



HAL
open science

MNT à très haute résolution spatiale pour la représentation 3D de ravines d'érosion en montagne

Andrés Jacome Pereira

► **To cite this version:**

Andrés Jacome Pereira. MNT à très haute résolution spatiale pour la représentation 3D de ravines d'érosion en montagne. Sciences de l'environnement. AgroParisTech, 2009. Français. NNT : 2009AGPT0080 . pastel-00601937

HAL Id: pastel-00601937

<https://pastel.hal.science/pastel-00601937>

Submitted on 21 Jun 2011

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

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



Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Science de l'Eau

présentée et soutenue publiquement par

Andrés JACOME PEREIRA

le 17 décembre 2009

MNT A TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE POUR LA REPRESENTATION 3D DE RAVINES D'ÉROSION EN MONTAGNE

Directeur de thèse : **Christian PUECH**

JURY :

M. Christian PUECH, Directeur de Recherche, UMR TETIS (Cemagref)

M. Christophe DELACOUR, Professeur, Université de Brest

M. Michel JABOYEDOFF, Professeur, Université de Lausanne (Suisse)

M. José A. MARTINEZ-CASASNOVAS, Professeur, Université de Lleida (Espagne)

M. Thierry VILLEMIN, Professeur, Université de Savoie

Mme. Nicolle MATHYS, Ingénieur Div. Agriculture et Environnement, Cemagref

Directeur de Thèse

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinatrice



Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Science de l'Eau

présentée et soutenue publiquement par

Andrés JACOME PEREIRA

le 17 décembre 2009

MNT A TRES HAUTE RESOLUTION SPATIALE POUR LA REPRESENTATION 3D DE RAVINES D'ÉROSION EN MONTAGNE

Directeur de thèse : **Christian PUECH**

JURY :

M. Christian PUECH, Directeur de Recherche, UMR TETIS (Cemagref)

M. Christophe DELACOUR, Professeur, Université de Brest

M. Michel JABOYEDOFF, Professeur, Université de Lausanne (Suisse)

M. José A. MARTINEZ-CASASNOVAS, Professeur, Université de Lleida (Espagne)

M. Thierry VILLEMIN, Professeur, Université de Savoie

Mme. Nicole MATHYS, Ingénieur Div. Agriculture et Environnement, Cemagref

Directeur de Thèse

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinatrice

REMERCIEMENTS

La liste des personnes et des institutions à remercier est énorme, que ce soit du côté vénézuélien que du côté français. Je demande donc aux personnes ou aux institutions que j'aurais pu oublier dans ces remerciements de m'en excuser. Les remerciements « côté vénézuélien » seront faits en espagnol.

Du côté français, je tiens à remercier vivement Christian Puech pour m'avoir donné la possibilité de venir au sein de la Maison de la Télédétection en me confiant ce sujet de thèse et pour toutes ces heures de travail qu'il m'a consacrées. Au delà des aspects scientifiques, je dois saluer ses grandes qualités humaines. Je remercie très spécialement le directeur de l'UMR TETIS, Pascal Kosuth, pour son aide inestimable.

Merci au Cemagref-Montpellier de m'avoir fourni les moyens techniques (et financiers) qui m'ont permis de mener à bien cette thèse. Un grand merci également au personnel du Cemagref-Grenoble (Didier Richard, Nicolle Mathys, Sébastien Klotz, Manu Olivier, Xavier Ravanat).

Je remercie les membres du jury : Christophe Delacourt (Professeur, Université de Brest), Michel Jaboyedoff (Professeur, Université de Lausanne, Suisse), José A. Martinez-Casasnovas (Professeur, Université de Lleida, Espagne), Thierry Villemin (Professeur, Université de Savoie), Nicolle Mathys (Ingénieur divisionnaire de l'agriculture et de l'environnement, Cemagref Grenoble) pour toutes ces observations qu'ont amélioré la qualité de ce manuscrit, et tout spécialement les rapporteurs Christophe Delacourt et Michel Jaboyedoff.

Je tiens à remercier Damien Raclot (IRD) et Jean-Stéphane Bailly (AgroParisTech Montpellier) pour leurs précieux conseils. Un grand merci à Marc Pierrot-Deseilligny (IGN) avec qui nous avons élaboré une collaboration décisive pour l'analyse stéréo d'images drone (merci MicMac !).

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont soutenu pendant les intenses missions de terrain, notamment les deux Nicos (Bercher et Moyroud) et Cristina Bicalho. Une mention spéciale ici à Sébastien Klotz et à Laurent Albrech (Cemagref Montpellier), pour l'aide inestimable sur le terrain, pour l'accueil chaleureux à Draix (Sébastien), ainsi que pour le traitement de données LiDAR (Laurent). Merci à Bruno Roux (l'avion jaune) pour toutes les missions drone sur les bassins de Draix.

Je remercie les personnes en poste à la Maison de la Télédétection : Sylvain Labbé, Guy Roussin, Alain Delacourt, Sylvie Blin, Sylvie Durrieu (le carré blanc !), entre autres, pour leurs innombrables aides et conseils.

Mention spéciale dans ces remerciements à mon ami et colocataire de bureau Nicolas Bercher, pour la très bonne ambiance musicale (alive & in studio) partagée pendant une belle partie de la thèse. Ainsi qu'au trio « space-rock » de la MTD : Nico B., Gabe Puyol et moi.

Et tous ces gens de passage à la MTD : Fadel, Carlos, Macarena, Julien, Nico D., Jérémy, Renaud, Carole, Denis, Jérôme, Yannick, Jean, Tristan, Roberto (vive le Baseball !). Merci beaucoup à Isabelle et à Véronique. Je remercie tous ceux qui m'ont aidé, d'une façon ou d'une autre, à finir cette thèse.

Por el lado venezolano, debo comenzar con un enorme agradecimiento a las instituciones que cofinanciaron la mayor parte de mi estadía en Francia: Fundación Gran Mariscal de Ayacucho y Embajada de Francia en Venezuela (EDUFRANCE), así como el Centro de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV).

Quiero también expresar mi agradecimiento al anterior Decano de la Facultad de Agronomía en Maracay (FAGRO), Dr. Franklin Chapín, y especialmente al actual Decano Dr. Leonardo Taylhardat (mi primer tutor), por el apoyo incondicional ofrecido durante mi estadía en Francia.

Es mucho lo que debo agradecer a la UCV, durante mis años de formación como estudiante (de pregrado o de postgrado), en particular al Instituto de Edafología de la FAGRO (mil gracias Deyanira Lobo). A todos los profesores que despertaron mi pasión por la investigación y la docencia. Entre ellos quiero citar a Aníbal Rosales, Jesús Vilorio, Graciano Elizalde, Stalin Torres, Francisco Ovalles, Adriana Florentino, así como Oscar Rodríguez (vecino), Napoleón Fernández, María Luisa Páez, y muchos otros.

A los colegas con quienes he compartido muchos años de andanzas académicas, en especial a mi compadre y amigo Oscar Silva. Lamento profundamente no haber podido culminar mis años de actividad profesional junto a ustedes en la FAGRO-Maracay, que es donde realmente pertenezco. Estaré eternamente agradecido....

El agradecimiento más grande por supuesto a la familia, especialmente a mi esposa Mónica y a mi hija Claudia, por la motivación a seguir superando metas, por el cariño y amor mutuos que nos permite avanzar día a día. Gracias también a mis suegros Emilio y Judith, por el importante apoyo logístico en Venezuela.

A mis hermanas Nina y María Inés, por sus palabras de aliento necesarias para terminar este trabajo. A mis padres y a mi hermano Manito (merci mon frère), que a pesar de no estar presentes físicamente hoy en día, siguen de alguna manera suministrándome fuerzas para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A ma fille Claudia

RÉSUMÉ

Le suivi et la compréhension de la dynamique spatio-temporelle de l'érosion par ravinement en zones de Badlands (montagnes marneuses à Draix, Alpes Françaises méridionales) ont besoin de méthodes de caractérisation détaillée, rapide et facilement reproductibles de ces phénomènes et de leurs manifestations sur le terrain. Nous avons testé deux approches d'observation spatiales afin de répondre à ces besoins : une approche aérienne à partir de la stéréophotogrammétrie d'images drone (en utilisant des appareils photos « grand public » et des méthodes de traitement informatique existant), et une approche terrestre à partir d'un scan LiDAR terrestre.

L'analyse de résultats pour l'approche aérienne montre qu'il existe trois éléments clés dans la chaîne de traitement stéréoscopique qui permettent de surmonter les contraintes d'une telle application : la préparation de terrain (nombre et distribution des mires) ; la compensation des erreurs systématiques issues de la géométrie d'acquisition d'images (par correction de déformation de lentilles et autocalibrage) ; et la stratégie de corrélation d'image (par algorithme multi-résolution et normalisation du relief). Une combinaison adéquate de ces trois éléments nous a permis d'obtenir une précision, un détail et une cohérence hydrographique des MNT drone à la limite de la donnée (résolution d'image originale au sol autour de 3 cm, erreur moyenne en Z de 5 cm).

Par rapport à l'approche terrestre, l'analyse du bruit de la mesure LiDAR sur tôles avec des formes géométriques connues nous montre une dispersion autour d'un centimètre pour une distance de mesure de 30 mètres. L'application d'une moyenne simple à un pas régulier d'un centimètre permet de réduire le bruit et aussi de recréer les formes de plus de 3 cm. Pour les formes géométriques plus petites, la dispersion des données est tellement importante qu'il n'est pas possible de les détecter.

Le rapport « avantages-contraintes » entre ces deux approches est nivelé par les éléments « étendue-continuité » et « résolution-précision » des MNT résultants. L'approche aérienne produit des MNT avec une étendue et une continuité importante, tandis que l'approche terrestre produit des MNT plus précis et détaillé. Ces deux approches peuvent être considérées comme complémentaires à l'heure d'étudier les manifestations superficielles de l'érosion hydrique en montagnes marneuses. La qualité obtenue par le MNT drone sur les ravines étudiées, après application de toutes les corrections possibles, s'est révélée très proche de la qualité obtenue par les techniques LiDAR.

Les résultats révèlent l'énorme potentiel du vecteur drone pour le développement des MNT peu coûteux, avec une très haute résolution spatiale, malgré de nombreuses contraintes. D'autre part, le LiDAR terrestre se révèle comme un système de lever de terrain permettant une rapidité et une répétitivité de mesure, ainsi qu'un niveau de détail intéressant pour le suivi des processus élémentaires d'érosion hydrique et ses manifestations sur le terrain.

Mots-clés : drones, stéréophotogrammétrie, MNT, érosion par ravinement, LiDAR, Badlands

ABSTRACT

Assessment and comprehension of gully erosion dynamics at their temporal and spatial scale in Badlands (marl's geology, south of French Alps) need fast and easy reproducible methods of characterization of these phenomena. This requires a very great flexibility in topographic data acquisition, very high temporal and spatial resolution, an easy to use methodology, and low costs. We tested two approaches of spatial observation in order to accomplish this goal: an aerial approach by stereophotogrammetry from unmanned aerial vehicle (UAV or drone) images, using non metric digital frame cameras and available data processing methods; and a terrestrial approach by ground laser scanner.

Results for the aerial approach shows that there are three key elements in the stereoscopic data processing sequence which make it possible to overcome the constraints of such application: ground preparation (number and distribution of ground control points); systematic errors compensation resulting from image acquisition geometry (by correction for lens distortions and self-calibrating methods); and an image matching strategy (by multi-resolution and relief regularization algorithms). An adequate combination of these three elements enabled us to obtain a drone DTM with resolution, accuracy, and hydrologic coherence within the limit of the data (average image ground resolution 3 cm, average error in Z of 5 cm).

In regard to the terrestrial approach, results of LiDAR measurement test on different geometric surfaces show that the noise is of one centimeter from a measure distance of 30 meters. The application of a simple average filter in a regular grid of 1 centimeter makes it possible to reduce the noise and also to recreate geometric forms of more than 3 cm large. For the smaller geometrical forms, the dispersion of the data is so important that it is not possible to detect them, and after application of noise filter the detail is lost.

The “advantage-constraints” ratio between these two approaches is leveled by the aspects “extent-continuity” and “resolution-precision” of the resulting DTM. The aerial approach produces DTM with better extent and continuity, while the terrestrial approach produces more precise and detailed DTM. There is a strong potential for the complementary use of these two approaches in the assessment and comprehension of gully erosion dynamics in marly mountains. The quality obtained by drone DTM on the gullies studied, after application of all the possible corrections, appeared very close to the quality obtained by ground LiDAR techniques.

These results reveal the enormous potential of drone images for the development of inexpensive DTM, with a very high spatial resolution, in spite of many constraints. In addition, ground LiDAR arises as an interesting topographic surveying system for the monitoring of elementary processes of gully erosion, allowing for very detailed measurements in space and time.

Key words: UAV, stereophotogrammetry, DTM, gully erosion, LiDAR, Badlands

TABLE DES MATIÈRES

TITRE	i
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIÈRE PARTIE	3
OBJECTIFS, PLAN DE LA THÈSE ET SITE D'ÉTUDE	3
I.1 OBJECTIFS	5
I.2 PLAN DE LA THESE	6
I.3 SITE D'ETUDE	7
DEUXIÈME PARTIE	11
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	11
II.1 RAVINES ET FORMES D'ÉROSION SUR BADLANDS	13
II.2 ÉROSION ET MNT	23
II.2.1 La stéréophotogrammétrie en zone d'érosion	24
II.2.2 La stéréophotogrammétrie à courte distance	27
II.2.3 Le LiDAR	29
II.2.4 L'érosion à l'échelle de la pente d'une parcelle d'érosion	29
II.3 CONSTRUCTION DES MNT	32
II.3.1 3D par approche aérienne	32
II.3.1.1 La stéréophotogrammétrie	32
II.3.1.1.1 Préparation du vol et prise de vue stéréoscopique	38
II.3.1.1.2 Géométrie	41
II.3.1.1.2.1 Orientation Interne	41
II.3.1.1.2.2 Orientation Externe	43
II.3.1.1.3 Aérotriangulation	46
II.3.1.1.4 Restitution numérique et création du MNT	49
II.3.1.1.4.1 Corrélateurs image-image en une dimension.	50
II.3.1.1.4.2 Corrélateurs image-image dans le domaine des fréquences.	52
II.3.1.1.4.3 L'approche multi résolutions	53
II.3.2 3D par approche terrestre	56
II.3.2.1 Système de géo-positionnement par satellite (GPS)	56
II.3.2.2 Tachéomètre	57
II.3.2.3 Méthodes d'observation de l'érosion <i>in situ</i>	57
II.4 ÉVALUATION DE LA QUALITE DES MNT	61
II.5 REFLEXION FINALE	65
TROISIÈME PARTIE	69
APPROCHE AÉRIENNE	69
III.1 MÉTHODOLOGIE	71
III.1.1 Définition des choix de base principaux de la mission	71
III.1.1.1 Avant le vol	71
III.1.1.2 Après le vol	72
III.1.2 Géoréférencement et vol	72
III.1.2.1 Stratégie d'installation des mires	73
III.1.2.2 Stratégie de géoréférencement sur la zone d'étude	73

III.1.2.3 Les vols	75
III.1.3 Calcul informatique des MNT	75
III.1.3.1 Géométrie	76
III.1.3.1.1 Orientation Interne	76
III.1.3.1.2 Orientation Externe	77
III.1.3.2 Aérotriangulation	77
III.1.3.3 Restitution du relief (corrélation d'images)	78
III.1.3.4 Synthèse pour la création du MNT drone	79
III.1.4 Validation et l'analyse de précision	80
III.1.4.1 Lever de données « vérité terrain »	80
III.1.4.1.1 DGPS-Tachéométrie	81
III.1.4.1.1.1 Stratégie de lever terrain	81
III.1.4.1.1.2 Préparation des données	81
III.1.4.2 Évaluation de la précision dans le calcul de l'altitude	82
III.1.4.2.1 Analyse statistique	82
III.1.4.2.2 Spatialisation de l'erreur	83
III.1.4.3 Évaluation de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs	84
III.1.4.3.1 Etablissement de la référence terrain « hydro »	84
III.1.4.3.2 Stratégie de comparaison quantitative des réseaux (planimétrie)	85
III.1.4.3.3 Stratégie de comparaison quantitative des réseaux (pentes)	86
III.2 APPLICATION	88
III.2.1 Construction des MNT	88
III.2.1.1 Les choix de base principaux	88
III.2.1.2 Les vols	89
III.2.1.3 Géoréférencement	92
III.2.1.3.1 Installation des mires	92
III.2.1.3.2 Lever de terrain	94
III.2.1.4 Calcul informatique du MNT	101
III.2.1.4.1 Géométrie	101
III.2.1.4.1.1 Orientation Interne	101
III.2.1.4.1.2 Orientation Externe	104
III.2.1.4.2 Aérotriangulation	104
III.2.1.4.3 Restitution du relief	110
III.2.2 Validation et analyse de la précision	116
III.2.2.1 Lever de données « vérité terrain »	117
III.2.2.2 Évaluation de la précision dans le calcul de l'altitude	119
III.2.2.2.1 Correction de déformation de lentilles et l'autocalibrage	119
III.2.2.2.1.1 Données de validation DGPS-Tachéomètre	119
III.2.2.2.1.2 Données de validation LiDAR terrestre	122
III.2.2.2.2 Algorithmes de corrélation d'images	126
III.2.2.3 Évaluation de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs	130
III.2.2.3.1 Comparaison quantitative des réseaux (planimétrie)	130
III.2.2.3.1.1 Réseaux hydrographiques de référence	130
III.2.2.3.1.2 Réseaux hydrographiques extraits des MNT drone et LiDAR	133
III.2.2.3.1.3 Evaluation de la précision planimétrique	135
III.2.2.3.2 Comparaison quantitative des réseaux (les pentes)	137
III.2.3 Synthèse des résultats	144
III.2.3.1 Tests pour les orientations interne et externe	144
III.2.3.2 Tests pour la corrélation d'images	144
III.2.3.3 Evaluation de la qualité « hydrographique » des MNT	145

QUATRIÈME PARTIE	147
APPROCHE TERRESTRE	147
IV.1 MÉTHODOLOGIE	151
IV.1.1 Analyse de la mesure LiDAR	151
IV.1.1.1 Le matériel (les tôles)	151
IV.1.1.2 Le bruit et la couleur	153
IV.1.1.3 Restitution de formes géométriques	153
IV.1.2 Test d'humidité	154
IV.1.3 Géoréférencement	154
IV.1.2.1 Transformation du référentiel LiDAR sans repères de terrain	155
IV.1.2.2 Transformation du référentiel LiDAR avec repères de terrain	155
IV.1.2.3 Filtrage	158
IV.2 APPLICATION	160
IV.2.1 Analyse de la mesure LiDAR	160
IV.2.1.1 Le bruit et la couleur	160
IV.2.1.1 Précision dans la restitution des formes	162
IV.2.2 Test d'humidité	168
IV.2.3 Géoréférencement	170
IV.2.3.1 Recalage numérique sans repères de terrain	170
IV.2.3.2 Recalage numérique avec repères terrain	173
IV.2.3.2.1 Repères amovibles	173
IV.2.3.2.2 Repères fixes	175
IV.2.4 Synthèse des résultats	177
IV.2.4.1 Mesure LiDAR terrestre	177
IV.2.4.2 Géoréférencement	177
CINQUIÈME PARTIE	179
DISCUSSION GÉNÉRALE	179
V.1 MNT DRONE	181
V.1.1 Sur l'application en ravines marneuses	181
V.1.2 Evaluation de qualité	182
V.1.2.1 Calcul de l'altitude	182
V.1.2.2 Calcul du réseau de thalwegs	185
V.2 MNT LIDAR TERRESTRE	187
V.2.1 Analyse du bruit de la mesure	187
V.2.2 Géoréférencement	188
V.2.3 Suivi diachronique	189
V.3 DRONE-STEREO OU LIDAR TERRESTRE ?	191
V.3.1 Applications	194
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	197
MNT DRONE	197
LIDAR TERRESTRE	199
PERSPECTIVES	200
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	203
INDEX DES FIGURES	213
INDEX DES TABLEAUX	219
ANNEXES	221
A1. PRODUITS DERIVES DES MNT	223
A1.1 La pente et la direction de flux	224
A1.2 Réseau de thalwegs	230
A1.3 Courbure	239

INTRODUCTION GENERALE

Les processus d'érosion par ravinement dans les versants marneux nus (Badlands) entraînent une forte dynamique spatio-temporelle dans l'évolution des conditions superficielles du système sol-régolithe, avec des événements météorologiques marqués intra annuels. L'Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches (UR-ETNA) du Cemagref-Grenoble suit depuis 1975 des bassins versants de recherche et expérimentation (BVRE) à Draix (Alpes-de-Hautes-Provence, France), sur géologie des marnes noires.

Des nombreuses institutions de recherche ont constitué un Groupement d'Intérêt Scientifique à Draix (GIS DRAIX), avec l'objectif principal d'améliorer la prédiction de la réponse de petits bassins versants de montagne aux forçages climatiques (érosion en badlands). L'étude de l'érosion hydrique demande une connaissance des processus afin d'améliorer les modélisations pour une meilleure aide à la gestion des canaux et barrages. Des questions de spatialisation fine commencent à devenir importantes dans le cadre de ces recherches.

La représentation 3D fine et précise du relief est un point clef dans le suivi et la compréhension du processus d'érosion hydrique en montagnes marneuses. Le relief est un des facteurs de site déterminant qui contrôle ce type d'érosion. Comme véhicule de l'énergie gravitationnelle, il participe dans la régularisation du volume et la vitesse du ruissellement. D'autres facteurs superficiels qui participent sont le système sol-régolithe et sa couverture (comme la végétation et la gravellosité), directement impliqués dans le contrôle de l'infiltration.

L'absence de données terrain quantitatives assez précises et fiables, à une résolution cohérente à l'échelle à laquelle les attributs morphologiques se manifestent, représente une contrainte importante afin de comprendre l'interaction entre les différents facteurs qui interviennent dans la formation de ravines. Le développement d'une technique de caractérisation des expressions superficielles des phénomènes de ravinement serait nécessaire afin de prévoir l'évolution de l'érosion par ravinement en montagnes marneuses.

Développer des MNT précis, détaillés et cohérents pour ce genre d'application exige une très grande flexibilité dans l'acquisition des données : une très haute résolution spatio-temporelle (détaille et répétitivité), une rapidité dans l'utilisation de la méthode, et un faible coût. L'arrivée de données spatiales de plus en plus fines permet le développement des MNT précis, mais de nombreuses questions de métrologie se posent (comment faire et à quelle précision ?).

L'approche aérienne ou spatiale par stéréophotogrammétrie, à partir des vecteurs aériens pilotés ou bien de satellites, est la plus couramment utilisée dans la caractérisation 3D du relief, étant donné l'étendue de ses applications et son rapport avec les coûts des missions. Néanmoins, ces types de vecteurs aériens et spatiaux nous proposent des résolutions au mieux de l'ordre du mètre. D'autre part, ils ne peuvent pas satisfaire les besoins de fréquence d'acquisition de données.

Les méthodes de terrain pour le suivi de la diffusion horizontale et le changement vertical des ravines, à partir de techniques topographiques classiques sont appropriées à la

résolution spatiale et à la précision requissent (Sneddon et al., 1988 ; Hudson, 1993 ; Martínez-Casasnovas et al. ; 2002). Néanmoins, ce sont de mesures intrusives, lourdes et coûteuses, qui n'ont ni la fréquence d'acquisition ni la flexibilité nécessaires pour étudier l'évolution temporelle des rigoles d'érosion sur versants marneux.

Une solution possible est la prise de photographies aériennes à basse altitude par vecteurs UAV (Unmanned Aerial Vehicles) drone ou ULM (Ultra-Léger Motorisé). L'utilisation des vecteurs UAV comporte deux contraintes importantes : instabilité du vol et basse capacité de charge. Ces contraintes empêchent une bonne description de la géométrie du vol et d'images, indispensables pour obtenir une très haute précision.

Récemment, plusieurs auteurs citent des applications d'imagerie drone en stéréophotogrammétrie (Casson et al., 2003 ; Henry et al., 2002 ; Maatouk, 2004 ; Raclot et al., 2005 ; Lejot et al., 2007), mais les incertitudes reportées sont encore importantes, par rapport aux besoins ci-dessus mentionnés. Le compromis entre « performance » et « robustesse » pour ce type de vecteur n'a pas toujours été optimisé (Raclot et al., 2005).

D'où des interrogations sur les différentes techniques pour obtenir des MNT fins capables de répondre à divers besoins dans l'étude de l'érosion hydrique sur montagnes marneuses. Ceci requiert des résolutions de l'ordre du cm, donc très loin de techniques actuellement disponibles par image spatiale.

Nous proposons de faire un tour des solutions existantes autour des MNT et de l'érosion, avant de proposer et tester des solutions particulières. Les contraintes initiales que l'on s'impose sur les méthodes à procurer sont : un type de mesures non intrusives, et un appareillage grand public.

PREMIÈRE PARTIE
OBJECTIFS, PLAN DE LA THÈSE ET SITE
D'ÉTUDE

I.1 OBJECTIFS

L'objectif principal est de produire des MNT à très haute résolution spatiale, détaillés et précis, avec une facilité de revisite (détection de changements), un faible coût et une rapidité d'acquisition (bilan "résolution-précision-fréquence"), accompagné d'une composante très forte d'évaluation de qualité et de validation de résultats. Les questions à répondre par rapport aux MNT sont : Quelles techniques ? Quelle précision ? Quelles précautions ?

Je propose de m'intéresser dans cette recherche aux points suivants :

- La création des MNT à très haute résolution, fins et précis, à partir de données grand public (appareils photos, prise de vue ULM ou drone) facile d'acquérir sur le terrain (fréquence, finesse de la résolution, facilité de suivi). Un point principal de la thèse se focalisera sur l'aspect de précision et de validation intégral. Les aspects originaux de notre contribution sont l'application et l'adaptation des schémas classiques de stéréophotogrammétrie à des zones érodées avec de fortes pentes, et avec des appareils photo grand public.
- L'utilisation d'un LiDAR terrestre pour la validation des MNT fins, ce qui constitue un développement intéressant sur Draix. Une phase complémentaire sera d'analyser la précision de ces données pour mieux connaître leurs potentiels dans un suivi diachronique de l'ablation et les dépôts sur versants marneux.

Ces deux techniques sont complémentaires, avec une précision potentielle en centimètres (voir millimètres pour le LiDAR), pour une approche sur des domaines petits de l'ordre de la ravine élémentaire. On s'intéressera à leur comparaison, de l'analyse de ces limitations et avantages.

Comme prémisses initiales nous allons établir des mesures non intrusives en utilisant des appareillages et procédures disponibles : MNT par stéréoscopie d'imageries drone et LiDAR terrestre.

La stéréophotogrammétrie à partir d'images prises à basse altitude n'a pas produit « jusqu'à présent » des résultats assez précis pour ce type d'applications. Le LiDAR terrestre est une technologie prometteuse mais la précision « réelle » reste à estimer et à tester en milieux à fort relief.

I.2 PLAN DE LA THESE

Les questions de recherche auxquelles on veut répondre sont :

- Comment construire des MNT fins, précis et cohérents, en zones de Badlands ?
- Comment mesurer leur précision ?

Les MNT fins doivent servir pour caractériser quantitativement la morphométrie des zones érodées et établir leur suivi temporel fin de façon à améliorer notre compréhension des processus élémentaires d'érosion hydrique en montagne (ravines élémentaires). Cette stratégie doit satisfaire le bilan « résolution-précision-fréquence » requis pour une telle observation.

Notre travail se focalise sur l'obtention des MNT précis en zones de ravines à différentes échelles spatiales et temporelles, l'estimation de la précision obtenue et les problèmes de validation *in situ*. Afin d'y répondre aux questions de recherche, deux approches d'observation spatiales seront adaptées : l'une dite « aérienne » qui utilisera des photos stéréoscopiques par drone, l'autre dite « terrestre » qui utilisera un LiDAR terrestre.

La thèse est structurée en cinq parties, mises à part l'introduction générale et la conclusion. La première partie comprend trois éléments : les objectifs, le plan de la thèse et le site d'étude. La deuxième partie concerne la synthèse bibliographique. La troisième et la quatrième partie abordent tout ce qui concerne (méthodologie et application) des approches d'observation aérienne et terrestre. La cinquième et dernière partie est composée par la discussion générale des résultats.

Dans le développement scientifique de l'approche aérienne, il faudra quantifier à chaque étape de la chaîne de traitement stéréophotogrammétrique le gain de précision obtenu dans la construction d'un MNT, obtenus avec un vecteur et un appareil photo à priori peu favorable à ces fins. De cette façon nous serons capables d'identifier les points clefs de la méthodologie afin d'exploiter efficacement les potentialités des outils dans l'application choisie.

Par rapport aux données de validation, la quantité et la précision requises ainsi que la souplesse d'utilisation de l'appareillage de mesure topographique sont des conditions qui doivent être satisfaites par les outils disponibles : GPS différentiel (DGPS) ou tachéométrie. L'utilisation du LiDAR terrestre se révèle comme un système de lever terrain pouvant satisfaire les conditions de précision et de volume d'information nécessaires pour la validation d'un MNT drone très détaillé.

En ce qui concerne l'approche terrestre dans le suivi de l'ablation de versant, le LiDAR terrestre constitue en soi même une source de données diachroniques que l'on pense suffisamment précises pour surveiller les évolutions de la surface des versants marneux nus. Toutefois certaines précautions de mise en œuvre sont nécessaires. Il est indispensable de garantir la correspondance spatiale des scans successifs, dans le même système de projection. Malgré l'énorme potentialité du LiDAR terrestre, il reste à évaluer la précision diachronique réelle à obtenir sur le terrain.

I.3 SITE D'ETUDE

Dans les Alpes Françaises méridionales et en particulier dans le Département des « Alpes de haute Provence », figure I.1), on rencontre la formation géologique de Terres Noires ou « Badlands ». Cette géologie couvre une grande surface et elle est responsable d'une grande partie des sédiments qui arrivent au bassin de La Durance (Brochot, 1999).

La géologie friable des marnes noires (callovo-oxfordien), ainsi que la combinaison du climat Méditerranéen et de montagnes (avec le gel en hiver et les précipitations de forte intensité en été), résultent dans une topographie typique de badlands (ravinement profond) et dans un fort transport des sédiments ce qui conduit à des inondations fortement chargées en aval et envase les réservoirs tout au long de La Durance (Mathys et al., 2005).

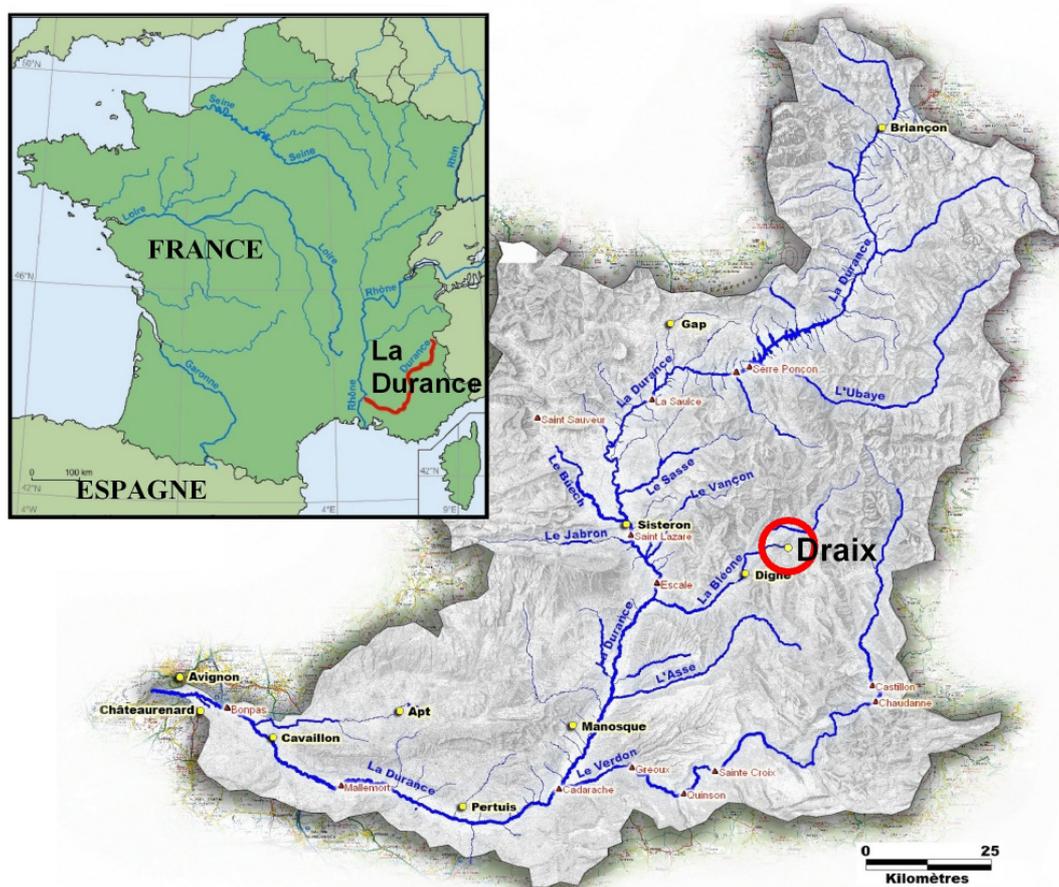


Figure I.1 - Localisation du bassin versant de La Durance et le village de Draix.

La Durance possède des nombreux barrages, canaux et réservoirs tout au long de son parcours jusqu'à sa confluence avec le Rhône. L'aménagement de la Durance a débuté depuis le XVI^e siècle au moins, dans plusieurs buts, entre autres d'utiliser l'eau de la Durance pour irriguer les cultures, se protéger des crues dévastatrices et limiter l'érosion.

De fortes tensions se déclenchent entre les différentes sociétés de riverains constituées depuis le XIX^e siècle. La crue exceptionnelle de 1856 provoque la création du premier service de surveillance d'une rivière en France (le Service spécial de la Durance), qui effectue des études d'hydrologie de la rivière.

Le réseau d'infrastructure actuel comprend le système d'hydroélectricité Durance-Vernon, le plus important de la France (figure I.2). L'hydroélectricité est la deuxième source d'énergie en France et apporte un 5,7% du total (84,2% pour l'énergie nucléaire), pendant que l'ensemble du système Durance-Verdon produit 6 à 7 milliards de kWh par an (10 % de la production hydroélectrique française).

L'aménagement a été décidé en 1955 par une loi qui confie trois missions à l'entreprise « Electricité de France » (EDF) : produire de l'électricité, assurer l'irrigation des cultures et l'alimentation en eau potable des villes, et réguler les crues (www.edf.fr). Cet aménagement dont la réalisation complète a pris plus de trente ans est achevé en 1992. A part la production d'électricité, le système de barrages-réservoirs fournit de l'eau potable à toute la région (y compris le canal de Marseille), et irrigue toute la Provence (un tiers de l'irrigation française ou 150 000 hectares de terres cultivées). Ainsi, les lacs sont une attraction touristique et les crues faibles et moyennes sont parfaitement contrôlées.

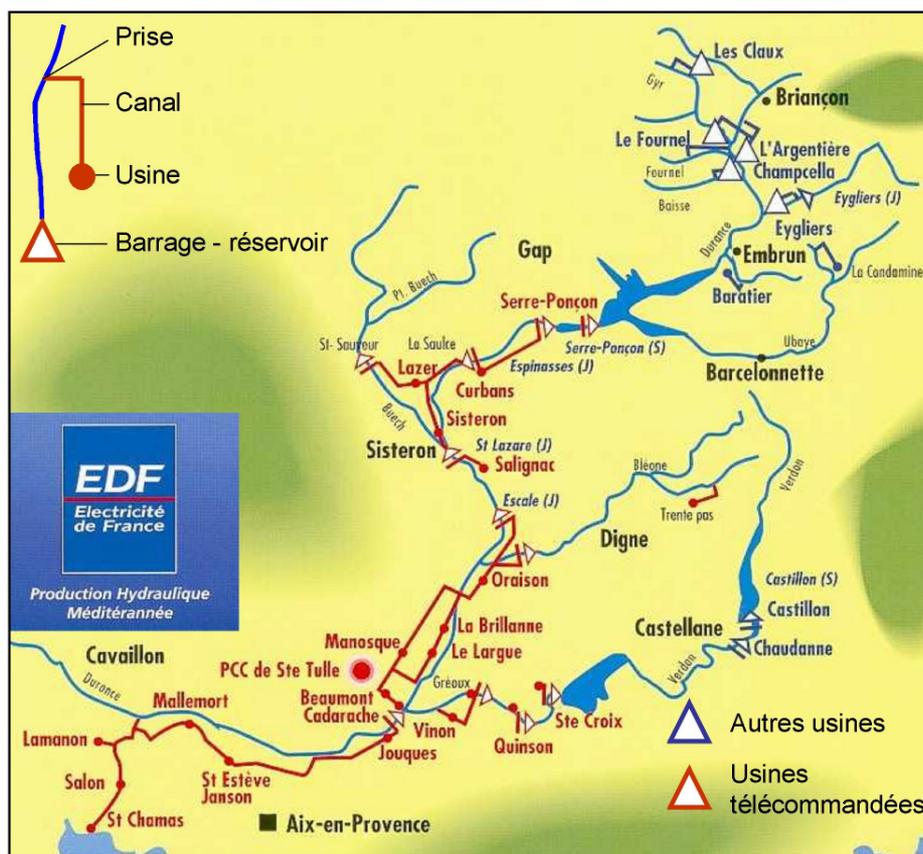


Figure I.2 - Système d'hydroélectricité « Durance-Vernon » (EDF).

Le canal EDF de la Durance court sur plus de 250 km, du barrage de Serre-Ponçon dans les Hautes Alpes à l'étang de Berre. Le canal alimente en eau quinze centrales

hydroélectriques et leur permet de démarrer et de fonctionner simultanément. Une puissance équivalente de 2 réacteurs nucléaires peut ainsi être mobilisée en moins de 10 minutes.

Dans ce contexte nous pouvons apprécier l'importance du contrôle de l'érosion en aval du canal d'EDF dans la Durance. Les coûts d'entretien en ce qui concerne le curage de sédiments par engins mécaniques, ainsi que par la chasse de barrages sont très importants. Il est donc impératif de développer un programme efficace qui permette de diminuer significativement le volume des sédiments qui atteignent le canal EDF.

Le Cemagref-Grenoble, Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches (UR-ETNA) suit depuis 1975 des bassins versants de recherche et expérimentation (BVRE) à Draix (figure I.3a, tableau I.1), récemment transformés en **Observatoire de Recherche sur les processus hydrologiques et Erosifs en montagne - ORE Draix** (Mathys et al., 2003).

L'objectif principal de l'ORE Draix est d'améliorer la prédiction de la réponse de petits bassins versants de montagne aux forçages climatiques (précipitations et températures). Ceci requiert d'identifier les facteurs déterminants dans les réponses en particulier aux phénomènes extrêmes (débits liquides et transports solides), ainsi que quantifier les rôles respectifs de ces facteurs et des processus associés (<http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/oreDraix/oreDraix.htm>).

L'importance des couplages entre les processus étudiés nécessite une approche pluridisciplinaire de ces questions, permettant d'aboutir à une modélisation du comportement des bassins. L'étude de crues torrentielles par approches expérimentales originales est fondamentale, ce qui inclut la compréhension des processus d'érosion en montagne marneuse et sa dynamique spatio-temporelle. Les aspects spatiaux sont de plus en plus importants étant donné que l'observation de cette dynamique est très difficile.

Quatre BVRE ont été équipés pour l'observation hydrométéorologique pendant la période 1984-1987 avec une section de contrôle, un limnigraphe, un piège à sédiments, un préleveur d'échantillons, et un turbidimètre (sur deux bassins). Puis l'équipement a augmenté en nombre et diversité, afin de s'adapter à l'évolution de la technologie et de satisfaire aux besoins des différents projets de recherche en évolution permanente.

Tableau I.1 - Caractéristiques générales des BVRE de l'ORE Draix (Brochot & Meunier, 1995).

BVRE	surface	taux de terrain nu (%)	 pente moyenne (%)	altitude (m.a.s.l.)	début des observations
Brusquet	108 ha	13	53	800-1260	1987
Laval	86 ha	68	58	850-1250	1984
Francon	73 ha	44	41		*
Moulin	8 ha	54	30	850-925	1988
Roubine	1 300 m ²	79	75	850-885	1983

*Le bassin du Francon n'a jamais été équipé dû aux coûts excessifs d'entretien

Nos sites d'étude proprement dits portent sur les BVRE du Moulin et de La Roubine : site 1 entouré par la ligne noire pointillée, et le site 2 entouré par la ligne rouge (figure I.3b).

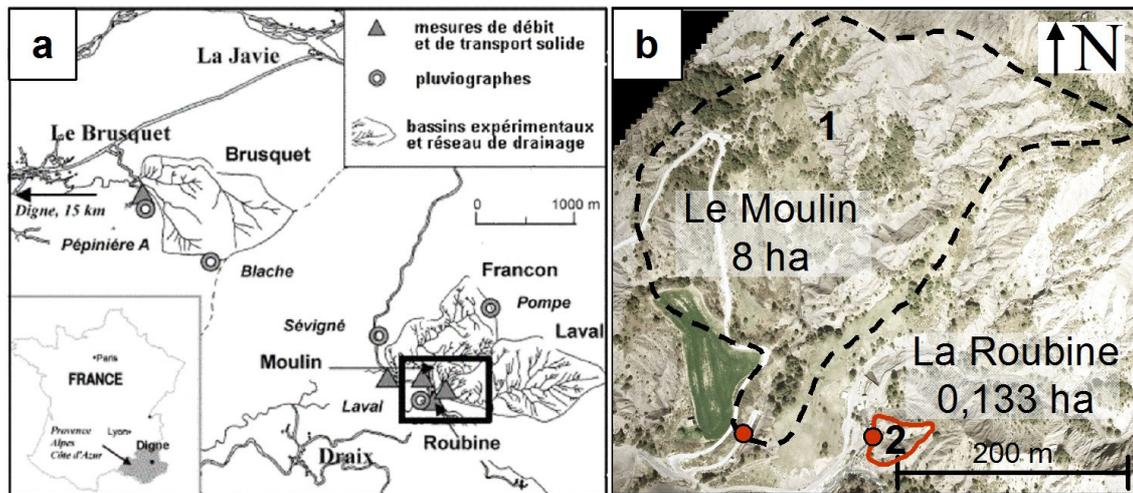


Figure I.3 - a) Localisation des bassins versants expérimentaux de Draix, et b) vue générale de la zone avec les deux sites d'étude (1 et 2).

Le site 1 a des dénivelées très fortes : 40 m entre les points haut et bas de la ravine principale, à une distance de 100 m (ravines de 10 à 20 m de large et 5 à 10 m de profondeur). Le site 2 (La Roubine) est l'unité élémentaire d'étude de l'érosion dans le système des BVRE à Draix du fait de sa taille et de la pente très forte sans possibilité de stockage intermédiaire de sédiments (Brochot & Meunier, 1995). Ce BVRE dispose d'un jeu complet d'instruments de mesure de l'érosion, où la mesure des processus érosifs y est indépendante de l'influence de l'hydraulique du transport solide. La Roubine est le bassin avec la pente la plus raide et en même temps avec une proportion plus importante de sols nus (tableau I.1).

DEUXIÈME PARTIE
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1 RAVINES ET FORMES D'ÉROSION SUR BADLANDS

Les badlands sont habituellement définis comme des paysages naturels intensément découpés où la végétation est clairsemée ou absente (Bryan et Yair, 1982) inutilisables pour une utilisation agricole. Le terme « badlands » est employé pour les secteurs des sédiments non consolidés ou de la roche mère faiblement consolidée qui contiennent peu ou pas de végétation (Gallart et al., 2002).

Les badlands se forment dans des conditions climatiques variées, principalement dans les zones semi-arides, où la pauvre couverture végétale associée à des insuffisances hydriques favorise l'érosion par ravinement (Nadal-Romero et al., 2007). Dans le Sud de l'Espagne on trouve en plus des conditions pédologiques favorables pour la formation de badlands, comme des quantités importantes de sodium et de smectique, ce qui favorise la dispersion des granulats.

Les badlands sont aussi communs dans les environnements de montagnes humides avec des précipitations plus élevées (Regüés et al., 1995), où la géologie, le relief et les forts contrastes saisonniers de températures et humidités favorisent sa formation. Ces badlands sont soumis à une dénudation plus élevée et une dynamique plus active comparée aux badlands semi arides, étant donné leur potentiel limité d'érosion.

À la fin du Moyen Âge, les habitants des vallées alpines observaient déjà que l'érosion et les effets de la précipitation à haute intensité étaient associés à la déforestation (Descroix et Mathys, 2003). Dans les montagnes méditerranéennes, les zones érodées ont augmenté en raison de la conjonction de la désagrégation de la lithologie, de l'occurrence des précipitations intenses et de la pression démographique sur l'environnement.

De nos jours, dans les bassins versants méditerranéens du nord la pression démographique n'est plus un facteur de contribution. Néanmoins, les dégâts des années de déforestation favorisent toujours la production de sédiments dans ces badlands (Descroix et Mathys, 2003).

Le processus d'érosion par ravinement en zones de montagnes est un des mécanismes de dégradation des paysages le plus intense et difficile de contrôler. L'incision des roches par ruissellement concentré représente une source de sédiments importante, et elle peut atteindre jusqu'à 90 % de l'érosion totale d'un bassin versant (Mathys & Poesen, 2005).

La quantité de sédiments produits dans les bassins versants soumis à une forte érosion par ravinement en amont peut causer de graves et coûteux problèmes en aval, dans les différentes œuvres d'ingénierie comme les canaux et les barrages. Ce type de dégradation du paysage peut causer aussi des événements violents comme les glissements ou les mouvements de terrain, ce qui met en risque de catastrophes naturelles la population des zones montagneuses.

