipulations numériques négligeables par rapport à la durée du travail nécessaire sur le terrain.

Parmi ces traitements complémentaires, nous identifions principalement :

- l'adaptation de la section de passage réelle sous les ouvrages de type ponts (section totale, nombre et largeur des piles) ;
- l'identification des pertuis (dimensions : largeur, hauteur, longueur),...

III.2 Détection

III.2.1 Introduction

Comme nous venons de l'expliquer, c'est l'élimination des zones boisées qui requiert le plus de ressources matérielles et humaines. Malgré le fait que ce soit l'élimination qui demande la plus grande part du temps dédié au traitement, c'est en fait la détection proprement dite qui nécessite le plus d'expérience de la part de l'opérateur.

Dans la majorité des cas rencontrés (Figure 24), l'identification est rendue plus aisée par la visualisation à l'aide d'une palette de couleurs appropriée (*cf.* III.2.2). Cependant, si les éléments apportés par cette première analyse visuelle ne sont pas suffisants, nous utiliserons d'autres données complémentaires comme outils d'aide à la décision (*cf.* III.2.3).

III.2.2 La palette de couleurs

L'interface WOLF permet l'affichage des matrices topographiques par l'utilisation de plusieurs types de palettes de couleurs différentes. Pour le travail topographique, il est recommandé d'opter pour une palette 16 couleurs 24 bits (8 bits par couleurs, 256 valeurs possibles pour les trois composantes) dont les bornes sont définies par une loi iso population. Ce terme signifie que chaque classe contient un même nombre de pixels. Les données relatives à la palette de couleurs sont reprises dans le tableau suivant (Tableau 2). Il spécifie pour chacune des 16 classes, la valeur des trois composantes additives (comprises entre 0 et 255) :

	R	V	B
1	128	255	255
2	89	172	255
3	72	72	255
4	0	0	255
5	0	128	0
6	0	121	55
7	128	255	128
8	255	255	0
9	255	128	0
10	255	128	0
11	255	0	0
12	209	71	12
13	128	0	0
14	128	0	0
15	111	111	111
16	143	143	143

Tableau 2 : Palette de couleur WOLF recommandée pour le travail topographique.

La figure suivante (Figure 24) démontre que grâce à l'utilisation d'une palette de couleurs adaptée, l'utilisateur peut non seulement identifier le « Sol » du « Sur Sol » mais en plus, il peut déterminer avec un minimum d'expérience si les objets ne faisant pas partie de la topographie sont d'origines anthropiques ou naturels. Les objets naturels, principalement la végétation, sont beaucoup plus hétérogènes et présentent une variabilité plus importante que les objets d'origine anthropique davantage réguliers et lisses.

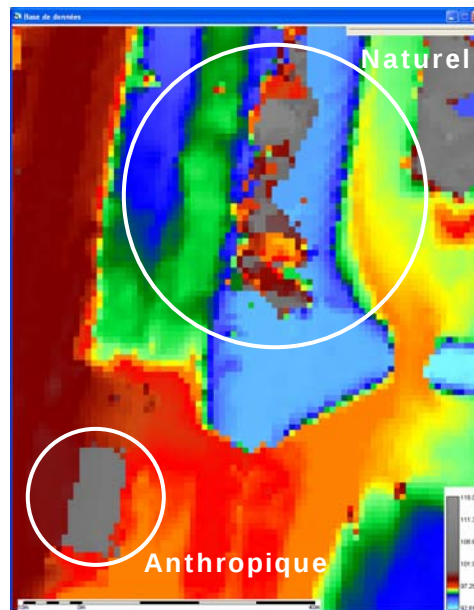


Figure 24 : Classification implicite des éléments anthropiques et de la végétation. (Capture d'écran WOLF 2D).

Dans certaines situations plus compliquées, cette première approche n'apporte pas les informations nécessaires à la classification de l'ensemble des mailles. Dans ce cas, nous utiliserons d'autres données complémentaires à l'altimétrie LIDAR qui nous aideront dans la prise de décision.

III.2.3 Données complémentaires

Dans le cadre de la cartographie des zones inondables, nous disposons d'un grand nombre de données complémentaires comme outils d'aide à la décision : le PPNC (Plans Photographiques Numériques Communaux) (Figure 25 a)), les données vectorielles Top10v-GIS de l'IGN (Figure 25 b)) ou d'autres données de moindre importance. En ce qui concerne les données Top10v-GIS, on privilégiera l'utilisation de la couche strucnet-p (contour vectoriel des bâtiments). Le PPNC étant composé de photographies aériennes assez anciennes, on préférera parfois les compléter par des

données satellitaires « grand public » de type Google Earth. En effet, ces données sont généralement plus récentes et dans certains cas de meilleure résolution au sol.

La figure ci-dessous illustre un exemple d'utilisation des données complémentaires disponibles ainsi que les capacités de superposition d'images et de gestion de la transparence de l'interface WOLF.

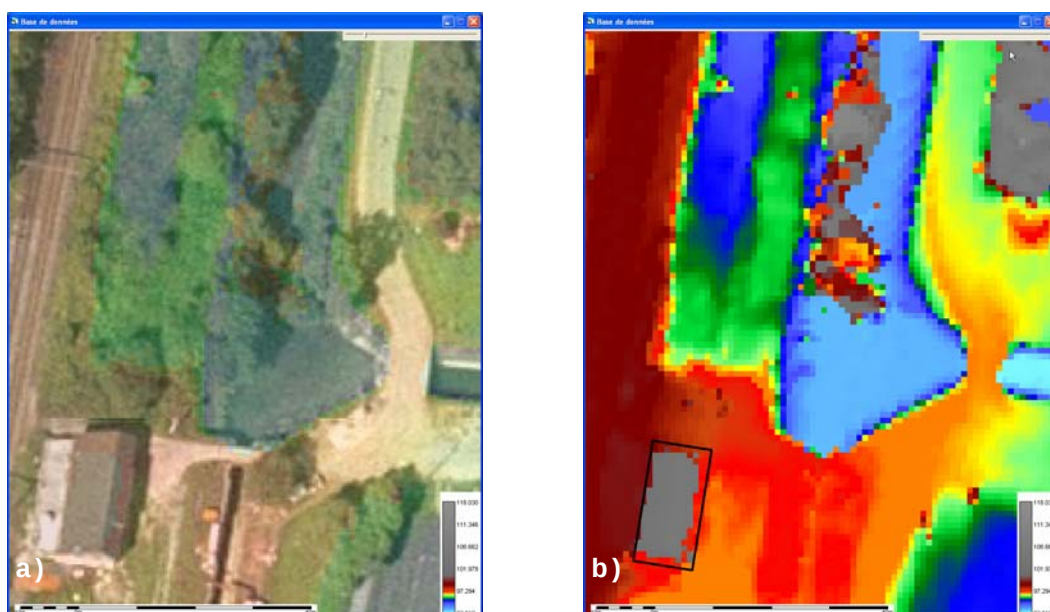


Figure 25 : Superposition de données complémentaires comme outil d'aide à la décision. (Capture d'écran WOLF 2D).

Lorsque nous utilisons ces données complémentaires, l'opérateur doit tenir compte de la date de mise à jour des données et veillera à croiser le plus possible les informations disponibles. Dans le cas où il est impossible de se prononcer sur l'occupation réelle du sol à un endroit précis, le dernier recours consiste à se déplacer sur le terrain afin d'obtenir des certitudes quant à l'occupation du sol. Cette visite nous apportera des informations complémentaires, souvent très importantes (remettant parfois en cause d'autres décisions) et nécessaires à la mise en œuvre d'une simulation hydrodynamique de qualité.

III.3 Élimination

La seconde phase du nettoyage des données consiste à interpoler les valeurs d'altitude du terrain naturel sous ses zones boisées en fonction des informations de topographie disponibles au voisinage de celles-ci. Plusieurs outils d'interpolation sont

disponibles dans l'interface de travail WOLF (DETREMBLEUR, 2003). Pour le processus d'élimination de la végétation, nous en utilisons principalement deux :

- interpolation linéaire entre deux points ;
- interpolation au « huit plus proches voisins ».

Le principal désavantage de cette seconde méthode est le suivant : elle ne permet pas l'interpolation de zones d'emprises importantes. En effet, que la méthode à tendance à propager les erreurs de proche en proche en fonction du parcours de mailles (cf. III.3.2). Lorsque nous avons à traiter ce type de zone, nous utilisons le second outil : l'interpolation linéaire entre deux points (cf. III.3.1). Il est utilisé, dans ce cas, afin de diviser la zone initiale en différents îlots de taille moins importante (une centaine de mailles au maximum).

Nous allons maintenant nous intéresser plus spécifiquement à chaque méthode et en expliquer leur fonctionnement.

III.3.1 Interpolation entre deux points

Comme nous venons de l'évoquer, la méthode d'interpolation linéaire entre deux points d'altitude connue permet de diviser une zone boisée d'emprise importante en petits îlots. Il s'agit d'une méthode d'interpolation élémentaire, elle peut facilement être appréhendée par un exemple très simple.

Si nous connaissons la valeur d'altitude ($f(d) = h$) en deux points séparés par une distance $2d$, soient :

$$f(0) = 110$$

$$\text{et} \quad f(2d) = 120$$

Et que nous souhaitons calculer la valeur d'altitude h ou $f(d)$ en d , la méthode d'interpolation linéaire consiste à prendre la moyenne des deux valeurs $f(0)$ et $f(2d)$ sachant que d si situe à égale distance entre 0 et $2d$:

$$h = f(d) = \frac{110 + 120}{2} = 115$$

En toute généralité, pour connaître la valeur d'altitude en tout point sur la droite définie par les deux points (d_a, h_a) et (d_b, h_b) , nous obtenons par application du développement polynomiale de Taylor au premier ordre la formulation suivante :

$$f(d) = h_a + (d - d_a) \frac{h_b - h_a}{d_b - d_a}$$

La figure suivante (Figure 26) nous montre un exemple particulier permettant d'illustrer au mieux l'utilisation de l'outil d'interpolation linéaire entre deux points. La figure a) représente l'image initiale et les figures b) et c) montrent deux étapes successives de division de la zone de la végétation présente sur la figure a).

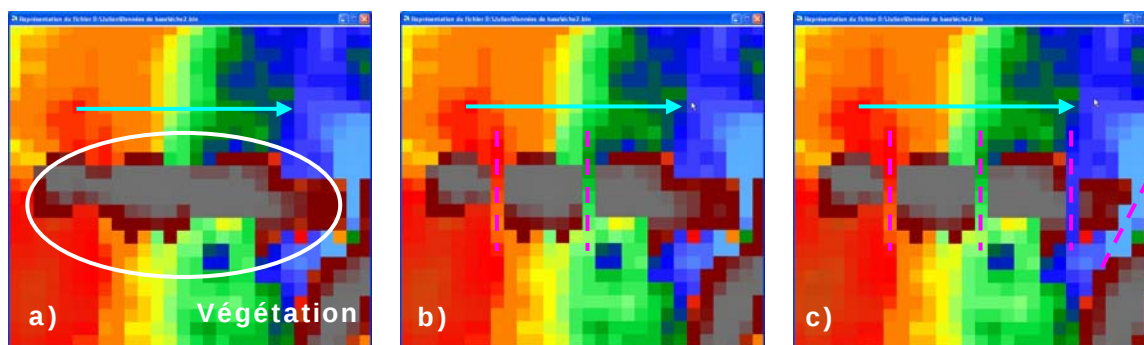


Figure 26 : Subdivision des zones boisées à interpolation linéaire entre deux points (résolution du maillage 1 mètre). (Capture d'écran WOLF 2D).

Afin de limiter les erreurs et imprécisions induites par ces manipulations effectuées sur la topographie, nous veillerons à diviser les zones boisées (traits roses pointillés sur la Figure 26 b) et Figure 26 c)) dans une direction perpendiculaire à l'orientation de la ligne de plus grande pente (flèches turquoises sur la Figure 26).

Il est évident que dans la pratique, d'autres situations beaucoup plus complexes sont rencontrées. Nous montrons ci-dessous (Figure 27) un subset du second écho laser localisé sur l'Amblève à l'aval de Stavelot, au lieu-dit « *Grand Faye* ». Cette figure illustre bien les difficultés qui peuvent être rencontrées lors de cette phase du processus de nettoyage de la topographie.

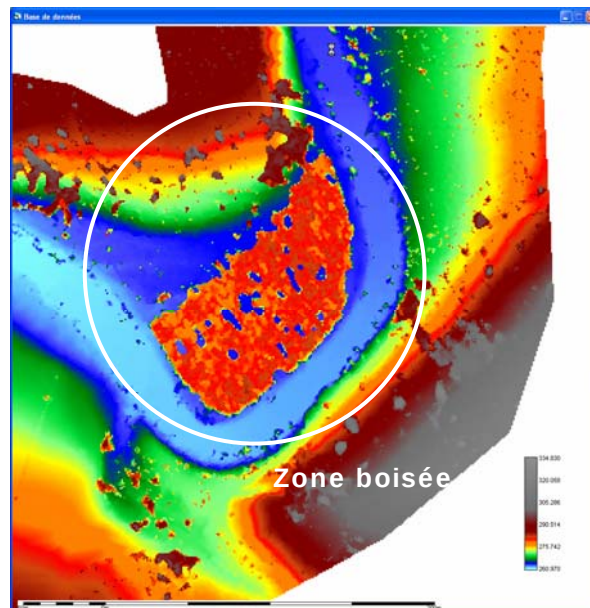


Figure 27 : Exemple de zones boisées pour laquelle le travail de division par l'opérateur devient plus laborieux. (Capture d'écran WOLF 2D).

Dans ce genre de cas, la division de la zone boisée doit être traitée par l'opérateur avec la plus grande vigilance. Il utilisera dans ces configurations l'ensemble des données qui sont à sa disposition.

Cette dernière figure (Figure 27) illustre à nouveau notre propos qui abordait le thème de la détection implicite des zones boisées par l'utilisateur (*cf.* III.2). En effet, nous pouvons aisément identifier, grâce à l'utilisation d'une palette de couleur appropriée, les zones boisées qui semblent perchées au dessus de la topographie.

III.3.2 Interpolation

Après cette première étape de division des zones boisées, nous pouvons utiliser l'outil d'interpolation au « huit plus proches voisins » sans risque de propager des erreurs trop importantes. L'étape préliminaire de division est indispensable pour obtenir un modèle de la topographie cohérent.

Mais avant d'effectuer l'interpolation proprement dite, il faut d'abord sélectionner manuellement toutes les mailles qui vont faire l'objet de cette interpolation (Figure 29 b)). Pour la réalisation de cette phase préalable au traitement, la suite logicielle WOLF nous propose plusieurs fonctions de sélection:

- sélection maille par maille (clique sur les mailles);
- sélection par définition d'un rectangle (touche raccourci MAJ+glisser) ;
- sélection par définition d'un polygone (touche raccourci MAJ+z).

Pratiquement, après la sélection des mailles, la méthode d'interpolation fonctionne de la manière suivante : la valeur d'altitude est égale à la moyenne des altitudes des mailles 8-connexes non sélectionnées pour l'interpolation (les mailles à interpoler dont la valeur a été calculée interviennent dans le calcul). Le processus est ainsi itéré en commençant par la maille en bas à gauche de la sélection vers la maille en haut à droite. Ce processus est illustré à la figure suivante (Figure 28), elle montre le parcours des mailles suivi par l'algorithme (les mailles à interpoler sont numérotées de 1 à 9 dans le sens de parcours) ainsi les mailles participant au calcul de la moyenne parmi les 8-connexes (flèche vers le numéro de la maille à interpoler).

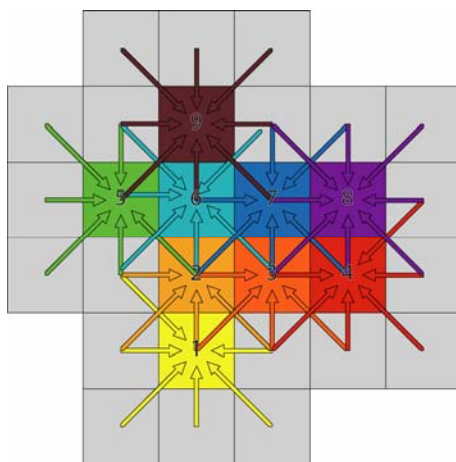


Figure 28 : Processus d'interpolation d'une zone sélectionnée.

La figure suivante (Figure 29) illustre les différentes étapes du processus d'utilisation de cet outil d'interpolation pour éliminer une zone de végétation.

- Figure 29 a) : identification des zones boisées;
- Figure 29 b) : sélection des mailles identifiées une par une;
- Figure 29 c) : interpolation des valeurs d'altitudes par la méthode des « huit plus proches voisins » (touche raccourci CTRL+w).

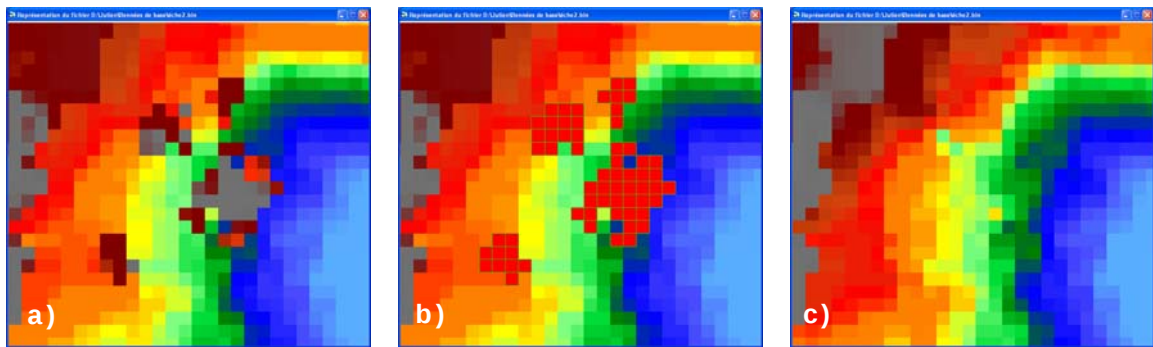


Figure 29 : Interpolation au plus proche voisin (résolution du maillage 1 mètre). (Capture d'écran WOLF 2D).

III.4 Application aux zones inondables

La méthodologie de nettoyage des données LIDAR que nous avons décrite précédemment a été mise en pratique et utilisée pour le nettoyage des modèles de surface couvrant une grande partie des lits majeurs des cours d'eau de la région wallonne, soit plus 800 kilomètres de rivières. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de cartographie des zones inondables de la Région wallonne.

L'importance de la tâche a demandé d'énormes ressources, tant au niveau humain que matériel. Nous avons tenté de quantifier cette charge de travail. En première approximation, nous avons estimé à 1200 heures/ingénieur la durée totale nécessitée par le seul traitement d'élimination des zones boisées sur l'ensemble des MNS. L'avantage qui aurait été gagné grâce à l'utilisation d'une procédure automatisée ou, au mieux semi-automatisée est donc non négligeable.

Dans la perspective de l'exécution de nouvelles études utilisant le même type de données, la démonstration de l'utilité qu'aurait un module d'automatisation de l'ensemble de ces traitements est immédiate. Il permettrait de réduire de manière considérable la durée du travail topographique préalable à l'exécution d'une simulation hydrodynamique de qualité.

Section IV : *Automatisation du traitement*

IV.1 *Introduction*

La méthodologie utilisée jusqu'à présent pour détecter et éliminer les zones boisées des MNS nécessite des ressources humaines et matérielles très importantes. La mise en place d'un nouveau processus de traitement automatisé ou semi-automatisé permettrait de réduire de manière significative ces ressources et d'obtenir des résultats de qualité supérieure.

L'automatisation de ces traitements devra se réaliser en deux phases distinctes. La première étant la phase l'identification des zones boisées. Celle-ci était auparavant réalisée instinctivement par l'opérateur et ne nécessitait aucun traitement particulier. Et la seconde consistant à interpoler la valeur de la topographie sous les zones boisées précédemment isolées.

Les différentes recherches que nous avons menées dans le domaine (*cf.* Section II) nous ont permis de développer notre propre algorithme de traitement et de le mettre en œuvre physiquement sous la forme d'une application codée en Visual Basic. Dans cette section, nous aborderons les concepts théoriques utilisés lors des différentes étapes de traitement du modèle de surface initial. Les considérations d'ordre technique relatives au codage de cet algorithme seront abordées dans la section suivante (*cf.* Section V).

IV.2 Segmentation-Classification

IV.2.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà indiqué dans l'introduction à cette section, la méthode d'élimination manuelle de la végétation ne nécessitait aucune procédure spécifique à appliquer sur les données brutes du second écho laser. En effet, l'identification et l'élimination des zones boisées étaient réalisées assez aisément par un opérateur au bout de quelques heures de pratique.

L'automatisation de ce traitement implique non seulement la mise au point d'une technique d'interpolation permettant la reconstruction topographique de zones d'emprises relativement importantes, mais aussi d'une technique d'identification automatique des zones boisées. C'est ce deuxième point qui sera traité dans la majeure partie de nos développements théoriques concernant l'automatisation du traitement. Le choix de la méthode d'interpolation se révèle être plus simple car nous utiliserons les différentes possibilités de gridding (interpolation sur une grille à maillage régulier) du logiciel Surfer répondant à nos exigences.

La méthodologie que nous avons utilisée pour l'automatisation de la segmentation des données LIDAR initiales se rapproche des travaux effectués par SITHOLE (2005). En effet, nous procédons à une succession de deux segmentations et classifications. Nous aboutissons alors à la classification de notre matrice des hauteurs initiales en 3 classes distinctes :

- les mailles **Sol (SOL)** ;
- les mailles **Sur Sol (SSOL)** ;
 - les mailles **Sur Sol Anthropique (SSA)** ;
 - les mailles **Sur Sol Naturel (SSN)**.

Pour la bonne compréhension de la rédaction, nous rappelons la définition de *segmentation* et de *classification* :

- le terme *segmentation* constitue le fait de diviser l'ensemble de l'information en différents sous-ensembles en se basant sur un ou plusieurs critères ;
- tandis que la *classification* est le fait de déterminer à quel type d'objet appartiennent ces sous-ensembles.

IV.2.2 Données disponibles

Afin de reconstruire un modèle topographique cohérent pour des simulations hydrodynamiques, nous disposons de trois sources de données principales :

- le premier écho du signal LIDAR sous la forme d'une image avec une résolution au sol de 1 mètre ;
- le second écho possédant les mêmes caractéristiques géométriques que le premier écho ;
- les différentes couches d'informations des données vectorielles Top10V-gis de l'IGN.

Chacune de ces données nous fournit des informations très utiles en vue de l'automatisation du traitement que nous allons appliquer pour l'élimination des zones boisées. Parmi ces informations, nous pouvons citer :

- La différence entre le premier et le second écho laser nous donne une information sur la perméabilité de l'obstacle rencontré. En d'autres termes, si la différence entre les altitudes du premier et du second écho est supérieure à une certaine valeur seuil, nous pouvons en déduire que la surface étudiée est perméable aux signaux laser.
- La couche d'information des données Top10v-GIS relative au bâti (strucnet) nous apporte une information supplémentaire sur les mailles appartenant à la classe **SSN**. Notons que cette information n'est pas totalement exhaustive et cohérente avec le LIDAR. En effet, la date de mise à jour de ces données ne correspond pas nécessairement avec celle de l'acquisition des données LIDAR.

Tous nos travaux de segmentation et de classification seront basés sur une analyse du deuxième écho laser. Celui-ci étant déjà débarrassé d'une partie importante de la végétation toujours présente sur le premier écho qui indique, en principe, le sommet de la canopée. L'écho 2 nous sera cependant utile pour déterminer la perméabilité des objets rencontrés. La perméabilité étant directement fonction de la différence d'altitude entre les deux échos laser réfléchis.

IV.2.2.1 Première segmentation

IV.2.2.1.1 Principes

Cette étape initiale consiste à diviser l'ensemble des mailles en deux classes distinctes :

- **SOL** : mailles appartenant au terrain naturel ;
- **SSOL** : mailles dont les valeurs d'altitude sont supérieures à la topographie.

Comme la plupart des références bibliographiques traitant de ce type de segmentation, nous avons choisi d'utiliser un critère de segmentation basé sur l'analyse de gradients présents dans l'image. Pour ce faire, nous avons adapté la méthodologie de segmentation par intersection de profils. Cette méthode nous paraît assez souple pour être

adaptée à nos objectifs et dans le même temps assez précise pour effectuer une segmentation de qualité.

Nous aurions pu réaliser une première sélection basée sur la perméabilité des zones boisées aux signaux laser en calculant sur la différence d'altitude entre les deux échos laser pour toutes les mailles (*cf.* IV.2). Cette procédure a effectivement été éprouvée pour un certain nombre de configurations. Malheureusement, une analyse qui porterait exclusivement sur ce paramètre ne serait pas correcte. Car même si ce critère se révèle assez puissant pour une grande partie des zones boisées, certaines espèces composant la végétation sont totalement opaques aux signaux laser émis dans le proche infrarouge. Dans ce cas, il n'y a donc aucune différence entre les deux échos bien qu'il s'agisse d'une maille à classer dans la catégorie **SSN**.

IV.2.2.1.2 Intersection de profils

Là encore, nous nous sommes inspirés des travaux menés par SITHOLE (2005) lors de ses recherches doctorales. Nous avons utilisé son concept de segmentation par intersection de profils qu'il a développé et mis en œuvre dans sa thèse, méthode qui est décrite en détail dans notre état de l'art (*cf.* II.3.1.3.2).

Nous avons choisi de travailler avec 8 directions de profils mais contrairement aux travaux originaux de SITHOLE, nous avons fixé la largeur des profils à une maille. Les différentes directions des profils sont schématisées à la figure suivante (Figure 30). L'ensemble des mailles de la matrice sera donc visité huit fois au cours du processus de segmentation.

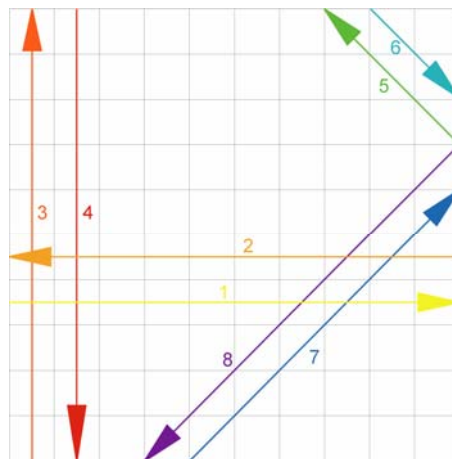


Figure 30 : schéma de parcours des mailles de la matrice des hauteurs selon les différents profils.

Une fois que l'analyse est effectuée dans chaque direction pour toute la matrice, le résultat final consiste à « superposer » tous ces résultats intermédiaires par une technique

nommée par l'auteur : l'intersection. D'où le terme « intersection de profils » pour nommer la méthode dans sa globalité.

IV.2.2.1.3 Analyse des gradients

Pour chacun des profils, nous testons successivement l'appartenance des mailles à la classe **SOL** ou **SSOL**. Cette analyse de base sur les gradients de pentes qui existent entre chaque maille consécutive dans le profil.

Nous avons tout d'abord utilisé et testé une identification des gradients de pentes élevés par une analyse du type filtrage de *Sobel* (cf. II.3.1.1.2), mais celle-ci se révèle assez difficile à paramétrer. Nous avons rencontré quelques difficultés à isoler les gradients de pentes limites qui définissent la frontière entre le « Sol » et les objets en « Sur Sol ». C'est pour cette raison que nous nous sommes orientés vers une analyse originale de détection des objets **SSOL**.

Notre méthode est inspirée par l'ensemble de nos lectures, elle assez naturelle et ne nécessite le calage que de deux paramètres. Le profil est parcouru de maille en maille. Lorsque la différence entre deux mailles successives est supérieure au premier paramètre *alpha*, la maille est classée en **SSOL**. Le parcours du profil continue jusqu'à ce que la valeur d'altitude soit inférieure à une pente critique calculé (*beta*) à partir de la dernière maille classée en **SOL**. À cet instant, la maille est classée dans la catégorie « Sol ». Le processus est itéré jusqu'à ce que la fin du profil soit atteinte. Cette démarche est illustrée à la figure suivante (Figure 31), elle permet de se rendre compte assez facilement du fonctionnement de l'algorithme.

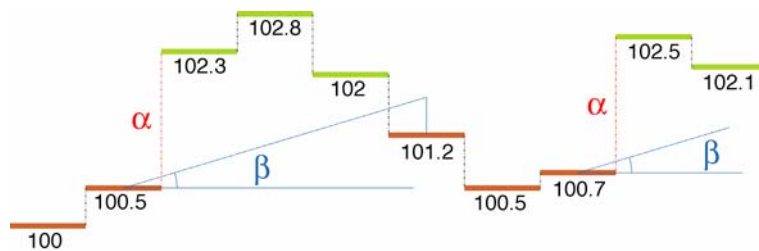


Figure 31 : Vue en coupe schématique de la segmentation d'un profil. Les mailles « Sol » sont représentées en brun et les mailles « Sur Sol » en vert.

Pour chaque orientation de profil, toutes les mailles sont testées (à l'exception des mailles de bord au début de chaque profil). À chaque fois, une nouvelle matrice est créée, elle contient la valeur 1 si la maille est considérée comme étant **SSOL** et 0 sinon.

IV.2.2.2 Première classification

Suite à la première segmentation, huit matrices binaires (matrice contenant uniquement des valeurs de 1 ou de 0) différentes sont créées. L'étape préalable à la classification consiste à sommer toutes ces matrices afin d'obtenir une seule matrice contenant des valeurs comprises en 0 et 8. Les mailles qui obtiennent un score de 8 ont une probabilité très élevée d'appartenir au « Sur Sol » tandis que pour celles qui ont obtenu un score de 1, la probabilité est extrêmement faible.

Dans le cas probable où certaines mailles ont été classées à tort dans la catégorie **SSOL** pour une ou plusieurs orientations de profil, l'utilisateur peut définir la valeur minimale de la somme pour qu'une maille soit effectivement classée dans la catégorie en « Sur Sol ».

En pratique, ce seuil se situe entre 3 et 5 lorsque la segmentation a lieu dans un paysage à relief marqué et tend à s'approcher de 1 lorsque la topographie devient plus lisse et régulière.

IV.2.2.3 Seconde segmentation

IV.2.2.3.1 Principes

La première succession d'une segmentation et d'une classification a permis la création d'un masque binaire de la classe « Sur Sol ». La seconde étape de notre classification est maintenant de diviser cette classe en deux classes filles :

- la classe **Sur Sol Anthropique (SSA)** ;
- la classe **Sur Sol Naturel (SSN)**.

Notre méthode de segmentation se base sur l'hypothèse selon laquelle la différence entre le premier et le second écho laser est en moyenne plus importante pour les zones boisées que pour les bâtiments ou tout autre objet anthropique. Bien que certaines essences d'arbres soient relativement opaques aux signaux laser, nous supposons qu'elles le sont moins que les objets anthropiques. Ce postulat se vérifie en pratique lorsqu'on utilise la valeur moyenne de la différence entre les deux échos pour chaque objet.

Pour affiner notre analyse, nous permettons à l'utilisateur d'enrichir nos données de base LIDAR par les données vectorielles Top10v-GIS de l'IGN. Si elles sont disponibles, ces données interviendront dans le processus de classification (*cf.* IV.2.2.4) comme critère d'appartenance à la classe des objets d'origine anthropique - **SSA**.

IV.2.2.3.2 L'algorithme

Pratiquement, le calcul de la moyenne de la différence d'altitude entre les deux échos est réalisé en deux temps. Le premier consiste à identifier les différents îlots de zones boisées et le second, à parcourir l'ensemble de ceux-ci et d'y calculer la différence moyenne.

La détection des îlots est effectuée sur base de l'hypothèse d'appartenance de deux mailles à un même îlot si elles sont voisines de connexité 4. En d'autres termes, si deux mailles sont voisines par un de leurs cotés, elles font partie de la même zone. Tandis que deux autres sont voisines par un de leurs angles, elles ne sont pas considérées comme appartenant à un même ensemble.

Lorsqu'une maille classée en **SSOL**, est rencontrée pour la première fois l'algorithme identifie toutes les mailles de la zone selon la méthodologie expliquée plus haut (voisinage de connexité 4) elles sont ensuite visitées et la moyenne de la différence entre les deux échos est calculée. Ce processus prend fin lorsque l'ensemble de la matrice a été parcouru.

IV.2.2.4 Seconde classification

Nous voici arrivés à l'ultime étape de notre classification, elle se limite au choix d'un seul paramètre. En effet, cette dernière classification est basée sur un seul critère, la différence moyenne entre le premier et le second écho. L'utilisateur doit choisir une valeur seuil pour cette différence. Si la valeur calculée pour un îlot est plus importante que le seuil fixé, les mailles qui le composent seront classées dans la catégorie **SSN** sinon, dans la catégorie **SSA**.

Si l'utilisateur dispose de données vectorielles Top10v-GIS, et qu'elles ont au préalable été rasterisées (i.e. codées sous la forme de matrice discrétisée), elles peuvent être utilisées dans la classification. Étant donné que la date de mise à jour des données n'est pas identique, les données Top10v-GIS ne peuvent pas être considérées comme vérité (En règle générale, les données vectorielles sont plus anciennes que l'acquisition LIDAR.). Par contre, la méthode de traitement supposera que tous les bâtiments présents sur les données Top10v-GIS sont également présents sur les données LIDAR.

IV.2.2.5 Généralisation du résultat

IV.2.2.5.1 Intérêt d'un processus de généralisation

À la suite de la procédure que nous venons de décrire, nous obtenons théoriquement un masquage binaire des zones boisées présentes dans le modèle de surface initial. En pratique, force est de constater qu'une série de mailles sur le pourtour de ce masque n'ont pas été correctement identifiées dans la classe **SSN**. Cette erreur de classification provient, en règle générale, du caractère arbitraire du choix des paramètres *Alpha* et *beta*.

Puisqu'elles sont localisées à la frontière des zones boisées, ces mailles ont une influence très importante lors de l'interpolation des altitudes. Ce problème nous a forcé à introduire un nouveau module de généralisation dans le processus de classification des mailles de la matrice.

IV.2.2.5.2 Le processus de généralisation

La solution que nous proposons d'appliquer si nécessaire est assez simple. Elle consiste à parcourir l'ensemble des frontières de toutes les zones classées dans la catégorie **SSN** par une fenêtre de convolution. Sa taille peut être adaptée par l'utilisateur en fonction du degré de généralisation qu'il veut appliquer sur base des résultats intermédiaires obtenus lors du traitement (fenêtre carrée de 3, 5 ou 7 mailles de côté). Pour chaque position de la fenêtre, on applique un critère de classification des mailles **SOL** plus ou moins restrictif en fonction du résultat escompté. Les quatre critères sont cités et expliqués ci-dessous :

- parmi les mailles **SOL** présentes dans la fenêtre de convolution, seule celle qui possède la plus grande valeur d'altitude est reclassée **SSN** ;
- parmi les mailles **SOL** présentes dans la fenêtre de convolution, celles qui possèdent une valeur supérieure à la moyenne des mailles « Sol » sont reclassées **SSN** ;
- parmi les mailles **SOL** présentes dans la fenêtre de convolution, seule celle qui possède la plus petite valeur d'altitude n'est pas reclassée **SSN** ;
- toutes les mailles **SOL** présentes dans la fenêtre de convolution sont reclassées **SSN**.

L'utilisateur sera appelé à choisir en fonction de différents paramètres propres à la topographie de la zone étudiée ou bien selon d'autres critères extérieurs le type de généralisation qu'il souhaite appliquer ou ne pas appliquer au résultat intermédiaire.

IV.3 Interpolation

IV.3.1 Préambule

Au terme de la segmentation de nos données LIDAR, nous obtenons un modèle numérique pour lequel l'ensemble des valeurs d'altitude des mailles classées dans la catégorie **SSN** sont masquées. Le traitement que nous allons maintenant appliquer à notre modèle est l'interpolation de nouvelles valeurs d'altitude pour les mailles **SSN**.

Il existe un très grand nombre d'algorithmes et de logiciels offrant la possibilité d'interpoler les valeurs d'altitude. Nous pouvons notamment citer parmi les plus répandus d'entre eux : Surfer, Global Mapper, Gocad (développé à l'ESGT - *École Supérieure des Géomètres Topographes*), ...

Cependant, nous avons choisi d'utiliser la technologie et les méthodes d'interpolations présentes dans Surfer 8 – Golden Software. Notre choix a été motivé par plusieurs facteurs importants. D'abord, ce logiciel possède une renommée internationale en

la matière. Et ensuite, il permet d'être automatisé par des lignes de code Visual Basic. L'ensemble de ces raisons font que l'unité de Géomatique de l'Université de Liège l'utilise depuis de nombreuses années comme outil d'interpolation. Notons aussi que le second facteur revêt pour nous une importance particulière dans l'optique d'une implémentation de notre méthodologie dans la suite logicielle WOLF.

IV.3.2 Première sélection des méthodes

IV.3.2.1 Introduction

Parmi les nombreuses méthodes d'interpolation disponibles dans le logiciel choisi, toutes ne conviennent pas pour des applications d'interpolation de la topographie. Nous allons devoir effectuer une sélection. Cette sélection sera effectuée en deux temps.

Afin de restreindre le choix des méthodes, nous allons réaliser préalablement à toute analyse complémentaire, une première sélection sur base de la littérature traitant du logiciel et de ces méthodes d'interpolation (YANG C-S & al., 2004). Ensuite, nous éprouverons les méthodes retenues dans un test qui sera mené à partir des données LIDAR dont nous disposons. Les essais porteront sur leur habilité à reconstruire la topographie dans plusieurs configurations et suivant différentes méthodologies de traitement.

IV.3.2.2 Sélection

Le logiciel Surfer 8 propose 12 méthodes d'interpolations différentes. Nous les détaillerons plus en détails dans la suite de notre exposé, toutefois voici une liste exhaustive de ces méthodes :

- Inverse Distance to a Power
- Kriging
- Minimum Curvature
- Modified Shepard's Method
- Natural Neighbor
- Nearest Neighbor
- Polynomial Regression
- Radial Basis Function
- Triangulation with Linear Interpolation
- Moving Average
- Data Metrics
- Local Polynomial

Notre première sélection est basée essentiellement sur une analyse expérimentale (YANG C.-S. & al., 2004). Dans la suite, nous avons résumé la démarche proposée par cet auteur.

L'étude est menée à partir d'un modèle numérique de terrain maillé à 5 mètres suivant une grille régulière. L'étape initiale consiste à former un modèle dont la résolution au sol est de 40 mètres. L'expansion de la résolution du modèle est réalisée sans traitement numérique particulier, mais simplement en ne gardant systématiquement qu'une valeur d'altitude sur 64. Ainsi, le modèle résultant n'aura pas subi d'altérations pouvant être introduites lors de manipulations numériques. Ensuite, chacune des méthodes de Surfer 8 est utilisée afin de recalculer un modèle de résolution identique au modèle initial.

L'analyse se borne enfin à effectuer la différence entre le modèle initial et le modèle interpolé par Surfer 8 à une résolution de 5 mètres. Les résultats sont présentés pour chaque interpolation sous la forme d'un graphique de la fréquence d'apparition d'un résultat dans l'image en fonction des résultats de la différence (Figure 32). Cette figure donne un aperçu succinct des résultats obtenus.

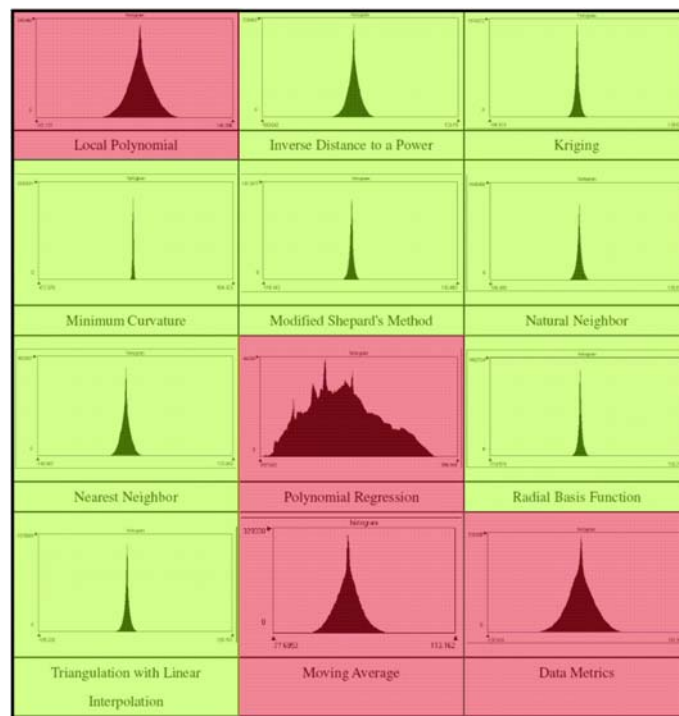


Figure 32 : Analyse des méthodes d'interpolation de Surfer 8. En vert, les méthodes retenues et en rouge, celles rejetées (Source : YANG C-S & al., 2004).

Les valeurs numériques précises des paramètres statistiques calculés pour chaque méthode d'interpolation sont reprises dans le tableau suivant (Tableau 3).

Interpolation method	Use time	Min.	Max.	Mean	STD. Dev.
Inverse Distance to a Power	00:23:06	-110.34	126.19	-0.023	8.227
Kriging	01:55:29	-104.93	128.63	-0.017	3.602
Minimum Curvature	00:02:55	-472.88	510.79	-0.023	10.641
Modified Shepard's Method	00:01:08	-119.6	144.34	-0.016	3.586
Natural Neighbor	00:11:57	-106.65	126.61	-0.019	3.880
Nearest Neighbor	00:01:21	-143.5	175.39	-0.068	8.495
Polynomial Regression	00:00:02	-697.88	956.95	0.304	304.533
Radial Basis Function	02:22:57	-114.57	132.4	-0.016	3.472
Triangulation with Linear Interpolation	00:00:06	-106.31	126.76	-0.018	4.061
Moving Average	00:00:10	-83.86	113.16	0.015	13.612
Data Metrics	00:18:08	-138.04	154.02	-1.069	20.638
Local Polynomial	00:25:24	-161.73	149.95	-0.113	20.133

Tableau 3 : Comparatif des paramètres statistiques et du temps de calcul obtenus lors de l'expérimentation (Source : YANG C-S & al., 2004).

Étant donné qu'il ne s'agit ici que d'une sélection préliminaire, nous allons effectuer notre sélection sur base des moyennes et des écarts-types respectifs de chaque méthode d'interpolation. Il apparaît clairement que les quatre méthodes suivantes :

- Polynomial Regression ;
- Moving Average ;
- Data Metrics ;
- Local Polynomial ;

présentent des précisions inférieures aux autres méthodes soumises à l'expérimentation (Tableau 3). Dans la suite de nos développements, nous n'utiliserons donc pas ces quatre méthodes et nous nous concentrerons sur les huit autres qui montrent d'ores et déjà des résultats préliminaires plus encourageants.