Le ravinement prend son origine quand le ruissellement s'organise et provoque une érosion concentrée. L'évolution surfacique de l'érosion hydrique concentrée peut suivre un schéma classique, classifiés d'après leur hiérarchie en amont (séquence griffes ou griffures, rigoles, ravineau, et ravines torrentielles ; Lilin & Koohafkan, 1987) ou en aval (rivière et fleuve).

Hauge (1977) et Poesen (1993) séparent les rigoles et les ravines saisonnières par une approche purement bidimensionnelle : une section transversale critique de 929 cm² (le critère du pied carré, *square foot*). D'autres critères de séparation incluent une largeur et une profondeur minimum d'environ 0,3 m et de 0,6 m, respectivement (Brice, 1966) ; ou bien celle de Imeson & Kwaad (1980) : une profondeur minimum de 0,5 m. Par rapport à la limite supérieure des ravines, aucune définition précise n'existe, la frontière entre une grosse ravine et une rivière reste très vague (Poesen et al., 2003).

Brochot & Meurnier (1995), mentionnent que les ravines sont des thalwegs permanents en forme de V symétrique, où les processus d'érosion sont dus au ruissellement concentré et aussi aux éboulements, à la solifluxion pelliculaire, au ruissellement diffus et aux mouvements de masse.

La transition entre les différentes échelles de manifestation superficielle d'érosion hydrique concentrée représente un continuum : des griffes ou griffures, des rigoles, des ravineaux, des ravines saisonnières, des ravines torrentielles, des rivières. N'importe quel système de classification des formes d'érosion hydrauliques concentrée est d'une certaine façon subjective (Grissinger, 1996a, b).

A présent, aucune compilation systématique des caractéristiques morphologiques (longueur, largeur, profondeur, etc.) des différents types de ravines dans des différents types de paysages n'a été faite. (Poesen et al., 2003). De telles données quantitatives seraient nécessaires afin de prévoir l'évolution de l'érosion hydraulique concentrée à un moment donné.

Les éléments qui contrôlent l'érosion hydrique sont le résultat de l'interaction d'une série de facteurs de site et de facteurs « externes ». Les facteurs externes sont les conditions météorologiques générales et locales, ou micro-climat (Descroix & Mathys, 2003). Les facteurs de site sont la topographie, le type de sol ou de matériel géologique dégradé (régolithe), et la couverture de la terre.

Les éléments qui contrôlent l'érosion par ravinement sont : le volume et la vitesse du ruissellement, la résistance du sol au cisaillement, et la friabilité du régolithe (Roose, 1991). Le volume ruisselé est fonction de la surface du bassin, du degré de saturation des sols et de leur capacité d'infiltration, de l'intensité et volume des pluies, de la dynamique hydrogéologique du bassin. Tandis que la vitesse du ruissellement est fonction de la pente, de la rugosité des surfaces, et des aménagements (infrastructures ou végétation).

Le régolithe est l'espace compris entre le sol enrichi en matière organique (sol cultivable) et la roche saine (bedrock), constitué de formations géologiques de surface. Ces formations géologiques de surface comprennent des roches généralement non consolidées. On y distingue des formations allochtones et autochtones. Les formations allochtones sont les sédiments fluviaux, lacustres, côtiers, glaciaires, ou éoliens, les éboulis, les colluvions et les formations de pente. Les formations autochtones, dites « altérites », sont les profils dont la genèse ou les propriétés actuelles résultent de processus d'altération *in situ*, quel qu'en soit l'âge. Le régolithe change sans arrêt avec les conditions climatiques extrêmes, il peut être extrêmement susceptible au processus d'érosion en fournissant les conditions favorables pour la génération de l'écoulement intense (Nadal-Romero et al., 2007), comme la marne noire.

Coulmeau (1987) décrit les mécanismes, les processus et les formes d'érosion qui prédominent sur Badlands, à Draix (zones montagneuses des Préalpes de Digne Les Bains). Les agents responsables de la désagrégation des roches marneuses et marno-calcaires à Draix sont les alternances des cycles gel/dégel (cryoclastism) et humification/assèchement. La désagrégation de ces roches est favorisée par la présence de diaclases, et de plans de schistosité (figure II.1). La vitesse de désagrégation varie en fonction du taux de calcaire, du taux d'argile et de la porosité des sols.

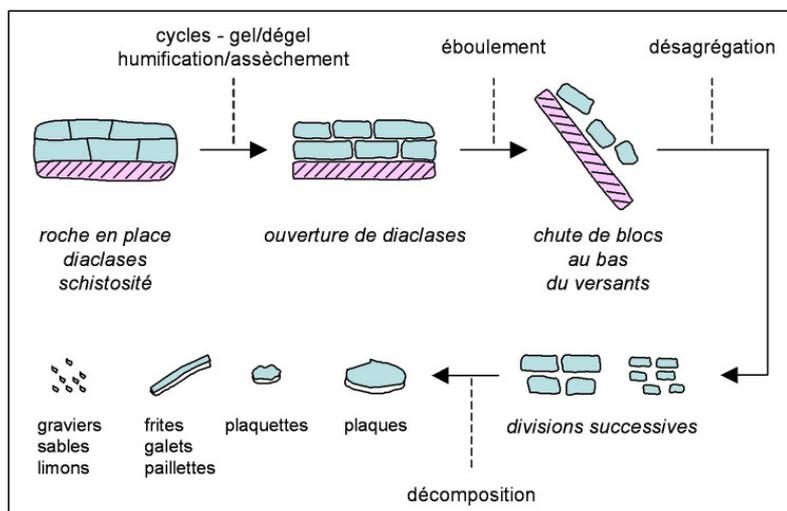


Figure II.1 - Altération des roches marneuses à Draix (adapté de Coulmeau, 1987).

Une diaclase résulte d'un épisode au cours duquel une roche se fend sans que les parties disjointes s'éloignent l'une de l'autre, il n'y a ni déplacement ni remplissage. Ce type de fracture est souvent orienté perpendiculairement aux limites de stratification. Une diaclase peut apparaître du fait des pressions auxquelles est soumise la roche, mais de faibles contraintes tectoniques sont nécessaires et les diaclases se forment facilement.

La schistosité décrit une famille de plans sub-parallèles et régulièrement espacés selon lesquels certaines roches se délitent (ou se clivent) facilement en feuillets plus ou moins épais. Cette particularité est le propre de roches à granulométrie plus ou moins fine ou argileuse, dont elle marque l'aplatissement.

Malet et al. (2003) mentionnent que **les caractéristiques surfaciques du sol** (p.e. croûtes, rugosité, gravellosité de la surface) influencent fortement l'infiltration, principalement par la géométrie du système poreux et du micro-relief. La variabilité spatiale et la dynamique des caractéristiques surfaciques du sol produisent une réponse hétérogène de l'infiltration et de l'écoulement sur les versants. Ces auteurs ont décrit six classes de sols superficiels d'après les caractéristiques surfaciques du sol associés à l'orientation de versants (figure II.2), dans le glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) développé sur géologie de marnes noires :

- classe 1 : couvre des secteurs développés sur blocs d'altérites non dégradées ou faiblement dégradées, sans croûte, avec deux directions de schistosité (BB) ;

- classe 2 : couvre des secteurs développés sur un ensemble d'altérites sans croûte, de différentes tailles et formes, provenant de l'altération de la classe 1, avec deux directions de pendage d'altérites (UCL1 et UCL2) ;
- classe 3 : couvre des secteurs développés sur altérites très dégradées avec croûte, complètement emballés dans une matrice fine (SCL) ;
- classe 4 : couvre des secteurs développés sur une croûte de gravier avec plus de 60% de gravier à gros grains dans des dépôts d'écoulement de débris. La partie la plus basse de la croûte est plus fine et sans pores vésiculaires, pendant que la partie supérieure est une croûte de sable à gros grains. Cette croûte présente peu de fissures de dessiccation. Deux sous-classes possibles d'après la taille de fragments grossiers (GC1 et GC2) ;
- classe 5 : couvre des secteurs développés sur une croûte structurale en fragments plus fins d'argile sablonneuse, y compris quelques altérites de fragments de calcite moyennement désagrégés. Cette croûte présente beaucoup de fissures de dessiccation, mais sans pores vésiculaire (SC) ;
- classe 6 : couvre des secteurs développés sur une croûte de dépôt à texture limono argileuse à la surface. Des fissures polygonales sont présentes. Deux sous-classes possibles d'après la taille de fragments grossiers et la proportion de la matrice fine (DC1 et DC2).

Ces six classes (et sous-classes) de sol surfaciques montrent l'extrême complexité dans la distribution spatiale et la dynamique 2D et 3D des états de surface du sol qui contrôlent l'infiltration et le ruissellement. Ils sont à la fois le résultat de différentes conditions de dégradation de la marne noire régularisée par l'orientation de la pente. Malet et al. (2003) reportent que 5 variables associées à la texture, la croûte et à la rugosité, et 2 variables associées à la taille et à l'orientation des altérites marneuses expliquent environ 60% de classes de caractéristiques surfaciques du sol.

Plusieurs études menées dans des bassins expérimentaux sur badlands du sud de l'Europe, ont souligné l'importance des paramètres de précipitation et de la dynamique surfacique du sol sur le ruissellement et la production de sédiments (Cantón et al., 2001 ; Mathys et al., 2005).

La texture du sol a une énorme influence dans la structure et la porosité, la stabilité des granulats, la séparation et la formation de croûtes. La gravellosité de la surface peut favoriser ou empêcher l'infiltration selon sa taille et forme et son contact avec les particules plus fines. Le microrelief et la rugosité superficielle influencent le stockage d'eau dans des micro dépressions. La densité apparente, la taille et distribution de macro pores (y compris les fissures de dessiccation) influencent fortement l'infiltration et la saturation.

L'altérite marneuse influence l'infiltration et le ruissellement sous pluie naturelle, sa taille et direction par rapport à la surface du sol sont deux variables de contrôle. Ces sont des caractéristiques spécifiques de l'altération de marnes.

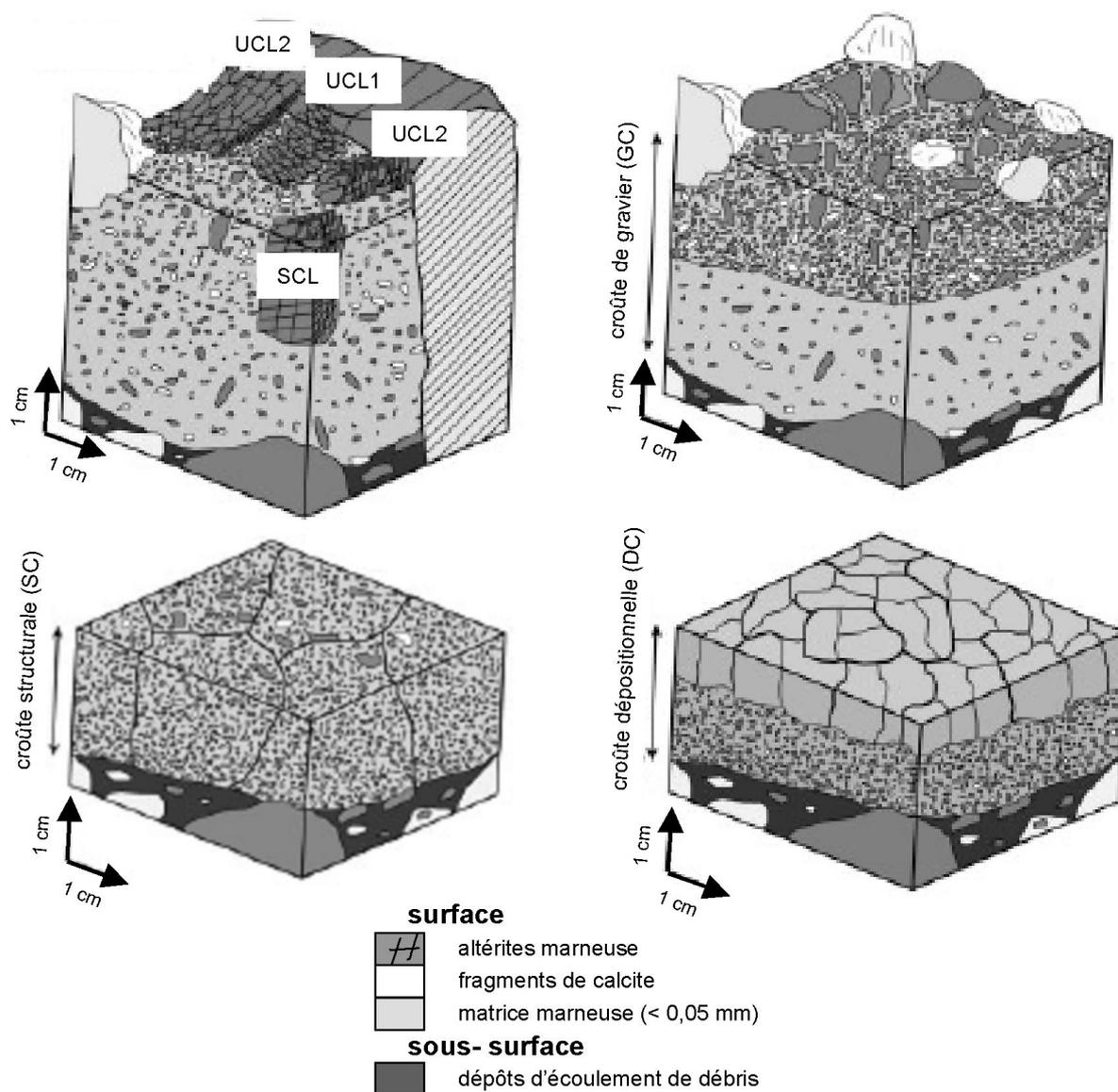


Figure II.2 - Morphologie des six classes de surface marneuses décrites par Malet et al. (2003).

La couverture végétale est un facteur capital étant donné qu'elle fonctionne comme régulateur de l'action érosive de la précipitation. La végétation intercepte la pluie et empêche l'énergie cinétique d'agir directement sur le sol. Elle peut aussi augmenter l'infiltration et servir comme ancrage stabilisateur du système sol-régolithe. Mathys et al. (1996) comparent la production de sédiments à l'exutoire de deux bassins versants expérimentaux à Draix¹ : le Laval et le Brusquet. Leur surface (86 ha Laval et 108 ha Brusquet) et géologie (marnes noires) sont similaires, mais le pourcentage de couverture végétale est significativement différent (32% Laval et 87% Brusquet). La production de sédiment au Laval est 40 fois plus importante que celle du Brusquet rapportée à la surface

¹Bassins Versants de Recherche et Expérimentation (BVRE) et Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) de Draix.

dénudée, alors que rapportée à la surface totale elle est 220 fois plus élevée. Sorriso-Valvo et al. (1995) reportent des résultats similaires sur des bassins versants expérimentaux marneux au Sud de l'Italie par pluie simulée en parcelles d'érosion.

L'intensité de la pluie joue un rôle clef sur l'infiltration et le risque d'érosion. Des tests réalisés sur badlands dans la région de la Toscane au centre-nord de l'Italie, montrent que l'énergie cinématique de la pluie peut expliquer la plupart des variations de la vitesse d'infiltration (Torri et al., 1999). La micro-topographie change pendant que les croûtes superficielles se développent par l'énergie cinétique de l'impact de la précipitation (la quantité n'est pas déterminante). A part ses effets directs sur le stockage superficiel ou sur le temps à écoulement, l'affaiblissement aléatoire de la rugosité exerce un effet clair sur les forces de détachement (re-détachement et transport) dus à l'écoulement de surface. L'interception de la pluie par la végétation agit à l'origine du processus d'érosion en empêchant d'abord la dégradation du sol et le transport ultérieur de sédiments.

L'orientation de la pente contrôle la quantité d'énergie solaire arrivant au versant dans une saison donnée. En hiver, elle gère l'énergie associée aux cycles gel-dégel : nombre, longueur, profondeur (figure II.3) ; et pour les saisons plus chaudes, les cycles de humification/assèchement.

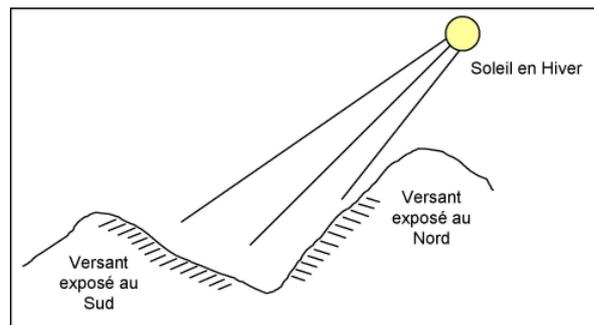


Figure II.3 - Orientation de la pente et incidente solaire.

Pour les versants marneux de Draix, la couche de régo-lite est plus épaisse dans les versants orientés vers le Sud, en raison d'une intensité plus importante des cycles gel-dégel. Néanmoins, les pertes de sol sont deux à quatre fois plus importantes sur les versants orientés au Nord (Descroix, 1994 ; Descroix & Olivry, 2002). Robert (1997) souligne la différence entre les processus d'altération superficielle de l'altérite en fonction de l'orientation de la pente : plus de désagrégation sur les versants orientés au Sud, et plus de solifluxion sur les versants orientés au Nord.

A Draix, l'orientation de la pente joue un rôle important dans les régimes de température du sol. Le processus de congélation atteint une profondeur de 25 centimètres dans l'orientation Sud tandis qu'il atteint plus de 50 centimètres dans l'orientation Nord. Ceci est une conséquence d'un nombre semblable de cycles de congélation dans les deux orientations, mais avec une durée plus longue et des températures plus faibles dans l'orientation Nord. Le pergélisol saisonnier se forme pendant 3 à 4 jours dans l'orientation Nord à une profondeur de 15 centimètres, tandis que la durée maximale de congélation dans l'orientation Sud est de 12 heures (Regues & Gallart, 1997).

L'énergie solaire reçue par les versants orientés Sud est approximativement 48 fois plus importante que dans l'orientation Nord pour les deux rangs de profondeur (25 et 50cm). Les cycles gel-dégel sont beaucoup plus fréquents dans l'orientation Sud. La quantité d'énergie utilisée dans la congélation est deux fois plus grande dans l'orientation Nord que dans le Sud, et le plus grand contenu d'eau dans l'orientation Nord augmente l'efficacité des cycles gel-dégel (Regues & Gallart, 1997).

Quand le gel fond dans les versants exposés au Nord, il ameublisse la croûte de surface qui s'est formée par le lavage des limons qui ont colmaté les interstices et pores du sol pendant les pluies d'automne. La solifluxion laminaire domine et les rigoles se dégradent par auto comblement par la suite de l'éboulement de leurs berges (Brochot & Meurnier, 1995).

Sur les versants exposés au Sud, lors d'une journée ensoleillée, la surface du sol est saturée en eau provenant de la fonte de la glace en surface, il se produit alors la gélifluxion pelliculaire. Les gonflements des argiles de sol dégradent la surface et quand elles fondent, la surface du sol glisse et des plaquettes de sédiment s'écroulent (Brochot & Meurnier, 1995).

Nadal-Romero et al. (2007) mentionnent que le développement de badlands au Nord de l'Espagne (centre-ouest des Pyrénées) sur régothites marneux est plus important dans les versants orientés au Nord. Pour cette orientation la densité de drainage et l'inclinaison de la pente sont plus importantes. Les auteurs montrent que l'efficacité des cycles gel-dégel dans l'altération des régothites dépend de sa teneur d'humidité. Les valeurs de densité apparente et de résistance mécanique à la pénétration sont plus faibles pour les versants orientés au Nord, tandis que la teneur d'humidité est plus importante. L'altération des marnes sur les versants orientés au Nord va jusqu'à 30 cm, permettant l'ouverture de fissures et l'infiltration d'eau approfondie. Cette condition favorise les coulées de boue et l'érosion pendant la période pluvieuse de printemps.

Kuhn et al. (2004), ont étudié la distribution spatiale des propriétés du sol superficiel dans les badlands marneux de la vallée de Zin, au Nord du désert de Negev (Israël). La profondeur du régothite montre un contraste entre les versants orientés au Nord-Est par rapport aux versants orientés au Sud-Ouest (22 cm contre 12 cm en moyenne, respectivement). Cet effet est attribué aux conditions climatiques différentielles entre les deux orientations (les versants orientés au Sud reçoivent plus de radiation solaire et ils sèchent plus vite).

L'angle établi entre la direction de la pente du versant et la direction de pendage (ou de stratification) est aussi un facteur déterminant qui, en combinaison avec l'orientation de la pente, contrôle l'évolution de l'état de surface de versants marneux. Cet angle offre des conditions contrastantes pour les processus d'infiltration-écoulement et d'érosion. Descroix (1994) mentionne que les surfaces parallèles au pendage sont souvent plus résistantes à l'altération, pendant que les surfaces perpendiculaires au pendage (affleurements à travers) sont plus affectées par les fronts de pénétration gel-humification. Une configuration « pendage-pente versant » perpendiculaire retient les particules de sol et les fragments grossiers dans le versant.

Oostwoud & Ergenzinger (1998) ont démontré qu'il existe une différence significative entre les glissements de débris miniatures (*miniature debris flows* ou MDF) pour une configuration « pendage-pente versant » perpendiculaire ou parallèle. Dans le cas d'une configuration perpendiculaire, les particules sont plus petites, tandis que pour la

configuration parallèle les particules sont plus grandes et le transport du matériel séparé est plus facile, dû au déplacement le long des plans de diaclases.

Descroix & Mathys (2003), mentionnent que sur versants marneux des Alpes du sud la combinaison versant orienté au Nord plus configuration « pendage-pente versant » perpendiculaire semble être la configuration qui rapporte le plus de matériau (figure II.4). Les valeurs les plus élevées de pertes de sol sont observées sur les versants orientés au Nord et la configuration perpendiculaire.

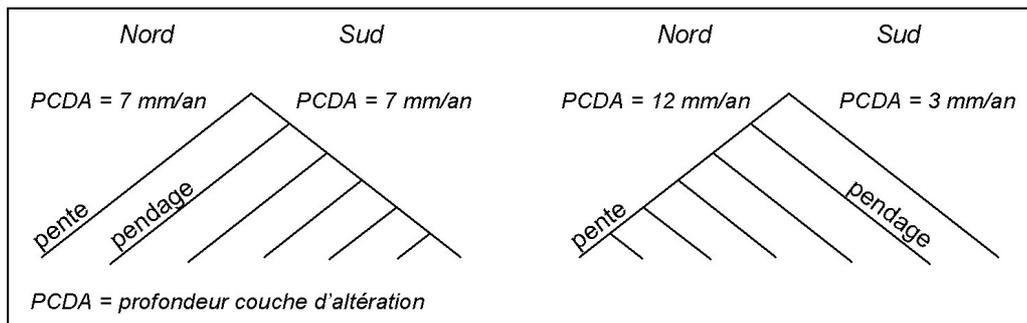


Figure II.4 - Relation entre la pente et l'orientation du versant, et le pendage de la stratification dans les Alpes du Sud (d'après Descroix & Mathys, 2003).

Mathys et al. (2005), ont évalué les processus de précipitation-ruissellement-érosion dans des parcelles d'érosion sous pluie artificielle et naturelle, pour différents types de configuration « pendage-pente de versants ». Sous pluie artificielle les résultats montrent que pour un versant avec la pente perpendiculaire au pendage, l'infiltration est beaucoup plus importante que le ruissellement. Les valeurs maximales d'infiltration ont été obtenues pour les versants avec la pente parallèle au pendage. Sous pluie naturelle les résultats ont été similaires pour le rapport « infiltration-ruissellement », mais les volumes de sédiments obtenus ont été environ 10 fois plus importants que sous pluie naturelle, même avec des intensités moyennes de pluies similaires.

Les processus d'érosion à Draix sont fortement contrôlés par **les conditions climatiques saisonnières très contrastées** (figure II.5). En hiver, les matériaux sont préparés et détachés par cryoclastisme et souvent transportés par des processus de solifluxion (Descroix & Mathys, 2003).

La solifluxion est la descente, sur un versant, de matériaux boueux ramollis par l'augmentation de leur teneur en eau liquide. Quand l'eau liquide provient du dégel on parle de gélifluxion. Après l'hiver, la couche en surface (ou couche active) se met à fondre et glisse littéralement sur la couche inférieure solidifiée par le gel. Contrairement à d'autres types de glissements de terrain tels que les coulées de boues après des pluies torrentielles ou les coulées de débris, le processus de solifluxion est graduel, voire imperceptible.

Chaque hiver se produisent plus de 100 cycles de gel-dégel ce qui produit un effet de désintégration des marnes noires. La couche d'altération formée est entraînée par la pluie et le ruissellement vers l'exutoire des bassins versants (Brochot & Meurnier, 1995). Le dépôt est stocké dans les ravines avant que n'arrivent les orages d'été.

Hiver	Printemps
+ 100 cycles gel/dégel fracture de blocs solifluxion laminaire accumulation des éléments rupture de la croûte de surface	humification/assèchement ruissellement diffus en micro-chenaux inorganisés (griffures – rigoles) décapage du sol de matières les plus fines évacuation des éléments accumulés pendant l'hiver colmatage de ravines
Été	Automne
orages montent en intensité moins intenses écoulement concentré, réseaux plus complets transport sédiments plus grossiers plus intenses rigoles s'approfondissent versants nettoyés	pluies moins intenses formation d'une croûte de surface par lavage des limons

Figure II.5 - Succession d'événements d'érosion intra annuelle des roches marneuses à Draix selon la saison.

Les précipitations à forte intensité et à haute énergie cinétique dès la fin de l'été au début de l'automne sont considérées comme les principales variables expliquant le transport de sédiments (Descroix & Mathys, 2003). Ces événements induisent fréquemment la formation des écoulements hyper concentrés, qui à Draix ont été mesurés au-dessus de 800 g/l (Olivier, 1995).

Les valeurs maximales d'érosion (concentration et transport) se produisent entre les mois d'avril et juillet, avant que la densité apparente de la couche d'altération atteigne sa valeur maximale (mois d'août). A l'inverse, les valeurs maximales de ruissellement se produisent entre les mois de septembre et novembre (Regues & Gallart, 1997). Le ruissellement ne débute jamais dès le commencement de la pluie : sur sol sec, il débute lorsque les pores et les fissures de dessiccation du sol sont remplis d'eau ou refermés ; sur sol humide, il débute plus tôt.

Le ruissellement diffus en micro-chenaux (griffures) inorganisés opère un décapage du sol de ses matières les plus fines : argiles, limons et sables. Lorsque l'intensité de la pluie est suffisante (orages d'été), les chenaux peuvent se réunir et donner naissance à des rigoles où l'écoulement concentré commence à pouvoir transporter les sédiments grossiers (Brochot & Meurnier, 1995).

Au printemps, après les derniers gels, la pluie commence à creuser les griffures et les rigoles sur les versants. Le ruissellement dégage les chenaux et évacue les éléments accumulés par le gel pendant l'hiver. En été, sous l'action des orages violents, les rigoles développent des réseaux plus complets sur les versants à forte pente. A mesure que les orages sont de plus en plus intenses, les rigoles s'approfondissent et, dans certains cas, les pluies torrentielles peuvent réduire le nombre de rigoles en détruisant leurs interfluves. C'est dans cette période qu'on observe les plus grands apports solides à la plage de dépôts ; les versants sont donc « nettoyés » (Brochot & Meurnier, 1995). La figure II.5 rassemble les points principaux des processus érosifs à Draix, selon la saison.

La couverture et la diversité d'espèces végétales sont aussi contrôlées fortement par l'orientation de la pente, la végétation dans la direction Nord est plus dégradée que la végétation dans la direction Sud (Regues & Gallart, 1997).

Il est important de souligner ici en résumant les éléments analysés, l'influence significative de la dynamique surfacique du sol sur l'évolution du ruissellement d'un versant. Étant donné que le ruissellement est le moteur principal de l'érosion hydrique concentrée, il est indispensable de faire une description quantitative de ces expressions superficielles ainsi que des facteurs qui la contrôlent. Tout ceci afin de prédire l'évolution du processus de dégradation et de transformation de paysages.

L'absence de procédures de description systématique de la morphologie de l'érosion concentrée et de ces manifestations linéaires sur le terrain à nos jours, met en évidence l'énorme besoin du développement d'une méthodologie d'acquisition des données qui soit à la fois flexible (répétitivité et rapidité), détaillée (spatialement et temporellement), ainsi que peu coûteuse.

II.2 ÉROSION ET MNT

La caractérisation du relief (et de ses dérivés) d'un bassin versant soumis à un processus de ravinement est un élément clef dans l'analyse spatiale des risques naturels, d'autant que la vitesse de ruissellement est en partie fonction de la pente générale des versants ou de la pente générale du lit principal des ravines (la longueur et le gradient). La caractérisation du relief peut aussi aider dans la cartographie de types de sols ou d'altérites, et même dans la cartographie de types de végétation (à partir de l'orientation de la pente des versants).

L'étendue des secteurs qui livrent la majorité de la charge du dépôt à une rivière peut n'être seulement qu'une fraction de son secteur total de drainage. La charge solide des rivières peut par conséquent être réduite avec succès si on identifie les secteurs de source en abaissant la relation de départ de la charge solide. Ceci requiert une compréhension du système érosif de ces secteurs quant aux processus par lesquels la charge solide se déplace ainsi que des facteurs qui contrôlent leur variabilité spatiale et temporelle (Oostwoud et Ergenzinger, 1997).

Etzelmüller (2000) mentionne que le suivi de changements de géo-formes à la surface de la terre nous donne une information très précieuse et utile pour la compréhension des processus qui produisent ces changements. Le type et l'ampleur des changements superficiels nous fournissent une information valable sur le type, l'ampleur et la fréquence des processus associés.

La plupart des processus géomorphologiques ont une origine gravitationnelle, par conséquent le taux et la vitesse de l'eau ou tout autre mouvement de masse est une fonction de la pente plus la texture de la matière qui se déplace. Les détections de changements spatiaux-temporels de la pente nous permettent de décrire de futurs déplacements de matière. Ces changements nous fournissent une information valable sur le rapport entre le flux d'entrée et de sortie de matière (Etzelmüller, 2000).

Au regard de ces informations, une représentation 3D général d'un bassin versant permettra une meilleure connaissance de la dynamique spatiale et temporelle des différents facteurs qui contrôlent la dégradation des paysages par ravinement. Aussi bien comme outil d'aide à la compréhension du processus érosif (à une échelle grossière), que comme outil d'aide à la prise de décision dans un programme de gestion des risques associés.

L'analyse numérique des dérivés du relief dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettra, à partir d'un certain nombre de seuils critiques de chaque facteur de contrôle, de diviser le paysage d'un bassin versant en fonction de différents types d'érosion (Bishop et al., 2003 ; McNamara et al., 2006), de cartographier la géomorphologie pour l'interprétation structurale (Ganas et al., 2005), de quantifier des changements superficiels (Etzelmüller, 2000), ou de faire une analyse régionale de paysages (Bolongaro-Crevenna et al., 2004).

Les indicateurs d'érosion superficielle les plus utilisés pour cartographier l'étendue de l'érosion du sol sont les rigoles et les ravines. Bien que ces manifestations ne puissent pas être individuellement identifiées par les capteurs satellitaire ou aérien (à échelle grossière) jusqu'à ce qu'elles atteignent de grandes dimensions, il est possible d'obtenir l'information

de façon indirecte à travers les facteurs environnementaux qui contrôlent leur développement sur le terrain (King et al., 1989).

Les formes linéaires de manifestation de l'érosion concentrée possèdent un lien entre les échelles spatiale et temporelle d'autant qu'elles correspondent à une évolution naturelle du processus d'érosion par ravinement sur le terrain. Par exemple, si on veut observer des érosions fines comme les griffures, la fréquence d'acquisition des données doit être forte.

Le volume des travaux par les hydrologues et les forestiers aux échelles spatiales temporelles plus grossières est significativement plus important dans la littérature que pour les échelles plus détaillées (Daba et al., 2003 ; Martínez-Casasnovas, 2003 ; Martínez-Casasnovas et al., 2003). Ces travaux sont souvent dirigés vers l'étude des systèmes de ravines torrentielles et leurs dynamiques de transport des sédiments. Néanmoins, il y a aussi un fort intérêt dans l'étude de ravinement associé aux catastrophes naturelles, par des géologues et géomorphologues (Casson et al., 2005 ; Demoulin, 2006 ; Nichol et al., 2006). Dans ce cas là on s'intéresse dans l'analyse de formes de versants et ravines, afin de détecter et de caractériser le déplacement de matériaux.

Bien que les processus de base soient fondamentalement différents, le mouvement de masse et le ravinement du paysage partagent certaines caractéristiques communes (Zinck et al., 2001). Le sol conditionne fréquemment le déclenchement et le développement de l'érosion et, en même temps, est affecté par eux. Les deux processus ont de multiples origines, les mécanismes de déclenchement pourraient avoir lieu à la surface de terrain ou en dessous. Ces sont des phénomènes chaotiques, déclenchés par le changement soudain de l'équilibre environnemental et ils peuvent produire des dommages catastrophiques.

Mulders (2001), mentionne que le lien entre les catastrophes naturelles (les orages et les glissements de boue, le volcanisme, les inondations de plaine dues à la fonte de neige, les éboulements, les avalanches, etc.) et la dynamique de processus d'érosion en zones de montagnes est bien connue. La surveillance de la physiographie de zones montagneuses est de grande importance pour le secteur de montagne en soit même, mais également pour les zones basses adjacentes. Etant donné que l'accès aux zones montagneuses est difficile, la télédétection est une alternative valable aux travaux intensifs sur le terrain et pour le rassemblement des données requises par un SIG. Elle peut fournir en même temps des images et de l'information tridimensionnelle (morphologie).

II.2.1 La stéréophotogrammétrie en zone d'érosion

La caractérisation 3D de ravines est dirigée vers l'élaboration des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Dans la référence bibliographique la plus ancienne qui remonte aux années 50, un MNT est défini comme « une représentation statistique d'une surface continue par un nombre de points choisis, avec des coordonnées *xyz* connues dans un système de projection donné » (Miller & Laflamme, 1958). Dans ce travail nous prenons MNT comme représentatif de terrain naturel, et Modèle Numérique de Surface (MNS) comme représentatif de la surface du « sursol » (tableau II.1).

Le terme « modèle » est pris ici dans son idée la plus large de « schématisation ». C'est donc une approximation de la vérité terrain ou une simplification de la complexité naturelle

du relief. Le MNT désigne en toute rigueur une description altimétrique référencée du sol nu, tandis que le MNS considère le sursol.

Comme toutes les variables géospatiales, les MNT peuvent être représentés à différentes échelles, dont chacune a sa propre technique de saisie de données (Oksanen, 2006). L'auteur propose 5 échelles de représentation, avec indication de la plage d'espacement de grille : Micro (< 5m), Topographique Fine (de 5 à 50m), Topographique Grossière (de 50 à 200m), Meso (de 200m à 5km), et Macro (> 5km). Plus le MNT est détaillé, moins étendue est la représentation du relief.

Tableau II.1 - Définition de MNT et MNS (adapté d'Oksanen, 2006).

Terme	Définition
Modèle Numérique de Surface MNS	Altitude de la surface supérieure d'objets réfléchissants sur la surface de la Terre (sursol), comme les bâtiments ou la végétation (Maune et al., 2001 ; Puech et al., 2004).
Modèle Numérique de Terrain MNT	Terme générique couvrant les données numériques de la topographie (altimétrie pour les secteurs émergés ou bathymétrie pour les secteurs submergés) d'une zone terrestre ou d'une planète tellurique, dans toutes les formes adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur), ainsi que par toutes les méthodologies possibles (adaptation de Maune et al., 2001). Synonyme d'un MNE du sol nu.
	Terme générique couvrant les modèles d'altitude et autres éléments géographiques. Il peut également inclure des produits dérivés comme la pente, l'azimut, entre autres (Li et al., 2004).

Il existe trois sources possibles de données pour la construction d'un MNT : les mesures directes sur le terrain ; les mesures directes à distance ; et les mesures indirectes à distance.

Les mesures directes sur le terrain, comme le lever par tachéométrie ou GPS, sont les mesures les plus précises et les plus détaillées. Néanmoins, ces techniques ne sont pas adaptées pour le complet développement des MNT étant donné qu'elles demandent beaucoup de temps sur le terrain, donc qu'elles sont très coûteuses. Ces techniques sont plutôt utilisées comme lever complémentaires pour ajouter des données ponctuelles dans des endroits spécifiques (p.e. les pics des montagnes, les fonds de ravines).

Les mesures directes à distance, à l'aide des émetteurs/récepteurs comme le LiDAR ou le Radar, sont des techniques basées sur l'interaction des objets ou d'une surface avec une énergie incidente (des ondes radio pour le Radar ou une lumière laser dans les domaines du visible, ultraviolet et infrarouge pour le LiDAR). La distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi.

Les mesures indirectes à distance, comme l'application de la stéréophotogrammétrie à partir d'images stéréoscopiques aériennes ou de satellites, ont été jusqu'à aujourd'hui le moyen le plus utilisé pour la production d'information sur le relief.

La stéréophotogrammétrie est la technique de restitution du relief la plus couramment utilisée, à partir de vecteurs satellitaires et aériens. Des études à différentes échelles spatiales temporelles (Daba et al., 2003 ; Martínez-Casasnovas, 2003 ; Martínez-Casasnovas et al., 2003) ont utilisé l'analyse multi date à partir des MNT issus de la stéréophotogrammétrie classique, afin de spatialiser les sources des sédiments qui correspondent au processus de ravinement (et leur dynamique). Cette technique a permis la délimitation de bords de ravines ainsi que le plan d'incision par différence de limites, le calcul des taux de retrait de parois des ravines torrentielles et leurs taux associés de productions de sédiment (production moyenne annuelle par différence des MNT). Quelques problèmes d'erreur systématique dans les MNT plus anciennes ont été détectés.

Dans l'étude de mouvements de terrain, la technique de stéréophotogrammétrie numérique semble être la solution la plus efficace pour la modélisation de la dynamique d'un mouvement de terrain, vis-à-vis de la complexité et des coûts d'un levé terrain par moyens classiques comme la tachéométrie ou le GPS.

Plusieurs auteurs (Mora et al., 2003 ; Casson et al., 2005 ; Demoulin, 2006 ; Nichol et al., 2006) ont appliqué la technique de stéréophotogrammétrie numérique ainsi que le levé terrain par DGPS dans l'étude des mouvements de terrains. Les MNT résultants sont assez détaillés et précis pour l'application prévue et ils ont permis le calcul de la vitesse de déplacement du mouvement de terrain à long terme. Quand les différences absolues entre pixels sont plus importantes que la précision relative verticale, la variation topographique est jugée significative, autrement elle est indéterminée et son interprétation sera faite d'après la vitesse de déplacement. Des MNT-DGPS ont été interpolés à partir de milliers de points terrain, ce qui peut être utilisé pour l'analyse à court terme. La combinaison de méthodes de mesures de déplacements à court et à long terme a donné des résultats cohérents. Néanmoins, les MNT-stéréo sont une source de données spatiales indispensable afin d'élargir la période de référence dans l'analyse d'évolution des géo-formes.

Les méthodes mentionnées ci-dessus aident dans la compréhension générale des processus d'érosion au niveau de bassins versants. Toutefois, elles ne sont pas suffisantes pour comprendre comment se développe l'interaction entre les facteurs de contrôle au niveau de versants élémentaires.

Les phénomènes d'érosion en montagne sont chaotiques. L'énorme difficulté de prévoir leur occurrence spatiale et temporelle contribue à rendre leur modélisation déterministe (Zinck et al., 2001). Cependant, le développement des techniques modernes d'observation de la terre, en particulier la disponibilité des données multi date par techniques de télédétection de plus en plus détaillées (spatiale et temporelle), améliore les possibilités de cartographier et de surveiller ces phénomènes.

Pour la surveillance de processus d'érosion hydrique, la méthode classique de prélèvement ponctuel dans la parcelle d'érosion a permis d'améliorer des résultats de modèles de simulation. Néanmoins, les problèmes sur l'observation directe des flux de masse aux endroits spécifiques d'un réseau de drainage, constituent une contrainte de prélèvement importante et limite une interprétation complète de la dynamique du système (Brasington & Smart, 2003). Une alternative de plus en plus populaire est l'estimation des formes et des taux de transport des sédiments à partir de l'analyse de la dynamique morphologique. Ceci comporte essentiellement l'inter comparaison des surfaces topographiques dans le temps, une approche qui a été employée avec succès en géomorphologie fluviale pour reconstruire le transport de la charge du lit fluvial à court terme (Brasington & Smart).

L'énorme intérêt récent pour la « méthode morphologique » tient en grande partie sur les avancées en technologie de levé topographique et des MNT, qui permettent la surveillance détaillée de géo formes et l'analyse quantitative à une résolution spatiale et à une fréquence temporelle sans précédent (Bransington & Smart, 2003). Un développement clef a été l'automatisation de la corrélation d'images stéréoscopiques à partir des méthodes de corrélation numériques « pixel à pixel ». Ceci a été possible grâce à la puissance des ordinateurs d'aujourd'hui plus la réduction de coûts dans la mémoire et le stockage de données.

L'arrivée de la photogrammétrie numérique par corrélation d'images a ouvert de nouvelles applications dans l'acquisition d'information sur les géo-formes (Stojic et al., 1998). L'avantage principal de la stéréophotogrammétrie numérique sur le levé terrain c'est le potentiel d'acquérir des données continues et à très haute résolution spatiale à partir des photographies aériennes, ainsi que de fournir un suivi permanent de ces formes. Ceci devient bien avantageux dans les cas où on requiert des données détaillées et avec une fréquence d'acquisition importante.

La stéréophotogrammétrie à partir de photographies aériennes nous donne la possibilité d'étudier l'évolution de la surface de la terre avec un écart de temps et une fréquence d'acquisition beaucoup plus importante que les autres sources de données spatiales (satellite, LiDAR, Radar, levé terrain, etc.). Par contre, la résolution et la précision envisageables sont métriques ou sous métriques, ce qui peut satisfaire l'analyse de l'évolution des grandes lignes d'érosion, ainsi que l'évolution générale de ravines saisonnières et torrentielles. Elle ne peut pas nous fournir de détail sur l'évolution de la morphologie de ravines élémentaires.

La stéréophotogrammétrie à partir de photographies aériennes est très affectée par la couverture végétale au moment de la restitution du relief par stéréoscopie. Elle est très sensible aux problèmes de géométrie interne de l'appareil photo et de la prise de vue (paramètres d'orientation interne et externe), donc des erreurs systématiques peuvent affecter significativement la qualité de la restitution finale.

II.2.2 La stéréophotogrammétrie à courte distance

Les modèles réduits de bassin versant permettent de modéliser et de quantifier le phénomène d'érosion à une échelle et une précision de la surface du sol adéquat, sur la base de la similitude de processus analogues et de leur signification. Ils permettent donc de mieux maîtriser quelques facteurs de contrôle (comme la pluie ou le ruissellement, la pente et le type de sédiment altérés sans structure naturelle) pendant qu'on rend possible l'observation directe des phénomènes très dynamiques d'érosion à partir d'une série de photos stéréoscopiques prises à courte distance, donc à une très haute résolution spatiale (taille de pixel) et temporelle (fréquence d'acquisition d'images).

D'un point de vue photogrammétrie, les conditions contrôlées en laboratoire permettent aussi de bien connaître les paramètres d'orientation interne et externe des prises de vue souvent inconnues et « estimées » dans les applications à ciel ouvert.

Les études récentes cherchent à rapprocher la similitude et les échelles des bassins versants à travers une révision plus rigoureuse des paramètres tridimensionnels explicites, y compris

les distributions de fréquence de la surface cumulative de drainage, le rapport surface-pente et l'hypsométrie (Brasington & Smart, 2003). L'indépendance de ces descripteurs aux effets d'échelle en conjonction avec la correspondance visuelle des réseaux de drainage naturels et expérimentaux est maintenant de plus en plus interprétée comme un signal de profonde similitude et de tendance vers l'auto organisation des processus de bassins versants (Rodriguez-Iturbe & Reinaldo, 1997).

Les références bibliographiques sur l'application de la stéréophotogrammétrie numérique sont beaucoup plus riches dans les travaux sous conditions contrôlés en laboratoire, même avec l'utilisation des appareils photos argentiques (Stojic et al., 1998 ; Hancock & Willgoose, 2001 ; Brasington & Smart, 2003). Les auteurs reportent que, malgré l'utilisation de techniques de stéréophotogrammétrie numérique, les erreurs dans le calcul des MNT sont toujours significatives vis à vis la précision cherchée dans ces applications. Des problèmes liés à la déformation de films et aux incertitudes dans le calcul de paramètres d'orientation interne sont cités.

Des essais avec des appareils photos numériques ont commencé dès qu'ils ont été disponibles dans le commerce (Lascelles et al., 2002 ; Chandler et al., 2005 ; Rieke-Zapp & Nearing, 2005). Les appareils photo ont été calibrés afin de calculer les paramètres d'orientation interne. Ils ont rencontré des problèmes avec le nombre et la distribution de points de contrôle terrestre dans la surface d'érosion, et avec les points de validation de qualité des MNT.

Des erreurs systématiques résiduelles étaient toujours présentes même après le calibrage, résultant des paramètres imprécis de la déformation radiale de lentilles. Même si le coefficient de corrélation et les évaluations de précision de la corrélation reflétaient une bonne correspondance entre les pixels des couples stéréoscopiques, il y a eu aussi des anomalies dans les MNT résultants. Le calibrage des appareils photos est essentiel dans la restitution précise des formes. Il est nécessaire que les méthodes de construction des MNT ainsi que les méthodes d'évaluation de qualité soient normalisées, pour ce type d'applications.