Mais, avant de procéder à nos propres essais, nous allons revenir sur certains aspects théoriques relatifs aux méthodes que nous venons de sélectionner.

IV.3.2.3 *Rappels théoriques*

Après cette première sélection basée sur la littérature existante, nous allons maintenant nous pencher plus spécialement sur les différentes méthodes choisies. Nous allons tout d'abord aborder chacune d'entre elles par un bref rappel théorique, ensuite nous les examinerons plus en détail dans une expérimentation poussée.

IV.3.2.3.1 *Plus proche voisin*

Cette méthode d'interpolation assigne au chaque nœud du grid (réseau régulier de points) la valeur de l'observation la plus proche. L'ellipse de recherche définit la zone dans laquelle ce point proche doit se trouver. Elle peut être paramétrée dans les options de la méthode en spécifiant la longueur de ses demi-axes. Dans le cas où aucun point n'intercepterait cette ellipse, le nœud en question reçoit la valeur « NO DATA », typiquement -9999.

IV.3.2.3.2 *Inverse distance élevée à une puissance*

L'hypothèse de base est que l'influence d'un point sur un nœud du grid diminue en fonction de la distance qui les sépare. Cette fonction varie avec la puissance choisie, généralement 1 ou 2. Un poids est attribué à chaque point situé dans la zone de recherche, la somme des poids est toujours égale à un.

Cette méthode d'interpolation est exacte, si les coordonnées planimétriques d'une observation coïncident avec celles d'un nœud du grid à interpoler, cette observation recevra un poids d'une unité, ce qui implique que toutes les autres observations recevront un poids de 0 et n'interviendront pas dans le calcul de la valeur du nœud. Bien qu'il s'agisse d'une méthode exacte, Surfer permet d'ajouter un paramètre de lissage afin de réduire les artefacts induits par le processus de calcul.

IV.3.2.3.3 *Krigeage*

Le krigeage est une méthode géostatistique très connue et utilisée dans de nombreux domaines. La méthode du krigeage tend à recréer la tendance générale d'une surface (un point haut peut appartenir à une ligne de crête ou bien à un monticule isolé). Le poids associé à chaque valeurs des données est déterminé par un variogramme qui est soit calculé de manière empirique sur base de données ou bien représenté par une fonction type (dans notre expérimentation nous utiliserons le variogramme linéaire par défaut)

Surfer permet d'utiliser le krigeage comme une méthode exacte ou non exacte (en incluant un algorithme de lissage directement dans la méthode) ou encore d'inclure la notion d'anisotropie.

IV.3.2.3.4 *Minimum Curvature*

Comme son nom l'indique, cette méthode largement utilisée dans les sciences de la terre tente de minimiser la courbure du modèle construit en respectant au mieux les données sources. Ce n'est pas une méthode d'interpolation exacte, l'intégrité des données initiales n'est donc pas garantie.

IV.3.2.3.5 *Radial Basics Function*

L'interpolation par Radial Basics Function regroupe un ensemble de plusieurs méthodes d'interpolation dans un grid. En termes d'interpolation de topographie, la

méthode multiquadratique est considérée par beaucoup comme étant la plus efficace. L'ensemble de ces fonctions sont des méthodes d'interpolation exactes, mais Surfer propose l'intervention d'un algorithme de lissage dans le processus.

IV.3.2.3.6 Shepard modifié

Sa méthodologie est semblable à la méthode d'inverse de la distance élevée à une puissance. Cependant l'algorithme utilise une méthode par moindres carrés complémentaire afin d'atténuer les artefacts pouvant apparaître lors de l'interpolation.

IV.3.2.3.7 Triangulation

Cette méthode d'interpolation relativement rapide fonctionne en deux temps distincts :

- Construction du réseau de triangles optimisé de *Delaunay* (ou TIN - *Triangulated Irregular Network*). Cette construction est l'unique triangulation telle que pour un ensemble de n points, un cercle passant par les trois points d'un triangle ne contient aucun autre point.
- Interpolation linéaire des nœuds à l'intérieur de chaque triangle. Cette interpolation est calculée par une méthode analogue à celle illustrée à la figure suivante :

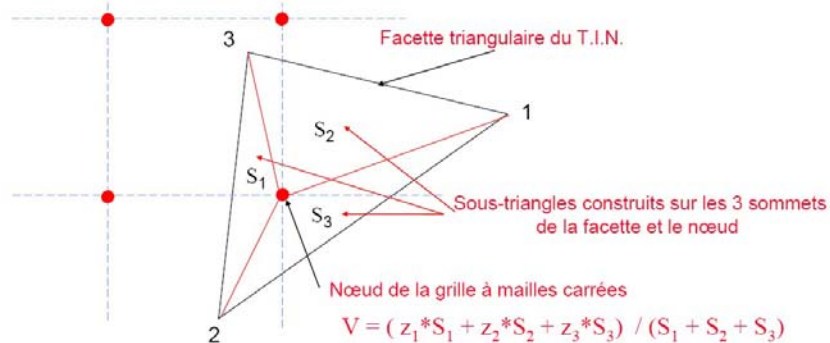


Figure 33 : interpolation dans un réseau irrégulier de triangles (Source : Donnay, 2004).

Dans Surfer, il est possible de sauvegarder le TIN dans un fichier indépendant.

IV.3.2.3.8 Voisin naturel

Cette méthode se fonde sur la tessellation de *Thiessen*. En mode vecteur, ce réseau de polygones est construit de la façon suivante : les cotés des polygones sont les perpendiculaires médiatrices des segments reliant les entités ponctuelles deux à deux et formant un réseau de triangles selon le critère de *Delaunay* (cf. IV.3.2.3.7).

Si un nouveau point est ajouté au set de données déjà existantes, le réseau de polygones sera modifié. La méthode d'interpolation attribue un poids à chaque observation en directement proportionnel à la surface du nouveau polygone construit à la suite de la modification du réseau.

En remarque complémentaire, nous informons que cette méthode d'interpolation ne permet pas l'extrapolation des valeurs au delà de la limite des données.

IV.3.3 Établissement d'une clé de sélection

IV.3.3.1 Introduction

Dans un chapitre précédent (*cf.* IV.3.2.2), nous avons utilisé des références bibliographiques dans le but d'effectuer une présélection des méthodes d'interpolation disponibles dans le logiciel Surfer 8. Parmi elles, les huit méthodes retenues vont maintenant faire l'objet d'un test. Celui-ci a pour objectif la détermination de critères précis qui pourront être exploités par l'utilisateur lorsqu'il devra effectuer le choix d'une méthode d'interpolation des altitudes sous les zones boisées.

IV.3.3.2 Choix de la zone de test

Notre expérience dans l'utilisation et le traitement de données LIDAR pour le projet de cartographie des zones inondables en Région wallonne a été mise à profit pour effectuer une sélection pertinente de la zone d'expérimentation. Nous l'avons choisie parce qu'elle concentre un grand nombre de caractéristiques intéressantes pour tester une méthode d'interpolation. Notamment, il existe des structures assez complexes et difficiles à reconstruire en rive gauche (sens d'écoulement vers le haut de l'image). Le site (défini par un rectangle bleu à la figure suivante) est localisé à Chanxhe en province de Liège, un plan de situation détaillé est fourni à la figure ci-dessous (Figure 34).

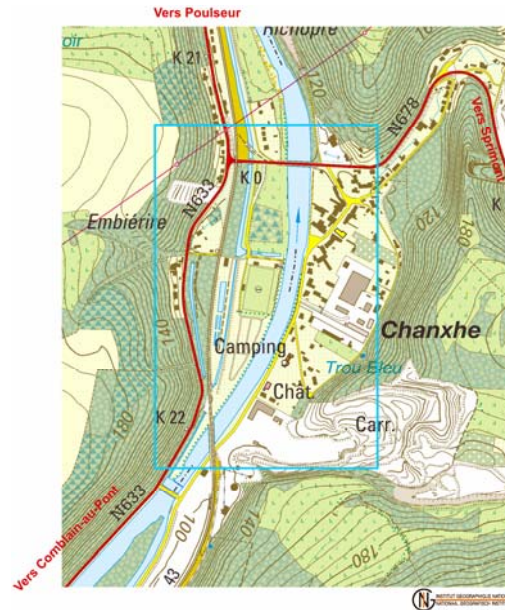


Figure 34 : Plan de situation (Sources : données Top10r – IGN).

IV.3.3.3 Méthodologie de test

Nous éprouverons ces méthodes dans quatre cas types et nous analyserons pour chacun d'eux cinq paramètres que sont le temps de calcul, le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart type de la différence entre la situation réelle et le résultat de l'interpolation. Les données de base de notre expérimentation sont les données altimétriques LIDAR discrétisées à un mètre. Comme que nous ne disposons pas des valeurs de la topographie réelle sous les zones boisées, nous considérerons comme vérité terrain les altitudes données par le deuxième écho laser nettoyé manuellement.

La mise en œuvre de cette expérimentation nécessite l'utilisation de trois logiciels : WOLF (données), Surfer (interpolation), Idrisi (traitements d'image). Afin de garantir l'interopérabilité entre ces trois outils, nous avons créé deux exécutables Visual Basic très utiles pour simplifier le traitement. Le premier est un outil de conversion de format d'image (de WOLF vers Idrisi et Surfer) et le second permet d'extraire les paramètres statistiques d'une image Idrisi.

IV.3.3.3.1 Choix et masquage des zones de test

En règle générale, les zones boisées ne sont pas totalement opaques aux signaux laser. En effet, dans la majeure partie des cas, il existe de l'information d'altitude de la topographie réelle incluse dans ces zones. Pour simuler ce fait, nous avons choisi de ne pas masquer certaines mailles en suivant une distribution irrégulière.

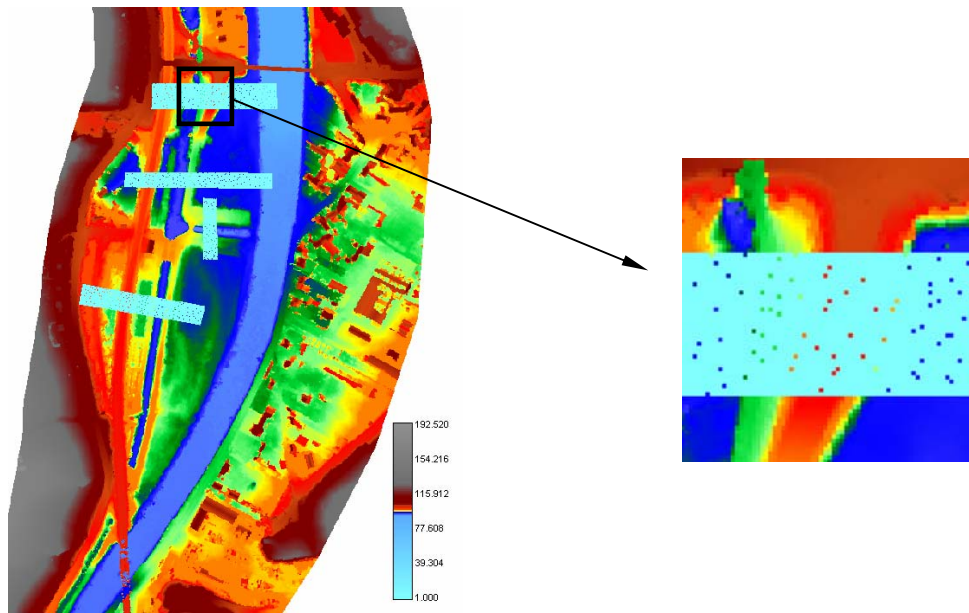


Figure 35: Masquages des zones de test à interpoler.

La figure précédente illustre l'artifice que nous avons choisi d'utiliser pour simuler la présence de végétation. Notons que dans la suite, d'autres interpolations seront aussi réalisées à partir de données identiques mais sans la présence de cette information sur les « points bas » à l'intérieur des zones boisées (*cf.* IV.3.3.4).

IV.3.3.3.2 Importation de la matrice de test dans Surfer via WIS converter.exe.

Une fois le masquage réalisé, nous passons à l'interpolation dans le logiciel Surfer 8. Le premier problème de conversion apparaît, mais il est rapidement contourné par le module de conversion des données que nous avons développé. Son fonctionnement est extrêmement simple, il peut être résumé par la succession des étapes suivantes :

- identification du chemin vers le fichier de méta données WOLF (xxx.bin.txt) à l'aide d'un explorateur de document Windows ;
- sélection des fichiers qui seront créés (données et méta données Idrisi et/ou fichier de données Surfer) ;
- déclenchement du processus de conversion, les fichiers « output » sont alors générés et sauvés dans le même répertoire et avec le même nom que la matrice WOLF initiale.

La conversion de la matrice WOLF vers un fichier de données Surfer est assez aisée. Elle consiste en une lecture séquentielle de la matrice WOLF et une écriture des coordonnées tridimensionnelles (X , Y , Z) de l'ensemble des points dans un fichier texte.

Par la même occasion, nous créons les fichiers images (.rst) et métadonnées (.rdc) Idrisi à partir des informations contenues dans le fichier de métadonnées associé à la

matrice WOLF. En ce qui concerne la conversion des fichiers images, le travail est grandement simplifié. Vu la similitude de codage entre le logiciel WOLF et Idrisi, il suffit simplement d'inverser de l'ordre des lignes de la matrice. En effet, les valeurs contenues dans la matrice sont formatées en nombre réel simple précision (single) et codés en binaire.

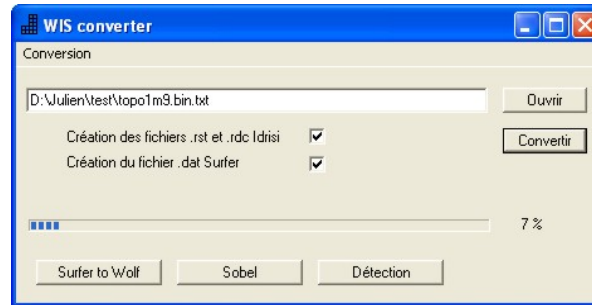


Figure 36 : Outil de conversion de format.

IV.3.3.3.3 Interpolation avec Surfer dans les zones de vide.

À l'aide du fichier de données Surfer (xxx.dat) qui vient d'être créé par notre module, nous allons pouvoir passer à l'interpolation proprement dite des valeurs d'altitude pour les mailles qui ont été masquées.

Nous avons choisi d'utiliser toutes les options d'interpolation par défaut. Si nous les avions ajustées, la comparaison entre les différentes méthodes aurait été beaucoup ardue puisque multipliant fortement le nombre de cas test (en fonction des possibilités d'ajustement des différents paramètres).

Néanmoins, un certain nombre de ces options doivent être adaptées en vue de nos futurs traitements. Le formatage du fichier interpolé devra impérativement être du type GS ASCII. En effet, il s'agit du seul formatage permettant l'importation du GRID Surfer dans Idrisi Kilimanjaro, il est aussi facilement décryptable en raison de son codage en ASCII. La taille du maillage de la matrice interpolé sera identique à celle des données de base (1 mètre).

Parmi les considérations fonctionnelles, nous pouvons remarquer que certaines méthodes d'interpolation nécessitent un temps de calcul important (*cf.* Tableau 4 à Tableau 8), cette constatation nous a poussé à automatiser l'exécution des interpolations par un outil proposé par le logiciel Surfer. Ces détails d'ordre plus pratique seront expliqués en détail dans la suite de notre rédaction (*cf.* IV.3.4.2).

IV.3.3.3.4 Post traitement dans Idrisi

Nous disposons maintenant de l'ensemble des informations nécessaires à l'obtention des statistiques de la différence entre l'interpolation et la vérité terrain. Le reste de la

procédure se résumant à une suite de traitements d'image que nous allons effectuer dans le logiciel Idrisi. Cette procédure est résumée ci-dessous par quatre points principaux :

- Importation du GRID Surfer dans Idrisi (formatage GS ASCII) (Figure 37 a)) ;
- Importation de la vérité terrain dans Idrisi par l'intermédiaire du module WIS converter ;
- Différence avec la vérité terrain (fonction Overlay) (Figure 37 b)) ;
- Multiplication par le masque binaire (fonction Overlay) (Figure 37 c)).

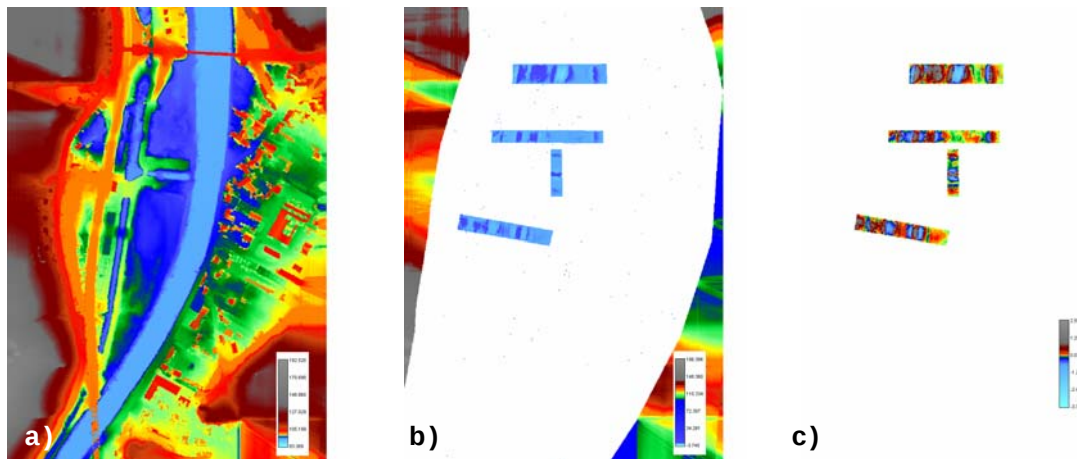


Figure 37: Visualisations du résultat des traitements dans le logiciel IDRISI Kilimanjaro.

Cette dernière image (Figure 37 c)) montre les valeurs de la différence entre la topographie initiale et les valeurs des mailles interpolées. Il s'agit de l'image qui va être analysée par la suite et nous servira de base pour l'étude des méthodes d'interpolation retenues.

IV.3.3.3.5 Analyse des résultats avec Statistiques.exe.

Une fois que l'image de la différence entre l'interpolation et la vérité terrain est construite, il ne reste plus qu'à calculer les statistiques qui lui sont associés.

Là encore, nous avons développé un module permettant d'automatiser la procédure. Ses atouts sont d'une part l'affichage du graphique de la fréquence des valeurs observées dans le calcul de la différence entre l'interpolation et la vérité terrain et d'autre part l'écriture des paramètres statistiques dans un fichier associé à l'image. Son fonctionnement est le suivant :

- identification du chemin vers le fichier de méta données Idrisi avec l'aide d'un explorateur de document Windows (xxx.rdc) ;
- détermination de la (des) valeur (s) à exclure du calcul des statistiques (ici, il s'agit de la valeur 0 – valeur « NO DATA ») ;

- calcul des statistiques et écriture du fichier résultat.

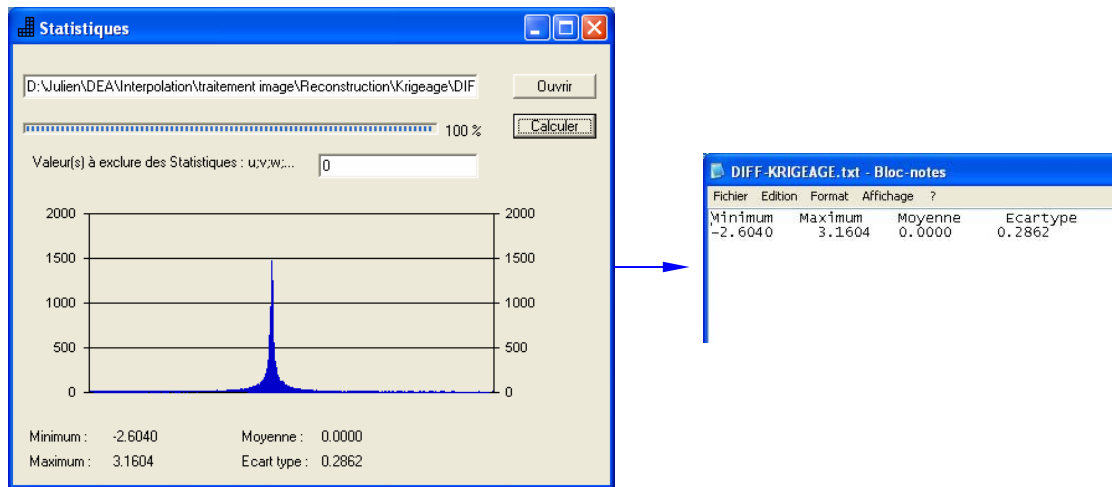


Figure 38 : Extraction des statistiques d'une image Idrisi. Exemple de l'expérimentation effectuée avec le Krigeage.

Le module permet également l'extraction des statistiques (le minimum, le maximum, la moyenne et l'écart-type) dans un fichier texte qui est sauvé dans le même dossier et avec le même nom que l'image à laquelle il se rapporte.