La taille et la précision de pixel des MNT résultant des applications à courte distance vont de 1 à 3 millimètres dans les applications de laboratoire citées ici. Cette technique satisfait les besoins spatiaux et temporels de l'échelle d'étude, mais des doutes existent toujours surtout dans les méthodes d'évaluation de qualité des MNT. Les avancées dans la restitution automatique du relief par stéréophotogrammétrie numérique et aussi la meilleure disponibilité d'appareils photos numériques « grand public » dans la dernière décennie, ont été traduites dans une amélioration significative de l'analyse morphométrique par différence des MNT. Même si ces applications sont effectuées pour l'étude de modèles de simulation de processus de bassins à échelle réduite, les aspects techniques de stéréophotogrammétrie utilisés sont parfaitement extrapolables aux applications à l'échelle de versants (griffures et rigoles d'érosion par ravinement).

II.2.3 Le LiDAR

Plus récemment, l'utilisation des levés LiDAR aéroportés commence à produire des résultats intéressants dans la génération des MNT. Les applications sont diverses : caractérisation des zones affectées par mouvements de terrain (McKean & Roering, 2004 ; Glenn et al., 2006) ; extraction automatique du réseau de drainage des secteurs forestiers, et morphologie des ravines (Mouton, 2005 ; James et al., 2007).

Des erreurs systématiques dans l'information LiDAR originale ont été traitées avec l'aide de données de vérité terrain (plusieurs profils DGPS). La taille de pixel du MNT-LiDAR n'a pas eu un effet déterminant sur l'efficacité des algorithmes de flux, tandis qu'avec le MNT-stéréo on a obtenu les résultats moins précis. Les résultats montrent que les données topographiques détaillées et précises ont le potentiel pour identifier les zones de fracturation dans un mouvement de terrain, mais elles fournissent aussi une information additionnelle sur le type des matériaux et ses déplacements.

Le réseau de ravines produit par le nuage de points LiDAR est assez précis en planimétrie (erreur moyenne de quelques mètres) pour la plupart des applications en gestion des ressources naturelles et des applications hydrologiques, à l'échelle de travail.

La morphologie de ravines a été mal représentée par les données LiDAR due à une sous-estimation systématique des profondeurs de ravines et à une surestimation des largeurs de ces bords. Ces problèmes pourraient être associés au filtrage de données LiDAR afin d'enlever la végétation, à l'insuffisante densité de points pour représenter la morphologie de quelques ravines (rapport résolution R des données et taille de l'objet O étudié), ou bien à l'angle de visée du faisceau laser qui produit un effet d'ombre portée au fond de la ravine.

Le levé par LiDAR aéroporté fournit une mesure directe du relief même à travers la végétation (dans certaines conditions de densité de la couverture végétale), avec une densité d'information beaucoup plus importante. Toutefois, les données LiDAR brutes ont besoin d'un filtrage afin d'enlever la végétation, ce qui peut produire des erreurs systématiques dans le MNT final. Un MNT-LiDAR peut mieux représenter la morphologie et l'emplacement de ravines qu'un MNT-stéréophotogrammétrie, néanmoins l'angle de visée du faisceau laser peut produire un effet d'ombre portée au fond de quelques ravines en fonction de sa morphologie.

II.2.4 L'érosion à l'échelle de la pente d'une parcelle d'érosion

Des nombreux travaux ont été faits sur parcelles d'érosion afin de mieux comprendre l'interaction entre les facteurs qui contrôlent ce phénomène à l'échelle d'une pente simple. La plupart de ces travaux ont été développés dans le cadre de l'utilisation agricole de la terre, et ils ont été dirigés principalement vers la mesure du volume des pertes de sol dans un contexte où les facteurs de contrôle et leurs interactions sont bien caractérisés.

En ce qui concerne l'étude du facteur relief, beaucoup de travaux ont été dirigés vers l'étude de l'effet de la longueur et le degré d'inclination de la pente sur les pertes de sol par

érosion hydrique. Seulement quelques études se sont focalisées sur l'effet des pentes irrégulières, ce qui est plus proche de la vérité terrain (p.e. Rieke-Zapp & Nearing, 2005).

La pente locale et la pente moyenne dans les reliefs à topographie irrégulière sont considérablement différentes le long du versant, donc la production de sédiment peut varier significativement par rapport aux versants à pente homogène. Les versants à pentes concaves réduisent considérablement la production de sédiment par rapport aux pentes convexes ou linéaires (Young & Mutchler, 1969b). Les versants à flux convergent peuvent avoir un impact important sur l'érosion, en grande partie par le développement de griffures et ravines qui augmentent l'érosion comparée aux versants à flux divergent (Moore & Burch, 1986).

Même si les données recueillies dans les parcelles d'érosion agricole à pente homogène ont été très utiles pour le développement de modèles empiriques de simulation d'érosion, comme l'USLE (équation universelle de pertes de sol par érosion hydrique en nappe et en griffures, Wischmeier & Smith, 1961), elles ne prennent pas en compte le suivi diachronique de l'état de surface pendant le processus d'érosion. L'absence d'une méthode permettant l'acquisition de données spatiales assez précises a été une contrainte importante au moment d'associer les données ponctuelles avec l'évolution de l'état de surface.

Martínez-Casasnovas et al. (2002) ont étudié des rigoles d'érosion à partir de techniques topographiques classiques (tachéométrie). La taille de pixel du MNT résultant de cette application est d'environ 20 cm, et la précision est de 1,7 millimètre (95% d'intervalle de confiance). Cette technique est appropriée à la résolution spatiale et à la précision exigée dans l'échelle moyenne, mais la résolution temporelle est loin de satisfaire la fréquence et la flexibilité requises afin d'étudier l'évolution temporelle des rigoles d'érosion sur versants marneux.

Dans l'étude de l'érosion par photogrammétrie d'images aérienne à basse altitude, en bassins versants à l'échelle des ravines élémentaires, nous commençons à avoir quelques résultats dans la littérature scientifique. Henry et al. (2002) ont utilisé des photos aériennes stéréoscopiques en petit format et prises à basse altitude (500 m) afin d'élaborer un MNT détaillé, dans le mouvement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, au Sud-Est de la France). Les auteurs mentionnent que le choix de l'équipement est fondamental afin d'accomplir les objectifs de la mission : la distance focale et la hauteur de vol contrôlent le détail d'images aériennes. L'appareil photo a été calibré avec l'aide d'un système de repères terrain en 3D. La génération automatique d'un MNT n'a pas donné de résultats satisfaisants, étant donné les problèmes fréquents dans la corrélation d'images. La qualité globale du MNT est sous-métrique, et il tend à lisser la morphologie détaillée.

Raclot et al. (2005), ont utilisé des images prises par drone Pixy (pixel 6 cm) dans le développement de MNS par corrélation d'images sur Le Moulin (Draix). La qualité du MNS a été évaluée grâce à 382 points de validation pris par DGPS. L'erreur quadratique moyenne en Z est de 0,80 m mais est très variable spatialement. Comme origine possible des erreurs, les auteurs mentionnent le dispositif d'acquisition d'images (appareil photo non métrique, argentique) et les effets locaux du relief très tourmenté. La description de la géométrie d'image (orientation interne) est très faible, mais aussi les conditions d'acquisition des images ont été loin d'être idéales d'où un faible contraste entre images et une mauvaise corrélation.

Dans un autre contexte, Lejot et al. (2007) ont utilisé aussi des images drone Pixy afin d'obtenir le relief de deux barres de gravier au long des rivières (Ain et Drôme), au Sud-est

de la France. Les images drone Pixy ont une résolution de 5 à 10 cm et la précision verticale des MNT résultants est de l'ordre de 15 cm (17 points de contrôle terrestre pour la validation, ces coordonnées ont été prises par GPS différentiel avec une précision de 10 cm). La précision finale des MNT est contrôlée par la qualité de l'optique de l'appareil photo et à la connaissance limitée des paramètres du vol. Ces problèmes peuvent être surmontés en employant des drones plus stables avec un meilleur contrôle du vol et des meilleurs systèmes optiques des appareils photos.

II.3 CONSTRUCTION DES MNT

II.3.1 3D par approche aérienne

La caractérisation tridimensionnelle des manifestations linéaires de l'érosion concentrée pourrait être effectuée par moyen aérien ou terrestre. L'approche aérienne est la plus couramment utilisée étant donné l'étendue de ses applications et son rapport avec les coûts des missions. Ces applications sont destinées à l'élaboration des MNT par stéréophotogrammétrie, par interférométrie Radar, ou plus récemment par l'utilisation du LiDAR. L'approche terrestre, mise au point par moyen des levés terrain direct (tachéomètre et GPS), est beaucoup plus limitée étant donné le rapport coût-étendue de la méthode.

II.3.1.1 La stéréophotogrammétrie

La photogrammétrie est une technique qui permet la mesure d'une surface observée à partir de clichés acquis en configuration stéréoscopique, en utilisant d'une part la vision stéréoscopique pour mettre en correspondance les deux images, et d'autre part une modélisation mathématique de la géométrie de prise de vue. La stéréoscopie est la reconstitution tridimensionnelle de la forme et de la position d'un objet à partir d'un couple de clichés pris sous des angles différents, ou vision binoculaire (Jensen, 2000). Le calcul de la différence de taille et de forme entre des objets projetés sur deux clichés bidimensionnels, permet donc de reconstituer le relief (figure II.6). La formule (1) relie la hauteur d'un objet, à sa parallaxe mesurée sur un couple stéréoscopique (Casson et al., 2003). De toutes les méthodes de restitution du relief la plus ancienne est la photogrammétrie, utilisée depuis des décennies.

$$\Delta h = (H-h) * (pB - pA/p) \quad (1)$$

Δh représente la hauteur de l'objet considéré, par exemple l'objet S sur la figure X ; pA et pB sont les parallaxes des points A et B , respectivement situés à la base et au sommet de l'objet S ; H est la hauteur de la caméra d'acquisition par rapport au niveau de la mer et h est l'altitude du point le plus bas de l'objet considéré, aussi par rapport au niveau de la mer. $(H-h)$ représente donc l'altitude de la caméra d'acquisition par rapport au sol, tandis que p est la parallaxe du point PI situé au centre de l'image 1.

La relation (1) n'est cependant exacte que lorsque les conditions suivantes sont remplies (Jensen, 2000) : l'acquisition des clichés est verticale ; l'altitude d'acquisition des deux clichés, au dessus du sol est identique ; les centres des deux images correspondent à des points ayant une altitude proche ; la base des objets mesurés a une altitude proche de celle des points situés au centre des images. Dans la mesure où nous nous éloignons de ces hypothèses (cas d'images acquises avec un vecteur UAV) la précision dans le calcul de la hauteur diminue.

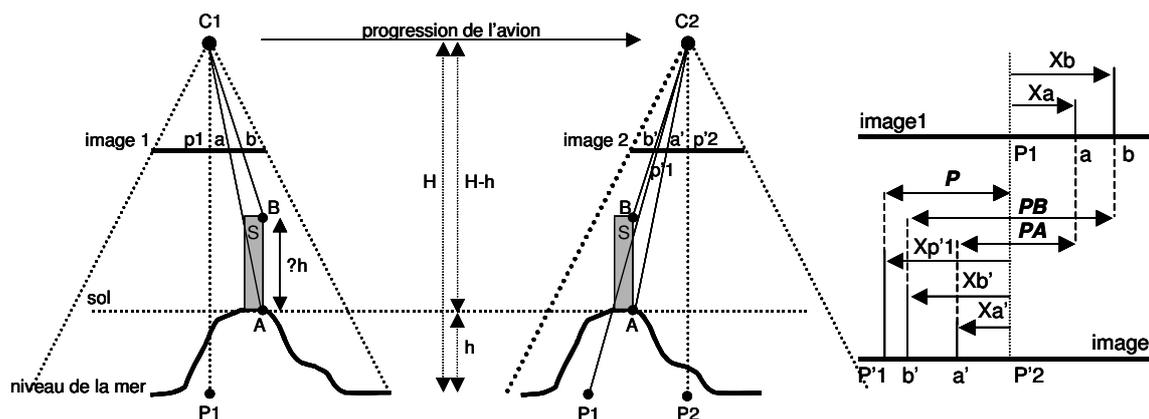


Figure II.6 - Principe de calcul de la hauteur d'un objet par parallaxe (d'après Casson et al., 2003).

D'après Kraus & Waldhäusel (1998), la stéréoscopie peut être développée en trois formes (figure 10) :

1. Analogique : restitution à partir de supports stéréoscopiques (argentiques) et d'équipements analogiques (restitution manuelle).
2. Analytique : processus de restitution manuelle mais assisté par ordinateur (ex. logiciel POIVILLIERS ; Egels, 1999).
3. Numérique : restitution numérique par points homologues et corrélation d'images, à partir de supports stéréoscopiques digitaux ou argentique scanné (ex. logiciel ERDAS ; Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

On a représenté ces éléments selon le schéma de la figure II.7, où nous pouvons apprécier l'évolution de la technique vers son automatisation complète. Pendant la dernière décennie, la stéréophotogrammétrie a évolué vers l'automatisation complète du processus, on a assisté au développement des routines et des logiciels permettant l'aérotriangulation et la restitution du relief de façon numérique. Ces techniques ont données plus de possibilités aux utilisateurs non spécialisés pour exploiter la stéréophotogrammétrie dans diverses applications.

Avec la stéréophotogrammétrie classique nous obtenions des plans de courbes de niveau en format analogique, où l'information concernant le relief était disponible sous forme discontinue avec des espaces sans information. Au début de l'utilisation des ordinateurs personnels, la production des MNT consistait en un nombre important d'étapes. D'abord la digitalisation ou numérisation des plans analogiques de courbes de niveau à la main, sur des tables à numériser. Le produit résultant était une couche vectorielle où les courbes de niveau étaient représentées par une série de polygones. Afin d'avoir un MNT, il fallait convertir la couche vectorielle en couche continue. Par exemple, pour obtenir un format raster (grille régulière) il fallait transformer les courbes de niveau en une succession des pixels ayant pour valeur la donnée d'altitude de la courbe de niveau originale. Ensuite, il fallait une interpolation mathématique afin de remplir les espaces vides « no-data » et obtenir ainsi un MNT (succession de gauche à droite des carrés bleu-rose-vert-jaune, figure II.7).

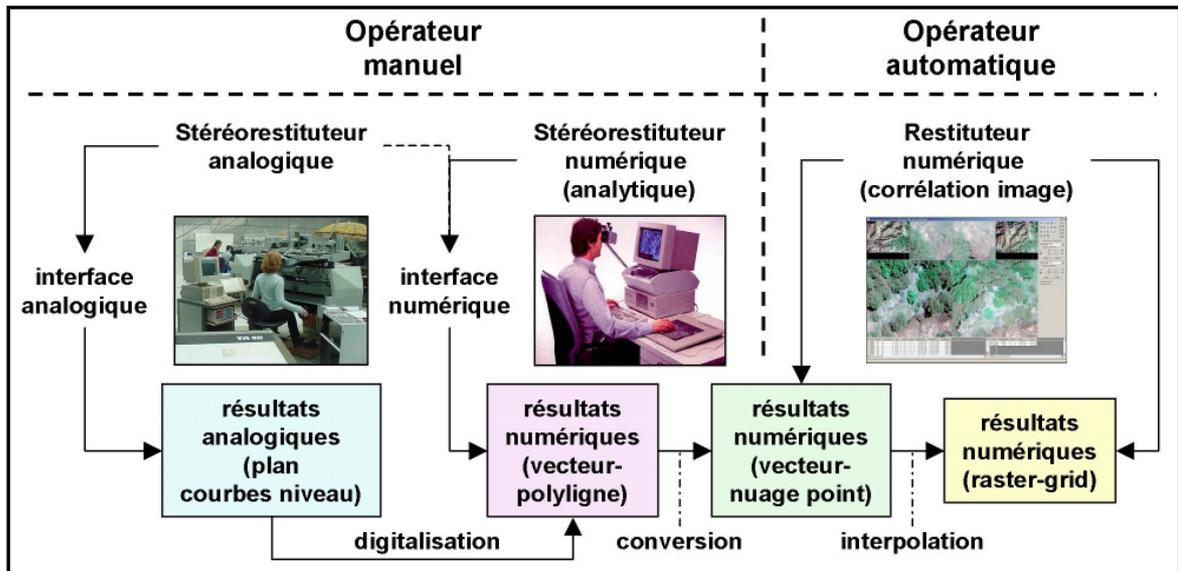


Figure II.7 - Evolution de la stéréophotogrammétrie.

Avec l'évolution de la « numérisation » dans la stéréophotogrammétrie, on cherche à diminuer l'intervention de l'opérateur humain dans la chaîne de traitement, ainsi qu'à diminuer les différentes étapes de transformation de format et des opérations mathématiques sur les données d'altitude. De cette façon les sources d'erreurs et d'incertitudes dans la restitution du relief sont réduites.

Le premier pas dans la numérisation a été le développement d'une interface pour le stéréorestituteur analogique, afin de transférer le tracé manuel de l'opérateur à une table à digitaliser en temps réel, ce qui enlevait déjà une source possible d'erreur. Le résultat de cette opération était une couche numérique vectorielle de polygones (courbes de niveau).

L'étape suivante représente le véritable début de l'automatisation de la restitution du relief par stéréophotogrammétrie, avec le développement des logiciels pour la stéréorestitution manuelle sur l'écran d'un ordinateur (stéréorestituteur analytique, p.e. le logiciel Poivilliers-IGN). Le résultat de cette technique était aussi une couche numérique vectorielle de polygones. La restitution sur l'écran a permis de mieux contrôler le pointage des points de contrôles terrestre à part de l'automatisation de l'aérotiangulation des couples stéréoscopiques.

Un saut significatif dans l'automatisation de la stéréophotogrammétrie a été la restitution du relief par corrélation d'images. A cette étape là, l'opérateur humain n'intervient jamais dans la chaîne de traitement. La première génération d'algorithmes de corrélation d'images n'arrivait pas à corrélérer effectivement un pourcentage important de pixels de la zone de recouvrement du couple stéréoscopique, dont le résultat était une couche vectorielle de points (en 3D) irrégulièrement distribués. En conséquence, on avait toujours besoin d'une interpolation afin d'avoir un MNT. La résolution du MNT interpolé dépendait de la densité de pixels effectivement corrélés.

Une dernière génération d'algorithmes de corrélation d'images (p.e. MEDICIS-CNES, Casson, 2003 ; et MicMac-IGN, Pierrot & Pappadimitis, 2006) ont amélioré significativement l'efficacité de la corrélation en ajoutant quelques routines (une

corrélation dans le domaine des fréquences pour MEDICIS, et une stratégie multi-résolution plus une régularisation de la corrélation pour MicMac). Ces stratégies ont permis non seulement de maximiser les pixels effectivement corrélés, mais également de contrôler de nombreuses fausses bonnes corrélations qui détérioraient significativement la qualité du résultat final. Ce résultat final est déjà un MNT en format grille, avec une résolution équivalente à la taille de pixel du couple stéréoscopique.

Même s'il existe de nombreux formats pour représenter numériquement le relief (figure II.8), la forme la plus commune pour produire un MNT « en continu » est par interpolation, à partir d'un nuage de points de terrain irrégulièrement distribués dans l'espace. Ce nuage de points de terrain constitue une représentation discrète d'une surface continue. Dans le cas d'utilisation de la dernière génération d'algorithmes de corrélation d'images, capables d'augmenter au maximum le nombre de pixel effectivement corrélés, les MNT résultants vont avoir un certain nombre de pixels contrôlés par les algorithmes de régularisation de la corrélation. Même le MNT de plus haute qualité est une approximation de la surface et pas sa représentation exacte.

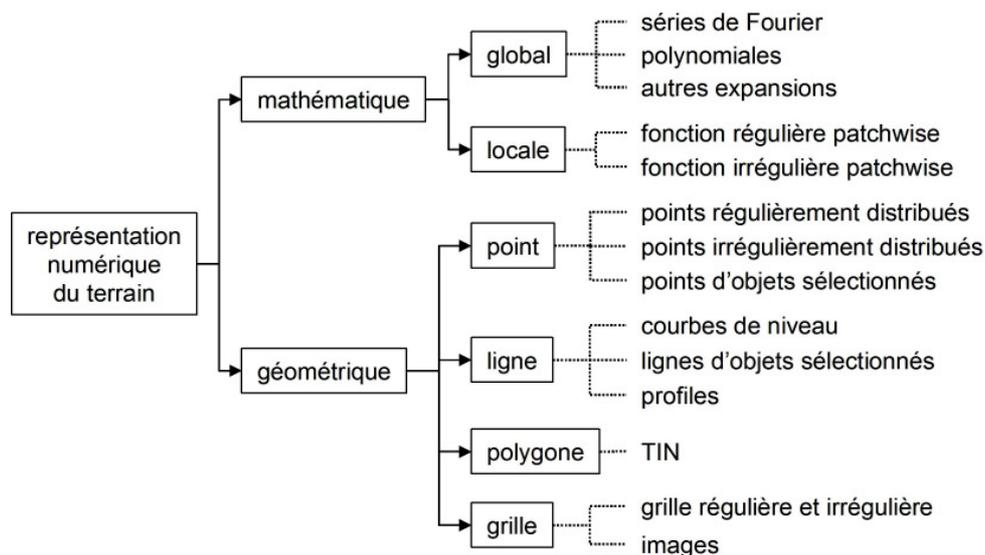


Figure II.8 - Types de représentation numérique du terrain (adapté de Oksanen, 2006).

Les formes de stockage d'un MNT ont aussi évolué avec les méthodes de production. Pendant les années « analogiques », le format de stockage était la carte de courbe de niveau en papier. Ensuite, avec l'évolution vers la période « analytique » on commence à stocker en format numérique et le plan de courbes de niveau est numérisé. Mais le plan numérisé représente un format préliminaire vers le format en grille régulière ou Raster (figure II.9), très employés en raison de leur simplicité et leur efficacité informatique pour les calculs et les opérations dans un SIG (Martz & Garbrecht, 1992). Le MNT en grille est limité de par sa conception qui consiste à représenter une surface continue par un ensemble discret de points (Puech et al., 2004).

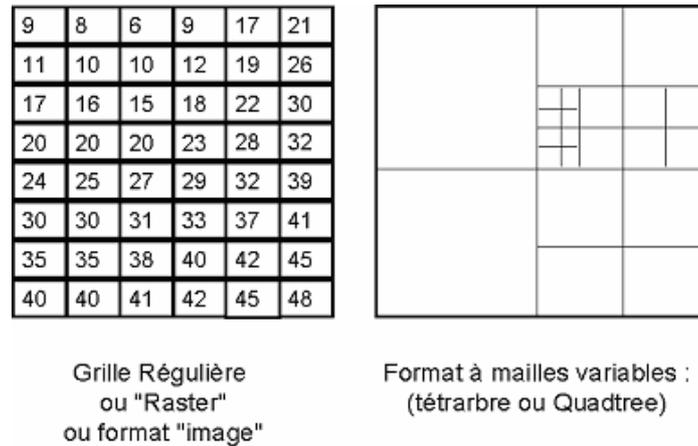


Figure II.9 - Les différents types de stockage en grille (d'après Puech et al., 2004).

Dans un MNT en grille, l'information ou variable z est stockée à intervalles planimétriques réguliers orientée habituellement dans le sens est-ouest pour la variable x , et nord-sud pour la variable y (pixel). La distance entre deux pixels est connue comme l'espacement de grille. Habituellement, cette distance est la même pour les deux directions de grille (grille régulière). La variable z dans un MNT représente normalement l'altitude réelle de la terre à l'emplacement déterminé par les coordonnées planimétriques (Raaflaub & Collins, 2006).

La grille régulière est un format efficace pour les opérations numériques avec un MNT, mais pas vraiment efficace pour le stockage, étant donné que dans les zones de topographie homogène (zones plates) le format à grille régulière doit garder une grande partie d'information répétitive. Au contraire, dans les zones au relief plus irrégulier et incliné, le terrain est habituellement sous-échantillonné, un équilibre doit être trouvé entre l'intervalle de prélèvement et d'autres besoins. Le format à mailles variables ou « quadtree » (figure II.12) est plus efficace dans le stockage de données mais il reste un format intermédiaire pour les opérations dans un SIG. En plus, la capacité de stockage disponible sur les disques des ordinateurs personnels augmente jour après jour, aux coûts abordables, ce qui réduit les problèmes de format de stockage des MNT.

Un terme souvent utilisé afin de définir l'espacement de grille est la « résolution » d'un MNT. Mais ce terme peut avoir plusieurs significations et il est employé dans de nombreux domaines :

- En informatique, la résolution d'une image s'exprime en pixel par pouce (ppi) pour l'affichage numérique et en points par pouce (dpi) pour l'impression sur papier.
- En métrologie, la résolution des appareils de mesure est la plus petite variation de la grandeur à mesurer que l'appareil est capable de détecter.
- En optique, le pouvoir de résolution d'un système optique désigne sa capacité à distinguer des détails fins (pouvoir séparateur). Dans le cas d'images aériennes, ce pouvoir séparateur correspond à la taille du pixel au sol, même s'il n'est pas absolument stable dans toute l'image par l'effet du relief ou les conditions de prises de vue.

Pour la majorité des MNT raster les valeurs des pixels représentent l'altitude d'un point, et il est le résultat d'une interpolation à partir d'un nuage des points de terrain irrégulièrement

distribués dans l'espace. Selon ce point de vue, le terme « résolution » correspond à l'espacement final de la grille (Raaflaub & Collins, 2006).

Le modèle TIN ou réseau de triangles irréguliers est un format de stockage vectoriel. Ce format a été développé dans les années 1970 comme une façon simple de construire une surface à partir d'un nuage de points à espacement irrégulier (Peucker et al., 1978), afin de stocker effectivement l'information spatiale sans répétitivité. Il permet une représentation du relief continue à partir de l'information originale disponible, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire d'interpoler afin de créer un MNT.

Sur un MNT-TIN, la surface topographique est représentée par un réseau de facettes triangulaires irrégulières et adjacentes, construites à partir d'un nuage de points 3D. Un triangle est formé par trois côtés, et chaque côté est défini par deux points de terrain en 3D (nœuds de triangles). Un nœud peut être partagé entre deux ou plusieurs triangles, pendant qu'un côté peut être partagé par deux triangles au maximum. Plusieurs combinaisons entre ces trois types d'éléments (nœuds, côtés et triangles) forment la structure d'un MNT-TIN (El-Sheimy et al., 2005).

Le diagramme de Voronoï est une structure géométrique qui représente les relations de proximité pour un jeu de points ou objets (El-Sheimy et al., 2005). Cette structure définit les secteurs d'un plan qui sont plus proches d'un point ou objet de ce plan qu'à n'importe quel autre point (on appelle aussi cette structure « polygones de Thiessen »).

La triangulation de Delaunay (Delaunay, 1934) est une structure duale du diagramme de Voronoï, ou polygones de Thiessen. Ceci indique que la triangulation de Delaunay désigne un segment de ligne entre deux nœuds Voronoï si les polygones Voronoï ont un côté en commun (figure II.10a). La triangulation de Delaunay est une collection de triangles satisfaisant le principe du « cercle vide » : pour chaque triangle nous pouvons trouver un cercle qui contient les nœuds (figure II.10b) mais qui ne contient aucun autre point à l'intérieur (El-Sheimy et al., 2005).

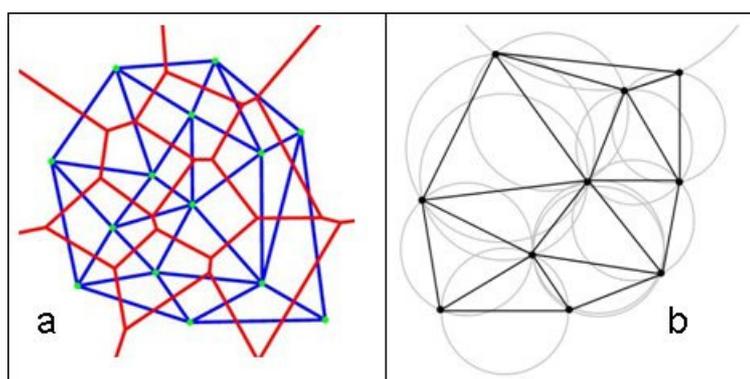


Figure II.10 - Relation entre les polygones Thiessen et la triangulation Delaunay (a), et le principe du « cercle vide » de la triangulation Delaunay (b).

Ce système de stockage permet de resserrer la densité du maillage dans les zones de topographie complexe par rapport à un maillage uniforme et carré comme le raster (Mita et al. 2001). Le MNT-TIN fait une représentation numérique du relief physiquement plus

juste. Néanmoins, ce format n'est pas forcément la meilleure solution pour stocker un MNT très détaillé provenant d'une application de la stéréophotogrammétrie numérique par corrélation d'image pixel à pixel. Par contre, si les données originales proviennent d'une couche vectorielle de points (en 3D) irrégulièrement distribués, le format MNT-TIN constitue une solution idéale afin de stocker et de représenter numériquement le relief.

Nous allons développer les principes généraux de la stéréophotogrammétrie numérique. Les grandes étapes de la méthode sont celles des techniques habituelles (Kraus & Waldhäusl, 1998), plus la restitution automatique du relief : 1) préparation du vol et prise de vues stéréoscopiques, 2) géométrie (orientation interne et externe), 3) aérotriangulation, et 4) restitution numérique du relief.

La première étape est le point du départ du développement d'un MNT et comprend la sélection du vecteur, d'après les objectifs de la mission, des dates et des heures de vol, du type de chambre photo, de la hauteur et la vitesse de vol, ainsi que le nombre et la précision des points de contrôle terrestre nécessaires. L'étape suivante consiste à définir les caractéristiques de la chambre photo de prise de vue, ainsi que les conditions de prise de vues (position et orientation de l'appareil photo). Ces paramètres d'orientation interne et externe sont à la base des calculs à développer dans la prochaine étape d'aérotriangulation, où un lien entre l'appareil photo, les photos et le terrain doit s'établir (colinéarité). La dernière étape consiste à restituer le relief à partir des couples stéréoscopiques par corrélation locale des points homologues. Les paramètres d'orientation inconnus entraînent des erreurs géométriques importantes pendant la restitution du relief.

II.3.1.1.1 Préparation du vol et prise de vue stéréoscopique

La préparation du vol est le point de départ du développement d'un MNT. D'après les objectifs, les moyens économiques disponibles, la résolution et la précision cherchée, nous fixons les paramètres suivants : le vecteur (drone, avion, satellite) ; les dates et les heures des vols ; le type de chambre photo, ce qui dépend aussi du vecteur choisi (capteur satellite, chambre analogique ou numérique, chambre métrique, semi-métrique, non-métrique, en cas de besoin résolution de scannage) ; la hauteur et la vitesse du vol (rapport base/hauteur) ; et le nombre et précision de points de contrôle terrestre (PCT).

Le choix du vecteur dépend bien sûr des objectifs de la mission, comme la couverture et la résolution. Les dates et heures du vol sont très importantes si nous voulons optimiser la prise d'image par rapport aux objectifs, certaines conditions saisonnières contrôlent l'acquisition d'information relative aux objets (ex. neige, feuillage, humidité). Les heures du vol sont plus liées à la qualité du contraste dans les images, c'est ce qui contrôlera la quantité ou densité de points effectivement corrélés (qualité du MNT).

Il y a trois types de chambres photographiques disponibles : métriques (développées spécialement pour la stéréophotogrammétrie, elles ont été contrôlées par rapport aux paramètres optiques de la chambre et sa lentille) ; semi-métriques (non prévues pour faire la stéréophotogrammétrie, les paramètres optiques ne sont pas stables) ; et non-métriques (non prévues pour faire la stéréophotogrammétrie, les travaux de calibrage sont plus longs et moins précis).

Le choix de la chambre est attaché au choix du vecteur. Les chambres métriques sont aussi lourdes et grandes et il est impossible de les utiliser dans un UAV. Donc quand on choisit un vecteur UAV pour avoir la flexibilité et répétitivité cherchés, il faut sacrifier la qualité optique des images.

Nous pouvons classer aussi la chambre à photo analogique selon les systèmes utilisés pour la définition de l'orientation interne : à repères de fond de chambre (4 à 8), à réseaux (plaque de verre ajusté devant le plan-image, réseau de croix), à cadre (les bords sont nettement découpés, les coins du cliché sont des repères indirects), et à pseudo cadre (l'image est limitée par un cadre de papier).

Les chambres à photo numérique n'ont pas besoin de repères, la matrice stable de pixels permet le calcul de l'orientation interne. Les exigences à satisfaire par une chambre photogrammétrique aérienne sont :

- Elle doit être calée par rapport à l'orientation au sol (système automatique avec 2 gyroscopes).
- Elle doit être calée par rapport à la direction effective du vol (système de suspension annulaire).
- L'avion doit avoir des dispositifs de navigation efficaces (contrôle de la route et de la hauteur de vol).
- Le recouvrement longitudinal prévu doit être respecté (un intervallo-mètre est donc nécessaire).

Un système de navigation inertiel permet le contrôle de tous ces paramètres, donc un contrôle intégral du vol. Mieux tous ces paramètres sont contrôlés et connus, mieux l'orientation externe sera calculée. Dans la figure II.11 nous pouvons observer les paramètres du vol.

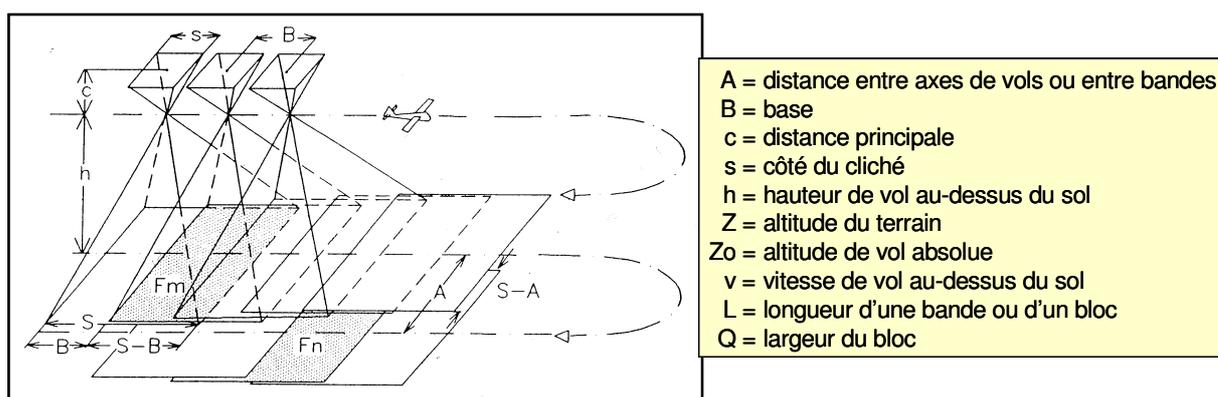


Figure II.11 - Paramètres de vol (d'après Kraus & Waldhäusl, 1998).

La perception du relief dépend de la différence d'angle d'incidence. La caractérisation de la configuration stéréoscopique d'un couple d'images se fait par le rapport base sur hauteur (B/h) selon l'équation (2) :

$$B/h = \tan(\alpha_g) + \tan(\alpha_d) \quad (2)$$

Dans le triangle formé par le point photographié au sol et les deux positions de l'appareil photo au moment des prises de vues, B représente la base de prise de vue ou la distance entre clichés, h c'est la hauteur de prise de vue par rapport au sol, α_g et α_d sont les angles de prises de vue gauche et droite respectivement (figure II.12).

Si le rapport B/h augmente, l'ampleur du relief perçu augmente. Un B/h égal à 1 est optimum pour la restitution stéréoscopique (Kraus & Waldhäusl, 1998), mais c'est un choix en fonction du terrain (figure II.12). Le rapport B/h peut être classifié autour des valeurs suivantes : 1,0 (forte valeur, valable surtout en traitement analogique) ; 0,8 (moyenne valeur, valable pour tous types d'applications) ; 0,6 (faible valeur, utilisable en traitement numérique).

Une forte valeur, nécessaire pour une exploitation visuelle, peut être gênante pour une exploitation numérique en corrélation automatique si le relief est très fort, car elle augmente le nombre et la taille des parties cachées.

Les éléments de stéréophotographie sont particuliers dans les zones de fort relief. En effet, dans la littérature on cite couramment le rapport B/h comme élément de qualité stéréoscopique (Kraus & Waldhäusl, 1998).

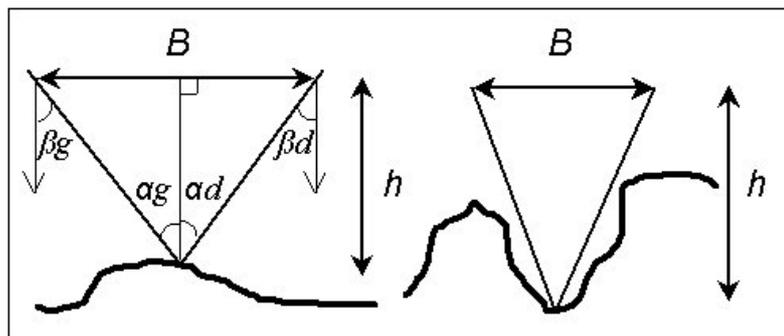


Figure II.12 - Rapport B/h en fonction du terrain.

Pour permettre l'examen stéréoscopique, le recouvrement longitudinal entre photos successives est de 60 % (figure II.13). Tout comme le recouvrement entre bandes, il peut être augmenté en zone montagneuse. Un autre paramètre important est le recouvrement entre couples stéréoscopiques d'images, on parle de recouvrement entre bandes ou longitudinal. La couverture photographique est constituée de bandes rectilignes (de photographies) qui présentent un recouvrement entre elles de 15 % environ. Pour éviter les hiatus dus aux reliefs, ce recouvrement peut atteindre 40 % sur certains massifs montagneux (<http://www.ign.fr/>).

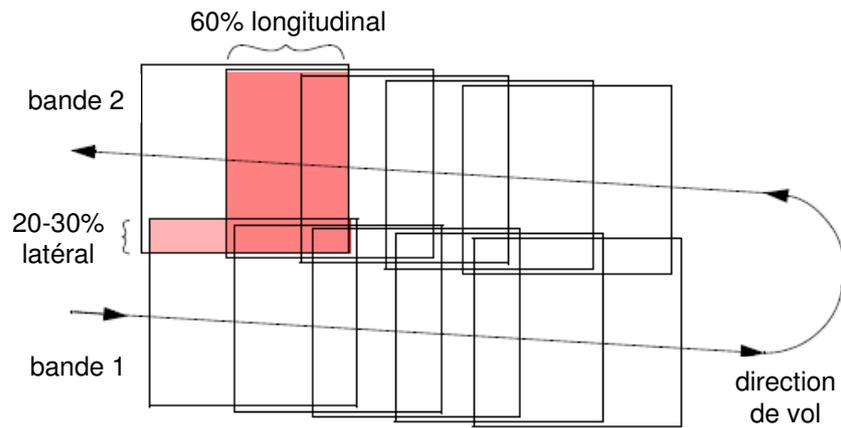


Figure II.13 - Types de recouvrement entre stéréo images (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

Le dernier pas de la préparation du terrain concerne les points de contrôle terrestre (PCT), ils doivent être repérables sur les photographies et avec des coordonnées en 3D connues. La quantité nécessaire des PCT pour un projet varie par rapport à l'échelle de travail et au nombre de couples stéréo à traiter, ainsi que par la méthode d'aérotriangulation à utiliser. Ils doivent être bien répartis dans le secteur de recouvrement entre deux images.

Afin d'améliorer le modèle stéréoscopique il faut s'appuyer sur des points homologues, pour augmenter le nombre de points dans l'espace 3D. Un point homologue est un point dont les coordonnées au sol ne sont pas connues, mais qui est visuellement reconnaissable dans le secteur de recouvrement entre deux images. Leurs coordonnées terrestres sont calculées pendant l'aérotriangulation. Les images doivent montrer un bon contraste au niveau des points homologues qui doivent être bien répartis sur le bloc stéréoscopique.

II.3.1.1.2 Géométrie

La géométrie de la prise de vue comprend les caractéristiques de l'optique de la chambre photo (ou paramètres d'orientation interne), ainsi que sa position et orientation angulaire dans l'espace (paramètres d'orientation externe).

II.3.1.1.2.1 Orientation Interne

L'orientation interne est fondamentalement utilisée pour transformer le système de coordonnées pixel en système de coordonnées spatiales de l'image (x, y).

Une image est nette si le foyer se trouve positionné sur le plan focal. Si le foyer se forme trop en avant ou trop en arrière, l'image est floue. Il faut ajuster la distance focale en fonction de l'éloignement du sujet (« mise au point »). La zone de netteté qui se trouve en avant et en arrière du sujet sur lequel la mise au point a été effectuée s'appelle « profondeur

du champ ». L'image d'un objet se trouvant en dehors de cette zone se forme devant ou derrière le plan focal et apparaît floue (figure II.14).

La lumière provenant de la scène photographiée passe tout d'abord par les lentilles qui composent l'objectif. Dans la photographie numérique, cette étape détermine le cadrage de la photo et conditionne de plus en plus la qualité de l'image finale maintenant que les capteurs proposent un grand nombre de méga pixels.

Afin de calibrer la chambre photo en ce qui concerne l'orientation interne, nous analysons des photographies particulières représentant des zones dont la géométrie est parfaitement connue. Ceci permet d'accéder aux déformations de l'image liées aux imperfections de la lentille. Le résultat peut être modélisé par une fonction de déformation généralement polynomiale et exprimée en fonction de la distance au centre de l'image, que l'on peut ensuite appliquer à l'image brute pour obtenir une image « théoriquement » corrigée des déformations.

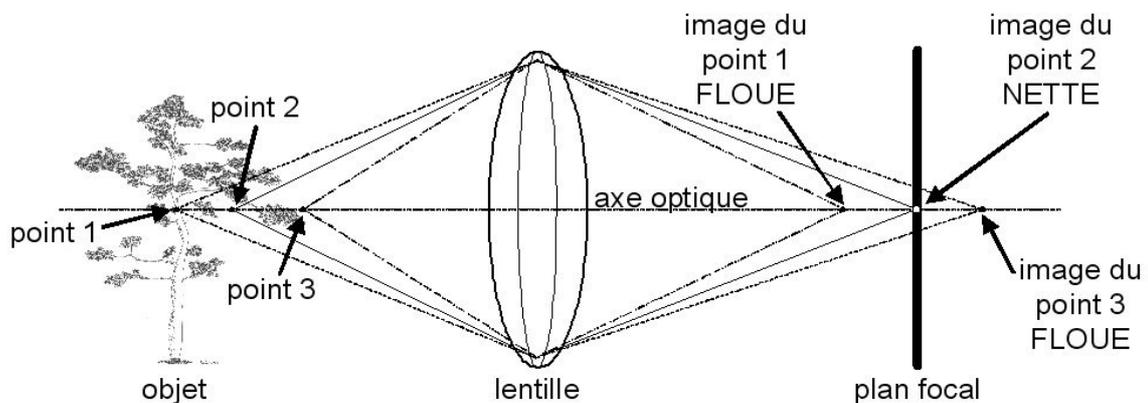


Figure II.14 - Le plan focal et la zone de netteté.

L'équation du polynôme de distorsion radiale est de la forme :

$$F(r) = a*r^3 + b*r^5 + c*r^7 \quad (3)$$

où r est la distance radiale en pixels, a , b et c sont des coefficients.

Plusieurs auteurs signalent que la correction de la distorsion de lentilles de l'appareil photo (calibrage) est essentielle dans la restitution précise des formes par stéréophotogrammétrie (Stojic et al., 1998 ; Henry et al., 2002 ; Lascelles et al., 2002 ; Bransington & Smart, 2003 ; Chandler et al., 2005 ; Raclot et al., 2005 ; Lejot et al., 2007). Les résultats montrent une amélioration significative dans la qualité de la restitution finale avec l'utilisation des paramètres d'orientation interne (figure II.15) : la distance focale, le point principal de symétrie, ainsi que les déformations de lentilles.

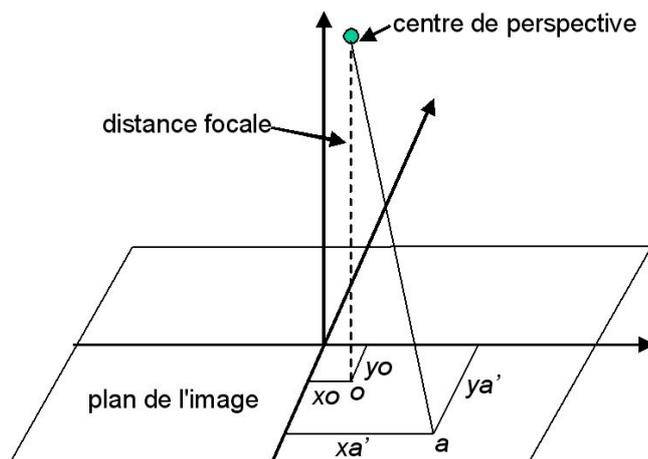


Figure II.15 - Paramètres d'orientation interne (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

Par rapport aux déformations des lentilles, la déformation en coussinet se remarque particulièrement en position de zoom déployé au maximum, tandis que la déformation en barillet gêne l'usage en grand angle (figure II.16).

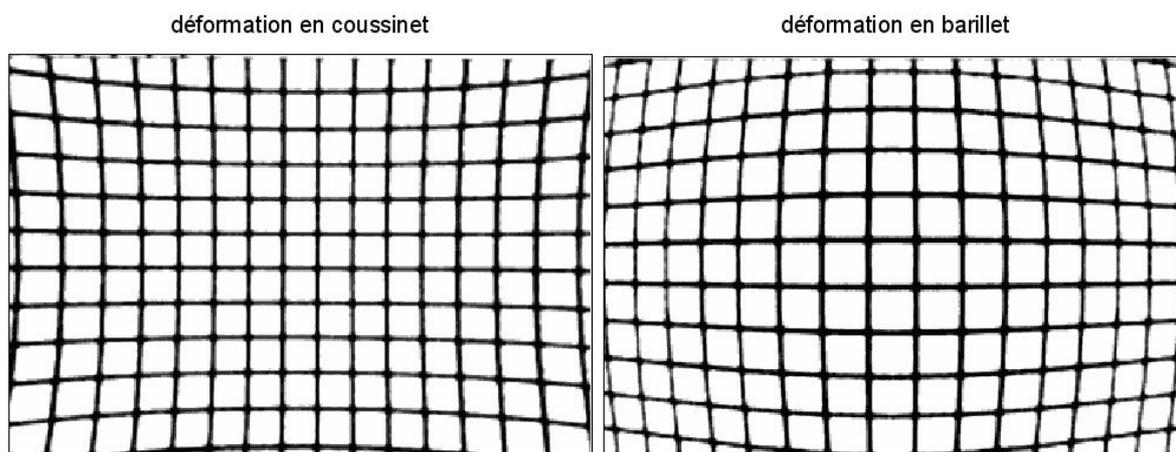


Figure II.16 - Deux types de déformation des lentilles.