IV.3.3.3.6 Résumé de développement

Afin d'aider à la compréhension globale du développement amenant à l'extraction des statistiques. Nous avons construit un organigramme reprenant toute la procédure de traitement étape par étape. Celui-ci est présenté à la figure suivante (Figure 39) :

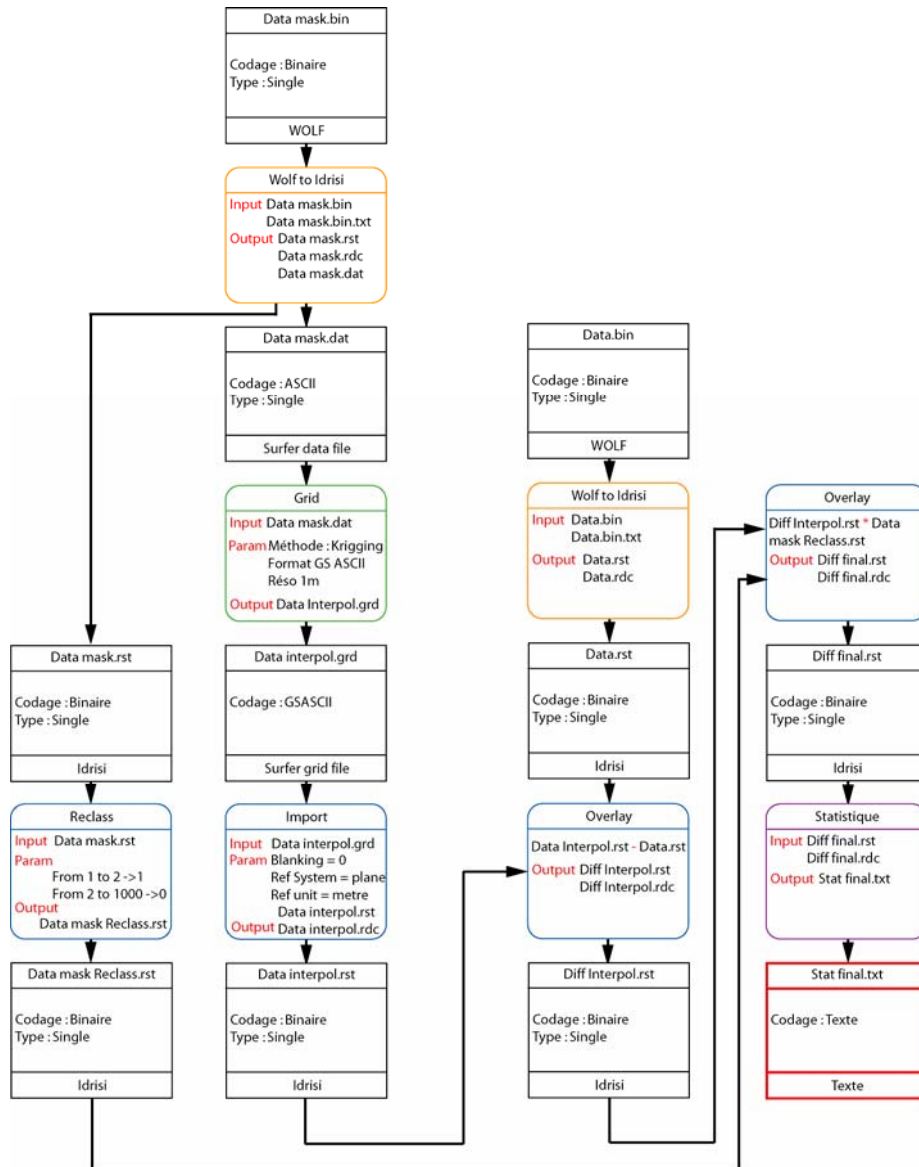


Figure 39 : Organigramme du processus conduisant au calcul des statistiques des méthodes d'interpolation.

Les rectangles noirs correspondent aux fichiers images. Le rectangle rouge correspond au fichier texte qui contient les statistiques extraites suite au processus développé. Les autres rectangles aux angles arrondis symbolisent les traitements qui sont appliqués aux matrices. Pour chaque logiciel ou module, nous avons associé une couleur :

- orange : le module de conversion WIS convertir ;
- vert : le logiciel Surfer ;
- bleu : les traitements d'image Idrisi ;
- mauve : le module d'extraction des statistiques de l'image Idrisi.

IV.3.3.4 Différentes configurations

Afin d'éprouver les différentes méthodes retenues jusqu'à présent, nous avons mis en œuvre avec plusieurs configurations des zones de données. La figure suivante (Figure 40) illustre les 3 configurations supplémentaires que nous avons testées

- l'extension des zones identiques mais les points bas sont supprimés (Figure 40 a)) ;
- l'extension de la zone est plus importante, la distance à l'information d'altitude augmente pour les points situés au centre de la zone (Figure 40 a)) ;
- l'axe de la zone fait un angle de 45 degrés avec l'orientation moyenne des plus grandes pentes de la topographie (Figure 40 a)).

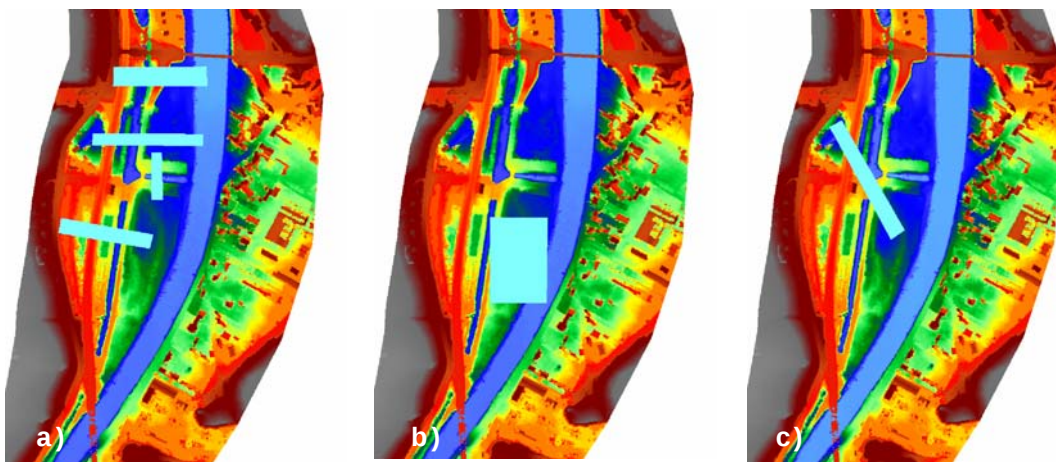


Figure 40 : Visualisations des 3 cas tests supplémentaires a) b) c).

IV.3.3.5 Autres paramètres testés

Pour être le plus exhaustif possible dans notre expérimentation, nous avons choisi d'analyser également l'influence d'autres facteurs qui peuvent être pris en compte dans Surfer 8. Nous testerons l'influence de l'introduction de lignes de crêtes ou *breaklines* ainsi que de celle de l'agglomération des données.

Ces deux paramètres supplémentaires seront testés avec la méthode du krigeage dans une seule configuration, celle qui simule au mieux la végétation (présence de points bas inclus dans les masques). Nous supposons que ce cas test représente bien la tendance de l'évolution des résultats en fonction de ces deux facteurs.

IV.3.3.5.1 Breaklines

Les fichiers Blanking File Surfer (xxx.blm) sont des fichiers textes formatés en ASCII. Ils sont généralement utilisés pour le stockage de données géographiques, mais aussi plus particulièrement pour des coordonnées tridimensionnelles (X , Y , Z) des points formant les lignes de crêtes ou *breaklines* qui sont présentes dans notre modèle. Un exemple de ce type de fichier est illustré dans la figure suivante (Figure 41).

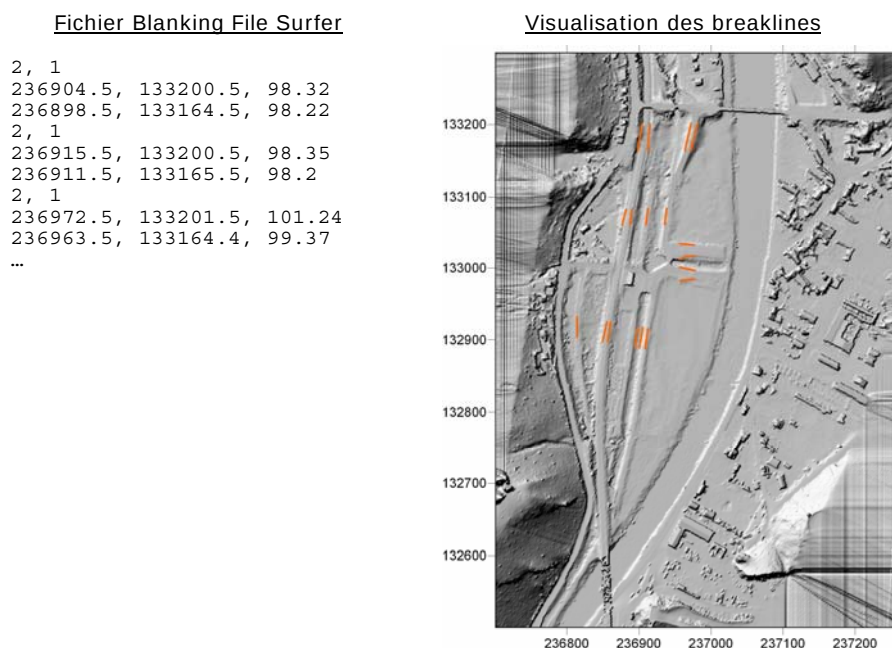


Figure 41 : Extrait d'un fichier .bln et visualisation des *breaklines* avant l'interpolation (orange).

En pratique, les algorithmes d'interpolation de Surfer utilisent les *breaklines* comme s'il s'agissait de données complémentaires au LIDAR. Mais la surface interpolée passera obligatoirement par ses segments tridimensionnels.

Bien que la combinaison de ces nouvelles données avec les données de base du modèle révèle une amélioration sensible du résultat de l'interpolation, toutes les méthodes proposées dans Surfer 8 ne supportent pas les *breaklines*. Parmi celles que nous avons sélectionnées, nous retrouvons :

- la méthode de Shepard modifiée ;
- le voisin naturel ;
- la triangulation avec interpolation linéaire.

IV.3.3.5.2 Agglomération

Durant notre expérimentation, il n'a pas été question de modifier la résolution des données LIDAR. Or, lorsque nous utilisons ces données pour des modélisations hydrodynamiques, il est fréquent que ces données soient agglomérées pour augmenter la vitesse de calcul. Le nombre de mailles de calcul potentiel étant lié par une fonction au carré à la variation de la taille de la maille.

Bien que les conclusions de cette expérimentation peuvent paraître triviales, nous avons tout de même jugé intéressant de déterminer par une expérimentation le moment le plus opportun pour réaliser cette agglomération : avant, pendant ou après l'interpolation.

Nous nous sommes bornés à analyser un seul cas test, l'interpolation par krigeage sur les données masquées avec points bas.

Pour résumer trois nouvelles expérimentations seront effectuées :

- agglomération des mailles à 2 et 4 mètres avant l'interpolation à l'aide du logiciel dans Wolf (agglomération par la moyenne) ;
- paramétrage des options de l'interpolation dans Surfer afin de créer un grid maillé à 2 et 4 mètres ;
- agglomération des mailles à 2 et 4 mètres avant l'interpolation à l'aide du logiciel dans Wolf (agglomération par la moyenne) après l'interpolation dans Surfer paramétrée à 1 mètre.

Les résultats sont présentés et expliqués dans la suite (*cf.* IV.3.5.5).

IV.3.4 Mise en œuvre du test

IV.3.4.1 Technique

La mise en œuvre technique de notre travail n'a pas posé de problème particulier à l'exception des traitements d'image avec Idrisi car le reste du processus a été facilité par l'utilisation des deux modules programmés en Visual Basic et une automatisation des procédures Surfer.

Outre l'utilisation des deux modules de conversion et d'extraction des statistiques, nous avons dû avoir recours à un autre outil intégré dans le logiciel Surfer 8 : le Scripter. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un éditeur de commande Visual Basic permettant l'exécution automatique des commandes du logiciel. L'exploitation de cette fonctionnalité s'est révélée très utile au niveau de la gestion de nos ressources informatiques. En effet, nous avons pu lancer toutes nos interpolations sur une machine libre pendant les 16 heures utiles au calcul complet de tous les cas testés.

IV.3.4.2 Utilisation du Scripter

Le langage utilisé par le Scripter de Surfer 8 est le Visual Basic. Il faut cependant veiller à utiliser les fonctions propres au logiciel. Pour cela, nous utiliserons la documentation assez complète fournie dans les fichiers d'aide du logiciel.

Voici un exemple de Script d'automatisation de Surfer (Code 1) :

```

Sub Main
'Déclaration des variables
    Dim SurferApp As Object
    Dim retValue As Boolean
    Dim Data As String
    Dim Path As String
    Dim OutPath As String
    Dim i As Integer, j As Integer

'Ouverture d'une instance de Surfer
    Set SurferApp = CreateObject("Surfer.Application")

'Remplissage des variables
    Data = "Zones test.dat"
    MethodLabel = Array("Zones test+trous", "Zones test", "Zones test+carre", "Zones test+oblique")
    MethodOutput = Array("Kriging-", "RadialBasis-", "InverseDistance-", "Triangulation-", "ProcheVoisin-", "VoisonNaturel-", "MinimumCurvature-", "Shepards-")
    MethodAlgo = Array(srfKriging, srfRadialBasis, srfInverseDistance, srfTriangulation, srfNearestNeighbor, srfNaturalNeighbor, srfMinCurvature, srfShepards)
    Path = "D:\Julien\DEA\Detection\"

'Rendre visible la fenêtre
    SurferApp.Visible = True

'Boucle sur les différentes interpolations à réaliser
    For i = 1 To 3 Step 1
        For j = 1 To 8 Step 1
            'Paramètres de l'interpolation
                SurferApp.GridData(DataFile:=Path + MethodLabel (i-1) + "test-élimination.dat" 'Chemin vers les données
                NumCols:=558, 'Nombre de colonnes
                NumRows:=800, 'Nombre de lignes
                ExclusionFilter:="Z=1", 'Valeur à exclure
                Algorithm:=MethodAlgo(j-1), 'Méthode d'interpolation
                ShowReport:=True, 'Affichage du détail
                OutFmt:=srfGridFmtAscii, 'Format de sortie des résultats
                OutGrid:=Path + MethodLabel (i-1) + "\" + MethodOutput(j-1) + "test-detection.grd" ) 'Chemin vers le résultat
            Next
        Next
    Next
End Sub

```

Code 1 : Automatisation du lancement des interpolations dans le logiciel Surfer 8 par l'utilisation du Scripter.

IV.3.5 Résultats

Nous présentons ci-dessous les valeurs des paramètres utilisés pour la comparaison des différentes méthodes d'interpolation. Nous avons divisé nos résultats suivant les différentes configurations testées.

IV.3.5.1 Configuration de base

La première constatation que nous pouvons faire sur base de ces résultats est qu'une première classification fondée sur le temps de calcul peut être effectuée. Nous remarquons que les méthodes d'inverse de la distance élevée à une puissance, le krigeage et la radial

fonction présentent des temps de calculs bien plus élevés que les autres méthodes testées. La méthode manuelle est classée dans une autre catégorie. Vu le temps que requiert le traitement manuel, qui est plus que doublé par rapport à la moyenne des méthodes d'interpolation « lentes », nous ne le réaliserons pas pour toutes les configurations testées.

Avec Points bas

	<i>temps (s)</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moyenne</i>	<i>ecartype</i>
Manuel	8400	-2.73	3.4884	-0.0003	0.3329
+ proche voisin	75.7	-4.23	6.02	0.0001	0.4843
Inverse distance	4001.9	-2.8877	3.0485	0.0011	0.4041
Krigeage	3254.8	-2.604	3.1604	0	0.2862
Min curvature	7.7	-2.589	7.0538	0.0177	1.099
Radial function	3515	-2.6012	3.1867	-0.0001	0.2813
Shepard	34	-4.5139	5.6871	-0.0004	0.3317
Triangulation	5.8	-2.6043	3.2447	-0.0001	0.3166
Voisin naturel	28.1	-2.6318	2.9409	0	0.3047

Tableau 4 : Résultats des interpolations dans le cas test avec points bas.

IV.3.5.2 Configuration supplémentaire – sans point bas

Pour cette configuration, nous n'avons pas effectué le travail en suivant la méthodologie de traitement manuel telle que nous l'avons expliquée dans une section précédente (cf. Section III). Nous avons jugé assez explicite de ne comparer cette technique qu'avec deux configurations différentes : la configuration de base (cf. IV.3.5.1) et la zone d'extension importante (cf. IV.3.5.4).

Sans points bas

	<i>temps (s)</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moyenne</i>	<i>ecartype</i>
Manuel	/	/	/	/	/
+ proche voisin	75	-4.99	5.02	0.0025	0.6462
Inverse distance	3602	-3.1207	3.3901	0.0031	0.5131
Krigeage	3381.3	-3.7451	2.5527	0.0023	0.5497
Min curvature	7.8	-2.4881	14.5562	0.2092	6.6456
Radial function	3866.8	-3.7072	2.5625	0.0022	0.5448
Shepard	33.2	/	/	/	/
Triangulation	5.8	-4.1699	2.4238	0.0018	0.461
Voisin naturel	43.5	-4.3016	2.1342	0.002	0.6199

Tableau 5 : Résultats des interpolations dans le cas test sans points bas.

Les paramètres statistiques ne sont pas indiqués pour la méthode de Shepard modifiée. Les résultats obtenus à la suite de l'interpolation sont beaucoup trop éloignés de la vérité terrain pour que ceux-ci ne soient utilisables dans ce comparatif. En réalité, cette méthode d'interpolation ne fonctionne pas lorsque la distance aux points d'altitudes

connues est trop grande (ce qui n'était pas le cas lorsque nous avons laissé des points bas dans les zones masquées).

De plus, nous pouvons ajouter que la méthode par courbure minimale semble être en retrait par rapport à toutes les autres méthodes au niveau de la précision du modèle créée. En effet, elle présente une moyenne et un écart-type beaucoup plus importants que les autres.

IV.3.5.3 Configuration supplémentaire – zone oblique

Les tendances que nous avons déjà évoquées précédemment semblent se confirmer à la suite de l'analyse de ces résultats. Nous pouvons malgré tout remarquer la diminution de la précision obtenue par la méthode du plus proche voisin et, dans une moindre mesure par celle de l'inverse de la distance élevée à une puissance.

Oblique

	<i>temps (s)</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>moyenne</i>	<i>ecartype</i>
Manuel	/	/	/	/	/
+ proche voisin	76.7	-3.64	3.82	0.0004	0.9181
Inverse distance	3600.2	-3.126	3.189	0.0005	0.8454
Krigeage	3445.6	-2.8476	2.9305	0.0005	0.6896
Min curvature	7.3	-0.3011	13.9249	0.0914	7.3496
Radial function	3987.6	-2.8634	2.9546	0.0005	0.6749
Shepard	34.3	/	/	/	/
Triangulation	5.8	-2.9221	3.5971	0.0004	0.7443
Voisin naturel	28.9	-2.7357	2.9116	0.0004	0.7415

Tableau 6 : Résultats des interpolations dans le cas test oblique.

Nous rappelons que la méthode manuelle n'a pas été testée pour cette configuration.

IV.3.5.4 Configuration supplémentaire – extension importante

La dernière constatation effectuée sur la méthode du plus proche voisin et l'inverse de la distance est confirmée par cette ultime expérimentation (cf. IV.3.5.3). Lorsque l'interpolation est plus compliquée, cette méthode semble donner des résultats plus éloignés de la vérité terrain.

Zone carrée

	temps (s)	min	max	moyenne	ecartype
Manuel	4200	-1.9528	1.8544	-0.0082	0.4905
+ proche voisin	81.4	-2.99	1.87	-0.01	1.2451
Inverse distance	3613.8	-2.6789	1.7622	-0.0113	0.9449
Krigeage	3271	-2.5397	1.7249	-0.0067	0.7101
Min courbure	7.7	-0.1306	10.7976	0.2572	7.6232
Radial function	4146.8	-2.5501	1.7674	-0.0061	0.7114
Shepard	34.3	/	/	/	/
Triangulation	5.8	-2.5186	1.6893	-0.0074	0.693
Voisin naturel	74.1	-2.3132	1.5056	-0.0089	0.6597

Tableau 7 : Résultats des interpolations dans le cas test zones carrée.

IV.3.5.5 Autres paramètres testés

Nous présentons ci-dessous les valeurs paramètres utilisées pour la comparaison des différentes méthodes d'interpolation

Autres tests (Krigeage - Zones test+pts bas)

			temps (s)	min	max	moyenne	ecartype
Référence		Krigeage	3254.8	-2.604	3.1604	0	0.2862
Breaklines			3338.7	-2.5863	2.0075	-0.0002	0.2498
Agglomération	Avant	2 mètres	269.1	-3.1067	2.5353	0.0021	0.6191
		4 mètres	30.4	-3.1939	1.9379	0.0001	0.6809
	Pendant	2 mètres	822.4	-2.7072	3.0844	0.0009	0.3345
		4 mètres	211	-1.4575	2.6101	0.0007	0.3081
	Après	2 mètres	3254.8	-1.7072	2.7328	0	0.2431
		4 mètres	3254.8	-0.9398	2.2361	0	0.199

Tableau 8 : Résultats des interpolations dans le cas test autres test.

L'analyse de ce dernier tableau de résultats nous apporte quelques nouvelles informations. En ce qui concerne l'utilisation des lignes de crêtes ou *breaklines*, nous pouvons affirmer qu'il n'y a pas d'amélioration sensible de la valeur des paramètres statistiques.

Pour l'agglomération, et après étude des résultats, nous conseillons d'effectuer ce traitement après le processus d'interpolation. Nous rappelons que lors de nos expérimentations, nous avons aggloméré les différentes matrices à l'aide d'une méthode par la moyenne.

IV.3.6 Conclusions

Une analyse détaillée des résultats obtenus et des différentes remarques émises nous permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- nous pouvons effectuer une première classification sur le temps de calcul où l'on retrouve dans les méthodes « lentes » : l'inverse de la distance élevée à une puissance, le krigeage et la radial basics function ;
- deux méthodes très rapides et relativement précises se détachent du lot : la triangulation par interpolation linéaire et la méthode du voisin naturel ;
- la méthode Shepard modifiée ne fonctionne pas lorsque l'extension des zones à interpoler est trop importante ;
- si les données doivent être agglomérées, elles le seront dans la mesure du possible après l'interpolation.

En résumé, avant de choisir une méthode d'interpolation, nous devons avoir en mémoire les deux instructions suivantes :

Si l'utilisateur dispose de ressources matérielles suffisantes, il devra utiliser la méthode krigeage ou la Radial Basics Function. Ce sont deux méthodes qui donnent des résultats sensiblement identiques au niveau des paramètres statistiques, mais le **krigeage** se révèle être moins gourmand en temps de calcul.

Si par contre, il ne dispose pas de ressources matérielles suffisantes, l'alternative la plus intéressante est la méthode de **triangulation par interpolation linéaire**. Elle présente des résultats intéressants dans toutes les configurations testées, et demande un temps de calcul près de 1000 fois inférieur au krigeage.

L'analyse que nous venons d'effectuer et nos conclusions mettent en avant certaines informations importantes qui seront utiles à l'utilisateur lorsqu'il devra choisir entre les méthodes d'interpolation disponibles afin d'obtenir une surface interpolée qui répond à ces critères.

Section V : *Implémentation Visual Basic*

V.1 *Philosophie*

Le travail d'implémentation qui est détaillé dans cette section est destiné à automatiser l'élimination de la végétation présente sur les données LIDAR multi-échos. Nous souhaitons offrir à l'utilisateur une application qui gère le processus dans son entièreté : du chargement des données à l'obtention d'une matrice finale segmentée et interpolée.

Outre cet objectif de gestion totale de la procédure de traitement, nous nous attacherons à développer une application qui soit en accord avec la philosophie de développement et les concepts de base de l'interface de la suite logicielle WOLF.

L'objectif de notre application est de proposer à l'utilisateur une interface simple et conviviale qui lui permet d'effectuer rapidement une segmentation la plus précise possible. Nous mettrons tout particulièrement l'accent sur la simplicité d'utilisation, par une division du processus en différents modules simples pour aboutir finalement à la création d'une matrice WOLF segmentée et interpolée.

V.2 *Module 1 : chargement des données*

V.2.1 *Principe*

Le principe de ce premier module est foncièrement simple. Il permet de déterminer les chemins d'accès vers les deux fichiers de base que sont les matrices WOLF contenant les premiers et les seconds échos laser ainsi que le chemin vers le dossier de travail dans lequel seront écrits les fichiers des résultats intermédiaires et la

topographie finale interpolée. Ce dernier paramètre est optionnel. Si l'utilisateur n'en spécifie pas un, le fichier résultat sera directement stocké sur le disque C (répertoire « C:\ ») et les résultats intermédiaires ne pourront pas être sauvegardés.

V.2.2 Interface

L'interface de ce premier module est assez simple (Figure 42), elle est composée de trois boutons qui appellent la fenêtre de sélection interactive des fichiers de base (premier et second écho laser). Un quatrième bouton se charge de la lecture et du chargement de ces fichiers de données en mémoire.

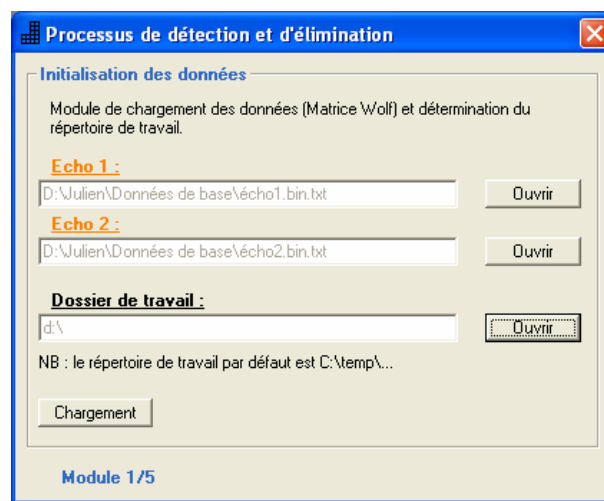


Figure 42 : Module de chargement des données et choix d'un répertoire de travail.

Le chemin d'accès au fichier (path) est déterminé soit manuellement par l'utilisateur (l'interface gère les erreurs si le fichier est introuvable) soit interactivement par l'intermédiaire d'une fenêtre de commande. Elle est illustrée à la figure suivante (Figure 43).

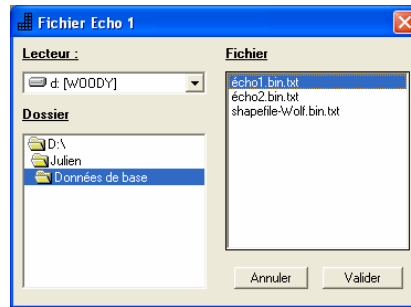


Figure 43 : Sélection interactive des fichiers de données.

V.2.3 Codage

Le codage de ce module ne présente aucune particularité spécifique, il utilise simplement les commandes classiques de lecture de fichiers textes (fichiers de métadonnées – xxx.bin.txt) et binaires (matrices de données – xxx.bin) et de gestion de chaînes de caractères. Toutefois, comme nous n'utilisons pas l'objet explorateur de document, des précautions ont été prises pour la gestion des erreurs dans la fenêtre de sélection interactive des fichiers.

V.3 Module 2 : segmentation Sol – Sur Sol

V.3.1 Principe

Détermination des paramètres *alpha* et *beta* indispensable à la segmentation de chaque profils. Cette première étape du processus de traitement est primordiale car elle conditionne le reste de la segmentation. Nous veillerons donc à soigner tout particulièrement l'ajustement de ces deux paramètres. Pour ce faire, nous avons implémenté un dispositif de visualisation de la matrice résultante permettant de déterminer leur valeur idéale (Figure 45).

De plus, nous avons permis à l'utilisateur de sélectionner le nombre d'orientations des profils. Par défaut, ce sont les 8 directions définies dans la théorie (*cf.* IV.2.2.1.2) qui sont utilisées. Par contre, s'il choisit une analyse 4-connexe le calcul sera rendu plus rapide (près de 2 fois) mais la segmentation moins précise.

La dernière information requise dans ce module est la valeur seuil qui marquera la frontière entre les mailles classées en « Sur Sol » et les mailles « Sol ». Ici encore, le calage de la valeur de ce seuil est facilité par notre diapositif de visualisation.

V.3.2 Interfaçage

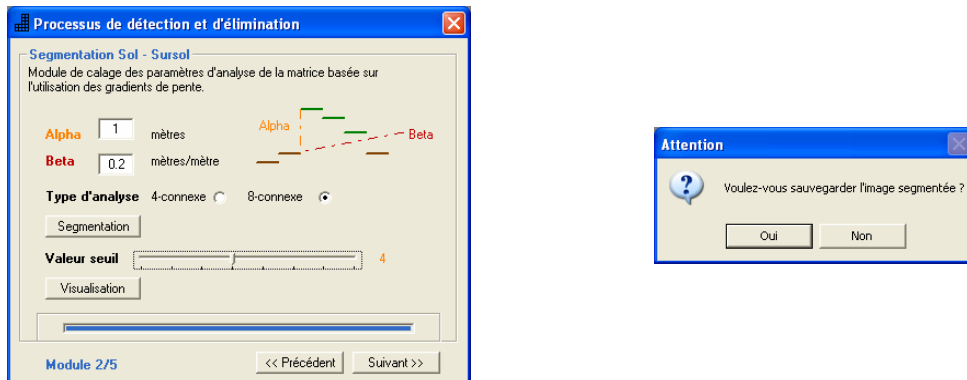


Figure 44 : Module de segmentation (SOL – SUR).

Nous pouvons remarquer que comme pour toutes les étapes ultérieures du processus de traitement, ce résultat intermédiaire peut être sauvegardé sous la forme d'une matrice WOLF (seulement dans le cas où un répertoire de travail a été spécifié (cf. V.2)).

Ce module permet la pré-visualisation du résultat obtenu avec les paramètres choisis. Si le résultat ne convient pas, l'utilisateur pourra affiner leur valeur afin d'obtenir une segmentation idéale. Cet outil propre à notre application permet d'avoir une vue globale de la segmentation effectuée. Il dispose notamment d'une fonction de zoom et déplacement de la fenêtre de zoom entièrement pilotable par les touches du clavier ou bien à l'aide de la souris afin de permettre une analyse plus détaillée de certaines zones critiques (Figure 45).

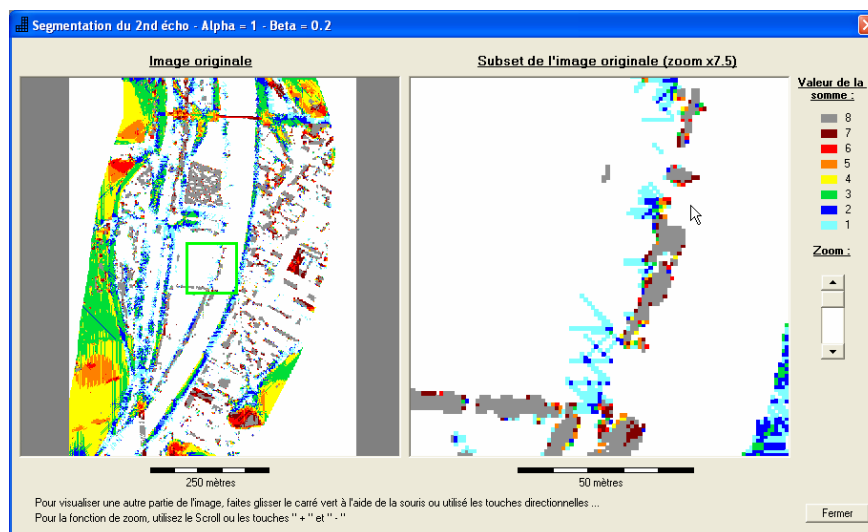


Figure 45 : Visualisation du résultat de segmentation utile pour le choix de la valeur seuil de la somme.

V.3.3 Codage

Cette première segmentation requiert un temps de calcul assez important. En effet, la matrice doit être parcourue entièrement 4 ou 8 fois avant d'aboutir à la création de la matrice finale de segmentation (Figure 45). Le temps nécessaire à l'exécution de ce processus pourrait certainement être réduit par une implémentation du code de calcul en un autre langage de type Fortran. L'algorithme Visual Basic utilisé est transcrit et commenté en annexe (*cf.* Annexe 2).

Outre les aspects algorithmiques, le codage de ce module en lui-même n'a pas posé de problèmes majeurs qui doivent être signalé dans ce rapport. C'est plutôt l'interface de pré-visualisation qui a nécessité le plus de temps de développement. En effet, cette fenêtre gère des commandes plus spécifiques telles que le « cliquer-glisser », la gestion des événements clavier ou encore l'affichage sous forme d'image de la matrice WOLF pour lesquelles nous n'étions pas initiés.

V.4 *Module 3 : segmentation SSA – SSN*

V.4.1 Principe

Ce module implémente la seconde segmentation qui est appliquée aux données LIDAR initiales. Son objectif est donc de diviser les objets « Sur Sol » en deux catégories distinctes :

- les objets en **SSN** (la végétation) ;
- les objets en **SSA** (les bâtiments).

Le critère de segmentation utilisé est la différence moyenne pour chaque îlot de « Sur Sol » entre les attitudes du premier et du second écho. Cette valeur seuil est définie par l'utilisateur, il dispose toujours de notre module de pré-visualisation afin d'affiner le calage de ce paramètre. Ajoutons également qu'un fichier contenant l'empreinte des bâtiments au sol peut être exploité dans l'analyse (type données Top10v-GIS de l'IGN). Dans ce cas, le chemin vers le fichier doit alors être spécifié (manuellement ou interactivement) par l'utilisateur.

V.4.2 Interface

Dans la même lignée que le précédent, l'interface de ce module se révèle assez simple (Figure 46). Un champ pour spécifier la valeur seuil de la différence moyenne et

un autre pour déterminer manuellement ou interactivement le chemin d'accès vers le fichier Top10v-GIS rasterisé.

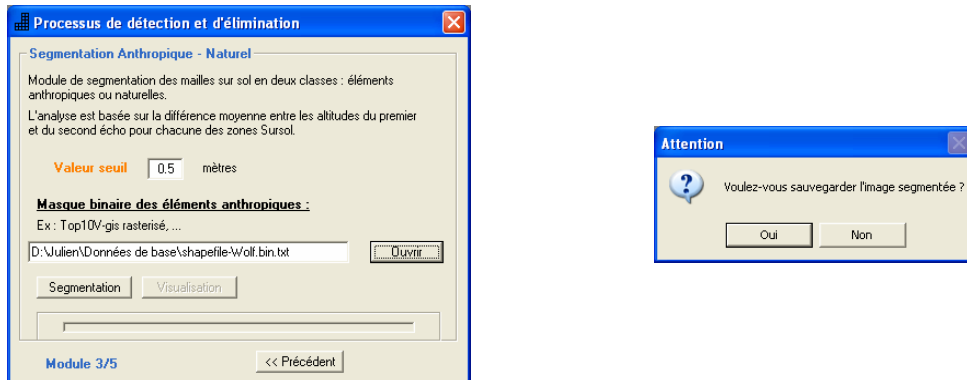


Figure 46 : Deuxième module de segmentation (SSA - SSN).

V.4.3 Codage

Pratiquement, les difficultés rencontrées lors du codage de ce module sont apparues lors de l'identification des différentes zones qui composent les objets de la classe « Sur Sol » afin de pouvoir en extraire les paramètres de segmentation. La méthodologie générale utilisée consiste à parcourir toute les mailles de la matrice de segmentation Sol – Sur Sol et d'y identifier successivement tous les îlots de connexité 4 (*cf.* Annexe 3).

V.5 Module 4 : généralisation

V.5.1 Principe

Le module de généralisation est un module optionnel. Il n'est pas obligatoire dans le processus de traitement, mais en pratique, il permet d'étendre les zones boisées détectées afin d'y inclure certaines mailles qui n'auraient pas été classées, à tort, dans la catégorie **SSN**. Pour plus d'information sur ce module, nous renvoyons aux concepts théoriques traitant de ce sujet (*cf.* IV.2.2.5).

En pratique, nous utilisons une fenêtre de convolution qui parcourt les frontières de toutes les zones en analysant les informations qui y sont présentes. Si l'utilisateur a chargé un fichier contenant les empreintes des bâtiments, celui peut être utilisé dans l'analyse en contrôlant le reclassement des mailles **SSA** dans la classe **SSN**.

V.5.2 Interfaçage

Assez simplement, deux *sliders* sont placés pour sélectionner la taille de la fenêtre de convolution et le type de généralisation souhaitée. Les informations relatives à chaque choix sont affichées interactivement dans la fenêtre du module. De plus, une simple case à cocher permet d'inclure ou non le masque anthropique si il a été chargé et utilisé dans la module précédent (*cf.* V.4).

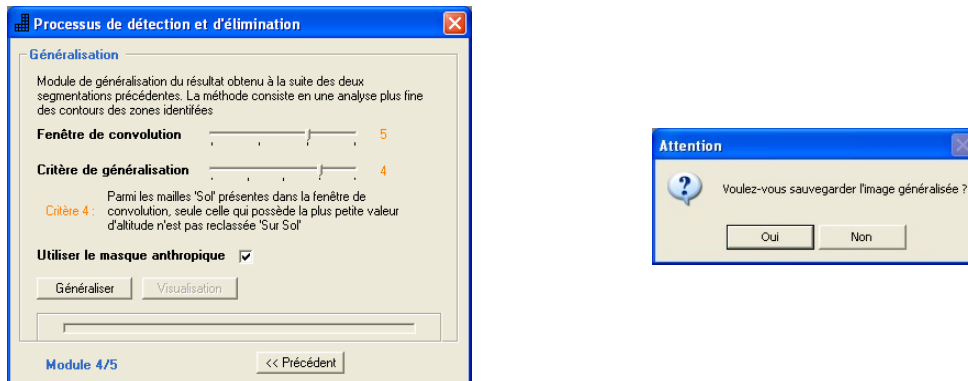


Figure 47 : Module de généralisation du résultat des deux segmentations successives.

V.5.3 Codage

Une fois encore, c'est l'entièreté de la matrice qui doit être parcourue afin d'identifier le contour de chaque zone isolée. Une optimisation de cette procédure ainsi que de la précédente qui consiste à isoler chaque zone de **SSOL** (*cf.* V.4.3) permettrait de gagner un temps précieux lors de l'exécution du programme. L'algorithme complet est présenté en annexe (*cf.* Annexe 4).

V.6 Module 5 : interpolation

V.6.1 Principe

Dans un chapitre précédent (*cf.* IV.3.1), nous avons utilisé le Scripter de Surfer afin d'automatiser l'exécution des calculs lors de notre expérimentation réalisée sur les différentes méthodes d'interpolation présentes dans ce logiciel. Nous avons eu l'idée de généraliser l'utilisation de cet outil et de commander Surfer directement par notre application Visual Basic.

Par ce module (Figure 48), nous commandons entièrement le processus d'interpolation du logiciel Surfer 8. Ci-dessous, une liste exhaustive des fonctionnalités qui sont couvertes par l'interface que nous avons développée :

- choix de la méthode d'interpolation ;
- choix de la résolution de l'interpolation ;
- sauvegarde et exportation des fichiers interpolés dans les différents formats (matrice WOLF, fichier GRID Sufer) ;
- possibilité de visualiser les résultats et de les comparer avec les deux échos laser.

L'utilisateur ne se soucie donc aucunement de l'utilisation du logiciel Surfer 8, l'ensemble des traitements sont automatisés dans les lignes de codes Visual Basic que nous décrirons plus en détail dans la suite.

V.6.2 *Interfaçage*

L'interfaçage est encore réalisée dans un souci de simplicité et garde une cohérence avec les autres modules développés.

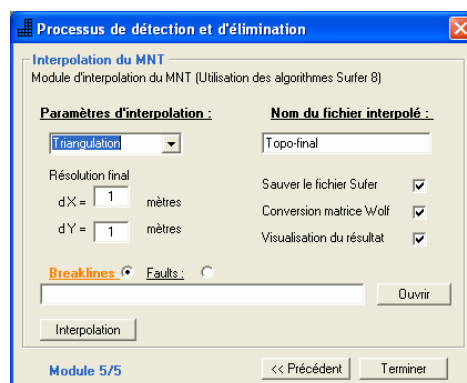


Figure 48 : Module de paramétrage de l'interpolation Surfer 8.

L'interface permet aussi la visualisation tridimensionnelle du premier écho laser, du second et du résultat de l'élimination de la végétation. Les vues en trois dimensions sont créées par le logiciel Surfer et récupérées dans notre application sous la forme de fichiers images Bitmap.

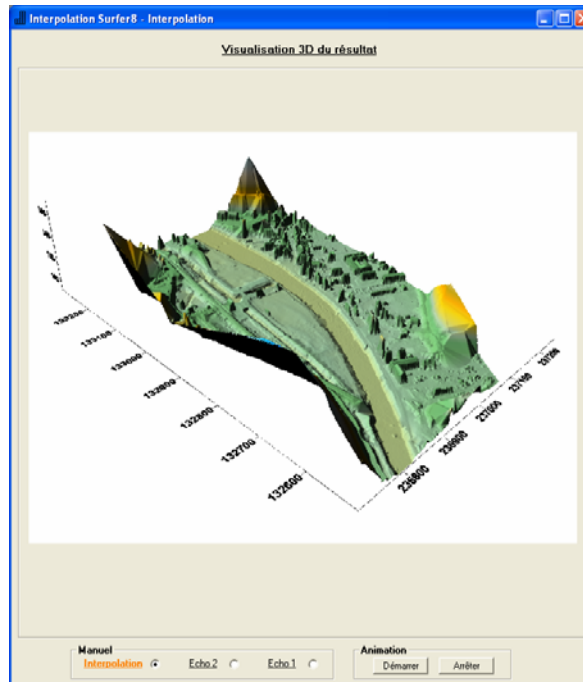


Figure 49 : Visualisation tridimensionnelle interactive du premier et du second écho laser ainsi que du résultat de l'interpolation.

V.6.3 Codage

Le code associé à ce module est assez simple, il consiste à récupérer le fichier contenant le masque des zones boisées et lancer l'interpolation sous Surfer 8. Toutefois, nous avons rencontré quelques problèmes lors de l'intégration des Scripts Surfer dans les lignes de codes Visual Basic.