II.3.1.1.2.2 Orientation Externe

L'orientation externe définit la position et l'orientation angulaire de l'appareil photo au moment de la prise de vue. Les paramètres de position de l'orientation externe incluent X_o , Y_o , et Z_o , position du centre de perspective (O) par rapport au système de coordonnées terrestre (X, Y, Z). Z_o est généralement égal à la hauteur de l'appareil photo au-dessus du niveau de la mer.

En utilisant les trois angles de rotation : omega (ω), phi (φ), et kappa (κ), le rapport entre le système de coordonnées spatiales d'une image (x, y , et z) et le système de coordonnées

terrestres (X , Y , et Z) est déterminé. Une matrice de rotation $[M]$ à trois dimensions, est employée :

$$[M] = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

La matrice de rotation est définie par une rotation séquentielle d'oméga (ω) autour de l'axe des abscisses, de phi (φ) autour de l'axe des ordonnées, et de kappa (κ) autour de l'axe z .

Une vectrice image \vec{a} peut se définir comme le vecteur qui part du centre de perspective O au point d'image p (figure X). Un vecteur terrain \vec{A} peut se définir comme le vecteur qui part du centre de perspective O au point terrain P . La vectrice image et le vecteur terrain sont situés sur la même ligne droite, impliquant que centre de perspective, point sur l'image et point sur le terrain sont colinéaires. La vectrice image et le vecteur terrain sont seulement situés sur la même ligne droite si l'on peut écrire l'équation (5) où k est un scalaire :

$$\vec{a} = k\vec{A} \quad (5)$$

Une expression matricielle de cette même relation dans le système de coordonnées image va alors s'écrire sous la forme :

$$[a] = k[M][A] \quad (6)$$

$[a]$ est la matrice colonne relative à \vec{a} (en système image), $[A]$ la matrice colonne relative à \vec{A} (en système terrain), et $[M]$ est la matrice de rotation (4). L'équation finale qui définit le rapport entre le centre de perspective O de l'appareil photo au moment de la prise de vue et le point P sur le terrain (point p sur l'image) est la suivante :

$$\begin{pmatrix} x_p - x_o \\ y_p - y_o \\ -f \end{pmatrix} = k[M] \begin{pmatrix} X_p - X_o \\ Y_p - Y_o \\ Z_p - Z_o \end{pmatrix} \quad (7)$$

où x_p et y_p sont les coordonnées image du point terrain, x_o et y_o sont les coordonnées images du point principal et f est la distance focale, X_p , Y_p et Z_p sont les coordonnées terrain du point terrain, X_o , Y_o et Z_o sont les coordonnées terrain du centre de perspective (figure II.17 et II.18, tableau II.2). Cette équation est à la base de la colinéarité qui est employée dans la plupart des opérations photogrammétriques (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

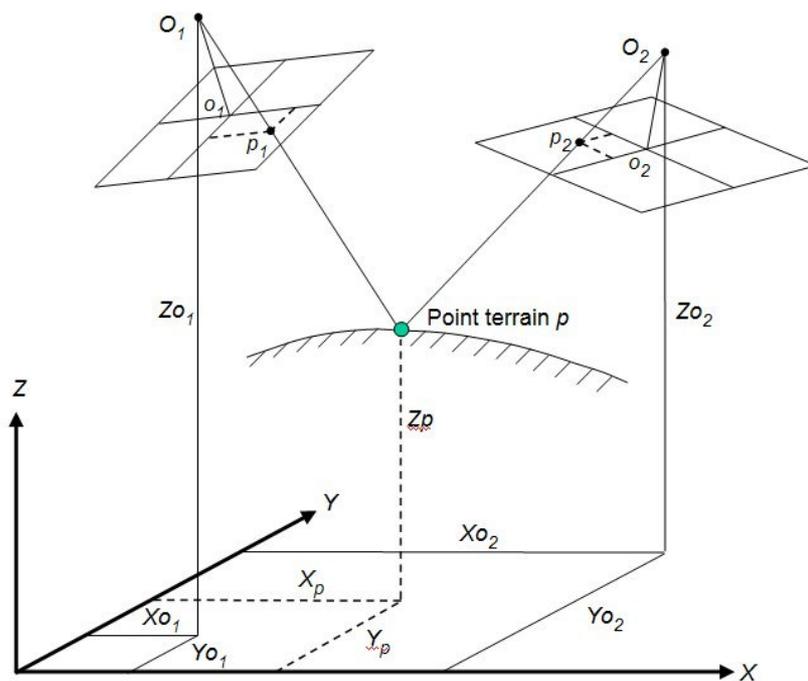


Figure II.17 - Paramètres de position de l'orientation externe (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

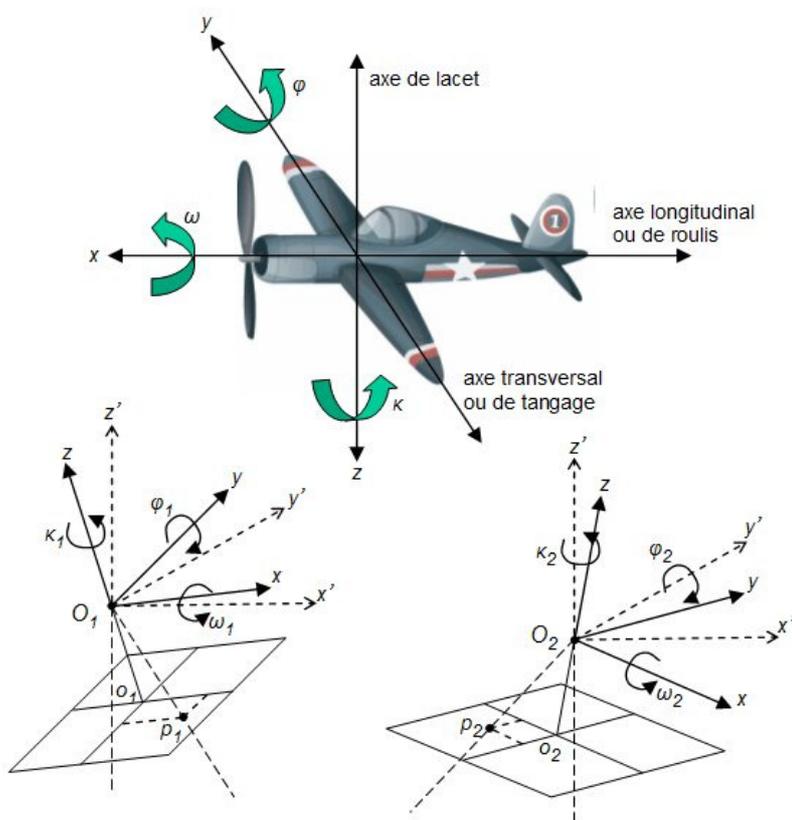


Figure II.18 - Paramètres d'orientation angulaire de l'orientation externe.

Tableau II.2 - Légende des figures II.18 et II.19.

Terme	Définition
$\omega\phi\kappa$	angles de rotation
$O1$ et $O2$	centre de perspective (Xo, Yo, Zo) de chaque image
$o1$ et $o2$	point principal de chaque image ($xo1-2, yo1-2$)
P	objet ponctuel sur le terrain (Xp, Yp, Zp)
$p1$ et $p2$	objet ponctuel sur chaque image ($xp1-2, yp1-2$)
$f1$ (de O à $o1$) et $f2$ (de O à $o2$)	distance focale de chaque image
de $O1$ à $p1$ et de $O2$ à $p2$	vecteur image de chaque image
de $O1$ à $P1$ et de $O2$ à $P2$	vecteur objet 3D de chaque image
vecteur image et vecteur objet sont collinaires	

Des points additionnels communs aux deux images stéréo (dits points homologues, ou PH), connus uniquement dans le système de coordonnées image, sont intégrés afin d'améliorer l'ajustement du modèle d'aérotriangulation. Ces PH peuvent être repérés manuellement ou de façon automatique par corrélation d'image.

II.3.1.1.3 Aérotriangulation

Afin d'accomplir la restitution d'un couple stéréo, une relation entre les paramètres de l'appareil photo, des photos et du terrain doit être établie. Pour définir cette relation on utilise les paramètres d'orientation interne et externe de chaque photo et une représentation précise du terrain par un ensemble de points de contrôle terrestres (PCT).

Les paramètres d'orientation externe d'une photo aérienne sont normalement inconnus et le calcul de ces paramètres est l'obstacle le plus important de la stéréorestitution. Selon les données d'entrée disponibles, plusieurs techniques sont employées pour définir les variables exigées dans la stéréophotogrammétrie. Parmi celles-ci, l'ajustement par paquet de blocs est la technique la plus rigoureuse considérant la minimisation d'erreurs et la distribution des résidus. La condition de coplanéité établit que les deux positions du capteur d'un couple stéréoscopique, ainsi qu'un point au sol quelconque et sa position image correspondante sur les deux images, doivent se situer dans un plan commun.

Une fois que chaque équation d'observation est formulée, la condition de colinéarité peut être résolue en utilisant l'ajustement par moindres carrés. Cette technique statistique est employée pour estimer les paramètres inconnus associés à une solution, tout en minimisant l'erreur. En ce qui concerne l'aérotriangulation, cette technique est employée pour : a) estimer ou ajuster les paramètres d'orientation interne et externe ; b) estimer les coordonnées X , Y , et Z des PH ; c) minimiser l'erreur et distribuer les résidus dans l'ensemble des PCT.

La solution par paquets de blocs utilise un calcul itératif des paramètres d'orientation interne et externe de chaque image dans un bloc, ainsi que des coordonnées de points homologues (PH) et de points de contrôle terrestre (PCT). Un bloc d'images contenues dans un projet est traité simultanément dans une solution en paquets de blocs (figure II.19).

L'ajustement par moindres carrés est employé afin d'estimer la meilleure solution pour le bloc entier en réduisant l'erreur au minimum et en distribuant des résidus de façon équilibrée (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

La solution par paquets de blocs triangule les points de contrôle terrestre, re-projete les images et établit l'auto calibrage des photos, et ceci de manière simultanée. Cette technique est la plus rigoureuse considérant la minimisation d'erreurs et la distribution des résidus, elle produit les coordonnées finales XYZ de tous les points mesurés.

La mise en œuvre de la méthode par paquets de blocs, utilise le fait que dans la zone de recouvrement entre deux images il y a deux jeux de coordonnées images (x, y) pour chaque PCT (X_o, Y_o, Z_o), tous connus. Ainsi, deux équations de colinéarité pourraient être formulées pour chaque image (4 au total) afin de représenter le passage des données terrain à leurs coordonnées images correspondantes (équation 8). La condition de colinéarité peut être résolue en utilisant l'ajustement des moindres carrés.

$$\begin{aligned} x_p - x_o &= -f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_{o1}) + m_{12}(Y_p - Y_{o1}) + m_{13}(Z_p - Z_{o1})}{m_{31}(X_p - X_{o1}) + m_{32}(Y_p - Y_{o1}) + m_{33}(Z_p - Z_{o1})} \right] \\ y_p - y_o &= -f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_{o1}) + m_{22}(Y_p - Y_{o1}) + m_{23}(Z_p - Z_{o1})}{m_{31}(X_p - X_{o1}) + m_{32}(Y_p - Y_{o1}) + m_{33}(Z_p - Z_{o1})} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Le jeu d'équations de colinéarité peut être formulé pour chaque PCT de chaque image (tableau II.2). Donc, pour chaque PCT (dans la zone de recouvrement entre deux images), nous avons 4 équations de colinéarité (coordonnées image et terrain par image, connus), et 9 paramètres d'orientation externe (3 de position et 6 d'orientation, inconnus).

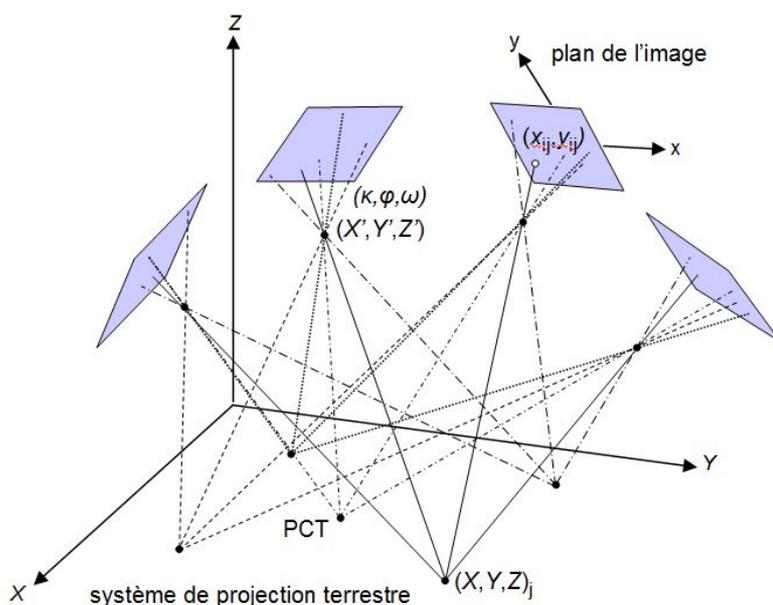


Figure II.19 - Ajustement par paquets de blocs (www.geodesie-maintenance.com).

Des erreurs systématiques subsistent à l'issue de l'aérotriangulation et se répercutent sur le MNT et les images associées. En mode numérique il s'agit des effets du non isotropie de la déformation de lentille ainsi que des effets d'une mauvaise disposition des mires dans la zone couverte par les clichés. Maatouk (2004) a réalisé des essais par rapport à la disposition des mires sur modèle réduit. Il montre des conséquences fortes sur la stabilité de l'aérotriangulation (basculement par exemple). Ainsi, une dissymétrie dans la disposition des mires a entraîné un déplacement en X jusqu'à 5,2 cm dans l'estimation de la position d'un appareil photo situé à 1,60 m d'altitude.

Il existe plusieurs manières de réduire les erreurs systématiques, comme la compensation a posteriori, le calibrage par données complémentaires de terrain, et l'approche par auto calibrage. Tandis que les deux premières méthodes sont coûteuses en temps, les approches par auto calibrage emploient des paramètres additionnels dans le processus de triangulation pour minimiser les erreurs systématiques. Dans la figure II.20 et le tableau II.3, nous pouvons observer les 12 paramètres additionnels de l'approche d'Ebner (1976) pour l'auto calibrage, et leurs effets sur les neuf points d'image.

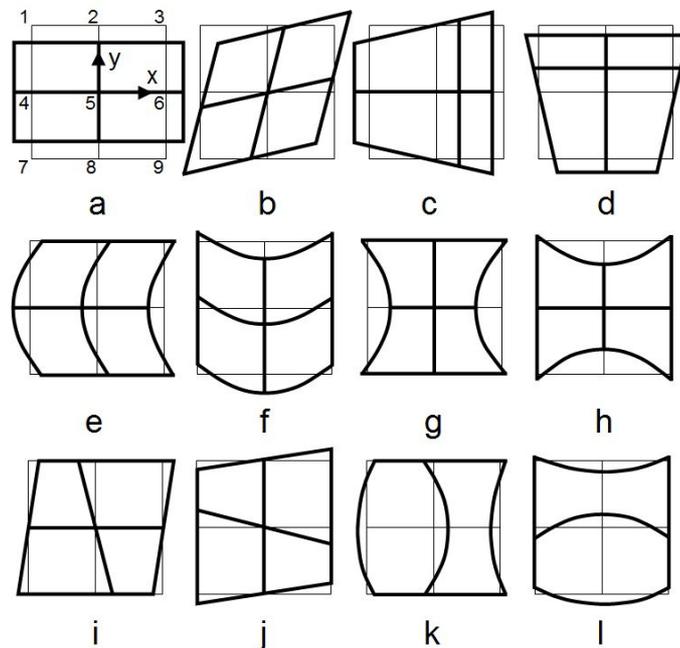


Figure II.20 - Paramètres additionnels d'image pour l'auto calibrage (d'après Ebner, 1976).

Tableau II.3 - Equations des 12 paramètres additionnels d'Ebner (1976).

	ΔX	ΔY		ΔX	ΔY
a	b_1x	$-b_1y$	g	$b_7x(y^2-2b^2/3)$	-
b	b_2y	b_2x	h	-	$b_8(x^2-2b^2/3)y$
c	$-b_3(2x^2-4b^2/3)$	b_3xy	i	$b_9(x^2-2b^2/3)y$	-
d	b_4xy	$-b_4(2y^2-4b^2/3)$	j	-	$b_{10}x(y^2-2b^2/3)$
e	$b_5(y^2-2b^2/3)$	-	k	$b_{11}(x^2-2b^2/3)(y^2-2b^2/3)$	-
f	-	$b_6(x^2-2b^2/3)$	l	-	$b_{12}(x^2-2b^2/3)(y^2-2b^2/3)$

La recherche et le développement intensif des modèles « auto calibrage » dans la stéréophotogrammétrie se sont intensifiés pendant les années 1970 et 1980, et plusieurs de ces résultats sont opérationnels aujourd'hui. Les paramètres additionnels sont un moyen extrêmement efficace pour compenser les erreurs systématiques, quelle que soit leur provenance, qu'il s'agisse d'une distorsion résiduelle de l'objectif, de déformations du film (en cas de photo argentique), d'anomalies de réfraction, ou de toute autre source d'erreur (Kraus & Waldhäusl, 1998).

II.3.1.1.4 Restitution numérique et création du MNT

La restitution numérique cherche à retrouver de manière automatique la position de chaque pixel de l'image de référence représentant le même objet sur son couple stéréoscopique, dans la zone de recouvrement. La corrélation d'images permet l'identification et la mesure automatiques des points d'image correspondants qui sont situés sur les zones de recouvrement des multiples images.

La corrélation d'image, est la méthode de restitution stéréophotogrammétrique du relief à partir d'un couple d'images numériques la plus adéquate dans les zones de relief très tourmenté. Dans ces conditions le temps pour le traitement d'images est faible par rapport à la bonne densité d'information altimétrique résultante, en réduisant les risques d'erreurs humaines de la restitution manuelle (analogiques ou analytiques).

Pour l'extraction des MNT par stéréophotogrammétrie numérique, trois étapes sont nécessaires : corrélation d'images afin de produire un nuage de points 3D ; détermination de coordonnées terrestre de ces points 3D à partir du modèle d'aérotriangulation ajusté ; et production du MNT grid ou TIN à partir du nuage de points 3D (par interpolation ou par triangulation, respectivement).

La qualité, le nombre et la précision des points effectivement corrélés dépendront du contraste entre les images stéréoscopiques, de la stratégie de corrélation d'image sélectionnée ainsi que du paramétrage correspondant, comme la taille de la fenêtre de recherche, la taille de la fenêtre de corrélation et le seuil du coefficient de corrélation.

La détermination de coordonnées terrestre des points 3D dépendra de la stratégie d'ajustement du modèle d'aérotriangulation ainsi que du paramétrage correspondant, comme le nombre, la distribution et la qualité du positionnement des points de contrôle terrestre et des points homologues, et les paramètres d'orientation interne.

Pour la dernière étape, à part les possibles incertitudes dérivées des étapes précédentes (qui se manifesteront dans le nombre, la précision et la distribution des points 3D effectivement corrélés), la qualité du MNT dépendra de l'algorithme d'interpolation ou de triangulation sélectionné, ainsi que du paramétrage correspondant, comme la taille du pixel final.

Afin d'obtenir un MNT en surface continue il est nécessaire d'interpoler. Les méthodes souvent utilisées pour fournir un MNT en format grille sont : plus proche voisin (nearest neighbour), interpolation bilinéaire (bilinear interpolation), ou convolution cubique

(cubique convolution). Il est possible aussi de convertir le nuage de point 3D en format TIN par triangulation.

La densité d'information du MNT est variable sur la surface de l'image, la qualité de la stéréo restitution dépend de plusieurs éléments :

- Vecteur et chambre photographiques (recouvrement entre clichés, angles et altitude d'acquisition des clichés, et de l'optique de la chambre d'acquisition).
- Terrain et images (rapport B/h, dates d'acquisition, nuages, ombres, neige).
- Points d'amer (nombre, distribution et précision de coordonnées terrain et image).
- Corrélation automatique (appariement perturbé par une réalité terrain changeante et les conditions météorologiques, absence de variabilité radiométrique, pas de corrélation et taille de la fenêtre de corrélation, nombres de points effectivement corrélés, prise en compte du sursol, faces verticales).

Nous pouvons classifier les corrélateurs d'images en deux groupes, d'après leur stratégie méthodologique pour calculer la corrélation entre stéréo photos :

- Corrélateurs image-image, par divers moyens (Casson et al., 2003) :
 - En une dimension : le long des deux lignes épipolaires lorsqu'il n'y a pas de décalage entre deux points homologues (corrélateur d'ERDAS LPS).
 - En deux dimensions : réalisée dans le domaine cartésien (les lignes épipolaires ne sont alors plus nécessaires), la corrélation s'apparente au calcul d'une covariance et les temps de calcul deviennent prohibitifs.
 - Dans le domaine des fréquences : grâce aux propriétés de la transformée de Fourier, c'est une méthode rapide et précise (corrélateur MEDICIS, CNES).
- Corrélateurs en multi résolutions : stratégie multi résolution pyramidale qui permet de limiter la combinatoire et rend l'appariement plus robuste.

On va détailler les outils ERDAS LPS, MEDICIS et MicMac comme exemples de ces types de corrélateurs.

II.3.1.1.4.1 Corrélateurs image-image en une dimension.

La méthode de corrélation d'images en une dimension utilise la géométrie épipolaire comme contrainte géométrique. La géométrie épipolaire est associée à la condition de coplanéité. Cette condition établit que les deux positions du capteur d'un couple stéréoscopique, ainsi qu'un point au sol quelconque et sa position image correspondante sur les deux images, doivent se situer dans un plan commun. La recherche de l'optimum de corrélation (coefficient) d'un point est donc orientée : chaque point est cherché sur sa courbe épipolaire dans l'autre image.

La méthode basée sur des secteurs d'images détermine la correspondance entre deux secteurs selon la similitude de leurs valeurs de niveau de gris. Le calcul est fait par corrélation croisée ou par techniques de moindres carrés à l'aide des fenêtres de corrélation (voisinage local des pixels). L'algorithme de corrélation emploie les caractéristiques de ces

fenêtres afin de faire correspondre les secteurs au sol d'une image (fenêtre de référence sur la première image) aux secteurs au sol de l'autre image qui se superpose. Pendant la corrélation, plusieurs tailles des fenêtres de recherche sont examinées jusqu'à ce qu'on trouve le secteur qui correspond le mieux à la fenêtre de référence.

Il est nécessaire d'avoir une bonne position initiale pour les deux fenêtres de corrélation. Si les paramètres d'orientation externe des stéréo-couples sont connus, une bonne position initiale des fenêtres de corrélation peut être déterminée. Cependant, si le contraste dans les fenêtres est très pauvre, la corrélation peut échouer (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

La corrélation par moindres carrés détermine des paramètres permettant le meilleur ajustement d'une fenêtre de recherche à une fenêtre de référence. Cette méthode prend en compte la gamme de gris et les différences géométriques, ce qui la rend particulièrement utile quand les objets au sol sont différents dans l'image de référence et dans l'image superposée adjacente (par exemple, des différences d'échelle, de teinte, d'orientation). La corrélation par moindres carrés est itérative.

Des caractéristiques géométriques et radiométriques, dérivées des valeurs de niveau de gris des stéréocouples, sont employées pour contraindre la corrélation d'images afin de produire des couples de pixels-images fortement corrélés, précis et fiables. La contrainte la plus utilisée est la géométrie épipolaire associée au stéréo-couple, ceci permet de limiter le secteur de recherche pour établir un couple de pixels-images corrélés. La figure II.21 montre un pixel-image de l'image de référence et la ligne épipolaire de l'image superposée adjacente.

La corrélation automatique d'images peut s'effectuer sur une large fenêtre (par exemple 7*7 pixels) pour une solution rapide mais ceci implique un adoucissement local du relief. Cette solution est implémentée par les logiciels de stéréophotogrammétrie « grand public » qui cherchent une solution « universelle » pour la plupart des applications.

Le MNT final est obtenu au moyen d'une compensation par moindre carré qui s'appuie sur la relation de coplanéité. Les résidus sont minimisés en ajustant chaque position sol. Tous les PH corrélés ne permettent pas de calculer une position sol dans le MNT final, donc les points pour lesquels la compensation par moindres carrés n'aboutit pas sont éliminés.

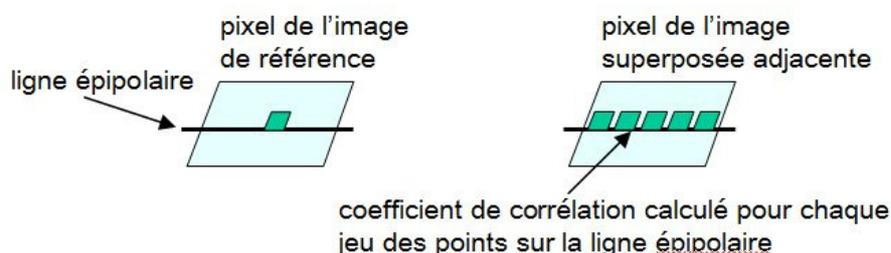


Figure II.21 - Corrélation d'images contrainte par la ligne épipolaire (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

La figure II.22 montre le processus de corrélation d'images en utilisant la géométrie épipolaire comme contrainte géométrique. pk et $p'k'$ représentent les lignes épipolaires et l'intersection des images avec le plan épipolaire. P est le point au sol, X_p , Y_p , et Z_p sont ces coordonnées dans le système de projection terrestre. On utilisant la ligne épipolaire la zone de recherche des pixels ainsi que le temps de calcul sont réduits (Keating et al., 1975 ; Wolf & Dewitt., 2000.).

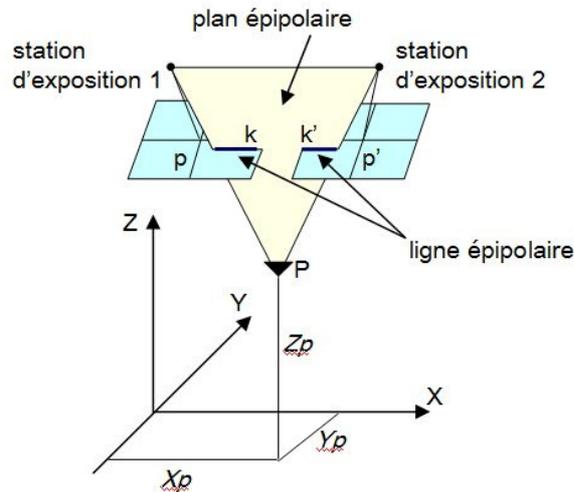


Figure II.22 - La géométrie épipolaire et la condition de coplanéité (d'après Keating et al. 1975).

II.3.1.1.4.2 Corrélateurs image-image dans le domaine des fréquences.

La normalisation de la fonction de corrélation (domaine des fréquences) permet de donner le même poids à toutes les fréquences afin d'obtenir un pic de corrélation étroit et d'augmenter le rapport Signal sur Bruit (Casson et al, 2003). La fonction de corrélation du corrélateur MEDICIS permet donc de calculer précisément les décalages (dans le domaine cartésien) entre les positions de deux points identiques, situés sur deux clichés différents.

La corrélation directe d'images aériennes à très haute résolution spatiale ne donne pas facilement de résultats concluants, les points qui ne corréleront pas peuvent être majoritaires sur les zones à restituer (surtout dans les zones à forte pente). La transformée de Fourier est un moyen performant pour mesurer des décalages en translation mais pas en rotation, et à haute résolution spatiale la rotation devient importante (sans pic de corrélation). La solution c'est ramener la différence de projection de la topographie entre deux clichés stéréoscopiques à une simple translation (préalablement à toute corrélation) par :

- ré-échantillonnage local sur chaque fenêtre de corrélation (sauf les zones à forte pente) ce qui fait augmenter le rapport signal sur bruit ;
- ré-échantillonnage global (projeter l'image 2 dans la géométrie de l'image 1, de manière bilinéaire).

La corrélation dans le domaine des fréquences (Casson et al., 2003) commence par le sous-échantillonnage d'images stéréoscopiques ce qui permet de travailler à différentes échelles

(étape 1) de la plus faible à la plus élevée, où le calcul des décalages peut être affiné. L'image 2 est ré-échantillonnée dans la géométrie de l'image 1 pour le couple de plus basse résolution spatiale, à partir de points homologues (PH). Le décalage initial entre les points homologues est calculé.

La première phase de corrélation de toute la surface est réalisée pour évaluer le décalage moyen entre les deux clichés ré-échantillonnés (étape 2). Puis la phase de corrélation *sensu stricto* est réalisée, sur une fenêtre de corrélation de taille définie avec un pas et une fenêtre de recherches adaptées aux supports. Les données de la première corrélation sont interpolées afin de combler les zones de décorrélation. Les points homologues corrélés lors de la première phase de corrélation sont utilisés pour ré-échantillonner les clichés à une résolution supérieure.

Ensuit une nouvelle corrélation se réalise (étape 3) suivie de l'interpolation (étape 4) des données corrélées. Plusieurs phases de ré-échantillonnage (étape 5) et de corrélations (étape 6) s'enchaînent jusqu'à corrélés les clichés en pleine résolution.

A chaque étape, c'est le cliché brut qui est ré-échantillonné, donc à la dernière étape de la corrélation il n'a subi qu'un seul ré-échantillonnage, les décalages obtenus au cours des corrélations successives sont utilisés afin de calculer les décalages totaux entre points homologues. C'est le passage par les pseudos ortho photos qui permet au corrélateur MEDICIS cette application unique. L'avantage de cette chaîne c'est qu'elle marche pour toutes les données. Quand les images sont de mauvaises qualités, prises avec de conditions très différentes d'acquisition, le passage par les pseudos ortho photos permet de produire une bonne corrélation et donc un MNT de meilleure qualité.

II.3.1.1.4.3 L'approche multi résolutions

Les corrélateurs d'image de dernière génération, type MicMac (Multi-Images Correspondances, Méthodes Automatiques de Corrélation) sont beaucoup plus puissants pour exploiter toute la potentialité de la corrélation d'images entre pixels des couples stéréoscopiques.

Pierrot & Paparoditis (2006) ont développé ce corrélateur, et il est un outil « open source » qui a pour objectif de fournir une solution unifiée permettant de répondre à la majorité des problèmes de calcul de correspondance rencontrés en cartographie. Il fonctionne par discrétisation des espaces objet et quantification de l'espace des parallaxes. Dans chaque étape de l'approche multi résolution, des pas de discrétisation sont définis. MicMac se sert essentiellement du coefficient de corrélation centré-normalisé comme critère d'attache aux données. Il utilise une stratégie multi résolution qui permet de limiter la combinatoire et rend l'appariement plus robuste. Cette stratégie, assez classique, commence par calculer une pyramide de N images à la puissance K , de résolution égale à :

$$2^K \quad K \in [1; N] \quad (9)$$

A la plus basse résolution (moins détaillée), le corrélateur recherche une solution en explorant tout l'intervalle d'incertitude (cet intervalle initial est un paramètre utilisateur). A l'étape courante (résolution 2^K), l'algorithme utilise l'étape précédente (résolution 2^{K+1}) comme un prédicteur permettant de limiter la combinatoire de la manière suivante : la solution de résolution 2^{K+1} s'ajuste à l'échelle de celle de résolution 2^K , puis à partir du

paramètre utilisateur de dilatation planimétrique et altimétrique, l'algorithme calcule deux nappes englobant qui encadrent la recherche.

MicMac utilise une approche énergétique afin d'obtenir une surface cohérente par rapport aux connaissances *a priori* du relief (Pierrot, 2007). Pour cela, l'algorithme recherche un champ de parallaxe P_x qui soit le minimum d'une fonction d'énergie définie par :

$$E(P_x) = \sum A(x, y, P_x x(x, y)) + \alpha * F(G(P_x)) \quad (10)$$

où P_x est la fonction de parallaxe inconnue recherchée, $A(x, y, P_x x(x, y))$ est le terme d'attache aux données représentant la dissemblance entre les images au point de projection (x, y, P_x) , $F(G(P_x))$ est une fonction positive qui dépend des variations de P_x (terme de régularisation qui permet d'exprimer la connaissance *a priori* sur la régularité du gradient), et α est un paramètre permettant de pondérer l'importance relative de l'attache aux données et de la régularisation.

Il est possible d'adopter une autre approche en raison du grand nombre de pixels dans une image, afin de réduire le temps de calcul et d'augmenter la fiabilité de la corrélation. L'image est représentée à plusieurs résolutions spatiales décroissantes (structure pyramidale). Chaque niveau dans la pyramide contient la même image à une résolution différente (figure II.23). Le processus de corrélation est effectué à chaque niveau de résolution, depuis le niveau à plus basse résolution jusqu'au plus haut niveau de résolution.

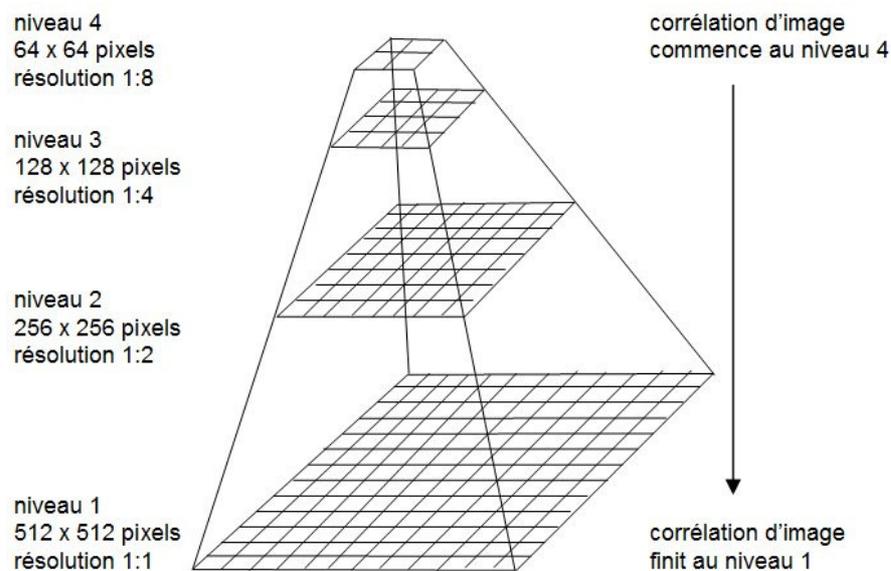


Figure II.23 - Corrélation d'image multi résolution (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).

Pour minimiser cette effet, deux algorithmes sont proposés par MicMac : l'algorithme de coupe minimale qui calcule le minimum exact mais a l'inconvénient d'être assez lent et non utilisable sur les problèmes bidimensionnels ; et l'algorithme de programmation dynamique qui ne calcule qu'un pseudo optimum mais a l'avantage d'être plus rapide et généralisable aux problèmes bidimensionnels.

MicMac est une boîte à outils fournissant un ensemble d'algorithmes que l'utilisateur peut enchaîner via un fichier texte de paramètres (suivant la syntaxe XML). Cet aspect « boîte à outils hautement paramétrable » vise à apporter la souplesse et la généricité nécessaire à un outil de recherche. La contrepartie est une relative complexité (il faut maîtriser les spécifications des briques élémentaires), ce qui n'est pas trop pénalisant dans le cadre de l'utilisation en laboratoire (Pierrot, 2007).

Avec MEDICIS ou Micmac le paramètre clef, essentiel, est la taille de la zone (ou fenêtre) de corrélation en pixels. Plus les conditions pour l'application de la stéréophotogrammétrie se dégradent (images très différentes par hauteur et angle de prise de vue, non verticalité, fort dénivelé, couverture végétale), plus grande est la zone de corrélation.

II.3.2 3D par approche terrestre

L'approche terrestre dans la caractérisation de ravines est dirigée vers le suivi local et diachronique de l'érosion dans toutes ces formes, ainsi que vers la modélisation physique de ces manifestations sur le terrain. Au contraire de l'érosion en nappe et en rigoles, où des procédures normalisées pour l'évaluation des taux d'érosion existent depuis des décennies (p.e. parcelle d'érosion employée couramment pour rassembler des données de perte de sol), aucune procédure normalisée n'est disponible pour mesurer des taux d'érosion par ravinement et leurs facteurs de contrôle (Poesen et al., 2003). Les moyens le plus couramment utilisés sont ceux du levé terrain classique, comme le GPS (système de Géopositionnement par Satellite) et le tachéomètre.

II.3.2.1 Système de géo-positionnement par satellite (GPS)

Le GPS permet qu'une personne ou un objet quelconque muni d'un récepteur puisse se localiser et s'orienter sur terre, sur mer, dans l'air ou dans l'espace au voisinage de la Terre, à l'aide des signaux transmis par un réseau de satellites spécialisés, avec une précision sans précédent. Le récepteur doit être équipé des circuits électroniques et des logiciels nécessaires au traitement des informations reçues.

Le système GPS comprend au moins 24 satellites orbitant à 20 200 km d'altitude. Ces satellites émettent en permanence sur deux fréquences L1 (1575,42 MHz) et L2 (1227,60 MHz) un signal complexe, constitué de données numériques et d'un ensemble de codes pseudo-aléatoires, daté précisément grâce à leur horloge atomique. Les données numériques, transmises à 50 bit/s, incluent en particulier des éphémérides permettant le calcul de la position des satellites, ainsi que des informations sur leurs horloges internes. Les codes sont un code C/A (acronyme de coarse acquisition, acquisition grossière) à 1,023 Mbit/s et de période 1 ms, et un code P (pour précision) à 10,23 Mbit/s avec une période de 280 jours. Le premier est librement accessible, le second est réservé aux utilisateurs autorisés. Les récepteurs commercialisés dans le domaine civil utilisent le code C/A. Quelques rares utilisateurs civils spécialisés, comme les organismes de géodésie, ont accès au code P.

Ainsi un récepteur GPS qui capte les signaux d'au moins quatre satellites peut, en calculant les temps de propagation de ces signaux entre les satellites et lui, connaître sa distance par rapport à ceux-ci et, par trilatération, situer précisément en trois dimensions n'importe quel point placé en visibilité des satellites GPS avec une précision métrique pour le système standard. La trilatération est une méthode permettant de déterminer la position relative d'un point en utilisant les distances entre un minimum de deux points de références, tandis que la triangulation utilise les angles et les distances pour positionner un point.

Le DGPS (Differentially corrected Global Positioning System) est un système très performant pour le calcul de coordonnées 3D d'un point dans l'espace, qui corrige la position obtenue par le GPS conventionnel à l'aide de données envoyées par une station terrestre de référence localisée très précisément. La méthode DGPS « statique » demande que les récepteurs GPS (tant la base comme le mobile) soient stationnaires. C'est la

méthode qui produit la précision plus élevée possible (sous-centimétrique en planimétrie, quelques centimètres en altimétrie). Les contraintes de cette méthode sont le temps nécessaire pour calculer les coordonnées d'un point, et la nécessité de post-traitement des données (Mora et al., 2003).

Dans le cas de la méthode statique, la qualité finale dépend du temps de mesure, des spécifications de l'équipement utilisés, ainsi que des conditions d'acquisition idéales (bonne réception de signal : relief pas trop encaissé et bonnes conditions météorologiques).

La méthode DGPS « cinématique en temps réel » (RTK, real time kinematic) permet l'acquisition des données avec un récepteur complètement mobile. La précision 3D en RTK est moins importante qu'en statique (centimétrique mais en dessous de 5 cm). Néanmoins, la méthode RTK permet d'effectuer beaucoup plus de mesures que la méthode statique dans le même temps (Mora et al., 2003). Elle nous permet aussi de connaître l'erreur de la mesure en temps réel, or il n'y a pas besoin de post-traitement de données (contrôle de qualité du levé en temps réel).

II.3.2.2 Tachéomètre

Le tachéomètre est un appareil servant dans les mesures d'angles horizontaux et verticaux pour déterminer des directions, mais aussi dans la mesure de distances. Le théodolite par contre est équipé d'un télémètre stadimétrique, ceci est un instrument optique qui permet d'estimer les distances en comparant un objet de grandeur connue avec une échelle contenue dans l'instrument. Un théodolite est vraiment un « tachéomètre » si l'appareil est capable de « mesurer » des distances par lui-même.

La mesure des distances dans le tachéomètre se fait grâce à un télémètre à visée infrarouge intégrée, à l'aide d'un prisme réflecteur tétraédrique « catoptrique » (système optique rétro réfléchissants), placé à la verticale du point que l'on souhaite mesurer à l'aide d'une nivelle sphérique. La mesure peut être effectuée au laser avec le même système réflecteur, et même sans réflecteur, ce qui permet de collecter des mesures de points inaccessibles.

Le tachéomètre est aussi appelé « station totale » et il permet de stocker dans une carte mémoire les mesures effectuées sur le terrain, pour les transférer et les traiter ensuite par ordinateur grâce à des programmes spécialisés. Des stations totales intégrant un système GPS sont aussi disponibles.

II.3.2.3 Méthodes d'observation de l'érosion *in situ*

Poesen et al. (2003) présentent une synthèse bibliographique des travaux de terrain et de techniques de laboratoire employés afin d'évaluer des taux d'érosion par ravinement à diverses échelles temporelles (tableau II.3). Nous pouvons observer que les techniques aériennes commencent à être utilisées pour l'étude de l'érosion par ravinement à court terme, tandis qu'elles ont été utilisées couramment pour les études à moyen et long terme.

Tableau II.4 - Relation entre l'échelle temporelle et les techniques utilisées pour l'étude de l'érosion par ravinement (adapté de Poesen et al., 2003).

échelle temporelle	période du temps	approche	techniques
court terme	< 1 à 10 ans	terrestre et aérienne	LiDAR terrestre drone ou ULM
moyen terme	10 à 70 ans	aérienne et terrestre	photographie aérienne, observation des racines
long terme	> 70 ans	aérienne	photographie aérienne images satellitaires

Pour l'étude de l'érosion hydrique par écoulement en griffures et en nappe, il existe des techniques standardisées de terrain comme la parcelle d'érosion, employée couramment pour rassembler des données de perte de sol. Par contre, aucune procédure normalisée n'est disponible pour mesurer des taux d'érosion par ravinement et ses facteurs de contrôle (Poesen et al., 2003).

Des techniques de terrain ont été employées pour évaluer les volumes érodés par ravinement à court terme (Valcárcel et al., 2003 ; Auzet et al., 1995 ; Casali et al., 1999 ; Sancho et al., 1991). La surveillance à court terme de la tête d'une ravine ou du retrait de ses parois a été conduite en mesurant régulièrement le changement de la distance entre le bord de la ravine et des repères installés autour d'elle.

L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (Food and Agriculture Organization, FAO) propose une méthode pour caractériser les ravines (Hudson, 1993). Cette méthode cherche à établir le suivi de la diffusion horizontale et le changement vertical des ravines (figure II.23, a et b respectivement) par mesures directes sur le terrain.

Pour le suivi de la diffusion horizontale la méthode propose de mettre en place une grille rectangulaire des repères d'érosion à un intervalle régulière de 2 à 5 m, afin de mesurer la superficie de la ravine, les changements de l'étendue du ravinement, ainsi que l'effondrement des parois (figure II.23a).

La superficie de la ravine peut être tracée avec des mesures le long des lignes de la grille des repères les plus proches du bord de la ravine. Les lignes de la grille servent également pour le tracé des sections transversales le long de la ravine. Une corde est étirée au niveau du sol suivant les lignes de la grille des repères, avec des marqueurs à intervalles fixes d'un mètre par exemple. À chaque marqueur sur la corde la profondeur est mesurée du fond de la ravine afin de tracer la section transversale à un intervalle régulier le long de l'axe principal. Le volume des sédiments déplacés de la ravine est calculé en utilisant la surface des sections transversales successives et la distance entre chaque section (figure II.23b). Les mesures diachroniques suivantes vont permettre d'établir le suivi de l'érosion par ravinement.

Un autre moyen, plus précis, pour surveiller l'évolution d'une ravine est en mesurant par contact direct sa morphologie tridimensionnelle (figure II.24), à l'aide d'une structure verticale fixée au sol (Sneddon et al., 1988). Ce système possède une base graduée pour mesurer les angles par séries de 10° chaque 50mm de profondeur.