Puisqu'il s'agit de fonctions propres au Scriptor de Surfer, le compilateur Visual Basic ne reconnaît pas les commandes telles que celle qui sont illustrée dans le code suivant (Code 2) :

```

Code Scripter Surfer
SurferApp.GridData(DataFile:=Path + "test-élimination.dat",
NumCols:=558,
NumRows:=800,
ExclusionFilter:="Z=1",
Algorithm:=srfTriangulation,
ShowReport:=True,
OutFmt:=srfGridFmtAscii,
OutGrid:="D:\Julien\DEA\Detection\test interpolation\detection.grd"

Code Visual Basic
SurferApp.GridData DataFile:= Path & "test-élimination.dat",
NumCols:= 558,
NumRows:= 800,
ExclusionFilter:="Z=1",
Algorithm:=8,
ShowReport:=False,
OutFmt:=2,
OutGrid:="D:\Julien\DEA\Detection\test interpolation\detection.grd"

```

Code 2 : Comparaison d'un script Surfer 8 et de ligne de commande Surfer dans un code Visual basic.

Nous avons rencontré beaucoup de difficultés à trouver la correspondance entre les deux langages de programmation. C'est donc par une succession d'essais et erreurs que nous sommes enfin parvenus à écrire un code Visual Basic qui automatise l'exécution du logiciel Surfer 8.

V.7 *Intégration dans la suite logicielle Wolf*

V.7.1 *Introduction*

Depuis plus de dix ans, les travaux de recherches dans l'unité d'Hydrodynamique Appliquée et de Constructions Hydrauliques ont mené à l'élaboration d'outils de modélisation de toute la filière des écoulements de surface, de la phase hydrologique de parcours de la goutte d'eau qui tombe à la surface du sol jusqu'aux écoulements quasi tridimensionnels dans un réseau hydrographique. La filière logicielle WOLF (ARCHAMBEAU, 2006), s'est ainsi imposée au niveau national et international comme véritable outil de prédiction des aléas hydrauliques mais également comme outil d'optimisation de la gestion de tout ouvrage hydraulique de stockage et de régulation.

Pour le laboratoire HACH de la Faculté des Sciences Appliquées, les développements logiciels sont placés au même niveau d'importance que les formulations théoriques. C'est dans cette optique d'intégration future et d'enrichissement des possibilités de traitements de la suite logicielle WOLF que s'inscrit la mise au point de notre application.

V.7.2 Aspects techniques

Au niveau du langage de programmation, nous avons choisi d'utiliser le Visual Basic dans un souci d'unicité avec l'interface de la suite logicielle WOLF. De plus, ce langage nous permet d'obtenir rapidement une application claire avec des connaissances du langage assez réduite. Comme nous débutons avec le Visual Basic cet aspect nous a rapidement séduits.

Il n'y a donc pas de problèmes de compatibilité de langage entre notre application et WOLF. Malgré tout, nous avons commis quelques erreurs au niveau de la déclaration des variables globales qui ne nous autorise pas à intégrer directement le code de notre module dans l'interface WOLF. Certaines variables sont déclarées en niveau global et pourraient interférer avec d'autres variables déjà utilisées localement dans l'interface WOLF.

Malgré tout, nous effectuerons ce travail d'adaptation nécessaire. Il permettra ainsi d'enrichir l'interface déjà très complète de la suite logicielle WOLF par l'ajout de nos modules de segmentation de données LIDAR.

Section VI : *Validations et applications*

VI.1 *Validations*

VI.1.1 *Introduction*

La validation de l'algorithme et de son implémentation en Visual Basic est une étape essentielle dans le cheminement qui amène à l'obtention de la méthodologie de traitement finale. Dans cette section, nous présentons deux validations dans ce premier chapitre et deux applications dans le chapitre suivant.

Malheureusement, par manque de temps nous n'avons pas pu mettre en œuvre autant de validations que nous l'aurions voulu. Néanmoins, les différentes validations et applications proposées dans cette section tendent à montrer que la méthodologie et l'algorithme de traitement développés semble bien se comporter dans les différentes configurations.

VI.1.2 *Comparaison avec la méthode « manuelle »*

VI.1.2.1 *Introduction*

Étant donné que nous ne sommes pas en possession d'un modèle numérique de terrain fiable pour les données LIDAR disponibles, notre validation se bornera à comparer le travail effectué par la procédure automatique avec les résultats obtenus suite à l'application de la méthodologie de traitement manuelle.

Pour être complet, notons qu'une comparaison avec des mesures de terrain aurait également pu être effectuée. Mais comme nous l'expliquerons dans la suite, le temps que nous avons accordé à l'exécution de ce travail était insuffisant que pour prévoir cette tâche supplémentaire.

VI.1.2.2 Données utilisées

Nous avons basé notre analyse sur les mêmes données que celles qui ont été utilisées lors du test des méthodes d'interpolation disponibles dans le logiciel Surfer. Il s'agit d'une zone rectangulaire de 600 sur 800 mètres de côté située dans la région liégeoise, à Chanxhe plus exactement. Notre choix s'est porté sur ce site pour les mêmes raisons que celles qui ont été évoquées lors du test de méthode d'interpolation (cf. IV.3). Un plan de situation est présenté à la figure suivante (Figure 50) :

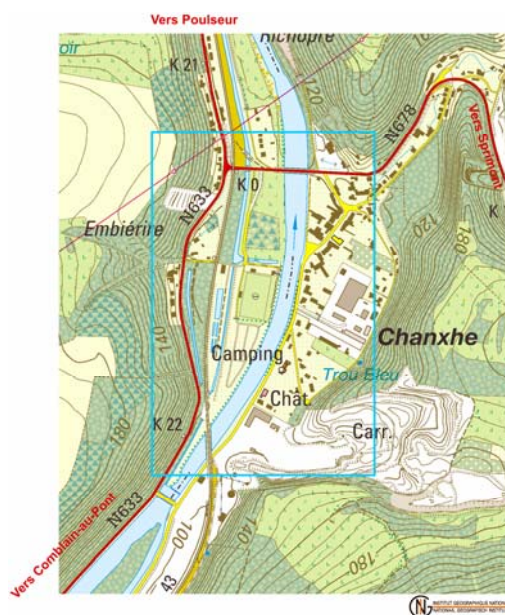


Figure 50 : Plan de Situation (Sources : données Top10r – IGN).

La figure ci-dessous (Figure 51) propose une représentation graphique des données LIDAR relatives à notre site de validation. Nous pouvons remarquer le travail d'élimination déjà réalisé lorsque l'on utilise le second écho comme base à la segmentation. Des photographies illustrant des éléments importants présents sur cette zone d'expérimentation sont présentées en annexes (cf. Annexe 1).

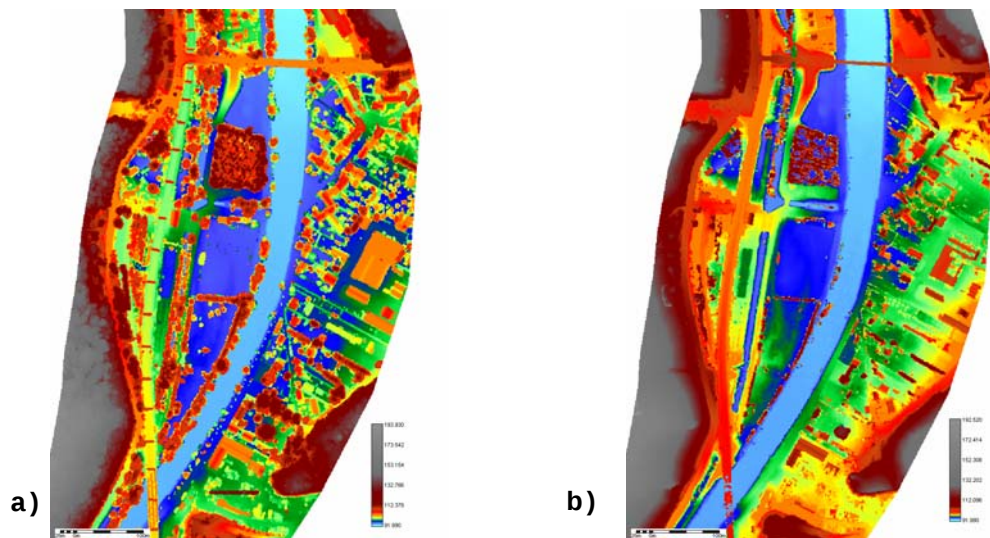


Figure 51 : Données utilisées pour la validation de notre méthodologie.
a) écho 1 b) écho 2.

La segmentation automatique a été effectuée avec les paramètres qui sont repris dans le tableau suivant (Tableau 9). Nous avons choisi d'utiliser les deux méthodes d'interpolation qui ont été mises en évidence lors de l'expérimentation que nous avons réalisée auparavant. Il s'agit le krigeage – méthode lente mais précise – et l'interpolation linéaire dans le TIN – méthode rapide et relativement précise – afin de comparer une nouvelles leur capacité d'interpolation des altitudes de la topographie.

Alpha	1
Beta	0.2
Valeur seuil de la somme	4
Différence seuil entre les 2 échos	0.2
Données vectorielles	oui
Critère de généralisation	Type 3
Taille de la fenêtre	3x3
Interpolation 1	triangulation
Interpolation 2	krigeage
Résolution	1 mètre

Tableau 9 : Paramètres de la segmentation de la zone de validation – Chanxhe, vallée de l'Ourthe.

VI.1.2.3 Analyse visuelle préliminaire

Les résultats de ces traitements sont présentés à la figure suivante (Figure 52). La Figure 52 a) illustre l'interpolation par interpolation linéaire dans le TIN, et le krigeage est illustré à la Figure 52 b). Une analyse visuelle des deux illustrations ne révèle pas de différences flagrantes, même si numériquement la méthode du krigeage est plus précise

que la triangulation avec interpolation linéaire. Nous remarquons également que contrairement au krigeage, la triangulation avec interpolation linéaire ne permet pas d'extrapoler les valeurs d'altitude hors de la limite définie par le set de données.

La topographie traitée par la méthode manuelle (Figure 52 c)) que nous considérons comme étant la vérité terrain est la même matrice que celle utilisée pour le comparatif des méthodes d'interpolation disponibles dans le logiciel Surfer.

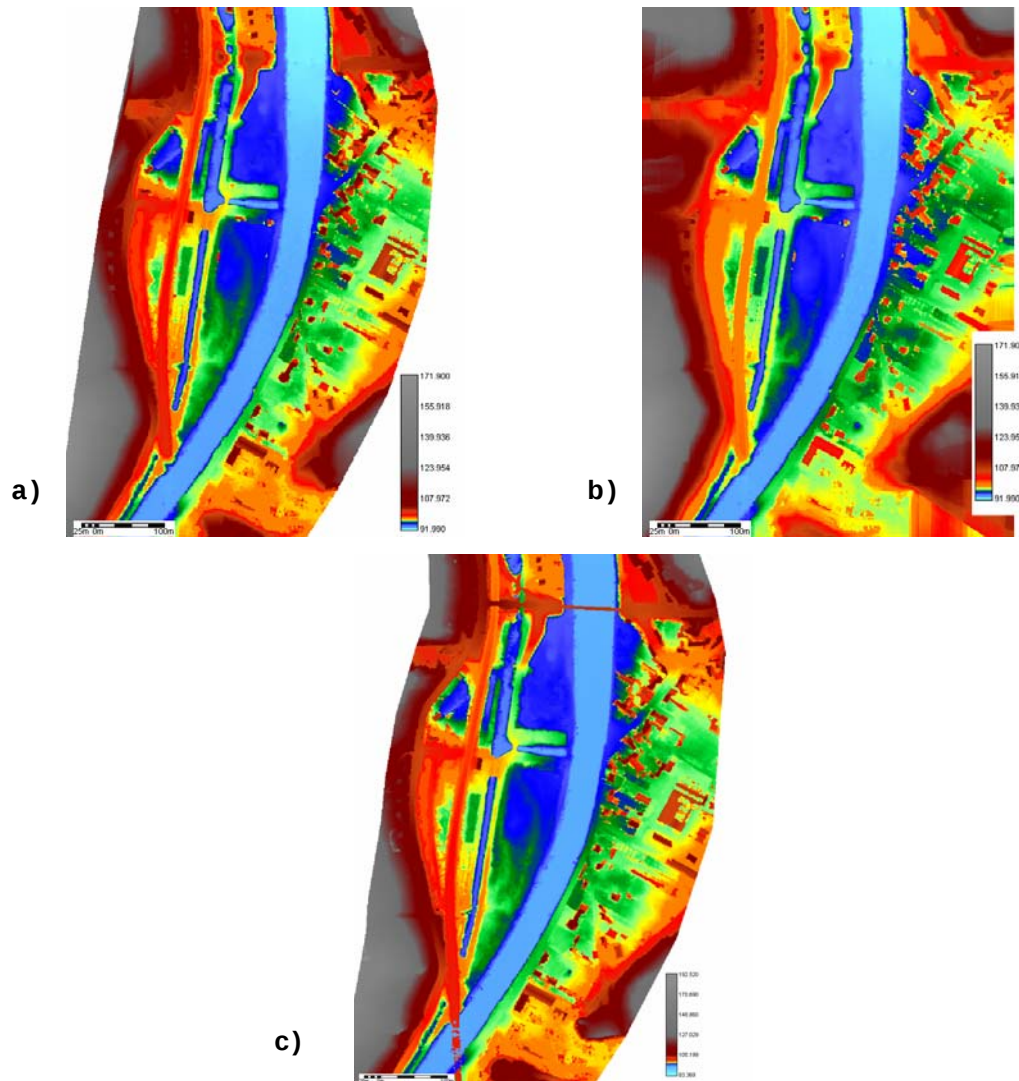


Figure 52 : Résultat du traitement avec l'application développée. a) interpolation avec la méthode de triangulation, b) interpolation avec le krigeage, c) méthode manuelle.

La comparaison détaillée entre la méthode manuelle et les deux méthodes de segmentation testées révèle des différences. Nous remarquons notamment l'absence de certaines constructions dans la méthode d'élimination manuelle. Elles ont sans aucun doute été assimilées à de la végétation par l'opérateur qui n'a pas jugé utile d'utiliser

d'autres données complémentaires qui auraient pu peut-être l'aider dans son processus de décision.

Ces bâtiments ont cependant été détectés par l'application de l'algorithme de segmentation des objets « Sur Sol » basé sur la différence moyenne entre les altitudes du premier et du second écho. Ils figurent toujours sur les résultats de la segmentation automatisée des données LIDAR (Figure 53 a)).

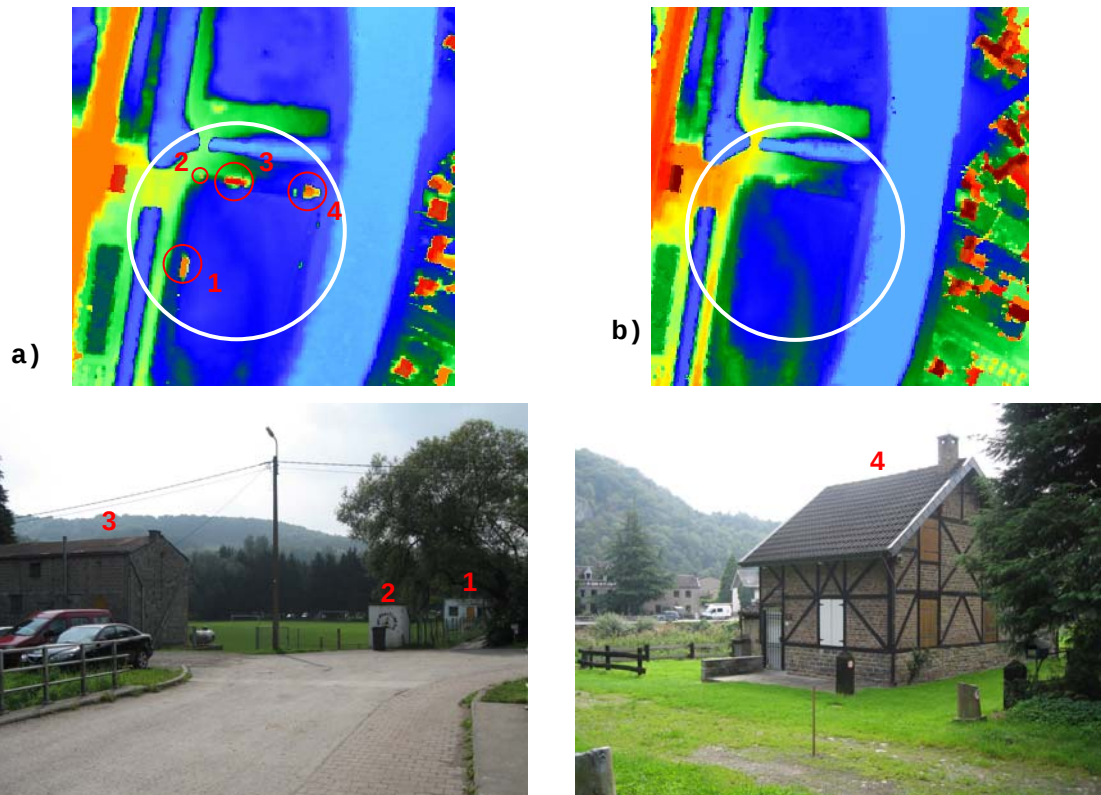


Figure 53 : Comparaison de la méthode d'élimination automatisée a) et manuelle b).

VI.1.2.4 Analyse des résultats numériques

Après cette première comparaison visuelle des résultats obtenus, nous allons analyser les données numériques de la différence entre la procédure automatisée et la méthode de détection et d'interpolation manuelle (dans ce sens). Pour effectuer cette étude, nous utilisons notre outil d'extraction de statistiques développé dans le cadre de l'analyse des méthodes d'interpolation de Surfer (*cf.* IV.3.3.3.5).

Les résultats expérimentaux qui ont été acquis par ce traitement sont présentés ci-dessous sous la forme d'un tableau (Tableau 10) ainsi que d'une visualisation des deux différentiels calculés avec un aperçu de la distribution des valeurs (Figure 54). Notons que les statistiques sont calculées à partir d'un effectif de 37269 mailles qui diffèrent de

zéro et que la distribution des résultats obtenus est quasiment identique pour les deux interpolations expérimentées.

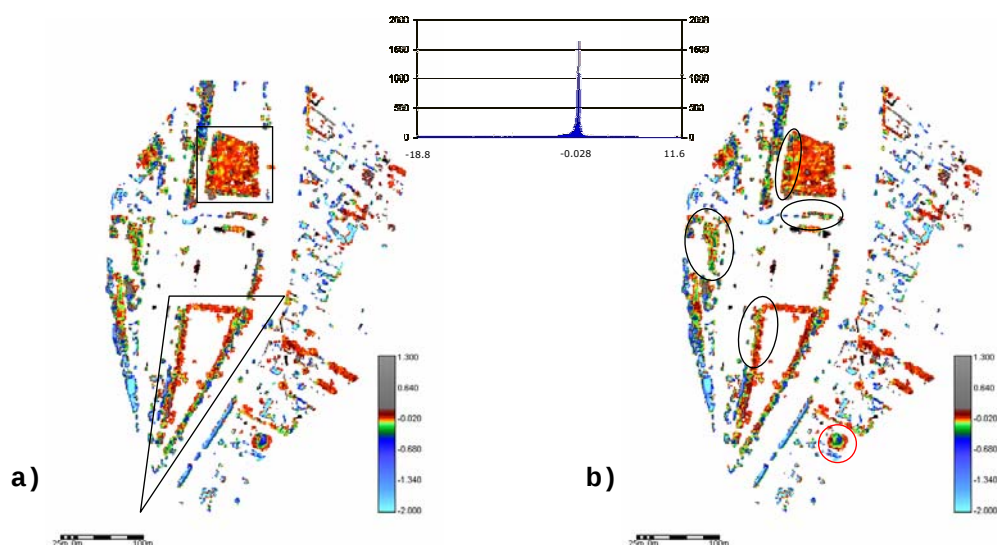


Figure 54 : Visualisation des différentiels calculés. a) triangulation vs manuelle, b) krigeage vs manuelle.

Tout d'abord, nous pouvons remarquer que ces résultats sont fort semblables, et cela bien que la triangulation soit extrêmement plus rapide que le krigeage (plus de 600 fois). Cette tendance se confirme après analyse des statistiques extraites de ces deux images (Tableau 10) :

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
Triangulation vs manuelle	-18.8107	11.5887	- 0.0276	1.3244
Krigeage vs manuelle	-18.8676	11.5892	-0.0280	1.3149

Tableau 10 : Validation de la segmentation automatique par une comparaison avec la méthode manuelle.

Mis à part ce premier constat, il est difficile de tirer d'autres conclusions à partir de ces valeurs. En effet, comme nous venons de le montrer dans le chapitre précédent (*cf.* VI.1.2.3), il existe des contradictions entre la détection intuitive effectuée par l'opérateur et la méthode automatique que nous avons mise au point.

Pour limiter les conséquences de ces différences, nous avons décidé de restreindre la zone d'analyse au lit majeur de la rivière. En effet, l'élimination manuelle de la végétation sur les versants de la vallée ne pas effectuée. Ce traitement supplémentaire impliquerait une augmentation substantielle du temps nécessaire au nettoyage de la topographie. De plus, il n'est pas utile pour une modélisation hydrodynamique des événements de crues d'inondations.