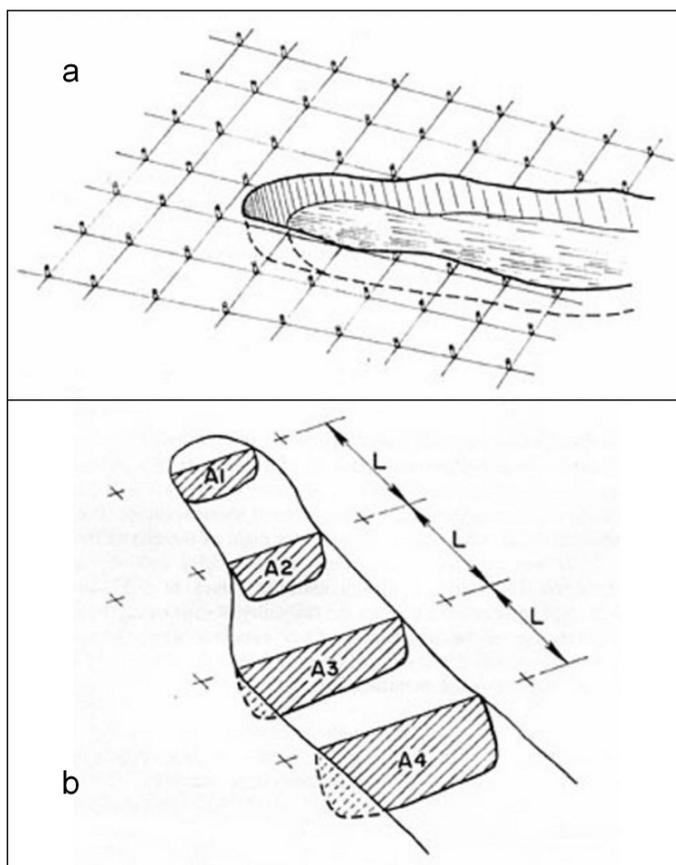


Figure II.24 - Mesure d'une ravine : a) diffusion horizontale, et b) changements verticaux (Hudson, 1993).

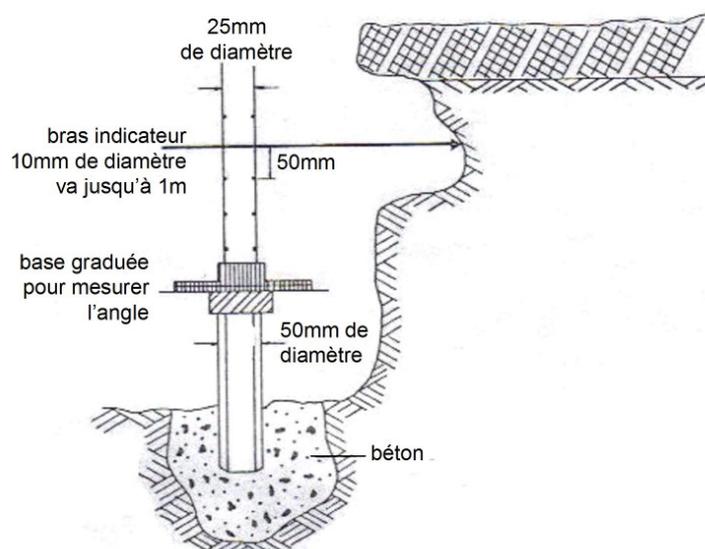


Figure II.25 - Méthode de mesure par contact direct (Sneddon et al., 1988).

La FAO propose aussi une méthode pour mesurer l'ablation ou l'érosion en nappe en utilisant des tiges en métal de faible diamètre (figure II.25). Une augmentation de la longueur de la tige exposée montrera combien la pente a perdu de sédiments. Cependant cette technique ne devrait pas être employée quand le placement des tiges affecte la résistance du sol à l'érosion.

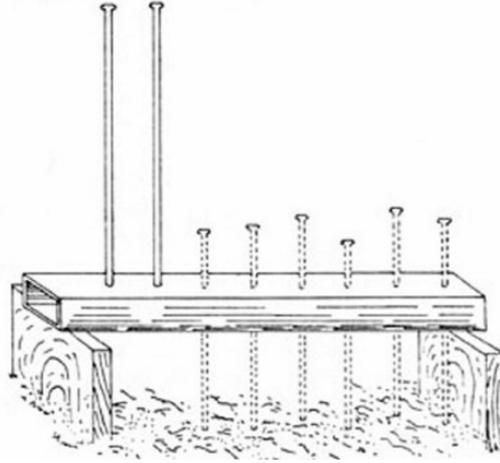


Figure II.26 - Mesure de l'ablation (Hudson, 1993).

Même si ces genres de méthodes de terrain ont aidé à la compréhension des processus de ravinement ainsi que d'ablation, elles ont aussi des contraintes importantes qui limitent significativement la portée dans la recherche de ces phénomènes. Ces sont des méthodes « intrusives » qui requièrent un effort énorme sur le terrain ainsi que des personnels, et souvent elles vont empêcher le déroulement des processus d'érosion naturels. Même si ces techniques sont assez précises, des questions de résolution, rapidité et répétitivité ne sont pas à l' hauteur des besoins. L'érosion concentrée est mal prise en compte par les méthodes de terrain disponibles car elle met en jeu des interactions complexes dans l'espace et dans le temps entre différents processus intervenant dans la genèse du ruissellement, l'arrachement et le transport de sédiments (Auzet et al., 1990).

D'autres moyens ont été utilisés pour décrire la topographie d'une ravine, comme la photogrammétrie terrestre (Pozzobon, S.D. ; Sneddon et al., 1988). Cependant, d'énormes contraintes existent pour l'utilisation des techniques photogrammétriques sur un objet aussi irrégulier qu'une ravine. Le rapport entre la ligne de base et la distance à l'objet, la distance focale, l'orientation angulaire, et les conditions d'illumination, vont être difficile à gérer étant donné aussi la complexité morphométrique de l'objet à étudier.

Plusieurs études ont appliqué des techniques photogrammétriques aux photographies aériennes séquentielles et à grande échelle afin de déterminer le volume de sol perdu par érosion due à des écoulements concentrés (Martínez-Casasnovas, 2003; Martínez-Casasnovas et al., 2003; Mora et al., 2003; Demoulin, 2006; Nichol et al., 2006). Ritchie et al. (1994) ont mesuré des sections transversales des ravines utilisant un altimètre laser monté dans un avion. Bien qu'on ait proposé plusieurs nouvelles techniques, peu de ces dernières ont été examinées dans un cadre environnemental.

II.4 ÉVALUATION DE LA QUALITE DES MNT

La production d'un MNT peut devenir une opération très compliquée, longue et coûteuse, et elle n'est pas le but de la plupart des utilisateurs intéressés dans l'analyse superficielle du terrain (Dietrich et al., 1993). La plupart des MNT nous fournissent une information nette et détaillé sur la topographie, peu importe la source. Ceci peut donner aux utilisateurs une fausse sensation de sécurité concernant la qualité des données numériques de terrain (Wechsler, 2007). Plusieurs études supposent la fiabilité des MNT même sans établir une évaluation de qualité.

Lors qu'on s'en sert de la stéréophotogrammétrie pour créer un MNT, on fait une « mesure » de l'altitude. Une erreur représente l'écart entre une mesure et sa valeur réelle. En termes familiers, une erreur a une connotation négative et indique une action qui aurait pu être évitée si assez de précaution avait été prise (Taylor, 1997). Cependant, dans le cadre des données spatiales, ni l'erreur ni l'incertitude résultante ne peuvent jamais être éliminées, elles sont inévitables et doivent donc être comprises et expliquées (Wechsler, 2007).

La qualité globale d'un MNT dépend à son tour de la qualité et de la densité des points d'altitude saisis (phase 1, figure II.26), ce qui couvre des erreurs aléatoires et humaines dans l'acquisition de données, comprenant des erreurs provoquées par l'équipement de mesure ou par la chaîne de traitement suivi dans la génération de nuage de points. S'il s'agit de la stéréophotogrammétrie numérique, il faut considérer les différentes sources d'erreur de la technique elle-même. La qualité d'un MNT résultant de la corrélation d'un couple photo stéréoscopique est loin d'être homogène tout au long de sa surface. Il faut prendre en compte toutes les sources d'incertitude de la méthode :

- Les paramètres d'orientation interne ou les imperfections de l'optique de l'appareil photo : la déformation de la lentille n'est pas distribuée de façon homogène. L'incertitude dans le calcul de la distance focale ainsi que la position du point principal de symétrie peuvent affecter aussi la distribution des erreurs.
- Les paramètres de l'orientation externe ou la référence spatiale et terrestre de la géométrie des prises de vues stéréoscopiques : les erreurs dans le calcul de la position et de l'orientation de l'appareil photo au moment de la prise de vue de chaque couple stéréoscopique. Les incertitudes dues à la référence terrestre (les coordonnées et la distribution spatiale de points de contrôle) pendant l'aérotriangulation peuvent produire aussi des erreurs dans la restitution du relief.
- La corrélation d'images elle-même est contrôlée par le contraste dans chaque image du couple stéréoscopique : plus fort est le contraste, plus des points homologues seront effectivement corrélés. De fausses corrélations se produisent quand l'algorithme de corrélation trouve un pixel dans chaque image stéréoscopique qui satisfait aux critères de corrélation (comme le coefficient de corrélation), alors que dans la réalité ce pixel ne correspond pas au même objet dans les deux images, d'où il résulte une mesure fautive de l'altitude.
- L'interpolation du MNT raster à partir du nuage de points 3D obtenu par corrélation des couples stéréoscopiques. Ce nuage de points à l'origine est déjà affecté par les erreurs (y

ces MNT ont été construits, sur les traitements subis, ou sur la distribution des erreurs finales (Holmes et al., 2000).

Les tâches typiquement impliquées dans l'analyse numérique de terrain, de la saisie de données d'altitude aux applications géospatiales ont tendance à introduire de l'incertitude (Oksanen, 2006).

Dans la phase 2 « génération des MNT » (figure II.26) des erreurs peuvent se produire aussi. Afin de créer un modèle du relief « en continu » à partir de données discrètes (nuage de points 3D), nous utilisons un algorithme d'interpolation. Ceci constitue une autre source d'erreur. Tous les algorithmes d'interpolation vont introduire un biais de calcul, propagé dans l'espace en fonction de l'opérateur mathématique utilisé. Le modèle de représentation numérique du relief choisi, ainsi que la résolution finale du MNT, vont aussi introduire des erreurs (Kienzle, 2004). Cette qualité « complexe » contrôlera les simulations ultérieures de processus superficiels.

La phase 3 « analyse – visualisation » (figure II.26) se compose de l'incertitude qui se produit à partir des algorithmes sélectionnés pour le calcul de produits dérivés et leurs suppositions. Ces produits dérivés serviront à la fois dans la simulation des divers phénomènes environnementaux. Pour finir, l'incertitude dans la phase 4 « interprétation et application » (figure II.26) peut être liée au décalage dans l'interaction utilisateur-ordinateur, ce qui peut être le résultat d'une analyse de propagation d'erreur pas assez approfondie (Oksanen, 2006).

Holmes et al. (2000) mentionnent que les erreurs d'un MNT vont affecter plus dramatiquement les dérivés secondaires ou les dérivés combinés étant donné la quantité des pixels qu'ils utilisent pour leurs estimations, reposant sur des écarts entre valeurs incertaines et proches. Même une petite quantité d'erreur en l'altitude pourrait affecter de façon significative le résultat, comme le calcul de l'accumulation de flux, l'indice topographique, la pente, et les applications qui dépendent à la fois de ces dérivés.

Lane (2000), mentionne qu'il existe trois éléments importants par rapport à la qualité des MNT, dans l'application de la stéréophotogrammétrie numérique pour l'étude de morphologie de rivières. Premièrement, avec la disponibilité de logiciels spécialisés en stéréophotogrammétrie numérique dès nos jours, le nombre d'utilisateurs non spécialisés a augmenté. La signification des paramètres de base de la stéréophotogrammétrie est critique dans ses applications, et elle est un facteur souvent ignoré. Deuxièmement, pendant que la stéréophotogrammétrie numérique a augmenté significativement la quantité de points de relief repérés par corrélation automatique d'images, à nos jours il n'existe pas de méthodes pour détecter automatiquement des fausses corrélations, donc des modifications à la main sont nécessaires. Comme troisième point, l'étude de la topographie naturelle soulève la difficulté de produire assez de données de contrôle de qualité d'un MNT (vérité terrain). Ces données doivent être utiles pour identifier les erreurs mais aussi pour produire des statistiques fiables de précision.

La disponibilité d'images avec une résolution de plus en plus détaillée révèle une autre faiblesse dans la chaîne de traitement : la précision avec laquelle on obtient les coordonnées terrestres des points d'évaluation de qualité ou de validation. Dans la mesure où les méthodes de production des MNT sont plus accessibles aux utilisateurs non spécialisés, le problème de validation de produits dérivés est plus important. Étant donné que la résolution spatiale attendue d'un MNT (créé par stéréophotogrammétrie numérique) est équivalente à celle de l'image originale (taille de pixel), les exigences par rapport à la

précision de mesure des coordonnées des points de contrôle terrestre et des points de validation ont augmenté significativement ces dernières années. Cette situation ajoute encore un nouveau défi de maîtriser les techniques de levé topographique de terrain de haute précision comme la tachéométrie (station centrale) et le GPS différentiel.

Il existe plusieurs façons d'évaluer la qualité d'un MNT, à part l'évaluation classique du calcul de l'exactitude par laquelle un point est positionné dans l'espace tridimensionnelle. D'autres auteurs mentionnent aussi comme méthodes d'évaluation de qualité des MNT : la possibilité de récupérer un objet entier comme le réseau hydrique d'un versant (« completeness » ; Helmlinger et al., 1993) ; la cohérence logique (« logical consistency » ; Liu et al., 1999), et l'exactitude temporelle (« temporal accuracy » ; Stevens et al., 2002 ; Rabus et al., 2003).

Holmes et al. (2000) mentionnent que les techniques géostatistiques constituent des procédures efficaces d'évaluation de la qualité d'un MNT, permettant la mesure de l'exactitude des évaluations, et assignent des intervalles de confiance aux évaluations en traitant la variable d'intérêt comme aléatoire. Néanmoins, l'analyse géostatistique de données topographiques a un comportement particulier. Les variogrammes des données topographiques n'ont aucune raison d'atteindre un sommet. D'autre part, les variogrammes des erreurs ont souvent une auto-corrélation spatiale. Pour être analysées, les données topographiques doivent être transformées selon une distribution normale standard.

II.5 REFLEXION FINALE

Le suivi tridimensionnel des processus d'ablation de versants marneux a besoin de méthodes de caractérisation précises et détaillées, avec une forte fréquence d'acquisition des données. La « résolution-précision » de ces mesures devrait être de quelques centimètres (voire de quelques millimètres) et la « fréquence temporelle » devrait être de plusieurs observations par saison, en fonction de la magnitude du processus d'ablation (bilan résolution-précision-fréquence).

La stéréophotogrammétrie numérique par corrélation d'images prises par un vecteur léger semble être une technique prometteuse pour les résolutions spatiales et temporelles dans l'étude de ravines élémentaires, même si dans les études actuelles la précision est toujours loin de celle exigée pour détecter des objets linéaires d'érosion concentrée à cette échelle. A présent, la taille de pixel du MNT de cette application est assez détaillée (quelques centimètres) mais la précision résultante en Z est plus faible que la précision laquelle on pourrait s'attendre, étant donné la taille des pixels d'origine. Cette technique pourrait être une alternative appropriée pour satisfaire les besoins de détection des objets linéaires à une échelle de ravine élémentaires, si la précision est sensiblement améliorée jusqu'à atteindre leur potentiel.

La stéréophotogrammétrie à partir des images prises par un vecteur léger est soumise à une multiplicité de sources d'erreurs qui commence avec l'utilisation d'un vecteur instable ainsi qu'une chambre photo non métrique (Raclot et al., 2005). Pour atteindre la précision théorique maximale il est nécessaire d'établir une stratégie adéquate couvrant toute la chaîne de traitement stéréophotogrammétrique.

La littérature ne fournit pas de solution précise pour des MNT fins issus des vecteurs légers, nous proposons d'y répondre à ces besoins. Notre but est alors de préciser les points où la méthode devient particulière, et de vérifier jusqu'où les incertitudes citées sont surmontables et à quel compromis « qualité / souplesse d'utilisation » il est possible d'accéder.

Dans la caractérisation 3D des ravines élémentaires en zones marneuses à fort relief par des moyens de télédétection, on cherche à déterminer des éléments spatiaux avec une résolution très fine pour mieux comprendre l'hydrologie de ce milieu et les processus d'érosion. Les paramètres nouveaux sont multiples et ne peuvent pas tous être obtenus par les mêmes techniques. Nous nous intéressons aux éléments de caractérisation très fine du MNT pour des besoins de modélisation hydrologique ou pour extraire des paramètres liés à l'érosion hydrique (i.e. pente des versants, pente du fond des thalwegs, ombres, réseau hydrographique, changement de morphologie des versants et de ravines, changement du microrelief par ablation ou dépôt, etc.). Selon les paramètres recherchés les précisions spatiales et temporelles seront différentes, et les méthodes d'observation spatiales devront être adaptées.

La description des processus d'érosion à l'échelle de ravines élémentaires demande une très haute précision et résolution spatiale des MNT à utiliser. Les études d'états de surface (texture, rugosité, couverture végétale, plaques d'érosion) et les conditions hydrologiques

de versants (griffures, rigoles, ravines) ont besoin d'une résolution-précision spatiale très fine. Cette résolution-précision spatiale à deux ou trois dimensions peut aller de quelques millimètres à quelques centimètres.

L'étude de changement dans le microrelief des versants marneux nus a besoin d'une résolution-précision spatiale et temporelle plus fine que pour le suivi de dépôts au fond de thalwegs, et le processus de glissement de terrain. Cette résolution-précision tridimensionnelle dépend de la dynamique des processus d'érosion locale et elle peut être de quelques millimètres.

Classiquement les MNT disponibles dans ce type de milieu sont au mieux de résolution métrique avec des précisions en altitude du même ordre de grandeur. Nous allons tester des techniques pour attendre des niveaux des précisions plus fins, de types décimétrique et centimétrique, en vue d'observer certains traits du paysage qui ne sont pas accessibles avec des données à 1 m de résolution.

La méthodologie que nous allons proposer ici ne consiste pas à créer de nouveaux processus de traitement informatique pour la construction d'un MNT, mais plutôt à utiliser des outils existant pour répondre au mieux à la problématique d'un MNT fin sur zone érodée que nous faisons reposer sur trois éléments contraignants (Figure II.28) :

- une résolution d'images très fine, exprimée en centimètres alliée à une précision altimétrique du produit final (MNT) également en centimètres ;
- un souci de méthodes opératives simples (faible coût, rapide à mettre en place, et d'application facile) ;
- un contexte difficile de relief tourmenté montagneux.

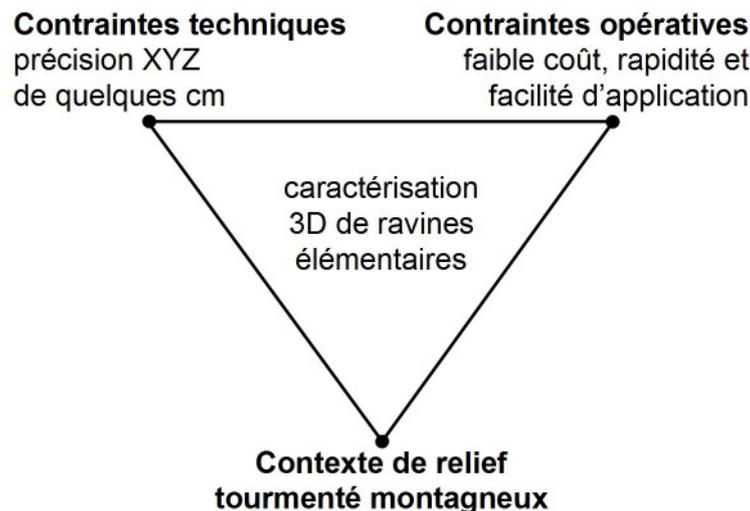


Figure II.28 - Les éléments contraignants de la recherche.

L'originalité de notre recherche se trouve dans un souci d'équilibre entre ces trois éléments qui constituent des contraintes pour cette application. Nous proposons ici de nous pencher sur deux types de précisions et donc deux types d'approches spatiales.

Pour la première approche spatiale nous allons utiliser des techniques aériennes afin de construire des MNT avec des précisions de l'ordre de quelques décimètres, voire centimètres (Troisième partie).

D'autre part, nous allons tester l'apport des techniques terrestres pour accéder à des précisions de l'ordre de quelques centimètres, voire millimètres (Quatrième partie). Cette technique terrestre devrait être utile pour une analyse et un suivi de tous les mouvements fins de la surface des ravines (tels que ablation, dépôt, présence ou absence de rigoles élémentaires).

A l'intérieur de chaque approche notre travail va être décomposé en deux parties. D'abord définir les étapes et les paramètres des chaînes complètes et cohérentes de création des MNT avec la précision recherchée, afin de pouvoir les réutiliser dans d'autres contextes de zones érodées. En parallèle, nous allons développer un ensemble de travaux spécifiques pour permettre une validation fine de chaque élément de la chaîne de création des MNT. Ces techniques devront nous permettre d'estimer tout ce qui concerne les réseaux hydrographiques, pentes et changement de morphologie.

TROISIÈME PARTIE
APPROCHE AÉRIENNE

III.1 MÉTHODOLOGIE

Dans la partie aérienne, notre choix préalable a porté sur une méthodologie basée sur des méthodes simples et en utilisant des vecteurs légers et des appareils photo « grand public » pour développer des suivis faciles à mettre en œuvre et d'un coût abordable. Ceci entraîne une grande facilité lors de la prise de vue pour ce qui est de la mise en œuvre de l'acquisition mais conduit à des précautions spécifiques lors des phases de terrain et de traitement d'images : installation des mires, rectification de lentilles, etc.

Vu la précision recherchée, nous proposons d'utiliser un vecteur aérien léger de type drone (avion d'aéromodélisme télécommandé) équipés d'un appareil photo numérique et volant à basse altitude. Nous allons détailler ci dessous la méthodologie à utiliser pour définir les choix différents solutions et les paramètres associés. Nous détaillerons successivement les éléments de la chaîne d'obtention d'un MNT à partir des images drone, par stéréophotogrammétrie numérique. En parallèle, nous cherchons à développer une stratégie de validation basée sur des nombreux points de mesure sur le terrain, pour servir de géo-référencement à tout ce qui est fait dans la zone d'étude.

Toutefois, il y a une double raison pour acquérir les points de terrain, d'une part une petite quantité doit servir pour le calage et la construction des MNT, d'autre part la plus grande partie de ces points va servir dans la phase de validation des MNT. Nous présenterons l'acquisition de tous ces points de terrain dans un seul paragraphe.

En conséquence, les étapes successives pour la création d'un MNT seront : la définition des choix de base principaux de la mission, le vol et les observations de terrain, le calcul informatique des MNT, la validation et l'analyse de précision.

III.1.1 Définition des choix de base principaux de la mission

On peut organiser les choix de caractéristiques de la mission en deux types : avant et après le vol.

III.1.1.1 Avant le vol

Le choix préalable concerne la précision souhaitée pour le MNT, centimétrique ou décimétrique, impliquant des choix d'image, de stéréoscopie et de corrélation d'image.

Les choix d'image concernent la taille du pixel au sol des images à acquérir, et par conséquent l'altitude du vol et la focale de l'objectif. Par exemple, on peut obtenir une résolution au sol de 2 cm en volant à 60 m d'altitude et pour une matrice 3000*3000 et une focale de 80 mm, ce qui peut être obtenu par drone. Une image de 20 cm de résolution sera obtenue à 600 m d'altitude pour le même appareil, ce qui est possible avec des vecteurs de type ULM (ultraléger motorisé).

Les choix des conditions stéréoscopiques sont relatifs à un B/h adapté au relief des ravines, soit une valeur *a priori* de l'ordre de 0,3, ainsi qu'à un recouvrement entre couples stéréoscopiques d'au moins 60%. Les choix des conditions de corrélation d'images concernent l'obtention d'un bon contraste en évitant les ombres (important dans le choix de l'heure de prise de vue), les conditions d'illumination et la saturation des images sur les zones bien ensoleillées (sachant qu'une légère couverture nuageuse peut être favorable).

Un dernier choix important en planification du vol concerne l'installation de mires contrastées, en nombre suffisant et bien distribuées.

III.1.1.2 Après le vol

Les choix des méthodes de prétraitement (correction de lentilles et auto calibrage) et de traitement d'images (choix de corrélateur d'images), influent directement sur la qualité des résultats. On testera l'impact de différentes méthodes sur cette qualité.

III.1.2 Géoréférencement et vol

Etant donné la résolution souhaitée et les choix dérivés (vecteur drone avion, appareillage photo numérique « grand public », et hauteur de vol entre 60 et 100 mètres), les activités de préparation de terrain pour les missions drone avion seront lourdes et en même temps déterminantes dans le résultat final à obtenir (qualité du MNT).

La précision requise dans le calcul de la position du capteur à l'instant de la prise de vue pour une utilisation en stéréoscopie drone, pour des altitudes entre 50 et 200 m est estimée de l'ordre de 1 m en planimétrie et en altimétrie. Cette précision n'est pas atteignable par les GPS légers mono fréquence et non différentiels. Pour atteindre cette précision, deux solutions sont possibles par mesure embarquée lors du vol ou par recalage *a posteriori* à l'aide du repère au sol (mires).

Si la mesure directe de la position du capteur résout théoriquement le problème, en pratique de nombreuses contraintes la rendent difficile. La limite du drone en charge utile est très faible (3 ou 4 kg), empêche de porter un GPS différentiel ou une centrale inertielle précise. Par ailleurs, une telle utilisation pendant la prise de vue pourrait être dangereuse pour le drone car le relief très tourmenté de la zone est difficilement compatible avec le maintien d'une hauteur de vol très basse et constante.

La solution retenue consiste en un guidage du drone de façon manuelle puis une mesure indirecte de la position du capteur effectuée *a posteriori* à l'aide de mires. Nous indiquerons au paragraphe suivant le mode de calcul de la position du capteur, et précisons ici notre solution d'installation et de répartition des mires dans les images.

III.1.2.1 Stratégie d'installation des mires

Pour bien calculer la position du capteur on propose d'installer sur le terrain, avant le vol, des mires qui seront visibles sur les photographies aériennes au moment du traitement. Les critères d'installation que nous avons retenus sont : des mires en nombre suffisant (un minimum de 5 mires par zone de recouvrement de chaque stéréo-couple), bien distribuées dans chaque image, d'une taille minimale de 3 fois le pixel prévu pour l'image, et d'un contraste fort avec le contexte. La qualité du positionnement devra être de l'ordre du pixel prévu.

Les contraintes liées au contexte local et aux conditions de vol, nous obligent à modifier les valeurs indiquées ci-dessus. Il faut tenir compte en effet du relief tourmenté qui ne facilite pas la répartition régulière des mires, ainsi que de l'instabilité du vol d'un vecteur léger en guidage manuel qui ne peut pas garantir une trace de vol bien linéaire.

La répartition ne peut pas par conséquent être optimisée *a priori*. Ceci nous force à augmenter le nombre des mires au sol et nous avons choisi de le doubler, soit 10 mires en moyenne par image, de façon à garantir au final une distribution homogène avec un minimum de 5 ou 6 mires opérationnelles.

En raison du nombre des mires à installer et des conditions de relief tourmenté, le matériel pour construire les mires doit être peu coûteux et facilement transportable. Notre choix s'est porté sur des plaques plastifiées carrées de taille différente et superposées, avec des couleurs vives contrastées.

Une qualité de positionnement requise de quelques centimètres s'impose (celle de GPS différentiel, ou DGPS) pour les mires au sol (ou point de contrôle terrestre, PCT), afin de pouvoir faire un calcul précis *a posteriori* de la position du vecteur en fonction des éléments de l'image.

III.1.2.2 Stratégie de géoréférencement sur la zone d'étude

Le géoréférencement de la zone d'étude vise plusieurs objectifs : l'un relatif à toutes les études menées par les différents acteurs du GIS-DRAIX, l'autre plus spécifiques au calcul de notre MNT, et également un besoin de repères de terrain positionnés avec grande précision pour la phase de validation (cf. § IV.5). Nous avons retenu une stratégie de géoréférencement hiérarchique pour répondre à tous ces besoins en même temps.

D'une part on va se relier à une référence topographique nationale à l'aide des bornes IGN les plus proches du site. D'autre part on va mettre en place un réseau de bornes permanentes (BP) comme relais local du géoréférencement. On pourra alors repérer tout point sur le terrain (par exemple une mire ou un point de validation), en liaison avec la borne permanente la plus proche. De cette façon on aura un réseau hiérarchisé de bornes (tableau IV.1) qui fait le lien entre le réseau des bornes IGN disponibles dans la région d'étude, et un réseau local de bornes permanentes (BP) à mettre en place (figure IV.1). Une fois calculées les coordonnées des bornes permanentes (BP) en utilisant une borne IGN

comme base pivot du système DGPS, ces BP pourront être utilisées comme pivot à leur tour pour le levé des PCT ou des points de validation dans le site d'étude.

Le passage des BP aux mires (PCT) ou aux points de validation (PV) pourra être effectué à partir d'appareillages mixtes, par exemple des DGPS et de la topographie classique par tachéomètre. Attention, il est indispensable d'avoir un protocole d'utilisation du système DGPS (modèle de Géoïde, coordonnées du pivot, stratégie de mesure, entre autres), sinon en risque d'obtenir des incohérences entre les différentes campagnes de lever de terrain à réaliser. Un point clef dans la stabilisation et la normalisation des missions DGPS sont les coordonnées de la station choisie comme base ou pivot de chaque mission. Les BP pourront être utilisées aussi comme station de base d'un tachéomètre.

Tableau III.1 - Réseaux hiérarchiques de bornes et points de contrôle terrestre.

nom	description	type de repère	réalisation	hiérarchie
IGN	borne IGN	borne	-	repère de base
BP	Borne permanente	permanent	ex : plot en béton	local, lié à IGN
PCT ou « mires »	mires (image) ou point de contrôle terrestre	semi permanent	ex : carton coloré ou peinture	local, lié à BP
PV	point de validation	points sans repère au sol	points sans repère au sol	local, lié à BP

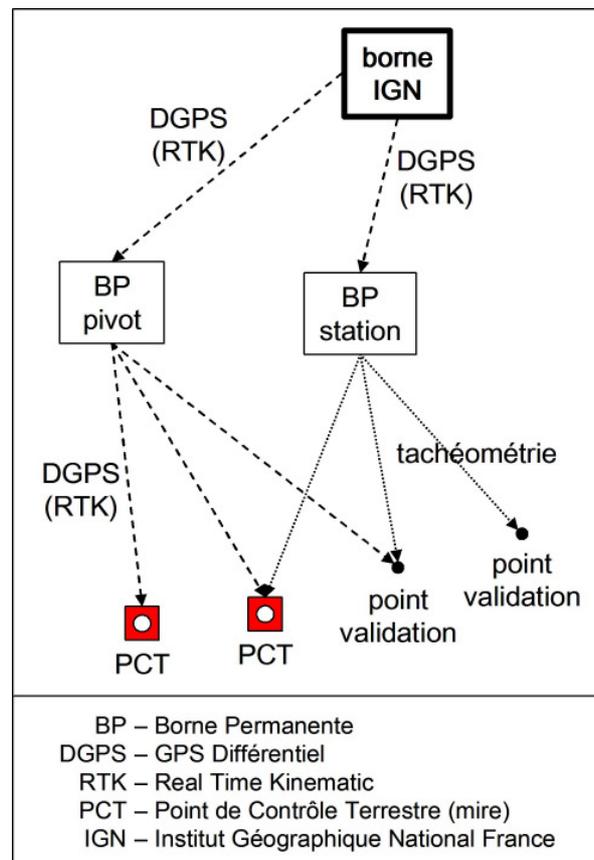


Figure III.1 - Stratégie hiérarchique pour la normalisation du levé terrain : connexion au réseau des bornes IGN, et connexion au réseau des bornes locales.

Afin de mettre en place une stratégie de surveillance diachronique de l'érosion en montagne au moyen de la stéréophotogrammétrie par images drone, il faudrait installer un réseau des mires semi permanentes sur des emplacements stables et bien distribuées spatialement.

III.1.2.3 Les vols

Les vols doivent être à basse altitude, afin de garantir une résolution adéquate aux besoins de détail dans l'image drone. Les conditions générales pour la restitution du relief à partir d'un couple stéréoscopique drone avion pris à faible hauteur sont loin d'être idéales (acquisition d'images et relief). Les conditions d'acquisition d'images avec un vecteur aérien instable volant à basse altitude et un appareil photo non métrique produisent de fortes incertitudes dans l'estimation des paramètres d'orientations interne et externe.

Les conditions météorologiques en montagnes n'améliorent pas la performance du drone, car les rafales de vent empêchent le vecteur de réaliser un vol bien aligné. Le relief très accidenté à Draix (versants pentus et ravines profondes) ne favorise pas la technique de stéréo restitution.

Concernant le rapport B/h pour la mission drone, une valeur proche de 1 est généralement préconisée pour une stéréoscopie « optimale » (Krauss & Waldhäusl, 1998). Néanmoins, dans le cas de zones très tourmentées comme le site d'étude où les pentes des versants analysés sont excessivement fortes, les lignes d'incidence de la prise de vue doivent être nettement plus verticales pour éviter des parties cachées (figure I15). Dans ces conditions nous avons cherché un rapport B/h plus petit (de l'ordre de 0,2 à 0,3), ce qui permet un bon compromis entre altitude, distance focale, et recouvrement entre clichés dans un relief aussi tourmenté que les ravines profondes de Draix.

III.1.3 Calcul informatique des MNT

L'objectif principal est d'identifier les points clefs de la méthodologie afin d'exploiter efficacement les potentialités de la stéréophotogrammétrie à partir d'image drone. Un point fondamental comprend la quantification du gain de précision obtenu dans la construction d'un MNT avec des différentes approches méthodologiques à chaque étape de la chaîne de traitement photogramétrique, afin de surmonter cette multiplicité de sources d'erreurs.

Ces objectifs demandent d'élaborer une stratégie visant l'analyse comparative de résultats en utilisant des MNT-drone générés par chaque choix méthodologique à chaque étape de la chaîne de traitement (un MNT de référence ou témoin). Ceci impose de disposer d'un jeu de données de validation non seulement précises et exactes, mais suffisamment nombreuses et bien distribuées.

Notre approche ne consiste pas à créer de nouvelles méthodes pour la stéréoscopie mais plutôt à utiliser et organiser des schémas existants pour obtenir la précision la meilleure. En

effet, la stéréophotogrammétrie, et particulièrement à partir des images drone, a une multiplicité de sources d'erreurs qui commence avec l'utilisation d'un vecteur instable ainsi qu'une chambre photo non métrique (Raclot et al., 2005).

III.1.3.1 Géométrie

III.1.3.1.1 Orientation Interne

Les paramètres d'orientation interne de l'appareil photo comprennent la distance focale, le point principal de symétrie, ainsi que les déformations de lentilles. Ces paramètres sont connus lorsqu'on utilise un appareil photo métrique (spécialisé pour la photogrammétrie) calibré au laboratoire. Dans le cas où on utilise un appareil photo « grand public », ces paramètres sont inconnus. L'orientation interne est fondamentalement utilisée pour transformer le système de coordonnées pixel en système de coordonnées spatiales de l'image (x, y) .

Il n'existe pas de moyens de déterminer *a priori* si un objectif est sujet à un type spécifique de défauts, seuls des tests sont en mesure de dévoiler leurs qualités et défauts. Afin de calibrer la chambre photo en ce qui concerne l'orientation interne, nous avons deux possibilités : utiliser des photographies particulières représentant des zones dont la géométrie est parfaitement connue, ou utiliser des stéréo couples avec des repères en plusieurs plans de perspectives (repères 3D).

La première solution peut être réalisée sur des mires planes quadrillées placées à courte distance de l'appareil photo ou bien en utilisant des bâtiments munis de repères pour des distances plus importantes. La deuxième solution, par repères 3D, est censée à produire une expression plus stable et rapide de la déformation de lentille. Toutefois, afin d'utiliser cette méthode il faut disposer d'un bâtiment muni des repères 3D, tel que le parking au sous-sol de l'IGN (Paris).

Ces méthodes permettent d'accéder aux déformations de l'image liées aux imperfections de la lentille, ainsi qu'aux autres paramètres de l'orientation interne. Les résultats peuvent être modélisés par une fonction de déformation généralement polynomiale et exprimés en fonction de la distance au centre de l'image, que l'on peut ensuite appliquer à l'image brute pour obtenir une image « théoriquement » corrigée des déformations (équation du polynôme de distorsion radiale 3, chapitre I). Les paramètres d'orientation interne sont calculés avant l'aérotriangulation.

Pour le calcul de paramètres d'orientation interne, nous allons tester l'impact de la correction de lentille en utilisant la solution par photographies sur des façades de bâtiments munis de repères 3D, selon deux variantes : à partir des photos traitées individuellement (logiciel MicMac, Pierrot & Paparoditis, 2006) ou bien à partir des couples stéréoscopiques (outil Etalon développé pour le logiciel Poivilliers-E, Egels, 1999).

III.1.3.1.2 Orientation Externe

Les autres éléments sont la position et l'orientation angulaire de l'appareil photo au moment des prises de vue stéréoscopiques. Ces paramètres sont généralement disponibles lors qu'on utilise un avion spécialement équipé pour une mission photogrammétrique, mais ils restent inconnus en utilisant un vecteur léger comme le drone, jusqu'à l'étape d'ajustement du modèle d'aérotriangulation où ils seront estimés par approximation.

Ceci constitue une des limitations du vecteur drone pour son utilisation en photogrammétrie, même si les données obtenues par les systèmes GPS-contrôle de l'inertie du vol professionnels sont généralement utilisées comme valeurs initiales dans l'ajustement du modèle d'aérotriangulation. Ces valeurs seront toujours recalculées une fois que le modèle d'aérotriangulation est ajusté.

III.1.3.2 Aérotriangulation

Les paramètres d'orientations interne et externe, ainsi que les points de contrôle terrestre, sont à la base des calculs à développer dans l'étape d'aérotriangulation, où un lien entre l'appareil photo, les photos et le terrain doit être établi, sur la base du principe de colinéarité entre le vecteur « image » et le vecteur « terrain ».

Pour établir ce lien, plusieurs techniques photogrammétriques sont disponibles : intersection connaissant les paramètres internes (Space Resection), ou externes (Space Forward Intersection), ou encore ajustement par paquets de blocs (Bundle Block Adjustment). Les deux premières techniques ont besoin d'une connaissance a priori des paramètres d'orientation, interne ou externe, et ne sont donc pas adaptées à cette application. Par ailleurs, Casson et al. (2003) signalent que l'aérotriangulation en bloc présente les meilleures précisions et que ce résultat peut s'expliquer par la condition de coplanéité et la présence des points homologues distribués de manière homogène sur la zone de recouvrement des clichés stéréoscopiques (ce qui compense une répartition des PCT parfois hétérogène).

Nous avons choisi d'utiliser l'ajustement par paquet de blocs afin d'ajuster le modèle d'aérotriangulation. C'est la méthode la plus adaptée aux conditions particulières de la stéréophotogrammétrie drone.

Pendant l'aérotriangulation, la mauvaise connaissance des paramètres d'orientation peut entraîner des erreurs géométriques globales importantes (par exemple, biais). Afin de diminuer au minimum les effets des erreurs systématiques résiduelles qui peuvent être encore présentes dans la phase d'aérotriangulation, il est important d'introduire une phase complémentaire dans l'estimation des coefficients. Cette phase est connue comme auto calibrage, elle utilise des paramètres additionnels qui permettent de rectifier des déformations simples : perspectives fuyantes horizontales ou verticales, poinçonnage, oblique, etc.

Nous allons tester l'impact de la solution d'auto calibrage d'Ebner (1976) sur la qualité du MNT, en intégrant ce processus dans le schéma itératif des paquets de blocs.

III.1.3.3 Restitution du relief (corrélation d'images)

Une fois ajustée le modèle d'aérotriangulation, la prochaine étape est la restitution du relief par stéréophotogrammétrie. Pour faire ceci, nous avons deux options : une restitution manuelle par un opérateur humain, ou bien une restitution automatique par analyse numérique d'images stéréoscopiques (figure II.10, Chapitre II).

Avec l'automatisation de la chaîne de traitement photogrammétrique dans la restitution du relief, l'intervention de l'opérateur humain est significativement diminuée, donc les sources principales d'erreurs sont aussi réduites. Etant donné que l'objectif est d'automatiser la génération des MNT fins, nous avons choisi la méthode de restitution du relief automatisée par corrélation d'images.

La corrélation d'images comprend l'identification et la mesure automatiques des points d'image correspondants qui sont situés sur les secteurs de recouvrement des multiples images superposées. Cette stratégie doit mettre en relation des objets présents dans des couples stéréoscopiques qui changent selon les conditions de prise de vue de chaque photo, comme l'échelle, la projection, la teinte, l'orientation, les ombres au sol, les parties cachées dans les images, etc.

Les types de corrélateurs peuvent être présentés selon l'approche qu'ils utilisent : il y a ceux qui se servent des relations directes « image-image » d'un couple stéréoscopique, et ceux qui se basent sur de la multi résolution.

Parmi les corrélateurs d'images utilisables, nous allons tester un corrélateur dans chacune des catégories ci-dessous (« image-image » et multi résolution). Il en résulte deux stratégies de corrélation d'images afin d'évaluer leurs effets sur la qualité des MNT à produire. Les deux corrélateurs que nous allons utiliser sont :

- ERDAS Leica Photogrammetric Suite (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003), corrélateur en une dimension, le long des deux lignes épipolaires lorsque le décalage entre deux points homologues est nul.
- MicMac-IGN (Pierrot & Paparoditis, 2006), corrélateur multi résolution par discrétisation des espaces objet et quantification de l'espace des parallaxes, permet de limiter la combinatoire et rend l'appariement plus robuste. Il utilise une approche énergétique afin d'obtenir une surface cohérente par rapport aux connaissances *a priori* du relief (régularisation du relief).

Pour utiliser le premier corrélateur nous avons besoin d'une licence privée tandis que le dernier est « *open source* ».

III.1.3.4 Synthèse pour la création du MNT drone

Les paragraphes précédents nous ont permis d'établir un ensemble d'outils méthodologiques pour la construction d'un MNT drone, en précisant les alternatives possibles pour les différentes étapes de la chaîne stéréophotogrammétrique. Le but est d'évaluer comment ces alternatives vont affecter la qualité finale du MNT drone. La figure III.2 montre l'assemblage de ces différents éléments.

La partie gauche de la figure III.2 correspond à la succession des étapes pour la construction d'un MNT : orientation interne et externe, restitution numérique du relief. La partie droite (en bleu dans la figure) précise les points particuliers que nous allons tester pour chacune de ces étapes.

Ainsi pour les paramètres d'orientation interne, nous allons évaluer l'effet de la correction de la déformation de lentilles. Dans le cas des paramètres d'orientation externe, on testera l'impact de l'auto-calibrage dans l'ajustement du modèle d'aérotriangulation. Tandis que pour la restitution numérique du relief, nous avons choisi de tester deux types de corrélateurs d'image.

Nous allons développer une stratégie de validation comprenant toutes ces étapes, afin de juger l'adéquation de cet ensemble d'outils pour surmonter les contraintes opératives et techniques, ainsi que le contexte montagneux : possibilité de tester chaque apport d'amélioration. Nous allons à présent détailler cette stratégie.

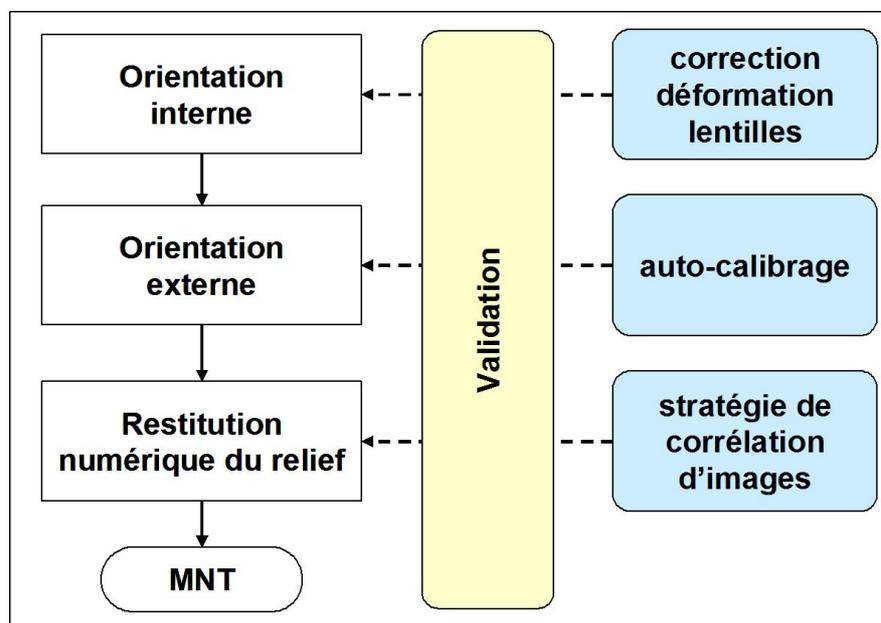


Figure III.2 - Schéma d'outils assemblés pour la construction d'un MNT drone.

III.1.4 Validation et l'analyse de précision

L'intérêt de cette phase de validation est de calculer et de caractériser l'erreur dans l'estimation de l'altitude du MNT issu de photogrammétrie drone. Même faible, l'erreur en altitude peut affecter de façon significative le résultat de certaines analyses numériques de terrain à partir des MNT. Nous avons choisi d'évaluer deux types de qualité des MNT-drone : altimétrique et hydrographique.

La qualité altimétrique d'un MNT représente la précision en altitude de chaque pixel, positionné dans l'espace 3D. L'information de validation est prise comme « vérité terrain » et les statistiques de l'erreur vont refléter la qualité générale de la représentation du relief. La précision des MNT étant surtout dépendante d'une restitution correcte des zones de rupture du relief, notre protocole de prise de point de validation sur le terrain est focalisé sur ces zones de rupture (comme les fonds de thalwegs, les lignes de crêtes, les bords de ravines), ainsi que quelques profils de versants.

La qualité hydrographique d'un MNT (dérivés de l'altitude) représente la précision avec laquelle l'analyse numérique de l'accumulation du flux superficielle d'un MNT dessine le réseau des thalwegs, tant par son tracé et sa longueur, que par sa pente (éléments spatiaux spécifiques de l'hydrologie). Chaque réseau élaboré à partir d'un MNT sera comparé avec des données extérieures de référence prises sur le terrain.