Néanmoins, nous remarquons qu'il subsiste certaines contradictions lors de la détection des objets présents dans le lit majeur (Figure 53), et ce phénomène est traduit dans le chiffre par des valeurs très élevées du maximum et du minimum (Tableau 10). Si la différence est positive (maximum), cela signifie que les altitudes présentent sur la matrice résultante de l'élimination manuelle sont plus basses que pour la méthode automatique et à l'inverse, si elle est négative (minimum) cela indique que les altitudes de la méthode manuelle sont plus élevées. Nous remarquons tout de même que pour les emprises de végétation pour lesquelles aucune confusion n'est possible (par exemple la zone carrée dans le haut de l'image ainsi que la zone triangulaire en dessous, Figure 54 a)), la différence entre les deux méthodologies de traitement est proche de zéro (valeur représentée en rouge avec la palette de couleur utilisée)

Une analyse plus fine de la distribution des résultats révèle une légère anisotropie vers les valeurs négatives (moyenne de -0.028) qui est aussi visible sur la représentation graphique de la distribution (Figure 54). Ceci signifie que soit des éléments de la classe **SSN** ne sont pas éliminés ou bien que le traitement automatique que nous avons appliqué a tendance à classer trop d'objets dans cette catégorie **SSN**.

La combinaison avec d'autres constats que nous avons posés dans un chapitre précédent (*cf.* VI.1.2.3), semble démontrer que se soit la première possibilité qui soit correcte. Cependant, nous prendrons ces résultats avec un certain recul vu le nombre réduit de validations qui ont été menées.

VI.1.2.5 Comparaison des interpolations

Suite à cette première validation, nous avons mis à jour une différence redondante entre l'interpolation manuelle et les deux méthodes automatiques. Il semblerait que la valeur de la différence soit proche de zéro en bordure des zones boisées, mais diminue de manière plus ou moins constante lorsqu'on se rapproche de son centre (augmente en valeur absolue). Les altitudes interpolées par la méthodologie manuelle sont égales aux valeurs calculées par le processus automatique en bordure de la zone et sont plus élevées au centre.

Nous avons illustré ce constat par un exemple très représentatif de l'interpolation des altitudes sous une zone de végétation circulaire (Figure 55). Afin de localiser ce groupe d'arbres, nous l'avons mis en évidence en l'entourant par un cercle rouge sur la Figure 54 b). D'autres exemples moins démonstratifs de ce phénomène sont visibles sur cette figure, ils sont entourés par une forme ovale noire sur la même figure.

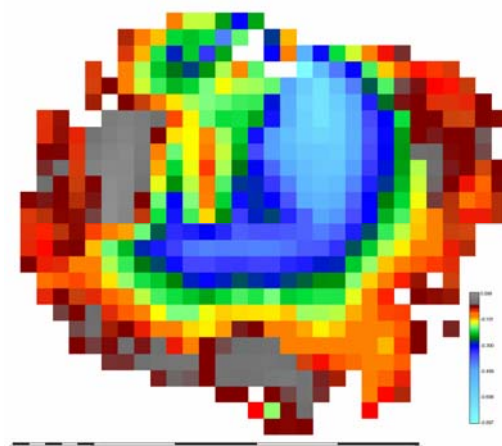


Figure 55 : Différence entre l'interpolation des altitudes sous un groupe d'arbres, manuellement ou avec le krigeage (échelle comprise entre -0.9 - et 0.1).

Comme nous l'avons évoqué plus haut dans notre rédaction, la méthode d'interpolation au « huit plus proche voisin » est caractérisée par un manque de stabilité (*cf.* III.3.2) et tend à propager les erreurs de proche en proche pendant le calcul. Cette propriété intrinsèque de la méthode est démontrée de manière empirique par les observations réalisées lors cette validation. Étant donné que nous retrouvons ces configurations particulières pour plusieurs îlots reconstruits, ceci prouve que l'interpolation par le procédé d'interpolation manuel ne permet pas de reconstruire la topographie sous les zones boisées avec une grande précision, ou en tout cas avec une précision moindre que la méthode automatique que nous proposons.

VI.1.3 Comparaison avec des mesures de terrain

Une comparaison de notre méthodologie de traitement de modèles numériques de terrain LIDAR avec des mesures précises effectuées sur le terrain aurait contribué à apporter des éléments très intéressants dans l'optique d'une validation. Malheureusement, l'échéance approchant, nous n'avons pas pu effectuer ces mesures qui nécessitent tout de même une certaine préparation.

Néanmoins, cette campagne de terrain est déjà prévue pour la fin de cette année civile. Nous comptons nous rendre sur le site pour mesurer une série de points sous les zones boisées à l'aide d'un théodolite classique ou robotisé avec un calage de la polygonale qui sera réaliser par mesures *GPS-RTK* (*WALCORS - WALlonia Continuous Operating System*). À cette période de l'année, nous profiterons de la diminution de la densité de feuillage sur les arbres qui permettra de réaliser un levé sous les zones végétalisées dans de meilleures conditions.

VI.2 Applications

VI.2.1 Introduction

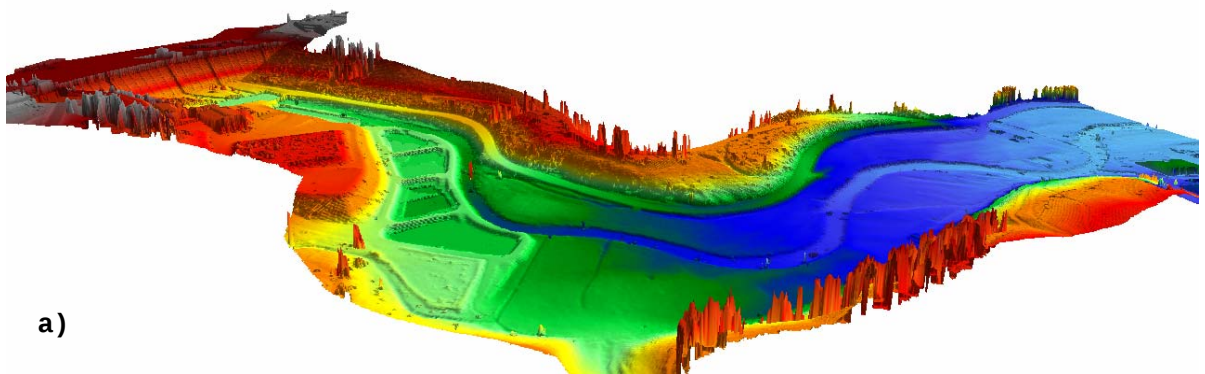
Dans ce chapitre, nous présentons deux exemples pratiques d'utilisation de notre logiciel. Ces applications valideront également les modules de détection et d'élimination des zones boisées dans un cas réel d'utilisation. Une de ces deux applications démontrera l'importance du gain de temps qui pourrait être gagné par l'utilisation de notre méthodologie.

VI.2.2 Le barrage d'Eupen

Cette première application a pour objectif de démontrer la rapidité d'exécution de notre méthodologie de traitement des zones boisées à partir de données LIDAR. Elle consiste simplement à éliminer les arbres présents sur un modèle numérique de surface LIDAR du proche aval du barrage d'Eupen.

Nous avons effectué l'ensemble du travail nécessaire (détection et interpolation dans notre application et création des vues tridimensionnelles) en moins de vingt minutes. Alors que nous aurions eu besoin d'environ une demi journée pour effectuer le travail avec l'ancienne méthodologie manuelle.

Les résultats explicites de cette application sont illustrés à la figure suivante (Figure 56). Visualisation tridimensionnelle du second écho laser à la Figure 56 a) et les résultats du traitement à la Figure 56 b) :



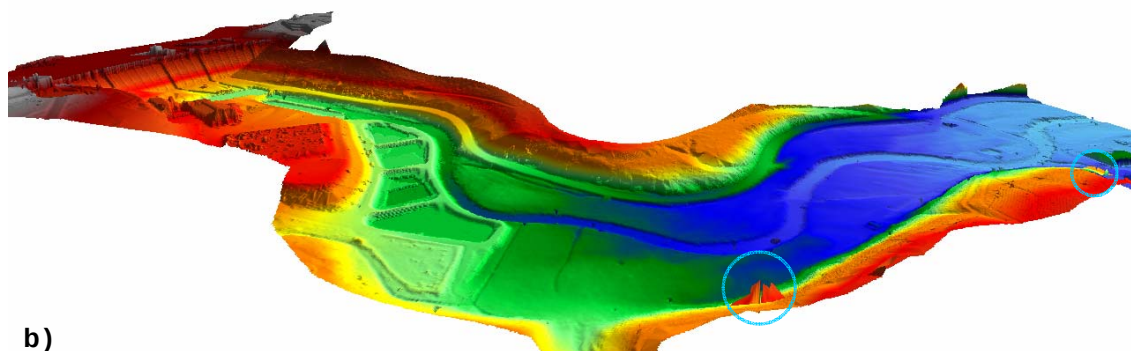


Figure 56 : Démonstration de la rapidité et de l'efficacité du traitement automatisé des données LIDAR. Second écho laser a), topographie traitée b).

La valeur des différents paramètres utilisés pour la segmentation des données LIDAR au proche aval du barrage d'Eupen est reprise dans le tableau suivant :

Alpha	1
Beta	0.2
Valeur seuil de la somme	5
Différence seuil entre les 2 échos	1.4
Données vectorielles	non
Critère de généralisation	Type 3
Taille de la fenêtre	5x5
Interpolation	triangulation
Résolution	1 mètre

Tableau 11 : Paramètres de la segmentation du nettoyage des zones boisées au proche aval du barrage d'Eupen.

Une différence marquante apparaît entre les paramètres utilisés pour nos validations et ceux qui figurent au tableau précédent est la valeur seuil de la différence entre les deux échos LIDAR. Elle se justifie par le fait que nous n'avons pas exploité de données vectorielles délimitant le contour des bâtiments.

Afin d'augmenter encore la vitesse de traitement, nous n'avons pas utilisé les données Top10v-GIS de l'IGN pour la segmentation de la classe **SSOL**. En effet, nous aurions dû au préalable, identifier et ensuite rastériser (convertir en format image) ces données. L'avantage qui résulte de cette démarche est un gain de temps substantiel, mais en contre partie, la différence seuil entre les deux échos laser a dû être augmentée assez sensiblement pour compenser l'absence des informations qu'auraient pu apporter ces données.

L'analyse des deux figures (Figure 56) montre que malgré cela, les résultats obtenus sont plus que convenables. L'ensemble de la végétation présente en lit mineur à été éliminée ainsi que la majorité de celle située sur les flancs de la vallée. Pour être rigoureux dans notre analyse, il faut avouer qu'il subsiste quelques mailles perchées qui n'ont pas été détectées par la segmentation (mis en évidence sur la Figure 56 b) par des cercles turquoises). Mais quelques minutes de traitement manuel seront amplement suffisantes pour en venir à bout.

VI.2.3 L'eau Blanche

VI.2.3.1 Procédure

Cette expérimentation revêt un grand intérêt pour notre laboratoire, car elle permet de mettre à l'épreuve notre application de segmentation de données LIDAR dans des circonstances identiques et des objectifs communs au travail effectué pour la détermination des zones inondables.

L'ampleur de cette validation portera sur le nettoyage de la topographie de 7 simulations. L'étude est bornée en amont par Chimay et par la confluence avec la Brouffe en aval, ce qui représente plusieurs dizaines de kilomètres de rivière à simuler et autant de topographie à traiter.

VI.2.3.2 Résultats

Les résultats de cette application ne sont pas encore connus au jour de la rédaction de ce mémoire. Néanmoins, nous profiterons de la défense publique de ce travail pour présenter ces résultats afin d'attester de la fiabilité de notre application de traitement des données LIDAR dans des conditions d'utilisation semblables à la cartographie de zones d'inondations.

Section VII : Conclusions

VII.1 Conclusions

La segmentation des données LIDAR est un domaine de recherches d'actualité. En témoigne les récentes thèses de doctorats de BRETAR (2006) et SITHOLE (2005). Durant l'exécution de ce travail, nous avons d'abord glané un maximum d'informations traitant de ce sujet, nous les avons étudiées en détail et décrites dans notre état de l'art.

À la suite de cette analyse, nous avons réfléchi à un moyen d'adapter ces nouveaux concepts au développement d'une méthodologie de traitement automatisée de données LIDAR. Elle devra être adaptée à la modélisation hydrodynamique et aux données habituellement exploitées pour l'étude des cures d'inondations.

Le HACH a une longue tradition de développements logiciels. L'ensemble de développement théoriques ont dès lors fait l'objet d'une implémentation sous la forme d'une application Visual Basic. Elle est divisée en plusieurs modules dédiés à chaque étape fondamentale du processus. Cette architecture permet ainsi d'optimiser au mieux les différents paramètres et de diminuer au maximum la durée des traitements nécessaires à la préparation des modèles de terrain pour une simulation.

Enfin, nous avons validé notre modèle de segmentation automatique et démontré l'utilité de l'automatisation du traitement des modèles LIDAR, tant au niveau gain de temps obtenu que de la précision globale du modèle qui en résulte.

Ce travail s'inscrit comme une étape préparatoire voire même exploratoire à de futures recherches doctorales. Dans ce cadre, nous avons soigné particulièrement l'état de l'art qui constitue la base de nos futurs développements et autres recherches. Une seconde partie plus pratique est dédiée à la conception d'une méthode d'automatisation de la procédure actuellement utilisée pour le nettoyage des données LIDAR.

Bien que nous n'ayons pas effectué beaucoup d'applications et de validations, les résultats obtenus montrent que des perspectives très encourageantes sont à envisager par l'exploitation de cet applicatif de détection et d'élimination des zones boisées. Nous ne doutons pas que cette tendance soit confirmée lors de nos futures expérimentations sur des zones d'extensions plus importantes (*cf.* VI.2.2).

VII.2 Perspectives

L'optimisation du code de calcul est une première perspective à court terme d'amélioration de l'application que nous avons développée. À la suite de cette optimisation, nous pourrions alors envisager l'intégration de notre application dans l'interface de la suite logicielle WOLF comme un outil de traitement de modèle numérique de terrain LIDAR préalable à la modélisation hydrodynamique.

Le processus de validation de notre méthodologie n'en est qu'à ces balbutiements. La seconde application proposée dans ce mémoire consistait éliminer la végétation résiduelle du second écho LIDAR du lit majeur de l'Eau Blanche entre les villes de Chimay en amont et de Mariembourg en aval (confluence avec la Brouffe). La mise en œuvre de notre logiciel dans ce cas réel d'application et dans des conditions très comparables au projet des zones inondables sera un excellent moyen d'expérimenter les possibilités réelles du traitement automatisé des modèles numériques de surface.

Une autre étape indispensable à la validation de notre logiciel, est la quantification de l'erreur absolue engendrée par la reconstruction des modèles topographiques LIDAR. Pour ce faire, nous avons d'ores et déjà prévu de nous rendre sur le terrain afin d'y effectuer un certain nombre de mesures précises. Elles seront utilement exploitées afin comparer les résultats obtenus par nos traitements numériques avec une référence exacte. Le levé topographique est, en effet, le moyen le plus adéquat d'obtenir la valeur réelle des altitudes du terrain naturel sous les zones végétalisées.

Comme nous l'avons évoqué au cours de la rédaction, nous pensons que l'avenir de la segmentation LIDAR passe par une intégration d'informations provenant des données externes. La combinaison avec d'autres données pourrait apporter de nouvelles pistes d'analyses par l'exploitation de données radiométriques diverses telles que des images satellitaires haute résolution ou bien des photographies aériennes.

Dans l'optique de nos futures recherches de doctorat, nous pensons que ce travail préliminaire est un excellent tremplin qui nous permettra d'entamer au mieux nos nouveaux développements dans le cadre de la segmentation et l'exploitation de données LIDAR dans le cadre d'applications hydrodynamiques.

Bibliographie

ALHARTHY A. & BETHEL J., 2002. *Heuristic filtering and 3D extraction from LIDAR data*, Photogrammetric Computer Vision ISPRS Commission III, Symposium 2002 September 9 - 13, 2002, Graz, Austria, 29-35 p.

ARCHAMBEAU P., 2006. *Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations*, thèse de doctorat en Sciences Appliquées, University of Liège, Faculté des Sciences Appliquées, HACH, 423p.

AREFI H., HAHN M. & LINDENBERGER J., 2003. *LIDAR data classification with remote sensing tools. ISPRS Joint Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization II*, Stuttgart, Germany, 2003, 131-136 p.

CHARANIYA, A.P.; MANDUCHI, R. & LODHA, S.K., 2004. *Supervised Parametric Classification of Aerial LiDAR Data*. Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, Volume 27, Issue 02, June 2004 30 – 38 p.

CLODE S.-P., ROTTENSTEINER F. & KOOTSOOKOS P., 2005 *Improving city model determination by using road detection from LIDAR data*. Stilla U, Rottensteiner F, Hinz S (Eds) CMRT05. IAPRS, Vol. XXXVI, Part 3/W24 -Vienna, Austria, August 2005, 29-30 p.

BATES P.D., MARKS K.J., & HORRITT M.S., 2002. *Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models*. Hydrological Processes **17**. 537-557 p.

BRETAR F., 2006. *Les systèmes LIDAR aéroportés : Géo-référencement et Précision*, Séminaire REGLIS 7-8 décembre 2006 Montpellier

BRETAR F., 2006. *Couplage de données laser aéroporté et photogrammétriques pour l'analyse de scènes tridimensionnelles*, thèse de doctorat en Sciences, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris, 166 p.

DASH J., STEINLE E., SINGH R.P. & BAHR H.P., 2003. *Automatic building extrcation from laser scanning data:an input tool for disaster management*. Advances in Space Research 33, 317-322 p.

DETREMBLEUR S., 2003. *Élaboration d'outils intégrés de gestion des données topographiques et morphologiques pour la modélisation des crues et inondations*, mémoire de DEA, University of Liège, Faculté des Sciences Appliquées, HACH, 110p.

Direction Générale de l'Aménagement du Territoire, du Logement et du Patrimoine (DGATLP), 2003. *Les risques majeurs en Région wallonne: Prévenir en aménageant*, Étude et Document, Ministère de la Région wallonne, 317 p.

DONNAY J.-P., 2004. *Analyse spatiale*, notes de cours, Université de Liège, Faculté des Sciences, inédit.

ERNST J., 2007. Analyses trajectographiques par des mesures GNSS RTK, rapport interne, inédit, 18 p.

ERNST J., 2006. *Modélisation tridimensionnelle de fragments urbains par voie photogrammétrique*, mémoire de licence, University of Liège, Faculté des Sciences inédit, 101p.

GONTRAN H. & LEHMAN M., 2006. *Custom GPS-Correction Server for Real-Time Trajectory*, ION GNSS '06, Fort Worth, Texas, USA, Sept. 26-29, 6p.

KRAUS K. & PFEIFER N., 2001. *Advanced DTM generation from LIDAR data*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 Annapolis, MD, 22-24 October 2001.

KRZYTEK P., 2003. *Filtering of laser scanning data in forest areas using finite elements*, Photogrammetry and remote sensing, Commission III - Working group 3, 6 p.

LAPLANCHE F., TELLER J. & BILLEN R., 2006. Méthode de relevé rapide de scènes urbaines tridimensionnelles dans le cadre d'évaluations environnementales stratégiques. *Revue Internationale de Géomatique* (accepté).

MASLO A. 1997. Visual basic 5

MERINOD B., SKALOUD J. & GONTRAN H., J., 2004, *GSM-distributed RTK for precise analysis of speed skiing*, Proceedings of the 8th European Navigation Conference GNSS, 17-19 May, Rotterdam, Netherlands, 5p.

PARIAN J.A. & GRUEN A., 2005. *Integrated Laser Scanner and Intensity Image Calibration and Accuray assessment*. Volume XXXV, Enschede, The Netherlands, September 2005. Proceeding of Workshop "Laser Scanning 2005", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.

SAUX E. & BILLEN R. (Ed.), 2006. Information géographique tridimensionnelle, *Revue internationale de Géomatique* . Paris, ° 1/2006.

TEO T.-A. & CHEN L.-C., 2004. Object-based building detection from LIDAR data and high resolution satellite imagery. 25th ACRS, 2004 Chiang Mai, Thailand, 6p.

TOVARI D., 2006. *Segmentation Based Classification of Airborne Laser Scanner Data*. Universität Karlsruhe, Fak. f. Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften. Diss. v. 11.07-2006.

YANG C., KAO S., LEE F. & HUNG P., 2004. *Twelve Different Interpolation methods: A Case Study of Surfer 8.0*. Geo-Imagery Bridging Continents, XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turquie. 8p. <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/231.pdf> , consultation le 14 avril 2007

Annexes

Annexe 1 : Photos de situation

La date de prises de vue est le samedi 25 aout 2007.