La stratégie de validation des MNT drone est le point clé de cette recherche, étant donné la précision attendue dans la restitution du relief et la finesse de l'application dans le suivi de l'érosion hydrique et de l'ablation en montagnes marneuses. Donc, il est impératif de garantir l'exactitude, la précision et la distribution spatiale de données de « vérité terrain », quelque soit l'équipement utilisé. Nous commençons l'exposé par le recueil des données de terrain qui vont servir de références à ces validations.

III.1.4.1 Lever de données « vérité terrain »

Pour valider un MNT à partir de points de terrain, la première préoccupation concerne l'altitude. Par ailleurs, on sait que la principale difficulté lors de l'établissement d'un MNT est liée à tout ce qui concerne les lignes de rupture du relief, et ceci spécialement dans les reliefs accidentés. On sait aussi que les MNT raster restituent mal ces lignes de rupture. Il nous a donc semblé logique de privilégier l'acquisition de points terrain le long de ces lignes de rupture pour la constitution du jeu de référence. On va donc élaborer un jeu de points de validation constitué essentiellement de points le long les lignes de rupture (crêtes et thalwegs). Ce jeu va nous servir autant pour la validation des MNT en altitude que pour la validation des réseaux hydrographiques obtenus par traitement numérique des MNT.

Prenant en compte la précision souhaitée (de quelques centimètres) afin d'établir une caractérisation très fine des MNT à développer pour l'étude de l'évolution des états de surface, les données de validation devront être acquises avec une précision cohérente. Les points de validation seront distribués le long des lignes de ruptures principales du relief en

mode semi-aléatoire avec un pas de quelques décimètres, ainsi que sur des transects transversaux aux ravines afin d'établir des profils de pentes sur quelques versants.

Nous allons utiliser deux approches pour le levé de données « vérité terrain » : les mesures directes *in situ* par DGPS et/ou tachéomètre, et les mesures directes à distance par LiDAR Terrestre (ce point sera traité dans la partie « Approche Terrestre »).

III.1.4.1.1 DGPS-Tachéométrie

Avec le DGPS ou le tachéomètre les mesures topographiques sont directes sur le terrain et elles sont les plus précises atteignables. Elles ne dépendent pas d'autres mesures indépendantes pour produire les coordonnées terrestres (sauf pour le pivot ou la station base du GPS différentiel).

III.1.4.1.1.1 Stratégie de lever terrain

Un problème qui se présente pour les levés topographiques des bassins versants en relief très accidenté est la mauvaise réception du signal satellite GPS au fond de ravines profondes. Etant donné la limitation du système DGPS, nous avons choisi une solution mixte DGPS-Tachéomètre pour traiter ce problème. Cette solution mixte utilise le système DGPS avec une base pivot lointaine choisie parmi les bornes permanentes, afin de lever les points en crêtes et en ravines peu profondes. Les points en ravines très profondes sont levés par tachéomètre, positionné sur une borne permanente (BP), dont la position précise a été acquise par DGPS. Cette borne doit être proche de la ravine et avoir une bonne visibilité de la zone. On peut jouer sur la hauteur de mire pour lever certaines parties trop cachées.

Ceci nous conduit à une précision satisfaisante (environ 3 cm) dans toutes les configurations de terrain. Le tachéomètre a une précision potentielle millimétrique, et il n'est pas limité par l'encaissement du fond des ravines. Le DGPS peut opérer sans visibilité entre la station pivot et l'unité mobile et a une précision centimétrique en RTK.

Notons que ces types de mesures sont invasifs, et que, dans certaines conditions de travail, le contact direct avec l'objet à mesurer ne convient pas (comme les bassins versants de recherche sur pentes marneuses nues : La Roubine). Ainsi, pour l'évaluation de qualité des MNT très détaillés et précis on risque de ne pouvoir garantir ni un nombre ni une distribution de données « vérité terrain » adéquates. Néanmoins, pour les zones de test de surfaces plus importantes, le levé terrain par DGPS et/ou tachéomètre représente le meilleur moyen d'établir un réseau de points de validation.

III.1.4.1.1.2 Préparation des données

Les rares plants de végétation sont très perturbants pour une analyse du relief en zone marneuse. Les points de validation par DGPS-Tachéomètre seront pris directement sur sol

nu de façon à établir une évaluation de qualité uniquement en terrain nu. Néanmoins, pour des questions de mauvaise interpolation de MNT autour des arbres ou arbustes, quelques points de validation trop proches de cette végétation devront encore être éliminés du jeu de référence.

III.1.4.2 Évaluation de la précision dans le calcul de l'altitude

Dans le cadre des données spatiales, ni l'erreur ni l'incertitude résultante ne peuvent jamais être éliminées, elles sont inévitables et doivent donc être comprises et expliquées (Wechsler, 2007). Donc, si on utilise un MNT-drone comme donnée de base afin d'améliorer notre compréhension du processus d'érosion hydrique concentré à l'échelle des ravines élémentaires, il sera recommandable d'établir auparavant une description complète de cette erreur de façon à juger l'adéquation de ces MNT à l'utilisation prévue.

Les éléments de l'erreur à expliquer sont : la dispersion statistique, qui représente l'erreur aléatoire de la méthodologie de restitution de relief ; et l'erreur systématique, qui est normalement minimisée par le calibrage de l'appareil photo, ou par l'utilisation des paramètres additionnels pendant l'aérotriangulation (auto calibrage). L'addition de ces deux sources d'erreurs représente l'erreur totale du MNT dans la restitution du relief par stéréophotogrammétrie.

III.1.4.2.1 Analyse statistique

Des statistiques globales de l'erreur sont utilisées afin d'évaluer la performance générale de la restitution du relief par les différentes méthodes utilisées. L'erreur est calculée par différence entre les MNT-drone (raster) moins les données « vérité terrain ». Dans le cas où la référence est représentée par les points DGPS-Tachéomètre, le contrôle sera effectué en comparant l'altitude de ces points avec celle de pixels MNT correspondant. Dans le cas où la référence vient la mesure par LiDAR terrestre, il s'agira de comparer les altitudes des pixels communs aux deux MNT raster.

Les estimateurs statistiques de l'erreur utilisés sont la moyenne (\bar{x}), l'écart type (ET), et l'erreur quadratique moyenne (EQM, ou RMSE root mean squared error). L'EQM est calculée comme la racine carrée de la moyenne de différences carrées entre la valeur estimée (x_i) d'altitude par le MNT-drone et la valeur mesurée d'altitude (t_i) par le DGPS-tachéomètre ou le LiDAR terrestre.

Dans le cas d'une population finie parfaitement connue (statistique descriptive), les valeurs de dispersion et les valeurs centrales peuvent être choisies arbitrairement (écart-type, écart moyen, étendue).

$$ET = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}} \quad (11)$$

L'EQM est la racine carrée de la moyenne de différences carrées entre la valeur estimée (x_i) et la valeur mesurée (t_i) ou « vérité terrain ». Néanmoins, étant donné que l'EQM est basée sur le carré des différences, les erreurs les plus importantes vont avoir une influence non proportionnelle sur l'estimateur de qualité.

$$\text{EQM (RMSE)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - t_i)^2}{n-1}} \quad (12)$$

Souvent, dans le processus de production des MNT par corrélation d'images, il arrive que des fausses corrélations soient générées, résultant en anomalies importantes dans la restitution du relief. En plus, les bords des MNT correspondent aux limites des zones de recouvrement des couples stéréoscopiques, où il est très probable que des anomalies soient aussi présentes. Afin de réduire l'influence de ces valeurs extrêmes dans l'évaluation de qualité en utilisant l'EQM, on utilise l'écart type de l'erreur.

D'autres estimateurs statistiques sont utilisés dans l'évaluation de la qualité globale, ce sont la plage de variation de l'erreur et les histogrammes de fréquences. Ceci permet d'établir des comparaisons visuelles de l'évaluation des MNT-drone développés par les différentes approches méthodologiques.

III.1.4.2.2 Spatialisation de l'erreur

Une partie importante et originale de l'analyse de qualité des MNT est la spatialisation de l'erreur, en utilisant une représentation cartographique des erreurs résiduelles. A partir de l'analyse spatiale des erreurs on peut étudier plusieurs aspects concernant les différentes approches méthodologiques utilisées, comme par exemple l'effet de la correction de la déformation de lentille sur la distribution des erreurs dans le MNT. On analysera en particulier la dispersion de l'erreur en fonction de la distance, de chaque point de validation DGPS-Tachéomètre utilisé, au centre approximatif des images stéréoscopiques.

Des profils des séries des erreurs résiduelles (résidus) sur différentes positions du relief (à partir des données « vérité terrain » par DGPS-Tachéomètre) seront utilisés afin d'analyser la distribution spatiale des erreurs des MNT-drone en fonction des formes du relief les plus déterminantes dans l'étude de l'érosion en montagne (thalwegs et crêtes).

En ce qui concerne l'analyse spatiale de l'erreur en utilisant les données « vérité terrain » par LiDAR terrestre, des différences entre les MNT-drone moins les MNT-LiDAR terrestre seront établies. Etant donné la densité de l'information LiDAR terrestre prise comme données de « vérité terrain », ces évaluations de qualité sont réalisées pixel à pixel, sur les zones préalablement sélectionnées en fonction de critères de densité de points scannés et en fonction de l'absence de végétation. Les mêmes statistiques de qualité générale sont utilisées (moyenne, écart-type et EQM) pour comparer les MNT-drone produits par les différents algorithmes de corrélation d'images testés, contre le MNT LiDAR terrestre de référence.

III.1.4.3 Évaluation de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs

L'analyse de la qualité des MNT s'arrête généralement à une analyse de l'altitude. Toutefois, il semble intéressant de compléter cette démarche par des analyses plus spécifiques sur les produits dérivés des MNT, en lien avec la thématique étudiée (Demargne, 2001). Ainsi, l'analyse de la précision des réseaux de thalwegs peut être un complément très informatif pour une application en modélisation hydrologique de l'érosion.

L'objectif de cette évaluation est de quantifier à quel point un MNT peut récréer le réseau des thalwegs permanents et interconnectés d'une ravine élémentaire, autant pour son tracé que pour sa longueur, ainsi que pour la cohérence de sa pente tout au long de son parcours vers l'exutoire du bassin. Les éléments à évaluer seront le tracé spatial planimétrique (position et longueur), et altimétrique (pente par tronçon).

Pour évaluer la précision du réseau de thalwegs on a prévu d'analyser deux éléments qui sont :

- la position dans l'espace et la longueur (tracé planimétrique) ;
- la pente par tronçon.

III.1.4.3.1 Etablissement de la référence terrain « hydro »

Afin d'établir une méthode d'évaluation quantitative dans le calcul du réseau des thalwegs par traitement numérique des MNT, il est nécessaire de disposer d'abord des éléments de référence « hydrographique » ou « vérité terrain », comme le tracé planimétrique du réseau et une estimation de sa pente par tronçon.

La référence terrain pour le tracé planimétrique du réseau peut être établie par interprétation visuelle des thalwegs sur une orthophoto superposable au MNT à évaluer. Ceci requiert que l'orthophoto soit créée en utilisant les mêmes paramètres d'orientation interne et externe employés dans la production du MNT à évaluer, de façon que la géométrie de l'orthophoto et du MNT se correspondent.

Néanmoins, l'extraction par interprétation visuelle d'une orthophoto est une méthodologie délicate. Dans notre cas, le microrelief très irrégulier des versants de badlands est un facteur qui ne facilite pas cette interprétation visuelle. Cette interprétation peut être aussi affectée par les conditions d'illumination au moment de la prise de vue ainsi que par le manque de contraste dans les orthophotos, à cause de l'homogénéité de la couche superficielle d'altérite. Cette méthode d'obtention du réseau de thalwegs de référence reste subjective.

Afin d'obtenir une référence plus objective, nous proposons de retenir les fonds de thalwegs identifiables par un opérateur. Pour cela, sur une ravine élémentaire, un repérage visuel direct sur le terrain est effectué. Il est suivi d'un tracé à la peinture des thalwegs identifiés. Le dessin cartographique de ce réseau de référence est enfin établi à l'aide de photos spécifiques de la ravine –aériennes et/ou terrestres - prises après traçage.

La référence pour la connaissance des pentes par tronçon sera établie à partir de l'ensemble des points terrain DGPS-Tachéomètre déjà mesurés sur la ravine étudiée.

III.1.4.3.2 Stratégie de comparaison quantitative des réseaux (planimétrie)

La méthode à utiliser pour extraire le réseau de thalwegs par analyse numérique des MNT drone sera l'algorithme D8 (standardisé dans la plupart des logiciels SIG), étant donné le détail attendu sur les MNT-drone. En effet, Mouton (2005) a comparé plusieurs algorithmes uni et multidirectionnels pour l'extraction du réseau de thalwegs à partir d'un MNT LiDAR aéroporté, et les résultats montrent que même l'algorithme le plus simple et le moins sophistiqué, comme le D8, est assez précis quand on utilise un MNT très détaillé.

Les éléments à évaluer sont la position et la longueur du réseau. Trois éléments liés perturbent leur évaluation objective : l'incertitude de la position exacte de chaque élément du réseau ; le seuil en amont d'accumulation des flux pour arrêter le tracé du réseau avec l'algorithme D8 ; et le fait que les distances en vecteurs sont différentes des distances en raster car ces dernières sont dépendantes de la résolution, mais aussi de la méthode de calcul de la distance en raster.

Une incertitude de position est inhérente à toute analyse d'image. Une façon de quantifier le rapprochement dans l'espace de deux tracés consiste à utiliser une zone « buffer » ou tampon autour du tracé choisi comme référence. Ceci permet de calculer l'évolution du pourcentage de correspondance en fonction de la taille d'une zone buffer construite autour du tracé de référence (distances multiples de la taille de pixel des MNT à évaluer, figures III.3a et b). On pense qu'un buffer de deux pixels de chaque côté du tracé est suffisant pour résoudre la plus grande partie de ce problème.

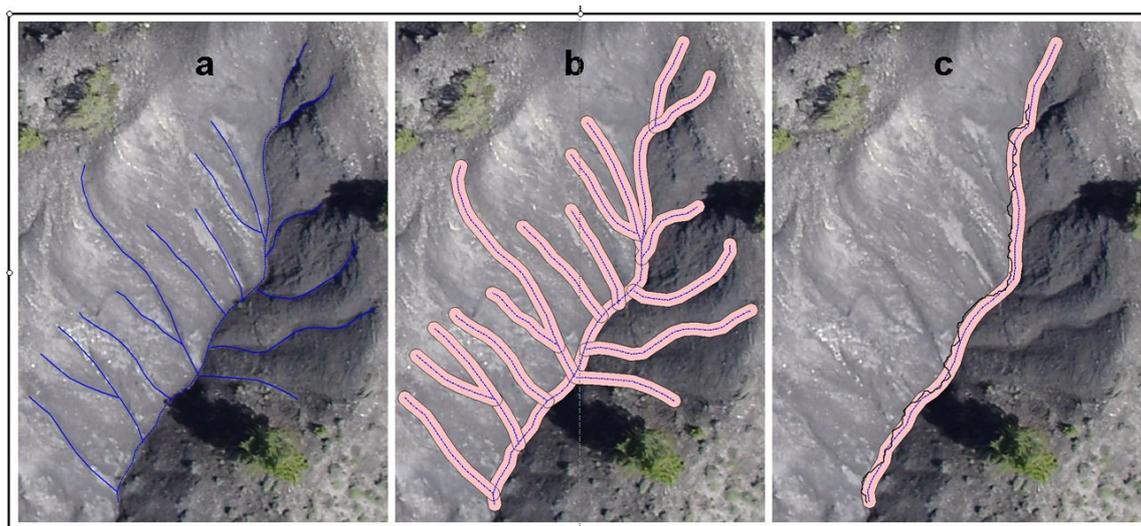


Figure III.3 - a) Photo-interprétation du réseau des thalwegs de référence, b) zone « buffer » autour ce réseau, et c) intersection du réseau extrait par traitement numérique des MNT-drone (ravine du Moulin).

Un seuil d'accumulation de flux sera établi de façon que les réseaux résultants du calcul numérique à partir des MNT drone soient similaires à la configuration établie par le réseau des thalwegs permanents utilisé comme référence de terrain (chevelu, figure III.3a).

Une fois choisi le buffer autour du réseau de référence, on peut définir la partie commune aux deux réseaux, la partie en trop \oplus (réseau calculé plus long que réseau référence), et la partie en moins \ominus (réseau calculé plus court que réseau référence). Si on s'intéresse aux longueurs, on peut exprimer ceci sur la forme :

$$L_c = L_r + \oplus - \ominus \quad (13)$$

où L_c est la longueur du réseau calculé, L_r celle de la référence, \oplus et \ominus les parties en plus en en moins. La similarité consiste à analyser ces éléments. On montre que l'optimum de similarité est obtenu lorsque $\oplus = \ominus$ ce qui correspond à minimiser la distance de Hausdorff (Voiron, 1995), distance à combler pour que deux ensembles se recouvrent. Ceci nous permet de définir le seuil adéquat.

Cette méthode permettra d'établir une comparaison quantitative planimétrique (le tracé) dans le calcul du réseau de thalwegs entre différents MNT. Elle pourra être établie globalement ou pour chaque hiérarchie du réseau (drain principal, secondaire et tertiaire).

III.1.4.3.3 Stratégie de comparaison quantitative des réseaux (pentes)

Les points de référence sont les points terrain déjà obtenus par DGPS-Tachéomètre. Les tronçons du réseau sont schématisés par des arêtes linéaires joignant les points de confluence ou des nœuds. On va privilégier les points placés sur les confluences (entre le drain principal et les drains secondaires). En absence de confluences sur un parcours du réseau, quelques nœuds seront utilisés aussi pour le calcul de la pente. La pente de chaque tronçon sera calculée par une expression de type dh/dl , où dh représente l'écart d'altitude et dl la distance horizontale entre nœuds ou confluences du réseau des thalwegs à comparer (figure III.4).

Postérieurement, le même travail de choix de points (confluences ou nœuds) et de calcul de pente sera effectué sur les MNT calculés. Les deux jeux de pentes seront alors comparés.

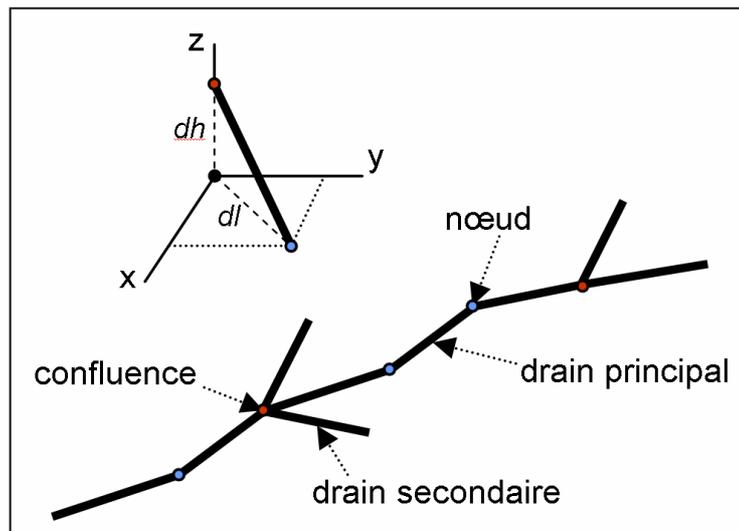


Figure III.4 - Représentation du réseau de thalwegs par des arêtes linéaires joignant les points de confluence ou des nœuds pour le calcul de la pente par tronçon.

III.2 APPLICATION

III.2.1 Construction des MNT

III.2.1.1 Les choix de base principaux

Tel qu'il a été signalé dans le chapitre concernant la méthodologie de l'approche aérienne, le premier pas dans la construction d'un MNT consiste à établir les choix de base principaux de la mission. Un des éléments le plus important est la taille du pixel au sol souhaité pour les images à acquérir. Ceci, combiné avec les autres contraintes de cette recherche (voir figure 2.1) comme la résolution des produits dérivés (des MNT), et le contexte d'application (relief), vont définir ces choix de base.

Les bassins du Moulin et La Roubine ont été choisis pour l'étude étant donné leurs meilleures accessibilités. Une première mission a été planifiée pour la zone de ravinement du bassin versant du Moulin (année 2005), avec une taille de pixel au sol autour de 5 cm. Cette mission avait pour objectif de cartographier les zones de ravinements du bassin versant du Moulin.

Les missions suivantes (2007 et 2008) ont été réalisées à une hauteur de vol plus basse, afin d'avoir une résolution plus détaillée (pixel au sol autour 2,5 cm), sur les ravines du Moulin ainsi que sur le bassin versant de La Roubine.

Les choix des conditions stéréoscopique concernent le rapport B/h de l'ordre de 0,30, un recouvrement de 60% entre photos successives, ainsi que l'heure d'acquisition d'images autour midi où l'effet d'ombre portée sera diminué.

Le vecteur léger choisi pour ces missions a été l'avion-jaune. Le drone avion jaune est un avion d'aéromodélisme (fibre de verre et résine) adapté pour porter des appareils photos numériques, télécommandé par un pilote expert depuis le sol. L'avion a été développé par Bruno Roux de la société privée « L'Avion Jaune » et vole à l'aide d'un moteur électrique à hélice alimenté par une série de batteries.

La partie avant de l'avion (le nez) a été aménagée afin de porter un maximum de deux appareils photos et un système de contrôle de navigation qui inclut un GPS mono fréquence. La vitesse de vol moyenne est de 30 Km/h, la plage de hauteur de vol est de 20 à 300 m. Le drone décolle à la main ce qui lui donne une souplesse d'utilisation surtout dans les zones montagneuses, mais l'atterrissage requiert une zone plate d'une dizaine de mètres avec une pente douce. Le rayon d'action est d'un kilomètre (<http://www.lavionjaune.fr>).

Trois missions drone (avion jaune) ont été réalisées à Draix dans le cadre de cette recherche (années 2005, 2007 et 2008), avec des photographies dans le visible par des appareils photos numériques « grand public ». Chaque mission a été réalisée avec un modèle drone avion différent (figure III.5).

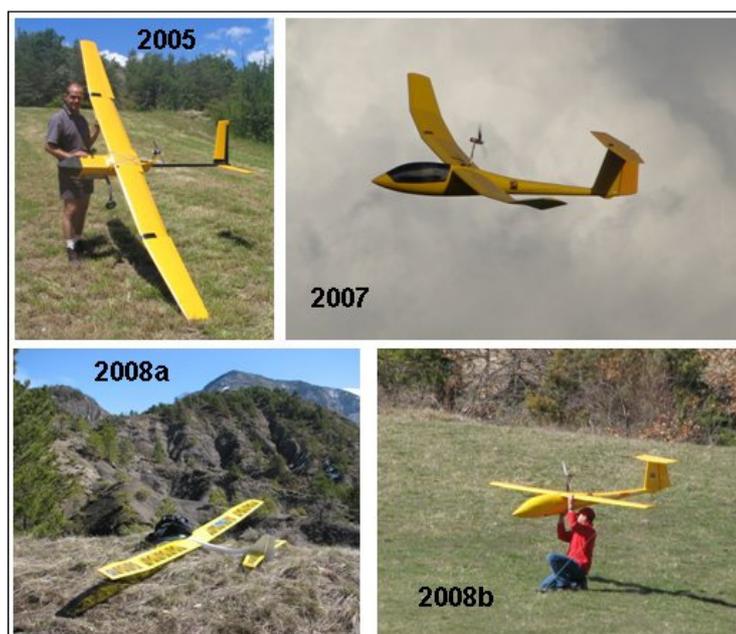


Figure III.5 - Différents modèles de drones utilisé pendant les trois missions réalisées, et le pilote du drone (Bruno ROUX).

III.2.1.2 Les vols

Dans le tableau III.2 nous pouvons observer les caractéristiques générales des trois missions réalisées. L'acquisition d'images avec un vecteur aérien instable et un appareil photo non métrique peuvent produire de fortes incertitudes dans l'estimation des paramètres d'orientations interne et externe. Les conditions météorologiques en montagnes n'améliorent pas la performance du drone, car les rafales de vent empêchent le vecteur de réaliser un vol bien aligné.

Tableau III.2 - Missions drone avion-jaune sur les BVRE de Draix.

date	BVRE	heure	hauteur (m)	pixel au sol (cm)	appareil photo numérique	pixels par image (Mo)
15 juin 2005	Moulin	11:30	~ 150	~ 5	Sony DSC-P150	7
11 mai 2007	Moulin Roubine	14:31	~ 70	~ 2,5	Sony DSC-V3	7
26 mars 2008	Moulin	12:43	~ 64	~ 2,5	Olympus μ 790SW,S790SW	7

L'effet conjoint de ces conditions défavorables peut être observé dans la figure III.6, où nous pouvons apprécier l'irrégularité dans la ligne de vol résultant de la mission 2005. Ceci empêche l'acquisition des images avec un recouvrement minimum de 60 %. La

restitution du relief par stéréophotogrammétrie à partir d'une telle configuration d'images n'est pas idéale.

D'un total de 39 photos acquises pour la mission 2005, en trois passages du vecteur drone, nous avons choisi le meilleur couple photos considérant le critère de recouvrement établi précédemment, ainsi que leur contraste et netteté (photos 02005 et 01994 en haut de la figure III.6).

D'un total de 116 photos acquises pour la mission 2007 sur les bassins versants du Moulin et la Roubine, nous avons choisi le meilleur couple photos en utilisant les mêmes critères qu'auparavant. Dans la figure III.7 nous pouvons observer les deux stéréo couples choisis pour les missions 2005 et 2007, un stéréo couple qui représente une ravine au bassin versant du Moulin, et un stéréo couple qui couvre la plupart du bassin versant de la Roubine.

Pour la dernière mission (année 2008), nous avons utilisé un nombre plus important de photos disponibles (15 au total) afin de recréer le relief en entier de la ravine d'étude du Moulin. Dans le tableau III.3 nous pouvons observer les paramètres généraux des couples sélectionnés dans chaque mission drone réalisée à Draix entre 2005 et 2008.

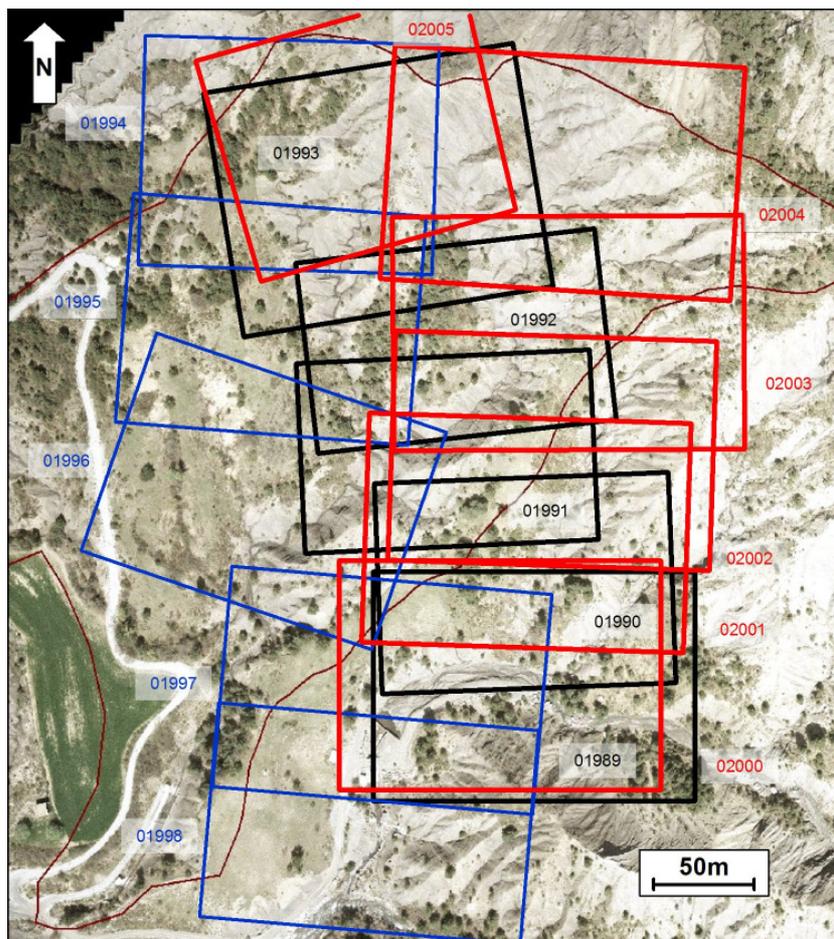


Figure III.6 - Schéma approximatif de la mission drone avion du 15 Juin 2005, chaque couleur représente un passage différent du vecteur drone.

Tableau III.3 – Paramètres généraux des stéréocouples sélectionnées à Draix.

couple	BVRE	mission	heure	hauteur (m)	focale (mm)	pixel au sol (cm)	appareil photo	pixels (Mo) matrice
01a-02a	Moulin	15 juin 2005	11:30	~ 150	87,29	~ 5	Sony DSC-P150	7 3072*2304
01b-02b	Roubine	11 mai 2007	14:31	~ 70	78,18	~ 2,5	Sony DSC-V3	7 3072*2304
plusieurs	Moulin	26 mars 2008	12:43	~ 64	87,98	~ 2,5	Olympus μ 790SW S790SW	7 2048*1536

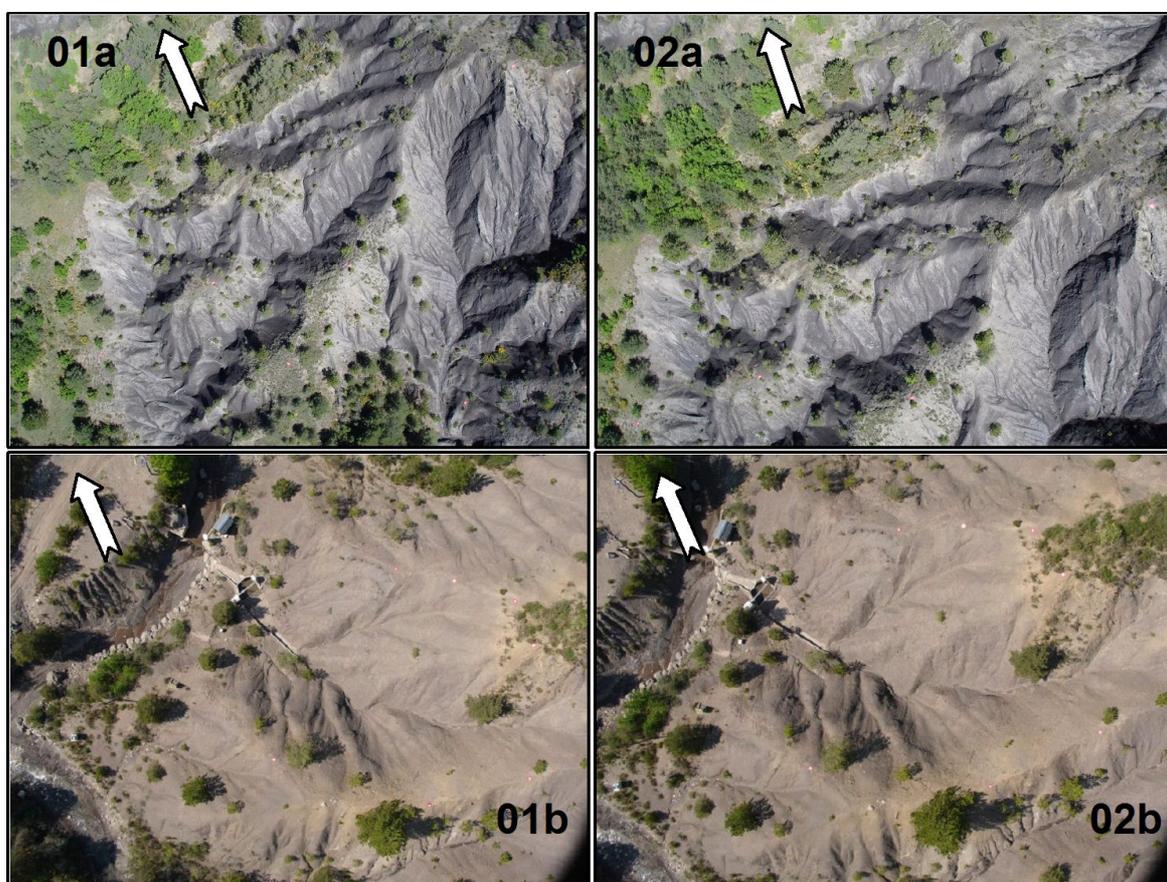


Figure III.7 - Deux couples stéréoscopiques choisis sur les bassins du Moulin (01a-02a, juin 2005) ; et La Roubine (01b-02b, mai 2007), la flèche blanche signale la direction du Nord Géographique.

III.2.1.3 Géoréférencement

III.2.1.3.1 Installation des mires

Afin de mettre en place une stratégie de surveillance diachronique de l'érosion en montagne au moyen de la photogrammétrie par images drone, il faudrait compter sur un réseau de mires semi permanentes sur le terrain, à des emplacements stables et bien distribuées spatialement.

Nous avons installé des mires en plaques plastifiées carrées de taille différente et superposées. Ces mires sont composées d'un carré rouge de 20x20 cm couvert par un carré blanc de 10x10 cm fixés au sol par une tige (ferraille à béton). Ce sont des matériels peu coûteux et facilement transportables sur le terrain accidenté (figure III.8).



Figure III.8 - Deux mires sur la crête d'une ravine (plaques plastifiées carrées de taille différente et superposées, rouges et blanches).

Le nombre de mires sur le terrain doit satisfaire d'une part des conditions de densité et répartition sur les images, d'autre part des conditions de facilité et de permanence sur le terrain. Pour des images de 50*100 m environ, cela donne des mires tous les 20 m environ sur le terrain, en alternant les mires de fond de thalweg et en lignes de crêtes. En fonds de thalweg les mires sont décalées pour éviter les zones d'écoulement à modifications rapides.

Dans la figure III.9 nous pouvons observer la distribution des 85 mires semi permanentes mises en place pour la mission drone (année 2005) pour la zone de ravinement du bassin versant Le Moulin (surface 8 ha).

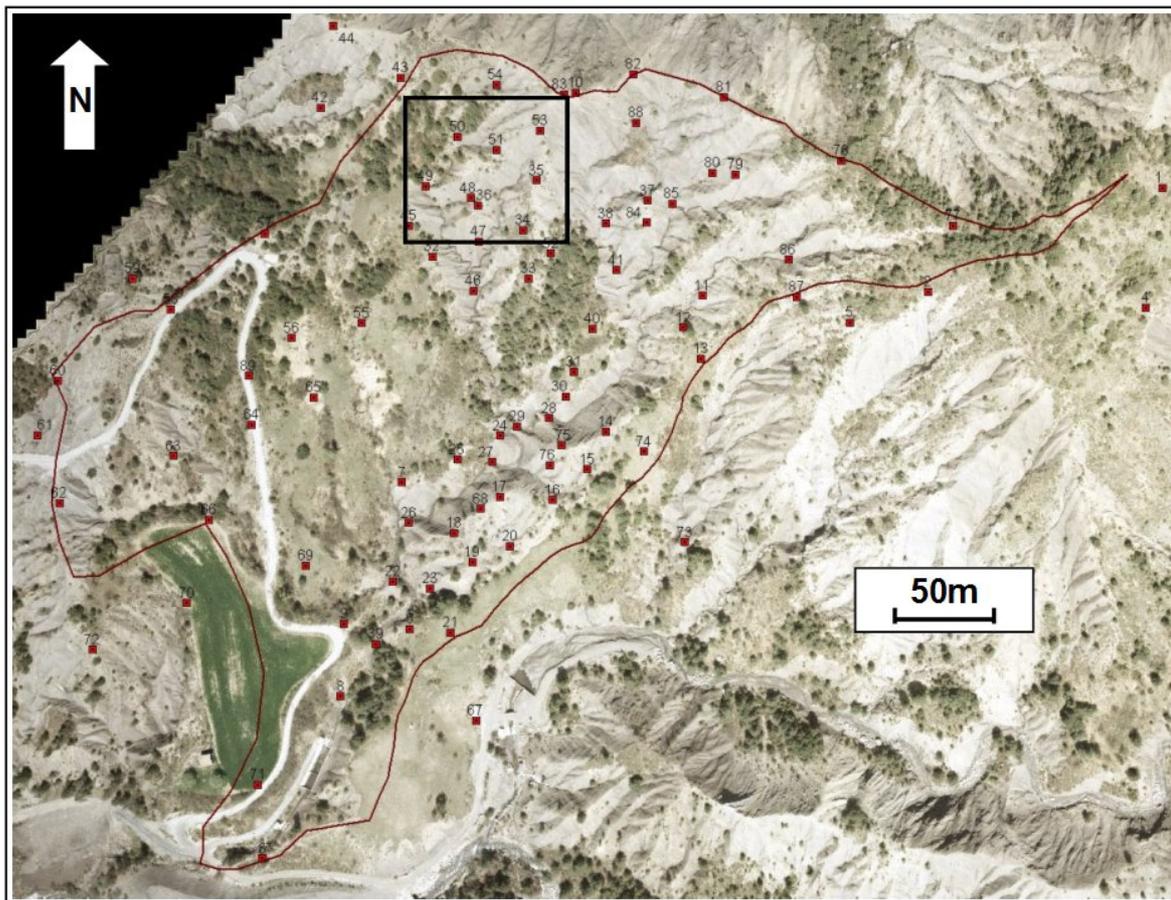


Figure III.9 - Distribution des mires (en rouge) sur le bassin versant du Moulin (ligne rouge), au nord du bassin la ravine étudiée plus en détail (carré noir).

Le nombre de mires placées pour chaque mission est significativement affecté par l'échelle de la mission. Pour les missions spécifiques sur la ravine étudiée au Moulin (mission drone 2008, carré noir sur la figure III.9), nous avons augmenté la quantité de mires sur le terrain de façon que la répartition soit plus adéquate avec la plus basse hauteur de vol prévu (35 mires pour la mission 2008 par rapport à 10 pour la mission 2005, sur la même surface).

Dans la figure III.10 nous pouvons observer les mires mises en place pour la mission à une échelle plus détaillée sur le bassin du Moulin.

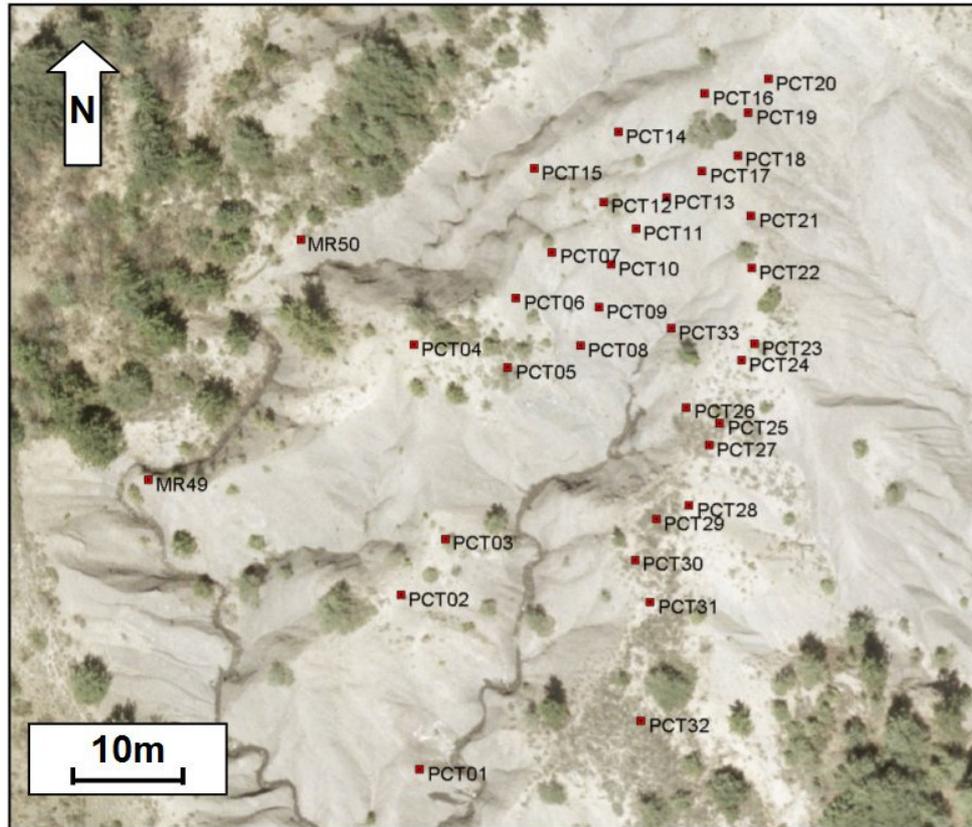


Figure III.10 - Distribution des mires (en rouge) sur la ravine étudiée au bassin du Moulin.

En ce qui concerne la mission 2007 sur le bassin versant de la Roubine, la mise en place des mires a été différente. Ce bassin d'expérimentation est l'unité élémentaire de mesure d'érosion à Draix (surface de quelques mètres carrés), et il est strictement interdit de marcher sur la surface du bassin étant donné le risque d'altérer les mesures d'érosion. Les mires (7 au total) ont été installées exclusivement sur les crêtes du bassin versant de la Roubine.

III.2.1.3.2 Lever de terrain

Les appareillages utilisés dans le lever de terrain sont : un système GPS Leica 1200 (GX1230), et un tachéomètre ou Station Totale Sokkia SET630R série 20 (figure III.11) :

- Système GPS Leica 1200 (GX1230) : capteur GPS bifréquence, géodésique, avec mesure cinématique en temps réel (RTK). C'est un système avec acquisition rapide, et un bon rapport signal-bruit. La précision de la mesure et la précision des positions planimétrique et altimétrique dépendent de divers facteurs dont le nombre de satellites, la géométrie, le temps d'observation, la précision des éphémérides et les conditions ionosphériques. La précision de la mesure en mode statique est : horizontal 5mm + 0.5ppm, vertical 10mm + 0.5ppm ; et en mode cinématique : horizontal 10mm + 1ppm, vertical 20mm + 1ppm.

- Tachéomètre ou Station Totale Sokkia SET630R série 20 : diode laser sur le proche infrarouge, avec une longueur d'onde de 780nm (invisible), et une portée jusqu'à 3 500m en utilisant un prisme simple. La précision brute (théorique) de mesure de distance est de $2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ en fonction de la distance de mesure. La température de fonctionnement oscille entre -20° et 50° Celsius. La précision brute de mesure d'angles est de $2'' / 0,6\text{mgon} / 0,01\text{mil}$. La précision de mesure de l'appareil en distance et en utilisant un prisme, est égale à $(\pm 2 \text{ ppm} \times \text{distance})$ en millimètre. Pour une distance moyenne de 100 m la précision de mesure est de plus ou moins 2 millimètres. La précision angulaire de la mesure est égale à $6''$.



Figure III.11 - Système GPS Leica 1200 et tachéomètre Sokkia.

Tel que nous l'avons mentionné dans le chapitre relatif à la méthodologie de l'approche aérienne, on a mis en place une stratégie de géoréférencement hiérarchique pour répondre à plusieurs besoins simultanément. D'abord, pour la normalisation de la méthodologie du lever de terrain qui affectera toutes les études menées par les différents acteurs du GIS-Draix (Groupement d'Intérêt Scientifique). Ensuite, plus spécifiques à cette recherche, pour la précision des repères de terrain destinés aux phases de calcul et validation du MNT drone.

L'historique d'application de la photogrammétrie à Draix remonte à l'année 1985 avec une mission de photographies aériennes classiques. Les levés terrain de PCT à l'époque ont été réalisés par théodolite. C'est au début des années 2000 que les levés par GPS (tableau III.4) de PCT ont commencé.

Férréol (2005) signale que dans la base de données des travaux altimétriques à Draix, il existe des incohérences entre les différentes campagnes GPS différentiels (DGPS), même dans les travaux qui ont été effectués avec des équipements similaires. L'auteur indique l'absence d'un protocole d'utilisation de DGPS (modèle de Géoïde, coordonnées de la base, temps de mesure, entre autres) comme une des causes des incohérences entre les différentes campagnes.

Tableau III.4 - Levé DGPS de points de contrôle terrestre à Draix (2002 - 2004).

équipement	date	méthode	nombre des points	objectif de la mission
Aschtech	2002	statique	23	PCT photo aérienne 1999
Aschtech	2003	statique	35	PCT mission drone pixy 2003
Aschtech	2003	RTK	223	validation drone pixy MNT 2003
Leica GS50	2004	RTK	90	PCT mission drone pixy et ULM 2004
Trimble 5700	2004	RTK	4228	validation mission drone pixy et ULM 2004
Trimble 5700	2004	RTK	462	ortho rectification 2004

La plupart des PCT définis sur Draix n'a pas des repères stables sur le terrain, donc la fiabilité avec laquelle on peut utiliser ces points historiques est très faible. Comme ces points sont à la base de tous les traitements d'images, leurs incohérences et incertitudes seront aussi transférés à leurs produits. Ces problèmes affectent tant la qualité de la restitution du relief que la validation des MNT.

Pour palier ce problème, un pilier ou station base GPS (pivot) a été construit dans le bassin du Moulin au début des années 2000, afin de servir de pied d'antenne GPS (pivot) permanente pour le lever différentiel. Le pilier consiste en une colonne de béton coffré dans un tuyau PVC et une base en métal dans la partie supérieure, afin de fixer l'antenne GPS ou tout autre instrument topographique. Mais les différents calculs des coordonnées du pilier déjà faits avant ma thèse montrent des résultats contradictoires. Cette incohérence peut causer à son tour des incohérences dans les calculs de coordonnées pour les différentes missions GPS différentielles à réaliser par les différents acteurs du GIS-Draix.