Annexe 2 : segmentation SOL-SSOL

Code commenté de l'algorithme de la segmentation *SOL - SSOL* :

```
Public Sub Segment(Alpha As Single, Beta As Single, methode As Integer, nbx As Integer,
nby As Integer, Echo2() As Single, ByRef Result() As Single, Seuil As Integer, nconvol
As Integer)

Dim lo As Integer
'Dimensionnement des matrices pour chaque profil
Dim Mbool1() As Single
Dim Mbool2() As Single
Dim Mbool3() As Single
Dim Mbool4() As Single
Dim Mbool5() As Single
Dim Mbool6() As Single
Dim Mbool7() As Single
Dim Mbool8() As Single
Dim Somme() As Single

ReDim Result(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool1(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool2(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool3(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool4(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool5(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool6(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool7(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Mbool8(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Somme(1 To nbx, 1 To nby)

'/// Horizontal (gauche vers droite)
'Boucle sur les lignes de la matrice
For i = 1 To nby
    Min = 0
    lo = 0
    'Boucle sur les colonnes
    For j = 1 To nbx - 1
        'On vérifie qu'il existe une valeur d'altitude à cette maille
        If Echo2(j, i) <> 0 Then
            'Initialisation de la valeur de la dernière maille SOL
            If Min = 0 Then Min = Echo2(j, i)
            'Test sur les deux paramètres alpha et beta
            If (Mbool1(j, i) = 0 And Echo2(j + 1, i) - Echo2(j, i) > Alpha) Or ✂
(Mbool1(j, i) = 1 And (Echo2(j + 1, i) - Min) / (j - lo) > Beta) Then
                'Si vrai → maille (j + 1, i) SSOL
                Mbool1(j + 1, i) = 1
                If Mbool1(j, i) = 0 Then
                    'Sauvegarde de la dernière maille SOL
                    Min = Echo2(j, i)
                    lo = j
                End If
            'Sinon SOL
            Else
                Mbool1(j + 1, i) = 0
            End If
        End If
    Next j
Next i
'Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh

'Le même raisonnement est appliqué pour toutes les orientations de profil

'/// Horizontal (droite vers gauche)
For i = 1 To nby
    Min = 0
    lo = 0
    For j = 1 To nbx - 2
```

```

        If Echo2(nbx - j, i) <> 0 Then
            If Min = 0 Then Min = Echo2(j, i)
            If (Mbool12(nbx - j, i) = 0 And Echo2(nbx - (j + 1), i) - ✂
Echo2(nbx - j, i) > Alpha) Or (Mbool12(nbx - j, i) = 1 And (Echo2(nbx - (j + 1), i) ✂
- Min) / (j - lo) > Beta) Then
                Mbool12(nbx - (j + 1), i) = 1
                If Mbool12(nbx - j, i) = 0 Then
                    Min = Echo2(nbx - j, i)
                    lo = j
                End If
            Else
                Mbool12(nbx - (j + 1), i) = 0
            End If
        End If
    Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 2 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh
`///Vertical (bas vers haut)
For i = 1 To nbx
    Min = 0
    lo = 0
    For j = 1 To nby - 1
        If Echo2(i, j) <> 0 Then
            If Min = 0 Then Min = Echo2(i, j)
            If (Mbool13(i, j) = 0 And Echo2(i, j + 1) - Echo2(i, j) > Alpha) Or ✂
(Mbool13(i, j) = 1 And (Echo2(i, j + 1) - Min) / (j - lo) > Beta) Then
                Mbool13(i, j + 1) = 1
                If Mbool13(i, j) = 0 Then
                    Min = Echo2(i, j)
                    lo = j
                End If
            Else
                Mbool13(i, j + 1) = 0
            End If
        End If
    Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 3 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh
`///Vertical (haut vers bas)
For i = 1 To nbx
    Min = 0
    lo = 0
    For j = 1 To nby - 2
        If Echo2(i, nby - j) <> 0 Then
            If Min = 0 Then Min = Echo2(i, nby - j)
            If (Mbool14(i, nby - j) = 0 And Echo2(i, nby - (j + 1)) - ✂
Echo2(i, nby - j) > Alpha) Or (Mbool14(i, nby - j) = 1 And (Echo2(i, nby - (j + 1)) ✂
- Min) / (j - lo) > Beta) Then
                Mbool14(i, nby - (j + 1)) = 1
                If Mbool14(i, nby - j) = 0 Then
                    Min = Echo2(i, nby - j)
                    lo = j
                End If
            Else
                Mbool14(i, nby - (j + 1)) = 0
            End If
        End If
    Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 4 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh

`Si l'utilisateur a choisi une analyse 8-connexe
If methode = 8 Then
    `/// Oblique (bas droite vers haut gauche)
    For i = 1 To nbx + nby
        k = IIf(i > nbx, i - nbx + 1, 1)
        l = IIf(i > nby, i - nby + 1, 1)
        Min = 0
        lo = 0
        For j = k To i - 1
            If j <> 1 And i <> 1 Then
                If Echo2(i - j + 1, j) <> 0 Then
                    If Min = 0 Then Min = Echo2(i - j + 1, j)
                    If (Mbool15(i - j + 1, j) = 0 And Echo2(i - j, j + 1) - ✂
Echo2(i - j + 1, j) > Alpha) Or (Mbool15(i - j + 1, j) = 1 And (Echo2(i - j, j + 1) ✂
- Min) / ((j - lo) * sqr(2*(Echo(2).Maille)^2)) > Beta) Then
                        Mbool15(i - j, j + 1) = 1
                        If Mbool15(i - j + 1, j) = 0 Then

```

```

        Min = Echo2(i - j + 1, j)
        lo = j
    End If
Else
    Mbool5(i - j, j + 1) = 0
End If
End If
End If
Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 5 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh

`/// Oblique (bas gauche vers haut droite)
For i = 1 To nbx + nby
    k = IIf(i > nbx, i - nbx + 2, 1)
    l = IIf(i > nby, i - nby + 1, 1)
    Min = 0
    lo = 0
    For j = k To i - 1
        If j <> 1 And i <> 1 Then
            If Echo2((nbx - i) + j - 1, j) <> 0 Then
                If Min = 0 Then Min = Echo2((nbx - i) + j - 1, j)
                If (Mbool6((nbx - i) + j - 1, j) = 0 And Echo2((nbx - i) + j, j + 1) <
- Echo2((nbx - i) + j - 1, j) > Alpha) Or (Mbool6((nbx - i) + j - 1, j) = 1 And <
(Echo2((nbx - i) + j, j + 1) - Min) / ((j - lo) * sqr(2*(Echo(2).Maille)^2)) > Beta)
Then
                    Mbool6((nbx - i) + j, j + 1) = 1
                    If Mbool6((nbx - i) + j - 1, j) = 0 Then
                        Min = Echo2((nbx - i) + j - 1, j)
                        lo = j
                    End If
                Else
                    Mbool6((nbx - i) + j, j + 1) = 0
                End If
            End If
        End If
    Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 6 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh

`/// Oblique (haut droite vers bas gauche)
For i = 1 To nbx + nby
    k = IIf(i > nbx, i - nbx + 1, 1)
    l = IIf(i > nby, i - nby + 2, 1)
    Min = 0
    lo = 0
    For j = 1 To i - k
        If j <> 1 And i <> 1 Then
            If Echo2(j, i + 2 - j) <> 0 Then
                If Min = 0 Then Min = Echo2(j, i + 2 - j)
                If (Mbool7(j, i + 2 - j) = 0 And Echo2(j + 1, i + 1 - j) - <
Echo2(j, i + 2 - j) > Alpha) Or (Mbool7(j, i + 2 - j) = 1 And <
(Echo2(j + 1, i + 1 - j) - Min) / ((j - lo) * sqr(2*(Echo(2).Maille)^2)) > Beta) Then
                    Mbool7(j + 1, i + 1 - j) = 1
                    If Mbool7(j, i + 2 - j) = 0 Then
                        Min = Echo2(j, i + 2 - j)
                        lo = j
                    End If
                Else
                    Mbool7(j + 1, i + 1 - j) = 0
                End If
            End If
        End If
    Next j
Next i
`Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 7 * 100 / Connexe
Navigation.ProgreSeg.Refresh

`/// Oblique (haut gauche vers bas droite)
For i = 1 To nbx + nby
    k = IIf(i > nbx, i - nbx + 1, 1)
    l = IIf(i > nby, i - nby + 2, 1)
    Min = 0
    lo = 0
    For j = 1 To i - k
        If j <> 1 And i <> 1 Then
            If Echo2(nbx - j + 1, i - j + 2) <> 0 Then
                If Min = 0 Then Min = Echo2(nbx - j + 1, i - j + 2)
            End If
        End If
    Next j
Next i

```

```

                If (Mbool8(nbx - j + 1, i - j + 2) = 0 And Echo2(nbx - j, ✂
i - j + 1) - Echo2(nbx - j + 1, i - j + 2) > Alpha) Or (Mbool8(nbx - j + 1, ✂
i - j + 2) = 1 And (Echo2(nbx - j, i - j + 1) - Min) / ((j - lo) * ✂
sqr(2*(Echo(2).Maille)^2)) > Beta) Then
                    Mbool8(nbx - j, i - j + 1) = 1
                    If Mbool8(nbx - j + 1, i - j + 2) = 0 Then
                        Min = Echo2(nbx - j + 1, i - j + 2)
                        lo = j
                    End If
                Else
                    Mbool8(nbx - j, i - j + 1) = 0
                End If
            End If
        End If
    Next j
Next i
End If
'Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg.Value = 100
Navigation.ProgreSeg.Refresh
'/// fin de parcours des mailles pour le segmentation
'Création de la matrice résultat par sommation des tous les profils
For i = 1 To nby
    For j = 1 To nbx
        Result(j, i) = Mbool1(j, i) + Mbool2(j, i) + Mbool3(j, i) + Mbool4(j, i) + ✂
Mbool5(j, i) + Mbool6(j, i) + Mbool7(j, i) + Mbool8(j, i)
    Next j
Next i
End Sub

```

Annexe 3 : segmentation SSA-SSN

Code commenté de l'algorithme de segmentation SSA-SSN :

```
Public Sub CalculDiff(Seuil As Single, nconvol As Integer, nbx As Integer, nby As Integer, Binaire() As Single, Echo1() As Single, Echo2() As Single, ByRef param() As Single, ByRef Zones() As Single, ByRef Result() As Single)

'Dimensionnement des variables
'Matrice de stockage des paramètres pour chaque zone
ReDim param(2 To 20000, 1 To 7)
ReDim Zones(1 To nbx, 1 To nby)
ReDim Result(1 To nbx, 1 To nby)

Zones() = Binaire()

Dim diff As Single
Dim x As Long
Dim TabVisite() As Long
ReDim TabVisite(1 To 2, 1 To 10000000, 1 To 3)
'IDzone = identifiant de l'îlot
IDzone = 1
'Calcul des paramètres
'Parcours de la matrice sauf les mailles de bord (taille de convolution/2)
'détection des îlot
For i = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nby - (nconvol - 1) / 2
    For j = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nbx - (nconvol - 1) / 2
        If Zones(j, i) = 1 Then
            IDzone = IDzone + 1
            Zones(j, i) = IDzone
            'Calcul des paramètres

            Moyenne = Echo2(j, i)
            diff = Echo1(j, i) - Echo2(j, i)
            NBmaille = 1
            'Première étape: recherche autour du premier pixel
            NBconnexe = 0
            For k = -1 To 1
                If k <> 0 And Zones(j, i + k) = 1 Then
                    NBconnexe = NBconnexe + 1
                    Zones(j, i + k) = IDzone
                    TabVisite(1, NBconnexe, 1) = j
                    TabVisite(1, NBconnexe, 2) = i + k
                    'Calcul des paramètres
                    Moyenne = Moyenne + Echo2(j, i + k)
                    diff = diff + (Echo1(j, i + k) - Echo2(j, i + k))
                    NBmaille = NBmaille + 1
                End If
            Next k
            For k = -1 To 1
                If k <> 0 And Zones(j + k, i) = 1 Then
                    NBconnexe = NBconnexe + 1
                    Zones(j + k, i) = IDzone
                    TabVisite(1, NBconnexe, 1) = j + k
                    TabVisite(1, NBconnexe, 2) = i
                    'Calcul des paramètres
                    Moyenne = Moyenne + Echo2(j + k, i)
                    diff = diff + (Echo1(j + k, i) - Echo2(j + k, i))
                    NBmaille = NBmaille + 1
                End If
            Next k
            'Fin de la recherche autour de premier pixel
            'Propagation dans l'îlot
            While NBconnexe > 0
                x = 0
                For n = 1 To NBconnexe
                    For k = -1 To 1
                        If k <> 0 And Zones(TabVisite(1, n, 1), TabVisite(1, n, 2) + k) = 1 Then
                            x = x + 1
                            Zones(TabVisite(1, n, 1), TabVisite(1, n, 2) + k) = IDzone
                            TabVisite(2, x, 1) = TabVisite(1, n, 1)
                        End If
                    Next k
                Next n
            End While
        End If
    Next j
Next i
```

```

TabVisite(2, x, 2) = TabVisite(1, n, 2) + k
'Calcul des paramètres
Moyenne = Moyenne + Echo2(TabVisite(1, n, 1), TabVisite
(1, n, 2) + k)
diff = diff + (Echo1(TabVisite(1, n, 1), TabVisite
(1, n, 2) + k) - Echo2(TabVisite(1, n, 1), TabVisite(1, n, 2) + k))
NBmaille = NBmaille + 1
End If

Next k
For k = -1 To 1

    If k <> 0 And Zones(TabVisite(1, n, 1) + k, TabVisite
(1, n, 2)) = 1 Then
        x = x + 1
        Zones(TabVisite(1, n, 1) + k, TabVisite(1, n, 2)) = IDzone
        TabVisite(2, x, 1) = TabVisite(1, n, 1) + k
        TabVisite(2, x, 2) = TabVisite(1, n, 2)
        'Calcul des paramètres
        Moyenne = Moyenne + Echo2(TabVisite(1, n, 1) + k,
TabVisite(1, n, 2))
        diff = diff + (Echo1(TabVisite(1, n, 1) + k, TabVisite
(1, n, 2)) - Echo2(TabVisite(1, n, 1) + k, TabVisite(1, n, 2)))
        NBmaille = NBmaille + 1
    End If

Next k
Next n

NBconnexe = x
For o = 1 To NBconnexe
    TabVisite(1, o, 1) = TabVisite(2, o, 1)
    TabVisite(1, o, 2) = TabVisite(2, o, 2)
Next o
Wend
'Écriture des paramètres dans la matrice param()
param(IDzone, 1) = IDzone
param(IDzone, 2) = NBmaille
param(IDzone, 3) = diff / NBmaille
param(IDzone, 4) = Moyenne / NBmaille
End If
'On passe à l'îlot suivant
Next j
'Calcul de la valeur de la barre de progrès
Navigation.ProgreSeg2.Value = ((i - (1 + (nconvol - 1) / 2)) /
((nby - (nconvol - 1) / 2) - (1 + (nconvol - 1) / 2))) * 100
Next i

'Calcul de l'ecartype pour toutes les zones
For i = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nby - (nconvol - 1) / 2
    For j = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nbx - (nconvol - 1) / 2
        If Zones(j, i) <> 0 Then
            param(Zones(j, i), 5) = param(Zones(j, i), 5) + (Echo2(j, i) -
param(Zones(j, i), 4)) ^ 2
        End If
    Next j
Next i

'Récupération de la différence et de l'écart type min et max
MinDiff = param(2, 3)
MaxDiff = 0
MinECT = param(2, 5)
MaxECT = 0

For i = 2 To IDzone
    param(i, 5) = param(i, 5) / param(i, 2)
    If param(i, 3) < MinDiff Then MinDiff = param(i, 3)
    If param(i, 3) > MaxDiff Then MaxDiff = param(i, 3)
    If param(i, 5) < MinECT Then MinECT = param(i, 5)
    If param(i, 5) > MaxECT Then MaxECT = param(i, 5)
Next i

'Écriture de la matrice binaire du résultat
For i = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nby - (nconvol - 1) / 2
    For j = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nbx - (nconvol - 1) / 2
        If Zones(j, i) <> 0 Then
            If param(Zones(j, i), 3) > Seuil Then
                'Result(j, i) = Zones(j, i)
                Result(j, i) = 1
            Else
                'Result(j, i) = Echo2(j, i)
                Result(j, i) = 0
            End If
        Else
            'Result(j, i) = Echo2(j, i)

```

```
        Result(j, i) = 0
      End If
    Next j
  Next i
End Sub
```

Annexe 4 : généralisation

Code commenté de l'algorithme de généralisation :

```
Public Sub Generalisation(Binaire() As Single, nbx As Integer, nby As Integer, nconvol
As Integer, Critere As Integer, Shapefiles As Integer, ByRef Result() As Single)

'Déclaration des variables
Dim Contour() As Single
ReDim Contour(1 To nbx, 1 To nby)
'Parcours de l'image binaire et détection des contours (intérieurs)
For i = 2 To nby - 1
    For j = 2 To nbx - 1
        If (Binaire(j, i) = 1 And Binaire(j - 1, i) = 0) Or (Binaire(j, i) = 1 And
Binaire(j, i - 1) = 0) Then Contour(j, i) = 1
        If (Binaire(j, i) = 0 And Binaire(j - 1, i) = 1) Then Contour(j - 1, i) = 1
        If (Binaire(j, i) = 0 And Binaire(j, i - 1) = 1) Then Contour(j, i - 1) = 1
    Next j
Next i
'Pourcours de l'image avec la fenêtre de convolution
For i = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nby - (nconvol - 1) / 2
    For j = 1 + (nconvol - 1) / 2 To nbx - (nconvol - 1) / 2
        'Initialisation des paramètres
        MoyenneArbre = 0 'Moyenne de la valeur des mailles SSN de la fenêtre de
convolution
        MoyenneSol = 0 'Moyenne de la valeur des mailles SOL de la fenêtre de
convolution
        nArbre = 0
        nSol = 0
        MinSol = 0
        MaxSol = 0
        'Si le centre de la fenetre est sur un contour
        If Contour(j, i) = 1 Then
            MinSol = Echo2(j, i)
            'Parcours de la fenetre de convolution
            For k = (1 - nconvol) / 2 To (nconvol - 1) / 2
                For l = (1 - nconvol) / 2 To (nconvol - 1) / 2
                    If Binaire(j + 1, i + k) = 1 Then ' si la maille est un arbre
                        MoyenneArbre = MoyenneArbre + Echo2(j + 1, i + k)
                        nArbre = nArbre + 1
                    Else
                        If Echo2(j + 1, i + k) <> 0 Then ' Si la maille n'est pas un
arbre et l'echo2 n'est pas nul
                            MoyenneSol = MoyenneSol + Echo2(j + 1, i + k)
                            If MinSol > Echo2(j + 1, i + k) Then MinSol = Echo2(j + 1,
i + k)
                            If MaxSol < Echo2(j + 1, i + k) Then MaxSol = Echo2(j + 1,
i + k)
                            nSol = nSol + 1
                        End If
                    End If
                Next l
            Next k
            'Calcul final des paramètres
            If nArbre > 0 Then MoyenneArbre = MoyenneArbre / nArbre
            If nSol > 0 Then MoyenneSol = MoyenneSol / nSol
            'Généralisation de la zone d'arbre
            For k = (1 - nconvol) / 2 To (nconvol - 1) / 2
                For l = (1 - nconvol) / 2 To (nconvol - 1) / 2
                    'Utilisation
                    Select Case Shapefiles
                        Case 0 'si on ne tient pas compte du shapefiles
                            Select Case Critere
                                Case 0 'Critère 1
                                    If Echo2(j + 1, i + k) = MaxSol Then Result(j + 1,
i + k) = 1
                                Case 1 'Critère 2
                                    If Echo2(j + 1, i + k) > MoyenneSol Then Result(j + 1,
i + k) = 1
                                Case 2 'Critère 3
                                Case 3 'Critère 4
```

```

                                If Echo2(j + 1, i + k) > MinSol Then Result(j + 1, i + k) = 1
i + k) = 1
                                Case 4 'Critère 5
                                    Result(j + 1, i + k) = 1
                                End Select
                                Case 1 'si on en tient compte
                                    If Maison(j + 1, i + k) < 1 Then
                                        Select Case Critere
                                            Case 0 'Critère 1
                                                If Echo2(j + 1, i + k) = MaxSol Then Result(j + 1, i + k) = 1
, i + k) = 1
                                                Case 1 'Critère 2
                                                    If Echo2(j + 1, i + k) > MoyenneSol Then Result(j + 1, i + k) = 1
+ 1, i + k) = 1
                                                Case 2 'Critère 3
                                                Case 3 'Critère 4
                                                    If Echo2(j + 1, i + k) > MinSol Then Result(j + 1, i + k) = 1
, i + k) = 1
                                                Case 4 'Critère 5
                                                    Result(j + 1, i + k) = 1
                                                End Select
                                            End If
                                        End Select
                                    Next l
                                Next k
                            End If
                        Next j
                    'Calcul de la valeur de la barre de progrès
                    Navigation.ProgressGen.Value = ((i - (1 + (nconvol - 1) / 2)) / ((nby - (nconvol - 1) / 2) - (1 + (nconvol - 1) / 2))) * 100
                Next i
            'Écriture des mailles déjà classe SSN avant la généralisation
            For i = 1 To nby
                For j = 1 To nbx
                    If Binaire(j, i) = 1 Then Result(j, i) = 1
                Next j
            Next i
        End Sub

```

Ce travail de DEA s'inscrit dans une stratégie de préparation à de futures recherches doctorales. Dans ce cadre, nous veillerons à soigner particulièrement l'état de l'art afin de le rendre le plus exhaustif possible dans les différents sujets ayant trait aux données LIDAR et à leur segmentation. Celui-ci pourra, par la suite, nous servir de base de travail intéressante pour nos recherches ultérieures.

Par ce travail, nous tenterons d'apporter une autre vision du traitement des modèles topographiques indispensables à toute modélisation hydrodynamique. Dans ce mémoire, outre la section consacrée à l'état de l'art, nous mettrons au point une méthodologie de segmentation des données LIDAR (Light Detection And Ranging) visant à isoler les zones boisées présentes dans les MNS (Modèle Numérique de Surface) initiaux. Ensuite nous permettrons à l'utilisateur d'interpoler les valeurs d'altitudes sous ces zones isolées, et ainsi reconstruire un modèle topographique pertinent à une simulation hydrodynamique.

Pour mener à bien nos objectifs, notre travail bénéficie d'une collaboration innovante et constructive entre les unités de Géomatique (Professeur Roland Billen) et d'Hydraulique Appliquée et Constructions Hydrauliques (Professeur Michel Piroton) de l'Université de Liège. Chacune met ses compétences et son expertise au service de ce projet pour pouvoir ainsi acquérir une vision globale du problème posé.