Le pilier du Moulin représente une solution idéale pour une géo référencement stable et définitif. Toutefois, dans le cas d'utilisation de certains appareils, on ne peut se positionner directement sur le pilier. Par exemple, avec le DGPS la mesure de l'hauteur de l'antenne se fait normalement par une méthode normalisée qui prend en compte la base qui fixe l'antenne au trépied (GPS Leica 1200). En utilisant le pilier comme base de l'antenne on risquerait de produire une erreur systématique dans le calcul des coordonnées.

Le calcul des coordonnées terrestre de PCT représente un point clef de la phase de préparation de terrain de cette recherche, étant donné la précision requise d'images aérienne drone et dans la restitution du relief par stéréophotogrammétrie.

La stratégie hiérarchique de lever de terrain commence par l'identification d'une référence topographique nationale à l'aide des bornes IGN.

Il existe deux bornes IGN du Service Géodésique proche de la zone d'étude, avec une précision décimétrique (tableau III.5 et figure III.12). La borne IGN0403603B est localisée dans le village du Brusquet à environ 5 km de distance des Bassins Versants de Recherche et d'Expérimentation à Draix (BVRE) du Moulin, Laval et la Roubine, mais plus proche du BVRE du Brusquet. En plus, le bassin du Brusquet et les autres BVRE à Draix sont séparés par une montagne qui peut empêcher l'utilisation de cette borne IGN comme pivot pour un lever GPS différentiel.

L'autre borne disponible (IGN0407201A) est localisée sur la route près du village de Draix, à environ 2 km des BVRE du Moulin, Laval et la Roubine, sans obstacles pour le signal radio. Une troisième borne IGN a été trouvée au sommet du Champ Grass (IGN0409702), mais celle-ci n'est pas une borne géodésique donc ses coordonnées ne sont pas connues au préalable.

Tableau III.5 - Bornes IGN proches des BVRE à Draix.

Bornes IGN	X	Y	Z	Type	Localisation
IGN0403603B	917850,67	3214671,55	786,42	Géodésique, qualité décimétrique	Au Brusquet à côté du terrain de foot
IGN0407201A	920013,69	3211833,61	871,00	Géodésique, qualité décimétrique	Sur la route vers Draix



Figure III.12 - Réseau de bornes IGN à Draix.

La deuxième étape de création des repères fixes concerne le réseau de bornes permanentes (BP) (figure III.13). Pour chaque borne nous avons creusé un trou dans le terrain au fond duquel nous avons placé plusieurs ferrailles à béton. Cette cavité a été remplie postérieurement d'un mélange de ciment, eau et sable. La partie supérieure de la borne consiste en une plaque métallique encastrée dans un champignon de béton légèrement soulevé du terrain.

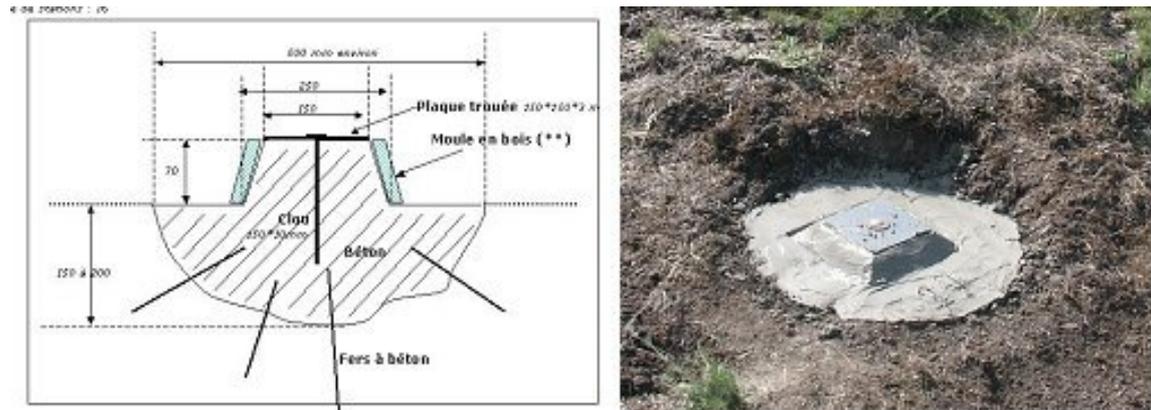


Figure III.13 - Les bornes permanentes (BP) en béton.

Les BP ont été distribuées dans le bassin du Moulin principalement (14 au total), tandis que les autres 7 BP ont été positionnées vers la périphérie du bassin du Laval (figure III.14).



Figure III.14 - Distribution de bornes permanentes (en jaune) sur les bassins du Moulin (ligne rouge) et le Laval (ligne violet).

Le critère de positionnement a été principalement une bonne distribution spatiale des bornes. En plus, sur le bassin du Moulin, on a aussi tenu compte de la visibilité des différents systèmes de ravines. Ces bornes permanentes permettent la rectification des missions aériennes, ainsi que la normalisation des futures campagnes GPS. Les BP de la périphérie du Laval servent aussi à évaluer la qualité des anciens levés DGPS.

Nous avons établi un protocole d'utilisation d'équipements GPS différentiel qui comprend les paramètres suivants : ellipsoïde local CLARKE 1880 IGN, modèle de géoïde RAF98, système de projection Lambert III, système de coordonnées NTF Lambert III 3G, modèle de SCSP GR3DF97A. La méthode de levé DGPS cinématique en temps réel (real time kinematic, RTK) a été sélectionnée, ce qui présente des avantages en termes de rapidité de mesure et de contrôle de qualité en temps réel (Mora et al., 2003). Nous avons donc mesuré les coordonnées terrain de tous les BP (tableau III.6) et les mires (annexes) mises en place par DGPS RTK.

Tableau III.6 - Coordonnées de bornes permanentes à Draix (par DGPS Leica 1200 RTK).

Id	X	Y	Z	date de la mission
BP01	921798,3500	3212344,3473	863,0695	10-2006
BP02	921719,1593	3212514,5055	877,9710	10-2006
BP03	922239,8276	3212999,5003	1019,0576	04-2006
BP04	922928,9402	3212915,6458	1087,2340	04-2006
BP05	922244,1267	3211846,7916	884,6351	10-2006
BP06	921856,3488	3212492,8113	874,4865	10-2006
BP07	921930,4532	3212416,2006	855,7068	08-2005
BP09	922713,3423	3213184,6157	1075,4040	04-2006
BP10	921748,6189	3212672,5669	894,2131	10-2006
BP11	922016,3484	3212190,6370	862,5056	10-2006
BP14	922206,0632	3212343,0303	877,2182	04-2006
BP15	922667,6123	3211889,9673	928,4853	11-2006
BP21	921814,2299	3212451,1401	868,7701	10-2006
BP22	921964,3089	3212615,1156	903,6415	10-2006
BP23	921934,1143	3212571,3111	895,3840	10-2006
BP24	921866,5334	3212517,6663	877,3985	10-2006
BP25	921790,5003	3212651,4611	896,6994	10-2006
BP26	921919,3420	3212648,9813	904,3953	10-2006
BP27	921873,1208	3212708,5154	926,1485	10-2006
BP28	921631,9209	3212576,3465	907,3654	10-2006
BP29	921613,8371	3212457,1410	891,5239	10-2006
BP30	921798,3383	3212549,0480	880,0173	10-2006

Plusieurs missions DGPS et tachéomètre ont été réalisées sur les mêmes BP, permettant de vérifier la cohérence des coordonnées mesurées par rapport à la précision attendue. Dans le tableau III.7 nous pouvons observer l'écart type de ces mesures sur 20 BP. Les résultats sont cohérents avec la précision attendue de l'équipement et la méthode utilisée.

Tableau III.7 - Evaluation de la précision dans le calcul des coordonnées de bornes permanentes (BP) à Draix.

Id	écart type (m)			nombre des missions utilisées
	X	Y	Z	
BP01	0,0313	0,0308	0,0151	3
BP02	0,0000	0,0083	0,0142	3
BP03	-0,0045	-0,0046	-0,0174	2
BP04	0,0163	0,0101	-0,0129	2
BP05	0,0121	-0,0050	0,0162	2
BP06	0,0681	0,0365	0,0211	3
BP09	-0,0039	-0,0201	-0,0241	2
BP10	0,0271	0,0132	0,0097	3
BP11	0,0116	0,0034	0,0469	2
BP14	0,0007	0,0048	-0,0208	2
BP21	0,0156	0,0039	0,0196	3
BP22	0,0098	-0,0115	0,0152	2
BP23	0,0000	0,0177	0,0148	3
BP24	0,0067	0,0088	0,0117	2
BP25	0,0221	0,0064	0,0132	4
BP26	0,0221	0,0110	0,0134	3
BP27	0,0247	0,0083	0,0096	5
BP28	0,0313	0,0258	0,0102	3
BP29	0,0271	0,0226	0,0110	3
BP30	0,0156	0,0130	0,0166	3

La stratégie méthodologique de lever terrain établie nous a permis la mise à disposition et la stabilisation d'un réseau de PCT, à plusieurs niveaux : 2 bornes IGN géodésiques, 22 bornes permanentes (dont 14 au Moulin), environ 100 mires semi permanentes au BVRE du Moulin. Ces points de terrain représentent une base de données de contrôle terrestre adéquate pour le besoin de traitement d'images à très haute résolution.

Le couplage DGPS-Tachéomètre nous a permis d'une part la validation de la qualité du levé DGPS RTK réalisé, mais aussi la prise d'information altimétrique au fond des ravines les plus profondes, et de façon fiable.

III.2.1.4 Calcul informatique du MNT

III.2.1.4.1 Géométrie

III.2.1.4.1.1 Orientation Interne

Pour le calcul de paramètres d'orientation interne, nous avons utilisé la solution par photographies sur des façades de bâtiments munis de repères 3D. Pour les photos aériennes de la mission drone 2005, ce calcul a été fait à partir des couples stéréoscopiques et en utilisant l'outil Etalon développé pour le logiciel Poivilliers-E (Egels, 1999).

Une série de photos a été prise dans un bâtiment muni de 65 cibles (mires 3D, parking sous-sol à l'IGN, Paris) disposées sur différents plans de façade, avec la chambre Sony DSC-P150 (figure III.15).



Figure III.15 - Trois couples stéréoscopiques pris dans le bâtiment de l'IGN à Paris, utilisés dans le calcul de paramètres d'orientation interne pour la mission Juin 2005.

Les paramètres d'orientation interne et les vecteurs de déformation de lentille pour l'appareil photo Sony DSC-P150 (mission 2005), ont été obtenus en utilisant Etalon (figure III.16) : XY sont les coordonnées du centre de symétrie, P est la distance focale en pixels, $R3$, $R5$ et $R7$ sont les coefficients a , b et c respectivement, de l'équation de distorsion radiale.

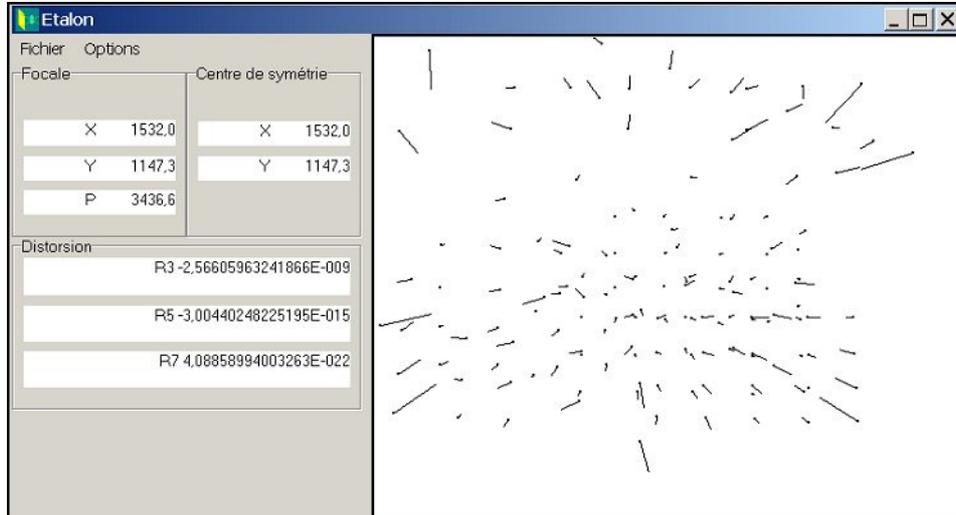


Figure III.16 - Paramètres d'orientation interne et vecteurs de déformation de lentille (2005).

L'ajustement d'un modèle de distorsion radiale (équation 3) aux déformations de lentille montre une forte augmentation parabolique des déformations vers les bords de l'image (figure III.17).

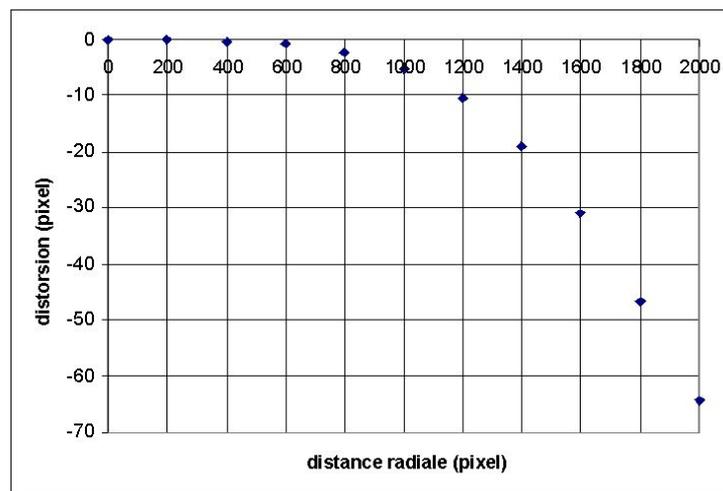


Figure III.17 - Calcul de la déformation de lentille par rapport à la distance au centre de l'image (mission Juin 2005), d'après l'équation polynomiale (3).

Pour la mission drone du 2007 (Sony DSC-V3), nous avons utilisé des photos prises dans le bâtiment d'Agropolis International à Montpellier. Sa proximité avec le laboratoire du Cemagref à Montpellier (Maison de la Télédétection) et les particularités de la façade du bâtiment en béton (comme les marquages ponctuels, figure III.18), facilitent son utilisation comme repère pour le calibrage des appareils photos numériques.

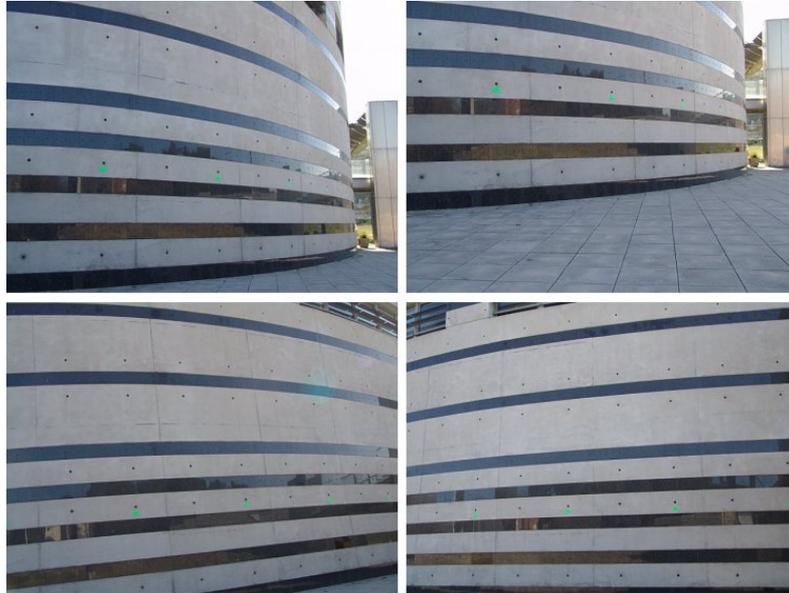


Figure III.18 - Des photos prises dans le bâtiment d'Agropolis International à Montpellier, utilisés dans le calcul de paramètres d'orientation interne pour les missions de Mai 2007 et de Mars 2008.

Le calcul de paramètres d'orientation interne a été réalisé aussi en utilisant l'outil Etalon développé pour le logiciel Poivilliers-E (Egels, 1999). Dans la figure III.19 nous observons l'ajustement d'un modèle de distorsion radiale aux déformations de lentille pour la mission drone du 2007 (Sony DSC-V3). Pour la mission drone du 2008 (Olympus μ 790SW,S790SW), nous avons utilisé aussi des photos prises dans le bâtiment d'Agropolis International à Montpellier. Mais cette fois-ci, le calcul de paramètres d'orientation interne a été réalisé avec l'outil développé pour le logiciel MicMac (Pierrot & Paparoditis, 2006).

Le tableau III.8 rassemble les paramètres d'orientation calculés pour chaque appareil photo utilisé dans chaque mission drone réalisée à Draix.

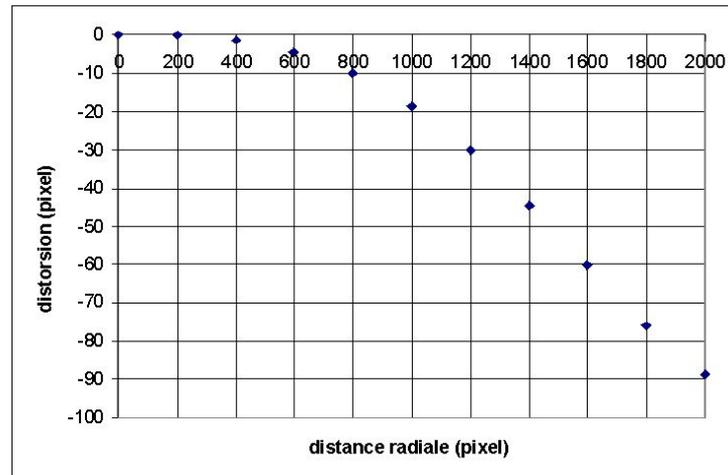


Figure III.19 - Calcul de la déformation de lentille par rapport à la distance au centre de l'image (mission Mai 2007), d'après l'équation polynomiale (3).

Tableau III.8 – Paramètres d'orientation interne des appareils photos utilisés à Draix (unités du centre de symétrie et la distance focale en pixels).

appareil photo	mission	centre de symétrie		focale	coefficients distorsion radiale		
		X	Y	P	R3 (a)	R5 (b)	R7 (c)
Sony DSC-P150	2005	1532,0	1147,3	3436,6	$-2,57^{E-09}$	$-3,00^{E-15}$	$4,09^{E-22}$
Sony DSC-V3	2007	1543,4	1177,9	3077,8	$-2,11^{E-08}$	$2,48^{E-15}$	$1,14^{E-24}$
Olympus μ 790SW	2008	1503,2	1160,3	3463,9	$2,42^{E-09}$	$-3,38^{E-16}$	$3,09^{E-23}$

III.2.1.4.1.2 Orientation Externe

Etant donné le choix d'utilisation d'un vecteur léger drone, les paramètres d'orientation externe seront estimés par approximation pendant l'ajustement du modèle d'aérotriangulation.

III.2.1.4.2 Aérotriangulation

L'ajustement par paquet de blocs (et moindres carrés) est employé afin d'estimer la meilleure solution pour l'aérotriangulation. Ceci permet l'ajustement du bloc entier en réduisant l'erreur au minimum et en distribuant les résidus de façon équilibrée.

Nous allons tester l'impact de la solution d'autocalibrage d'Ebner (1976), avec 12 paramètres additionnels, sur la qualité du MNT, en intégrant ce processus dans le schéma

itératif des paquets de blocs. L'efficacité de cette correction dépend du rapport entre l'erreur systématique et l'erreur aléatoire donc exige une bonne qualité des mesures des PCT. Un nombre plus important de PCT et de points homologues est rendu nécessaire par l'introduction de ces paramètres additionnels. En appliquant le modèle orthogonal d'Ebner (1976) on obtient un schéma d'aérotriangulation avec toutes les corrections (déformation de lentille et auto calibrage).

Pour le couple drone du juin 2005 nous disposons de 8 points de contrôle terrestre (PCT) avec des coordonnées 3D, ainsi que 326 points homologues (PH) détectés automatiquement par corrélation d'images, à l'intérieur de la zone de recouvrement du couple (ainsi que 4 PCT en dehors, figure III.20). La distribution des PH n'est pas homogène : le coté Nord-Ouest des images, plus végétalisé, a un faible potentiel de corrélation ce qui se traduit par une densité plus faible de PH que dans la zone non végétalisée.

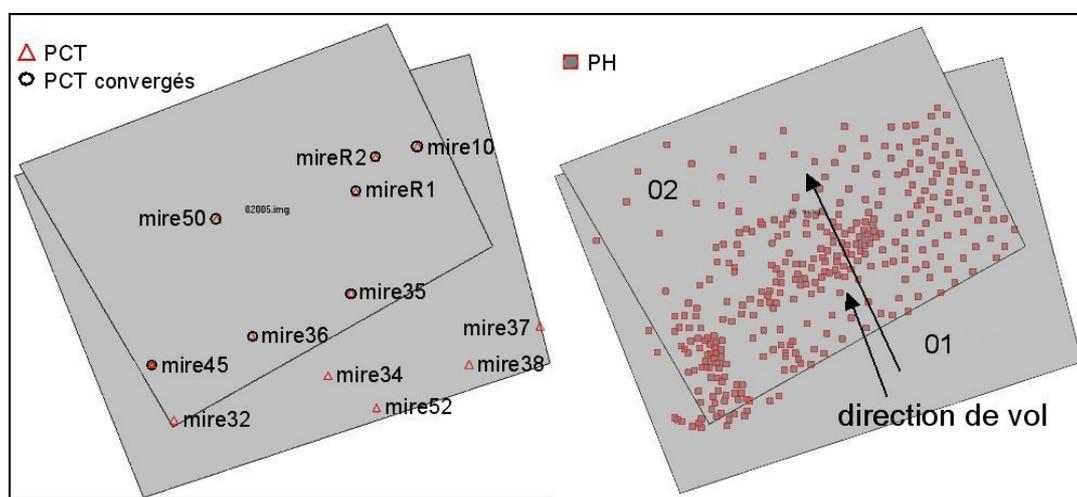


Figure III.20 - Distribution des PCT (cercles noirs) et des PH (carrés rouges) sur le stéréo couple de 2005 (ravine le Moulin).

Pour cette mission (2005), le modèle d'aérotriangulation a été ajusté en utilisant le logiciel ERDAS Imagine LPS, avec une valeur de convergence de 0,001 mètres. Les résultats montrent une EQM totale estimée de 0,011 et de 0,032, 0,177, et 0,196, pour XYZ, respectivement (toutes en pixels). Le tableau III.9 montre les paramètres de l'orientation externe estimés pendant l'ajustement du modèle d'aérotriangulation.

Nous obtenons un rapport B/h de 0,28 (très bas mais favorable à la restitution automatique par corrélation d'images en zones à fortes pentes), et un écart en Z de 29,5 m dans la hauteur de vol entre les images.

Tableau III.9 - Paramètres d'orientation externe calculés (unités XYZ en mètres et $\omega\phi\kappa$ en degrés) couple 2005 (ravine le Moulin).

ID image	X	Y	Z	oméga	phi	kappa
01	921 864,439	3 212 648,732	1 053,237	6,0819	7,0046	-163,0634
02	921 870,597	3 212 688,243	1 023,656	-0,9023	13,8752	-153,4707

L'écart d'altitude du vecteur au moment de l'acquisition d'images est d'environ 30 mètres : 158,24 m pour l'image 01, et 128,66 m pour l'image 02 (d'après les paramètres d'orientation externe). C'est une valeur importante qui entraîne une différence d'échelle entre les deux clichés. Les écarts dans les angles $\omega\phi\kappa$ résultent de l'instabilité du vecteur drone avion, et ils ne représentent pas les conditions de vol idéales pour une restitution précise du relief, par des techniques de la stéréophotogrammétrie. C'est une des limitations de l'utilisation du vecteur drone et des conditions extrêmes d'acquisition des images.

Deux PCT ont été rejetés après l'ajustement du modèle d'aérotriangulation, sur un total de 8 disponibles, ainsi que 8 PH sur un total de 326 disponibles. Dans le tableau III.10 nous pouvons observer les résidus des PCT non rejetés après l'aérotriangulation.

Le PCT mire45 présente les résidus les plus importants, ce qui est cohérent avec la position de la mire (figure III.20) au bord de la zone de recouvrement de deux images, où les effets de la déformation de lentille sont plus forts, même après la correction de ces distorsions. La mire32, encore plus au bord de l'image, a été rejetée pendant l'aérotriangulation.

Tableau III.10 - Résiduels de PCT non rejetés après l'ajustement du modèle d'aérotriangulation (en mètres) couple Juin 2005 (ravine la Roubine).

ID PCT	rX (m)	rY (m)	rZ (m)
mire10	-0,005	0,016	-0.059
mire35	-0,009	-0.009	-0.061
mire36	-0,063	-0.016	-0.125
mire45	0,000	-0.500	-0.500
mire50	0,061	0.003	0.165
mireR1	0,016	-0.016	0.085

Pour l'aérotriangulation du couple drone 2007 sur La Roubine, nous avons utilisé 7 PCT en 3D, et 240 PH détectés par corrélation d'images (figure III.21), dans la zone de recouvrement. Le modèle d'aérotriangulation a été ajusté en utilisant le logiciel ERDAS Imagine, avec une valeur de convergence de 0,001 mètres.

La distribution des PH n'est pas homogène, le côté Nord des images, moins contrasté, a un faible potentiel de corrélation ce qui se traduit par une densité beaucoup plus faible de PH (obtenus automatiquement par corrélation d'images). Le tableau III.11 montre les paramètres de l'orientation externe calculés pour le couple drone 2007.

Nous obtenons un rapport B/h de 0,23 (toujours très bas mais favorable à la restitution automatique par corrélation d'images en zones de fortes pentes), et un écart en Z de 6,86 m dans la hauteur de vol entre les images, plus faible que le couple 2005. Le pourcentage de recouvrement est de 69%. La hauteur de vol moyenne du vecteur drone est de 62,9 m. Les écarts dans les angles $\omega\phi\kappa$ sont aussi importants et résultent de l'instabilité du vecteur drone et des conditions d'acquisition des images en zones montagneuses.

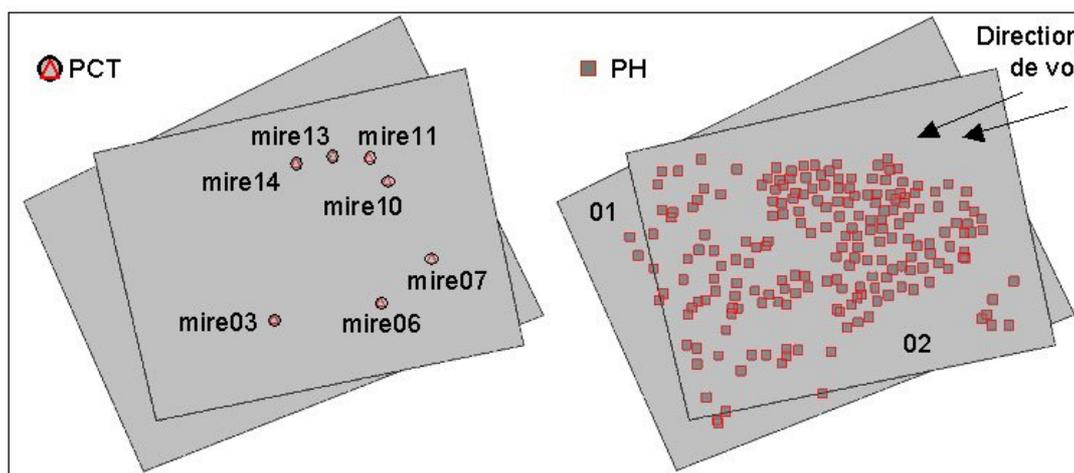


Figure III.21 - Distribution des PCT (cercles noirs) et des PH (carrés rouges) sur le stéréo couple de 2007 (ravine la Roubine).

Tableau III.11 - Paramètres d'orientation externe calculés (unités XYZ en mètres et $\omega\phi\kappa$ en degrés) couple 2007 (ravine la Roubine).

ID image	X	Y	Z	oméga	phi	kappa
01	921860,7810	3212335,7826	931,3298	1,2797	-6,7369	24,4173
02	921874,9765	3212336,5003	924,4712	1,5982	-1,3616	12,4254

Pour la mission drone-avion 2008, nous avons utilisé 15 images au total afin de construire un MNT drone. Mais cette fois nous avons réalisé toute la chaîne de traitement photogrammétrique, dès le calibrage de l'appareil photo jusqu'à la corrélation d'images, en utilisant le logiciel MicMac. Pour cela nous avons fourni les images, les coordonnées images et les coordonnées terrain de PCT au laboratoire MATIS de l'IGN (au concepteur du logiciel Marc Pierrot-Deseilligny).

Cette mission a été effectuée en ayant pour but la mise en place d'une méthodologie d'évaluation de la qualité hydrologique d'un MNT, où il fallait réaliser un travail sur le « chevelu » des thalwegs de la ravine au Moulin juste avant la mission drone-avion. Cette fois-ci nous nous sommes servis de toutes les photos aériennes disponibles de la ravine acquises pendant la mission, de manière à être sûrs de pouvoir représenter numériquement toute son étendue.

Dans la figure III.22 nous pouvons observer la disposition d'images drone mission 2008 sur le Moulin, ainsi que les PCT utilisés dans l'aérotriangulation avec MicMac.

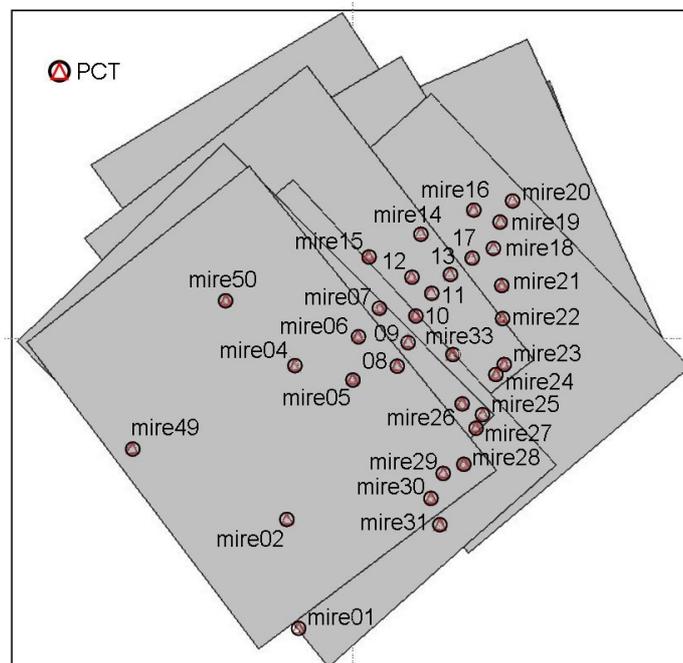


Figure III.22 - Distribution des PCT (cercles noirs) sur plusieurs couples d'images drone de Mars 2008 (ravine le Moulin).

Dans le tableau III.12 nous avons l'altitude du vecteur au moment de la prise de chaque photo aérienne drone de la mission de Mars 2008. La hauteur de vol moyenne de cette mission est autour de 64 mètres approximativement. Néanmoins, les photos ont été prises en deux passages du drone principalement. Un premier groupe d'image a été prises à une hauteur moyenne de 53 mètres, pendant que pour le deuxième passage la hauteur moyenne d'images est plus élevée (72 mètres).

Tableau III.12 - Altitude du vecteur au moment de la prise de vue pour chaque image de la mission de Mars 2008 (ravine le Moulin).

ID image	altitude au Sol (m)	altitude du vecteur (m)
117	897,785	56,677
118	897,444	56,615
140	911,189	51,907
141	910,534	52,496
142	908,792	53,767
144	904,257	55,466
145	900,394	59,329
183	906,924	67,497
184	903,371	72,380
185	902,918	73,044
186	903,156	71,574
187	900,268	72,297
188	897,789	75,235
189	896,869	75,269
190	896,458	75,849

III.2.1.4.3 Restitution du relief

Dans l'étape de corrélation d'images nous avons utilisé les programmes ERDAS Imagine LPS et MicMac, afin d'évaluer l'impact d'un algorithme de corrélation d'images plus robuste (MicMac) sur la qualité du MNT résultant.

Le premier algorithme utilisé dans cette recherche a été ERDAS-LPS (licence dans l'UMR TETIS, Cemagref/AgroParisTech, Maison de la Télédétection à Montpellier). L'outil MicMac a été appliqué par l'équipe du laboratoire MATIS à l'IGN (concepteur du logiciel Marc Pierrot-Deseilligny), en utilisant les images et les données de terrain de ce travail de recherche.

Pour ce qui concerne les corrélations d'images avec ERDAS-LPS, le canal rouge a été utilisé pour la corrélation automatique d'images étant donné son meilleur contraste par rapport aux autres canaux disponibles. La taille de la fenêtre de corrélation utilisée a été de 7*7 pixels (soit 45*45 cm approximativement).

La taille finale du pixel MNT drone ERDAS du Juin 2005 a été fixée à 15 centimètres, car ERDAS-LPS contraint la taille minimale de pixel du MNT à trois fois la taille d'images utilisées. La figure III.23 montre une restitution 3D de l'ensemble des ravines où a été calculé le MNT drone ERDAS Juin 2005.



Figure III.23 - Vue 3D du MNT drone ERDAS mission Juin 2005, le Moulin (pixel 15cm).

Afin d'apprécier le détail atteint dans la restitution du relief par stéréoscopie drone, on compare qualitativement sur une ravine les courbes de niveau issues de restitution manuelle de photos en argentique au 1/4000, avec notre résultat (figure III.24 a et b, respectivement).

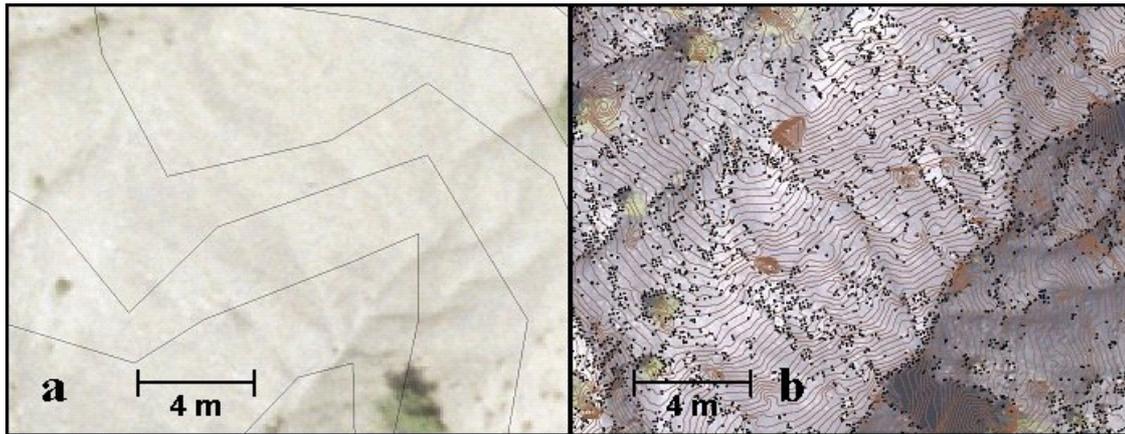


Figure III.24 - Courbes de niveau sur une ravine à partir de photos aériennes 1/4000 (a) ; courbes de niveau et points effectivement corrélés à partir du couple drone 2005 (b).

Les courbes de niveau du MNT existant sont à espacement de 2 m, celles issus du couple drone sont à espacement de 20 cm. La finesse de détail et le modelé des courbes démontrent les potentialités de la restitution précise du relief à partir des images drone.

La quantité de points effectivement corrélés dans une fenêtre de 285 m² est de 3 915 points (figure III.24b). Cette densité représente environ 14 points par mètre carré, mais elle n'est pas homogène sur la surface. La densité moyenne nous donne une distance moyenne de 20 cm approximativement, mais dans les zones densément corrélées la distance entre points peut atteindre la taille du pixel des images drones originales (6 cm).

Les points effectivement corrélés, suivent les zones de rupture radiométrique dans les images, telles que les lignes d'ombres. En absence de végétation, les zones de rupture radiométrique sont les lignes de contraintes classiques d'un MNT : les thalwegs et les crêtes. En présence de végétation les points effectivement corrélés sont bien contrôlés par les bordures de la végétation et ses ombres.

La dépendance de la corrélation sur les points de rupture abrupte de la radiométrie laisse une grande partie de la surface des photos inexploitée dans la restitution du relief. Environ 1% du total des pixels disponibles ont été effectivement corrélés avec ERDAS-LPS, et cela inclut les fausses corrélations.

Même si le MNT semble cohérent dans un contexte général, en regardant en détail certains endroits (figure III.25) nous pouvons trouver des fortes anomalies, des artéfacts qui proviennent possiblement de l'interpolation du MNT en utilisant des pixels appartenant aux fausses corrélations.

Les zones du MNT drone ERDAS 2005 les plus touchées par les artéfacts de l'interpolation sont les fonds des ravines les plus profondes et les espaces proches des végétations de grande taille, où la corrélation d'images peut être affectée par un contraste pauvre entre les photographies aériennes drone, étant donné l'effet d'ombre portée.

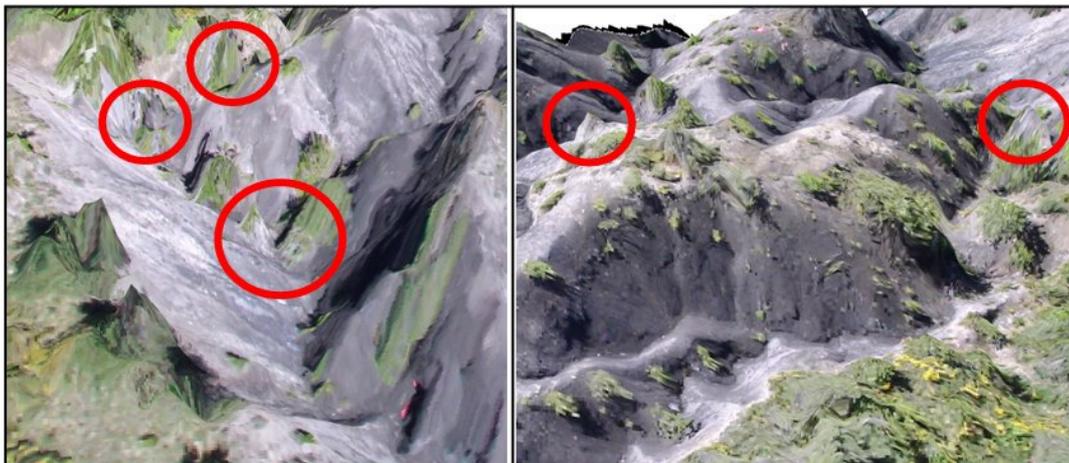


Figure III.25 - Deux zooms 3D sur le MNT drone ERDAS 2005 (ravine sur le Moulin), dans les cercles rouges des artefacts de l'interpolation (pics).

La figure III.26 montre la restitution 3D du bassin de La Roubine (mission drone 2007) avec l'utilisation de l'outil MicMac. Le MNT résultant a à la fois une bonne cohérence générale ainsi qu'une qualité homogène quand on rentre dans le détail du relief. Ce MNT a une taille de pixel finale de 3 cm, égale à la taille moyenne des pixels des images drone utilisées.



Figure III.26 - Vue 3D du MNT drone MicMac mission de Mai 2007, la Roubine.

Les algorithmes de corrélation multi résolution (ex. MicMac) ont d'autres paramètres réglables comme ceux qui interviennent pendant la corrélation d'images : un paramètre de dilatation qui fixe l'intervalle à explorer à partir de la prédiction de l'étape de corrélation d'images précédente ; un paramètre permettant de séparer la résolution des algorithmes de la résolution image (lorsque la solution attendue est très régulière, ce paramètre permet, à la fois, de gagner du temps et de forcer la régularisation) ; la possibilité de n'utiliser à une étape qu'un sous-ensemble des images disponibles.

Le fait du dénivelé important joue sur le paramètre de recherche de la distance de corrélation (équivalent à la ligne épipolaire, mais cette distance devient très longue pour des recherches de points homologues avec des dénivelées très fortes). MicMac utilise des pyramides et une stratégie de multi résolution afin de stabiliser la corrélation de tous les pixels des couples stéréoscopiques. Un autre point clef est les paramètres de la régularisation du relief, ce qui peut réduire l'influence des fausses corrélations sur la cohérence du MNT.

Afin d'évaluer l'impact de la stratégie de corrélation d'image sur la cohérence finale des MNT drone, nous pouvons comparer les MNT du même bassin de La Roubine produits avec le programme ERDAS et l'outil MicMac (figure III.27). Ces deux MNT ont été générés en utilisant les mêmes paramètres d'orientation interne et externe. Le modèle d'aérotriangulation a été ajusté avec ERDAS-LPS, et les valeurs de ces paramètres ont été exportées sur MicMac.

La taille de la fenêtre de corrélation utilisée avec ERDAS a été de 7*7 pixels (soit 21*21 cm approximativement), la taille finale du pixel a été de 5 cm. Tandis que pour MicMac la taille de la fenêtre de corrélation a été de 5*5 cm (soit 15*15 cm approximativement), pendant que la taille finale du pixel a été de 3 cm.

Même si le MNT ERDAS possède une cohérence générale semblable à celle du MNT MicMac, il est plus affecté par les artefacts produits pendant la phase de restitution numérique du relief (fausses corrélations), comme les pics et les fossés (figure III.27, ERDAS).

La figure III.28 montre la restitution 3D de la ravine au Moulin (mission drone 2008), aussi produit avec l'outil MicMac. Le MNT montre encore une excellente cohérence générale, mais localement il est aussi cohérent. Le MNT drone Mars 2008 a une taille de pixel finale de 2,73 cm, égale à la taille moyenne des pixels des images drone utilisées.

L'algorithme de corrélation d'images est un point clef dans la chaîne de calculs photogrammétriques. Le nombre et disposition de pixels effectivement corrélés, ainsi que la proportion des fausses corrélations seront déterminants dans la qualité finale du MNT produit. L'impact de cette étape sur la qualité finale du MNT sera évalué en utilisant les données LiDAR terrestre comme « vérité terrain ».

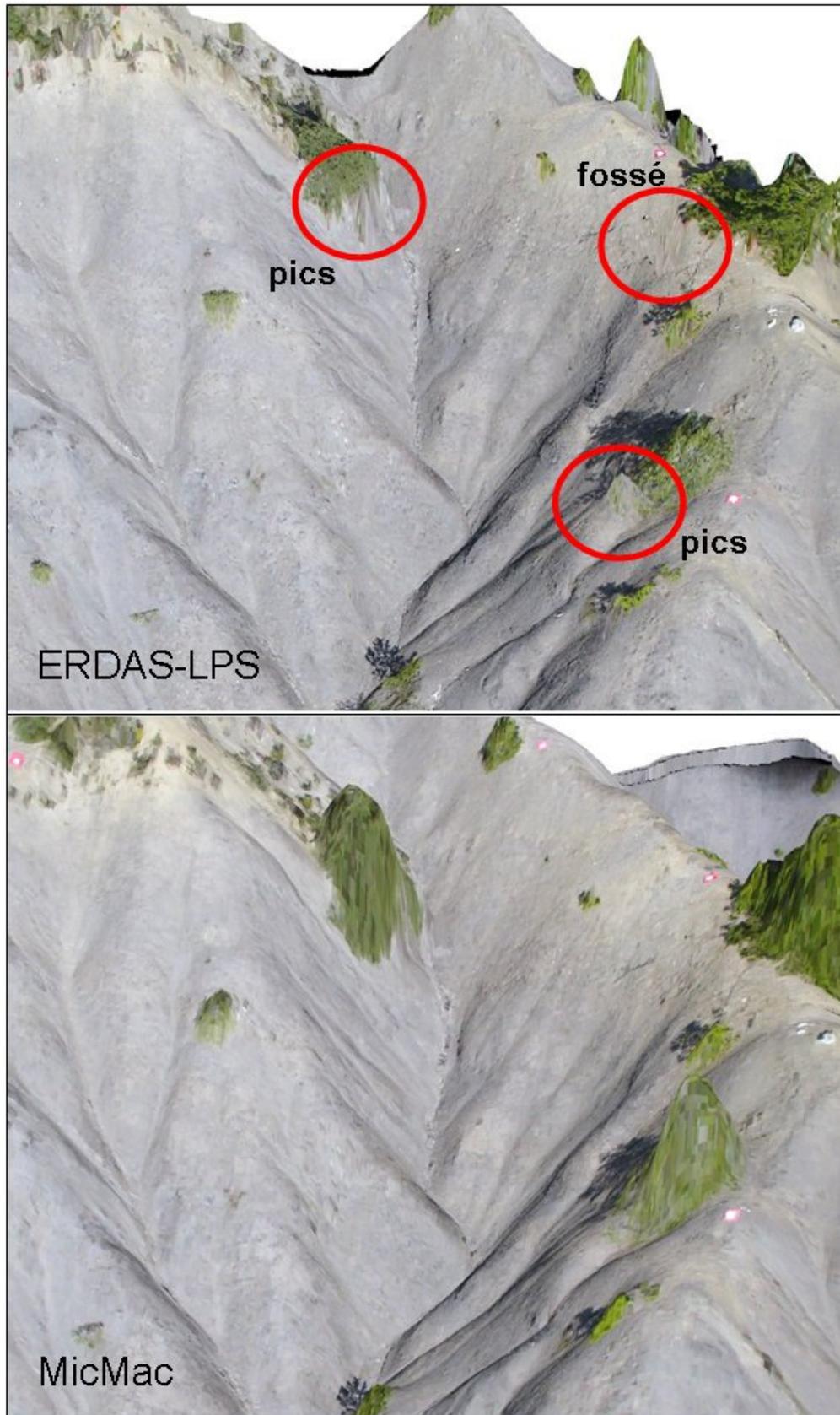


Figure III.27 - Des zooms 3D sur les MNT drone ERDAS et MicMac (mission Mai 2007, la Roubine), dans les cercles rouges des artefacts de l'interpolation avec ERDAS.



Figure III.28 - Vue 3D du MNT drone mission Mars 2008, ravine Le Moulin.

III.2.2 Validation et analyse de la précision

Notre but est ici de tester l'effet de différentes approches méthodologiques dans la chaîne de traitement photogrammétrique sur la qualité de la restitution du relief. Le tableau III.13 indique les différentes sources disponibles de données spatiales (images) pour la construction des MNT ainsi que les données de terrain correspondant pour sa validation (groupes de données « images-terrain »).

Les effets de la correction de la déformation de lentille et l'auto-calibrage sur la qualité altimétrique des MNT, ont été évalués en utilisant les images drone mission 2005 et les points de validation DGPS-Tachéomètre mission 2006, pris sur la ravine du Moulin.

Pour le groupe de données « images-terrain » 2005 du Moulin, trois MNT ont été construits à partir du même couple stéréoscopique d'images drone, avec le même jeu de PCT et de PH : a) MNT sans correction de lentille et sans auto calibrage (MNT.o) ; b) MNT avec correction de lentille mais sans auto calibrage (MNT.L) ; et c) MNT avec correction de lentille et avec auto calibrage (MNT.LA). L'évaluation de qualité altimétrique de ces MNT a été réalisée en utilisant les données « vérité terrain » DGPS-Tachéomètre 2006.

Tableau III.13 - Groupes des données « images-terrain », et types d'évaluations réalisées.

	altimétrie		hydrologie
BVRE	Moulin	Roubine	Moulin
mission images	juin 2005	mai 2007	juin 2005
mission terrain	DGPS-Tachéo 2006 LiDAR 2007	LiDAR 2007	DGPS-Tachéo 2006 photos 2008
type évaluation	déformation lentille auto-calibrage	corrélateur d'image	zones buffer (tracé des thalwegs)
algorithme	ERDAS-LPS	ERDAS-LPS MicMac	D8

L'effet de l'utilisation de l'algorithme de corrélation d'images MicMac a été évalué en utilisant les images drone avion-jaune 2007, et les points de validation LiDAR terrestre 2007, pris sur la Roubine. Pour le groupe de données « images-terrain » 2007 de la Roubine, deux MNT ont été construits à partir du même couple stéréoscopique d'images drone, avec les mêmes paramètres d'orientation interne et externe, calculés pendant l'aérotriangulation avec ERDAS : a) MNT corrélé avec le logiciel ERDAS-LPS (MNT.ERDAS) ; et b) MNT corrélé avec le logiciel MicMac (MNT.MicMac).

La méthode de zones buffer a été utilisée pour l'évaluation de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs des MNT drone 2005, les ortho photos 2005, les photos aériennes et les photos panoramiques 2008, ainsi que les points de validation DGPS-Tachéomètre 2006, sur la ravine du Moulin.

III.2.2.1 Lever de données « vérité terrain »

Pour le lever des données « vérité terrain », nous nous sommes servis du même équipement DGPS-Tachéomètre utilisé pour le lever de géoréférencement, ainsi que d'un LiDAR terrestre (Optech ILRIS-3D). Tous ce qui concerne le LiDAR terrestre sera traité dans la partie « Approche Terrestre », même si ces données ont été utilisées pour valider les MNT drone.

Une campagne mixte DGPS-Tachéomètre a été réalisée dans la zone d'étude pendant l'année 2006, en s'appuyant sur les BP comme des stations tachéomètre et comme base pivot DGPS, pour le lever des points de validation, ainsi que toutes les mires semi permanentes sur les BVRE du Moulin et La Roubine (coordonnées en annexe). Les points de validation (388) ont été filtrés de façon à ne garder que l'information « vérité terrain » sur sol nu.

Nous pouvons observer dans la figure III.30 la distribution en 3D du réseau de points de validation DGPS-tachéomètre (en rouge) sur une ravine du Moulin. Les points de validation suivent les lignes principales du relief en mode semis aléatoire avec un pas de quelques décimètres. Nous avons aussi établi des profils de pentes sur quelques versants.

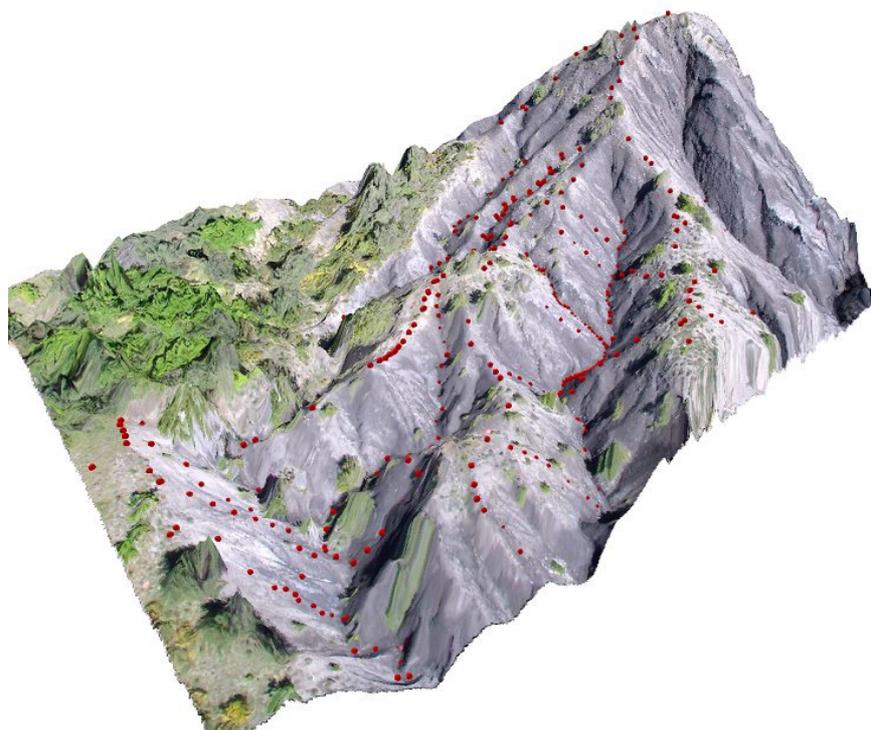


Figure III.30 - Réseau de points de validation (388) prises par campagne mixte DGPS-tachéomètre sur une ravine du Moulin (en rouge).

Les systèmes comme le GPS ou le tachéomètre présentent un problème pour son utilisation dans les conditions de terrain aussi particulières que Draix (versants marneux nus). Ces

systèmes ont besoin d'un support canne pour l'antenne (GPS) ou bien pour le prisme (tachéomètre) afin de repérer un point dans l'espace 3D. Souvent cette canne s'enfonce de quelques millimètres (voire centimètres) sur la marne dégradée au moment de la prise des coordonnées (figure III.31) jusqu'à quelle atteint une couche plus compacte. Ceci peut provoquer des erreurs non systématiques significatives à l'échelle et à la précision de travail.

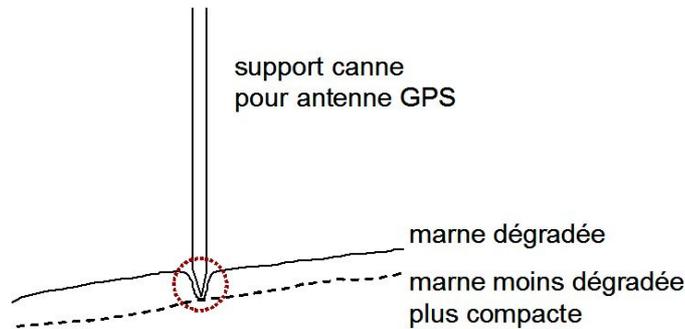


Figure III.31 - Problème dans le calcul de l'altitude de points de validation avec un support canne pour antenne GPS (ou mire tachéomètre) sur l'altérité de marne noire dégradée.

Un autre problème dans l'utilisation de ces systèmes est le caractère « invasif » de la méthode, qui en combinaison avec les conditions topographiques de la zone d'étude, peut provoquer des altérations artificielles dans l'évolution des états de surface de la marne nue sur les bassins versants expérimentaux. Dans le bassin de la Roubine, qui représente l'unité spatiale élémentaire d'érosion la plus petite à être équipée pour la mesure de sédiments à Draix, ces petites altérations artificielles peuvent provoquer de faux résultats dans le suivi diachronique de l'ablation.

Comme mentionné auparavant, la fiabilité de l'évaluation de qualité des MNT drone fins et détaillés repose d'abord sur la qualité de points de validation. Dans ce cadre, nous avons testé les données LiDAR terrestre comme source de données « vérité terrain » non invasif.

III.2.2.2 Évaluation de la précision dans le calcul de l'altitude

III.2.2.2.1 Correction de déformation de lentilles et l'autocalibrage

Pour l'évaluation de qualité à partir de points de validation DGPS-Tachéomètre, le calcul des erreurs sera fait sur tous les points d'observation terrain en comparant les différences d'altitude entre les points de référence terrain et les différents MNT produits. Pour l'évaluation à partir des scans LiDAR terrestre (évaluation de qualité « surface continue »), le calcul des erreurs sera faite par différence des MNT drone (MNT.LA) et MNT LiDAR terrestre (mission 2007).

III.2.2.2.1.1 Données de validation DGPS-Tachéomètre

Les résultats de l'évaluation de la qualité altimétrique des MNT drone (ERDAS) de Juin 2005 se présentent dans la figure III.32, où le MNT.o représente l'application sans correction de lentille et sans auto calibrage, le MNT.L représente l'application avec correction de lentille mais sans auto calibrage, et le MNT.LA représente l'application avec correction de lentille et avec l'auto calibrage.

Par rapport au MNT.o, on observe des améliorations successives à chaque type de correction. L'amélioration la plus importante dans la qualité du MNT drone provient de la correction de la déformation de lentille (cf. figure III.32a et III.32b). Avec l'auto calibrage (toutes corrections), l'erreur quadratique moyenne (EQM) en Z pour le MNT.LA diminue d'environ 80% par rapport à l'EQM du MNT.o (aucune correction). L'application de ces corrections permet de :

- ramener la moyenne de l'erreur en altitude pour le MNT.LA à 8 cm, ce qui est à peine supérieur à la taille initiale du pixel de l'image drone (6 cm).
- Améliorer fortement la précision du MNT (écart-type), ce qui est garant d'une meilleure cohérence de la représentation du relief.
- Réduire fortement la plage de variation de l'erreur en altitude ([-3.15m ; 1.96m] pour le MNT.o contre [-0.78m ; 1.07m] pour le MNT.LA).

La mise en œuvre de l'auto calibrage sur les images (MNT LA) nous permet de réduire les erreurs systématiques de manière significative. Ces affirmations se retrouvent sur les histogrammes de fréquence des erreurs pour chaque MNT analysé (figure III.32b). L'histogramme des erreurs pour le MNT.o (ligne bleue) est plat et étendu avec une plage de variation très importante (figure III.32b).

Avec l'application de corrections (MNT.L et MNT.LA, lignes verte et rouge respectivement) l'histogramme des erreurs se déplace vers l'axe des ordonnées et il se resserre, les valeurs des erreurs sont plus concentrées.

Dans la figure III.33 nous pouvons observer les séries des erreurs (résidus) correspondant à un profil de crête et un profil de thalweg. La tendance générale des séries des erreurs montre l'effet de déformation radiale de lentille surtout pour le MNT sans aucune correction (MNT.o, carré rouge clair dans la figure III.33), dans chaque profil. Les résidus du profil thalweg sont d'une ampleur plus importante que ceux de la crête.

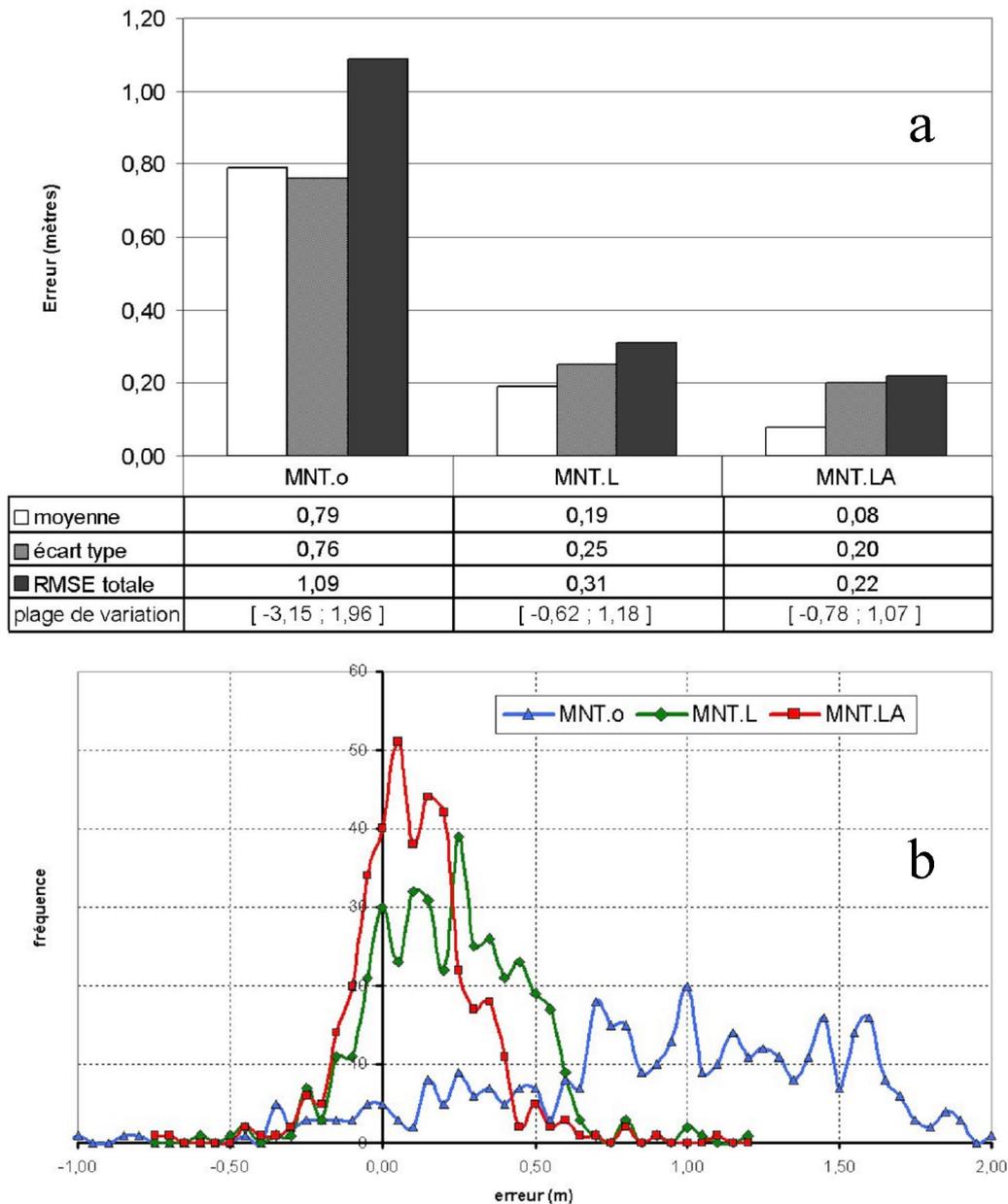


Figure III.32 - Statistiques de contrôle de qualité (a) et histogrammes de fréquence des erreurs en Z (b), pour chaque MNT drone corrélé avec ERDAS 2005 analysés.

Après la correction de la déformation de lentille, les résidus qui correspondent au MNT.L (cercle noir foncé, figure III.33) montrent déjà une amélioration significative, surtout pour la crête. Par rapport au thalweg, nous pouvons observer toujours des erreurs systématiques même si elles ont été réduites en ampleur.

L'utilisation de l'approche par auto calibrage (MNT.LA, triangles verts clairs dans la figure III.33) ne représente pas une amélioration significative pour le profil qui correspond à la crête. Toutefois, ce n'est pas le cas du profil thalweg où le profil MNT.LA semble plus affecté.

Ces résultats nous indiquent l'importance de la correction de la déformation de lentille, et la compensation a posteriori des erreurs systématiques résiduelles (par auto calibrage) dans la restitution du relief par stéréophotogrammétrie drone.

Maatouk (2004), mentionne que l'exactitude en Z peut être améliorée jusqu'à une valeur égale à cinq fois la taille du Pixel après la correction de la déformation de lentille, soit une EQM de $6 \text{ cm} * 5 = 30 \text{ cm}$, ce qui est comparable avec notre résultat : 31 cm. Avec l'approche par auto-calibrage l'EQM a encore diminué jusqu'à 22 cm, soit environ trois fois et demie la taille moyenne du pixel de base des images drone.

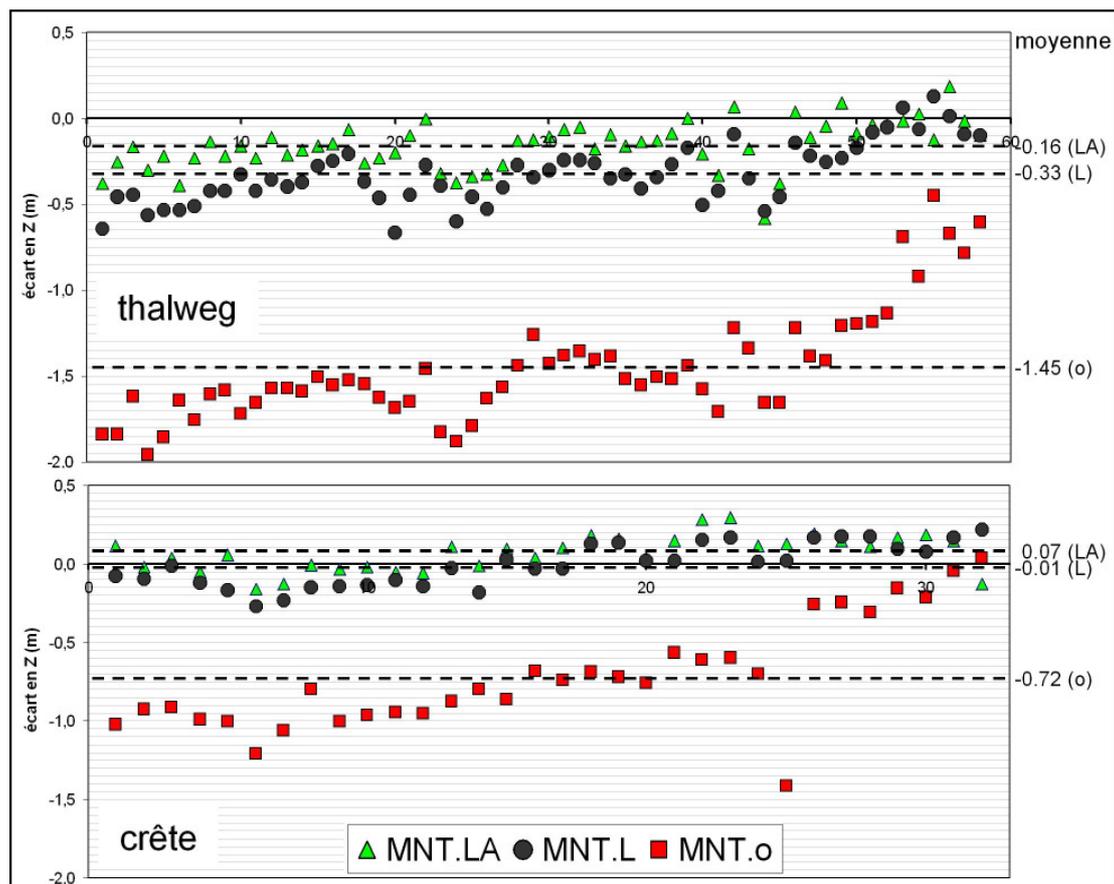


Figure III.33 - Profils des écarts « vérité terrain moins chaque MNT » sur une crête (points A-B) et un talweg (points B-C).

Afin d'avoir une vision générale de la distribution spatiale des erreurs, nous avons calculé la distance au centre de l'image (rayon) de chaque point de validation (figure III.34), pour les trois niveaux de traitement étudiés.

L'effet de la déformation de la lentille dans la distribution des erreurs est bien évident, l'erreur est plus forte dès qu'on s'éloigne du centre de l'image (figure III.34a). L'application du modèle de déformation de lentille (figure III.34b) montre une amélioration significative de la qualité du MNT. L'effet d'erreur systématique du MNT est encore visible (forme de la ligne de tendance), mais cet effet a été significativement diminué.

La figure III.34c correspond au MNT.LA avec toutes corrections. La distribution des erreurs est plus resserrée autour de l'axe des X, correspondant à la baisse de la moyenne des erreurs en Z de 0,19 à 0,08 cm (figure III.32a). L'effet des erreurs systématiques a été aussi diminué, la pente de la ligne de tendance (0,0033, figure III.34c) est plus faible que dans le cas sans auto calibrage (0,0069, figure III.34b).

L'EQM totale finale obtenue (0,22 m), et la présence de résidus systématiques laisse encore la possibilité d'améliorations surtout autour d'une estimation plus performante de paramètres d'orientation interne de l'appareil photo (modèle de déformation de lentille, distance focale).

III.2.2.2.1.2 Données de validation LiDAR terrestre

Nous avons sélectionné une ravine du bassin du Moulin où les données LiDAR étaient plus denses (figure III.35). Une nouvelle grille régulière a été calculée à l'intérieur du polygone LiDAR sélectionné (MNT-LiDAR, maille de 5 cm).

Une évaluation de qualité a été faite dans le polygone sélectionné, par différence des MNT : MNT.LA (drone ERDAS 2005) moins MNT-LiDAR 2007. Les valeurs positives de cette différence sont principalement situées en tête de ravine (figure III.35), et moins évidemment le long de sa rive droite, dénotant une sur estimation de Z pendant la corrélation d'images drone. Nous pouvons trouver une situation inverse en rive gauche de la même ravine, où la sous estimation est plus évident.

Les nombreuses taches bleues et rouges intenses sont associées à des anomalies locales de type « pics et fossés », respectivement, dus aux fausses corrélations pendant la restitution numérique du relief. Ces nombreuses taches isolées affectent la qualité finale du MNT mais aussi sa continuité et sa cohérence. Elles pourraient être éliminées dans notre cas par un post traitement de type algorithme de lissage.

D'autres solutions intègrent ces régularisations directement dans l'algorithme de corrélation d'image, par exemple le logiciel MicMac (Pierrot D., 2007). Ces appréciations n'auraient pas été possibles en utilisant seulement les points de validation pris par DGPS-Tachéométrie.

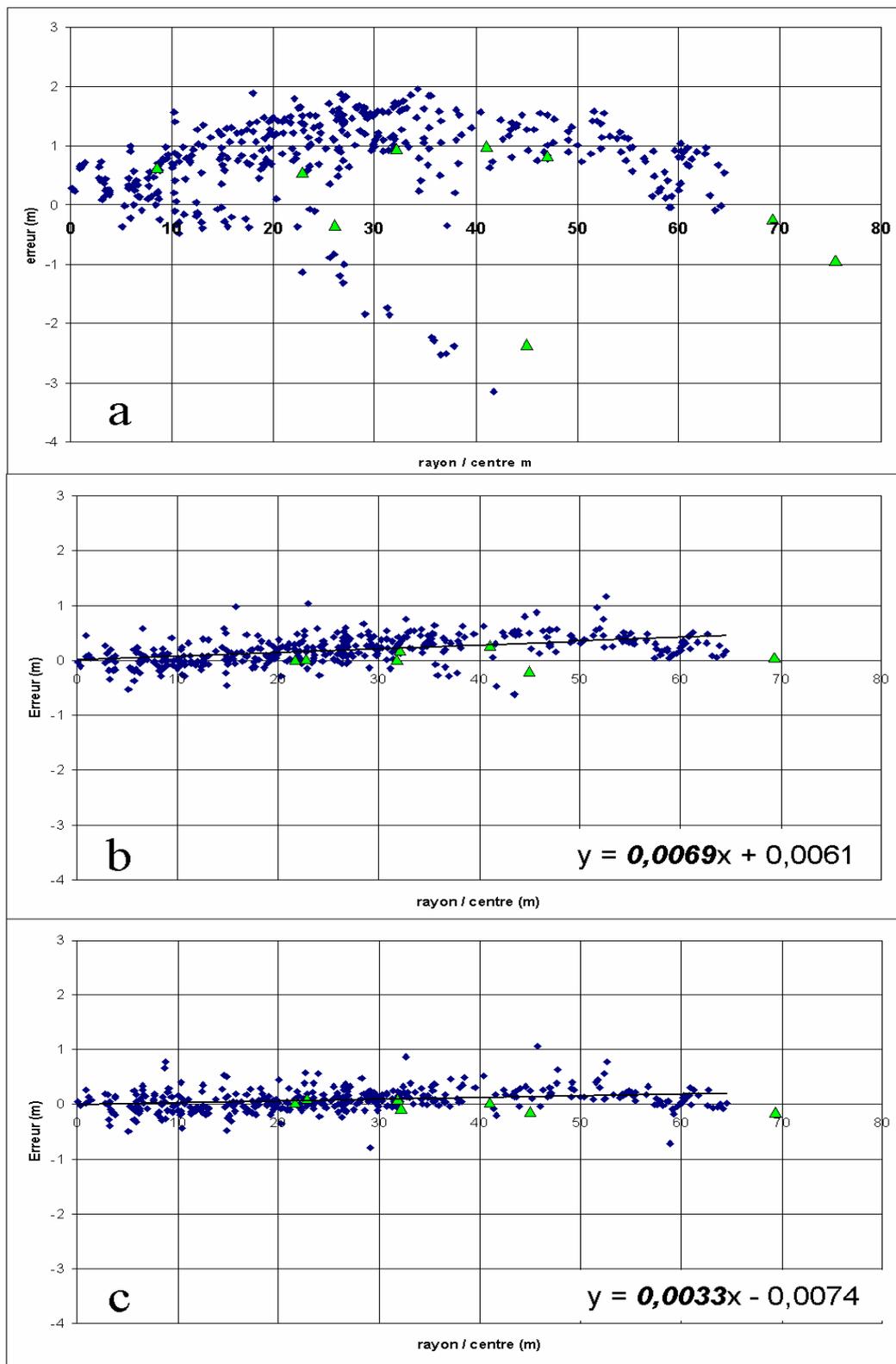


Figure III.34 - Distribution des erreurs en Z par rapport à la distance (rayon) au centre de l'image, a) MNT.o, b) MNT.L, et c) MNT.LA.

L'évaluation de l'erreur en Z dépend non seulement du décalage en Z lui-même mais également des décalages selon les axes X et Y, particulièrement dans un relief très accidenté comme Draix. Une optimisation 3D (MNT.LA au MNT-LiDAR) a été effectuée pour calculer le décalage moyen global dans chaque axe : -0,004, 0,014, et -0,272 (tous en mètres) pour XYZ respectivement. Ces résultats montrent un décalage significativement plus important en Z, par rapport aux axes XY.

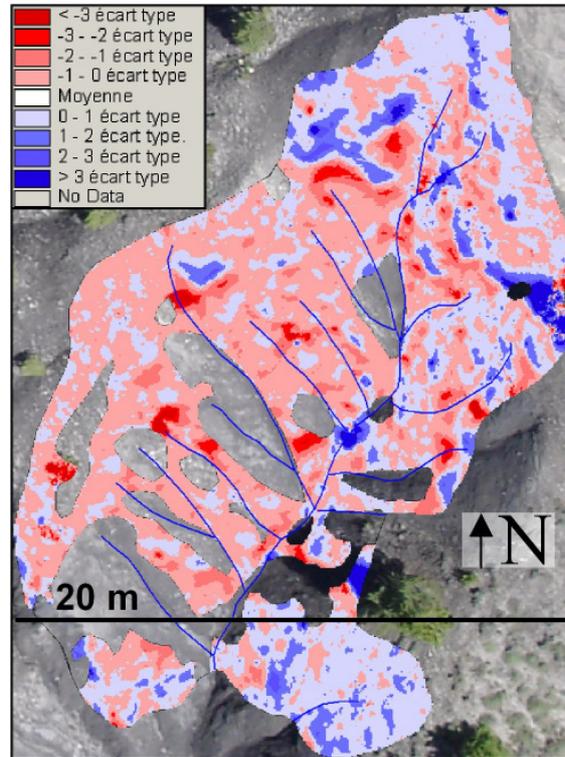


Figure III.35 - MNT.LA (drone ERDAS 2005) moins MNT-LiDAR 2007 (moyenne -0,14 m, écart type 0,19 m).

Nous avons comparé l'évaluation de qualité du MNT.LA drone faite avec les deux sources de données de vérité terrain. Pour la référence terrain obtenue par DGPS-Tachéométrie, nous avons 30 points de contrôle de qualité dans le polygone sélectionné. Dans le cas du nuage de points LiDAR terrestre (et le MNT de référence résultant), nous avons 101 912 pixels. Les résultats de ces deux évaluations de qualité (tableau III.14) montrent que même si l'écart type en Z est similaire pour les deux jeux de données de vérité terrain, l'EQM est plus importante pour le LiDAR terrestre.

Tableau III.14 - Résultats de l'évaluation de qualité du MNT.LA 2005 (en mètres) pour les deux jeux de données « vérité terrain » : DGPS-Tachéométrie et LiDAR terrestre.

	DGPS-Tachéomètre	MNT-LiDAR
points de validation (confiance)	26 (96%)	96 816 (95%)
moyenne (m)	-0,04	-0,14
écart type (m)	0,12	0,13
EQM (m)	0,12	0,19

III.2.2.2 Algorithmes de corrélation d'images

L'effet de la stratégie de corrélation d'images sur la précision dans le calcul de l'altitude par le MNT a été évalué en comparant les résultats obtenus avec l'utilisation des logiciels ERDAS et l'outil MicMac. Pour ceci, nous avons utilisé les images drone de la mission du Mai 2007 (la Roubine) pour la génération des MNT drone, ainsi que les données « vérité terrain » prises par LiDAR terrestre en Mai 2007 pour le même bassin.

Afin d'éviter de perturber l'évaluation de ces stratégies de corrélation, nous avons utilisé les mêmes paramètres d'orientation interne et externe (après avoir ajusté le modèle d'aérotriangulation en utilisant ERDAS) pour les deux cas. Ensuite, des MNT drone 2007 la Roubine ont été créés en utilisant les stratégies de corrélation d'images ERDAS et MicMac.

Dans la figure III.36 nous pouvons observer une vue 3D du MNT MicMac 2007 obtenu sur le bassin de la Roubine avec le nuage de points LiDAR terrestre (mission Mai 2007) drapé sur le MNT. Ce nuage de points LiDAR terrestre est d'excellente qualité altimétrique, les points sont bien distribués, nombreux, et obtenus de façon non intrusive ; ils représentent pour nous un jeu de données « vérité terrain ». Ce nuage de points a été généralisé en mode raster en utilisant une moyenne simple à un pas régulier équivalente à la résolution des MNT drone à évaluer.

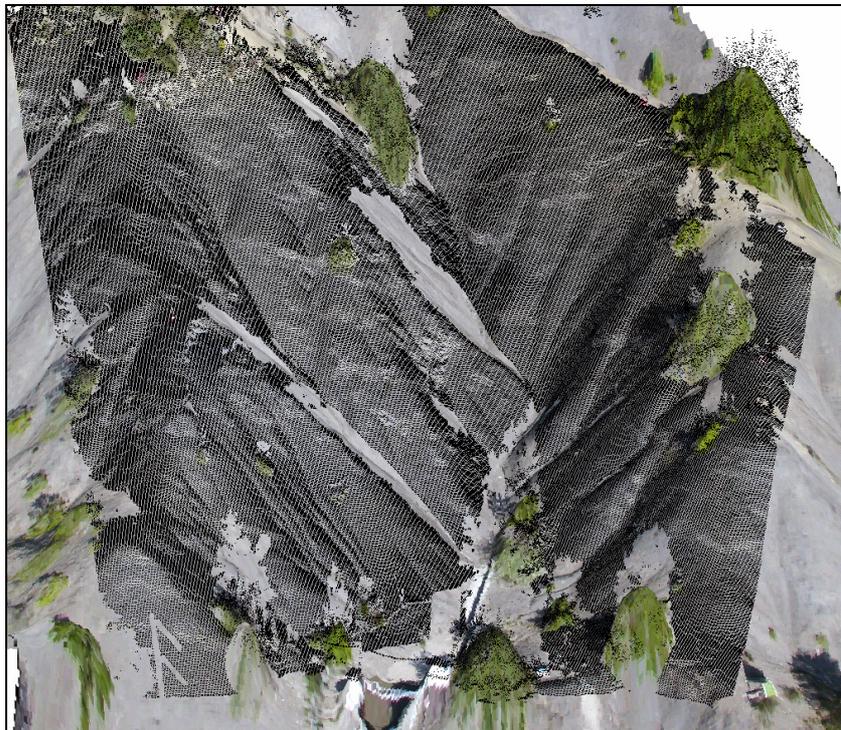


Figure III.36 - Vue 3D du nuage de points LiDAR terrestre (mission Mai 2007) drapé sur le MNT drone (mission Mai 2007, pixel 3 cm) du Bassin de la Roubine.

Ce MNT LiDAR terrestre interpolé est alors utilisé comme référence pour vérifier, par différence d'altitudes, la qualité des MNT drone Mai 2007. Le nombre de pixels utilisés dans cette validation est de 183 555.

Les statistiques de la différence entre les MNT-drone (ERDAS et MicMac) et le MNT-LiDAR terrestre sont reportées dans le tableau III.15. La distribution spatiale des différences pixel à pixel peut être observée dans la figure III.37. Elle est indiquée en multiples de l'écart type de la différence entre les MNT (MNT-drone moins MNT-LiDAR).

Tableau III.15 - Statistiques des différences entre les MNT-drone 2007 (ERDAS et MicMac) et le MNT-LiDAR terrestre 2007 (« vérité terrain ») dans la Roubine (unités en mètres).

différence (en mètres) MNT-drone moins MNT-LiDAR	MNT ERDAS	MNT MicMac
moyenne	-0,125	-0,008
écart type (ET)	0,390	0,050
EQM	0,410	0,050
plage de variation	[-5,23 : 2,15]	[-0,55 : 1,30]

Etant donné que le MNT-LiDAR terrestre mission 2007 sur la Roubine est pris ici comme « vérité terrain », la différence pixel à pixel (en Z) entre les MNT-drone mission 2007 (ERDAS et MicMac) et le MNT-LiDAR terrestre est considérée comme une évaluation de la précision dans le calcul de l'altitude par photogrammétrie drone (ou évaluation de qualité altimétrique). Tous les MNT ont le même système de projection (Lambert III), ce qui permet d'établir cette évaluation de qualité altimétrique par différence directe des MNT. L'écart entre l'altitude « estimée » par la photogrammétrie et l'altitude « mesurée » par le LiDAR terrestre est considéré comme l'erreur d'estimation.

Toutes les statistiques de l'évaluation de qualité des MNT-drone 2007 (tableau III.15) montrent que le MNT-MicMac a une qualité significativement supérieure, avec une dispersion de l'erreur (5 cm) qui s'approche de la qualité atteignable par l'appareillage et le mode de mesure des coordonnées géographiques des repères utilisés (DGPS-RTK, vers 3 cm en altimétrie). Ces repères incluent les mires pour la photogrammétrie et les boules pour le LiDAR terrestre comme « vérité terrain ».

En observant la distribution spatiale de l'erreur d'estimation de l'altitude (figure III.37) nous pouvons apprécier l'impact des différentes stratégies de corrélation d'images sur la qualité de sa performance. Sur le plan qui correspond aux résultats de l'évaluation du MNT-ERDAS, les pixels effectivement corrélés ont été représentés avec des points noirs. Ceci montre une distribution non homogène de points 3D ce qui implique une distribution non homogène dans la taille du pixel réelle (ou de la résolution) du MNT final interpolé. Ce plan montre aussi une présence importante des taches bleues et rouges foncées surtout en amont du bassin (coté Est), correspondant aux pics et fossés avec des valeurs importantes d'erreurs d'estimation de l'altitude.

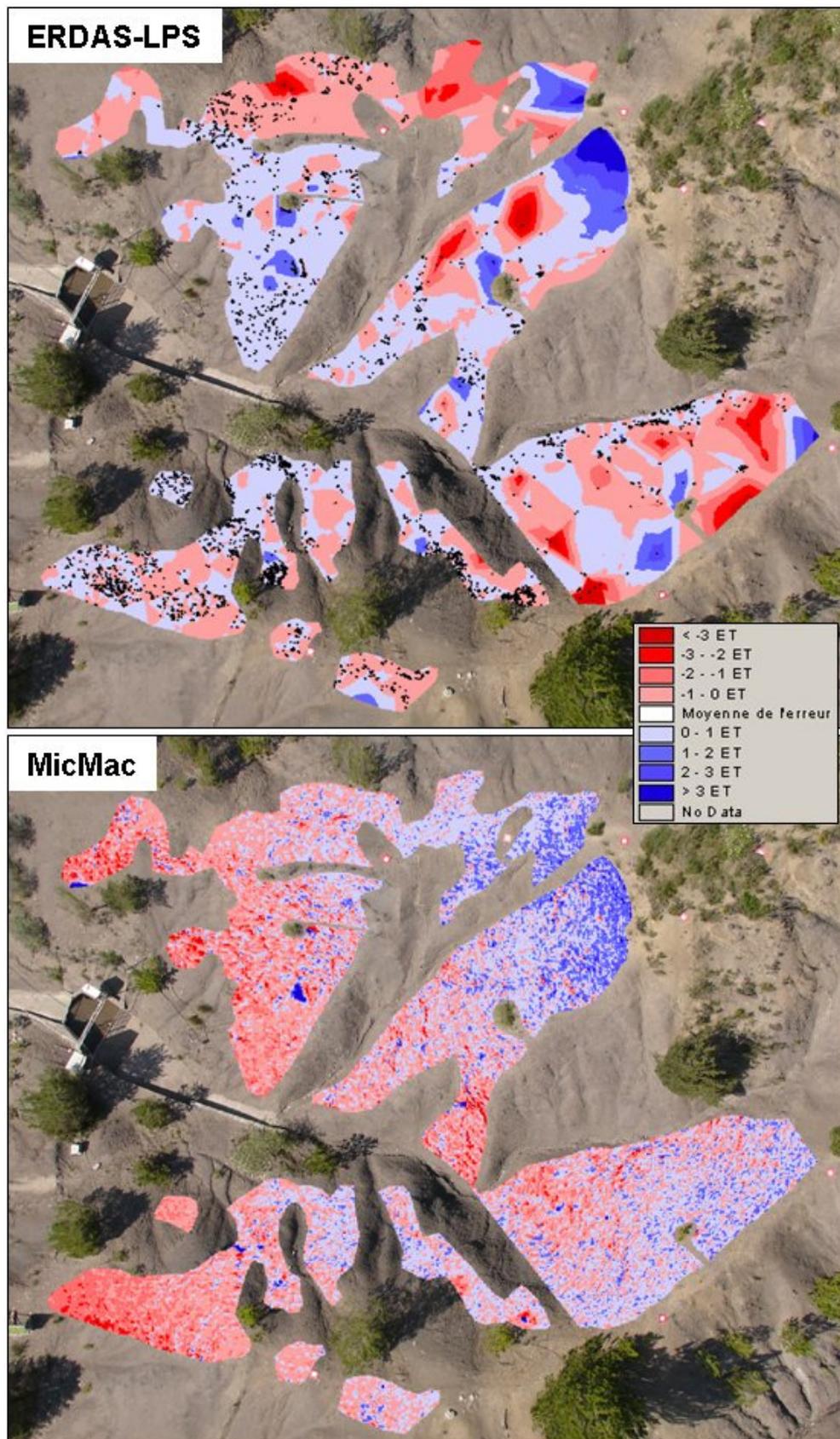


Figure III.37 - Visualisation des écarts entre les MNT-drone calculés (mission 2007) et le MNT-LiDAR. En haut avec ERDAS, en bas avec MicMac. Moyenne de l'erreur -0,125m et -0,008m, écart type (ET) 0,39m et 0,005m (ERDAS et MicMac, respectivement).

Pour le MNT ERDAS la moyenne de l'erreur est de 12,5 cm (tableau III.15), tandis que pour le MNT-MicMac elle est presque nulle (8 mm). L'erreur systématique est toujours importante (39 cm) pour le MNT ERDAS, mais beaucoup plus faible pour le MNT-MicMac (5 cm). Cette erreur systématique sur le MNT-MicMac est observée dans la spatialisation des différences (figure III.37 MicMac) : les taches bleues se trouvent vers l'amont et les taches rouges vers l'aval du bassin de la Roubine.

III.2.2.3 Évaluation de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs

La corrélation d'images (comme moyen de restitution du relief) n'est jamais parfaite, donc les anomalies de la corrélation d'images plus les anomalies des interpolations postérieures peuvent altérer localement la continuité du réseau hydrologique.

Les algorithmes d'interpolation privilégient les contraintes d'ingénierie (bonne estimation du Z). Mais une bonne altimétrie en Z ne signifie pas obligatoirement que les critères hydrologie/hydraulique sont bien satisfaits, que les interpolateurs respectent les directions d'écoulement des eaux.

On peut obtenir un profil en long du réseau hydrologique irréal et inadéquat pour une utilisation en modélisation distribuée. C'est pourquoi nous nous intéressons à définir un MNT « hydrologique » où les cheminements de l'eau sont cohérents.

III.2.2.3.1 Comparaison quantitative des réseaux (planimétrie)

III.2.2.3.1.1 Réseaux hydrographiques de référence

Afin d'établir une évaluation quantitative de la précision dans le calcul du réseau de thalwegs, nous avons dessiné le réseau de thalwegs de référence sur une orthophoto drone, mission 2005. Pour ceci, nous nous sommes appuyés sur une série de photos panoramiques de la ravine du Moulin ainsi que des photos aériennes drone mission 2008 (figures III.38 et III.39a et b pour les panoramiques, figure III.39c pour les aériennes).



Figure III.38 - Thalwegs permanents et interconnectés (ligne noire) dans une photo panoramique prise vers la partie haute droite de la ravine du Moulin.

Une délimitation des thalwegs *in situ*, avec traçage à la peinture (figure III.39c) nous a permis d'améliorer significativement son identification par interprétation visuelle sur

l'orthophoto drone avion 2005. Les thalwegs permanents et interconnectés ont au moins 10 cm de large dans un profil transversal (fenêtre sur la figure III.38), ce qui rend possible leur identification dans les images aériennes prises par le drone avion utilisées dans cette recherche.

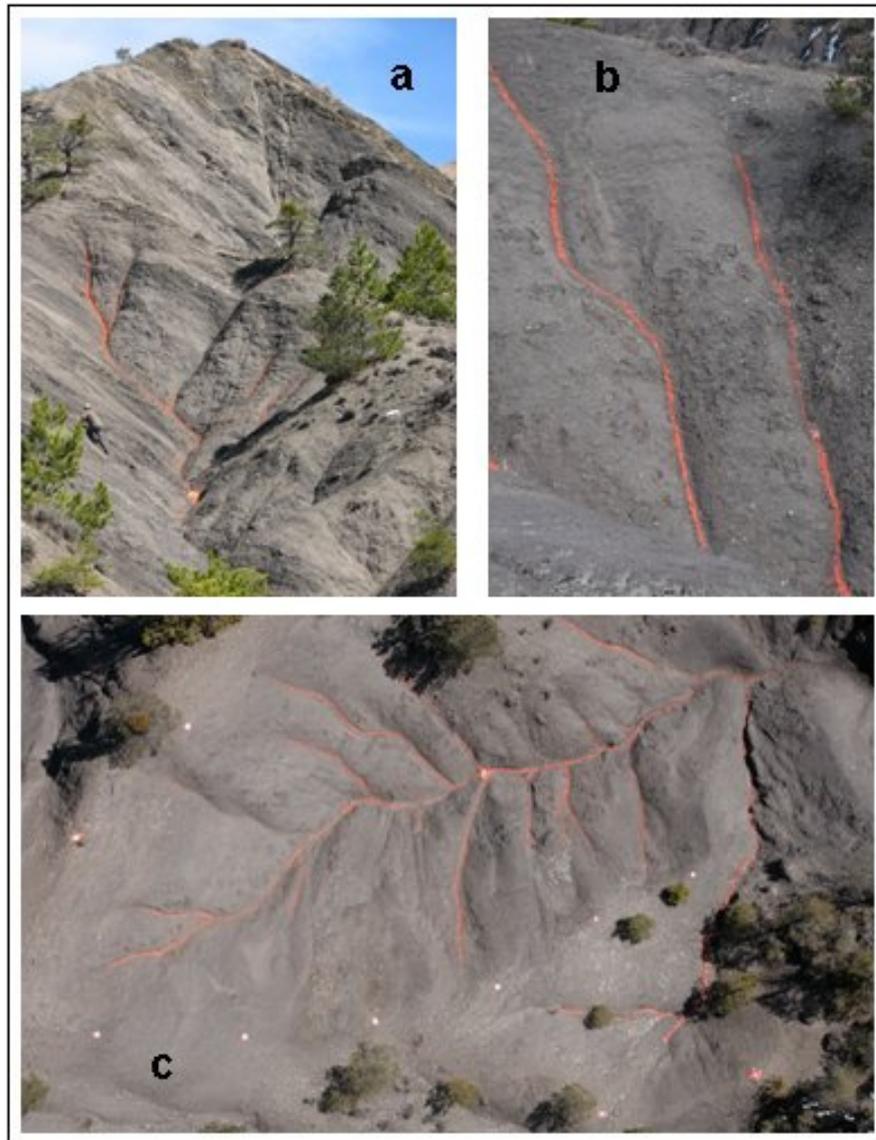


Figure III.39 - a) Ravine du Moulin, b) détail des rigoles avec peinture rouge avant le vol du drone avion, et c) photo aérienne drone avion-jaune mission 2008.

Dans la figure III.40 nous pouvons observer le réseau de thalwegs de référence résultant (lignes bleues) pour l'orthophoto mission drone avion 2005.

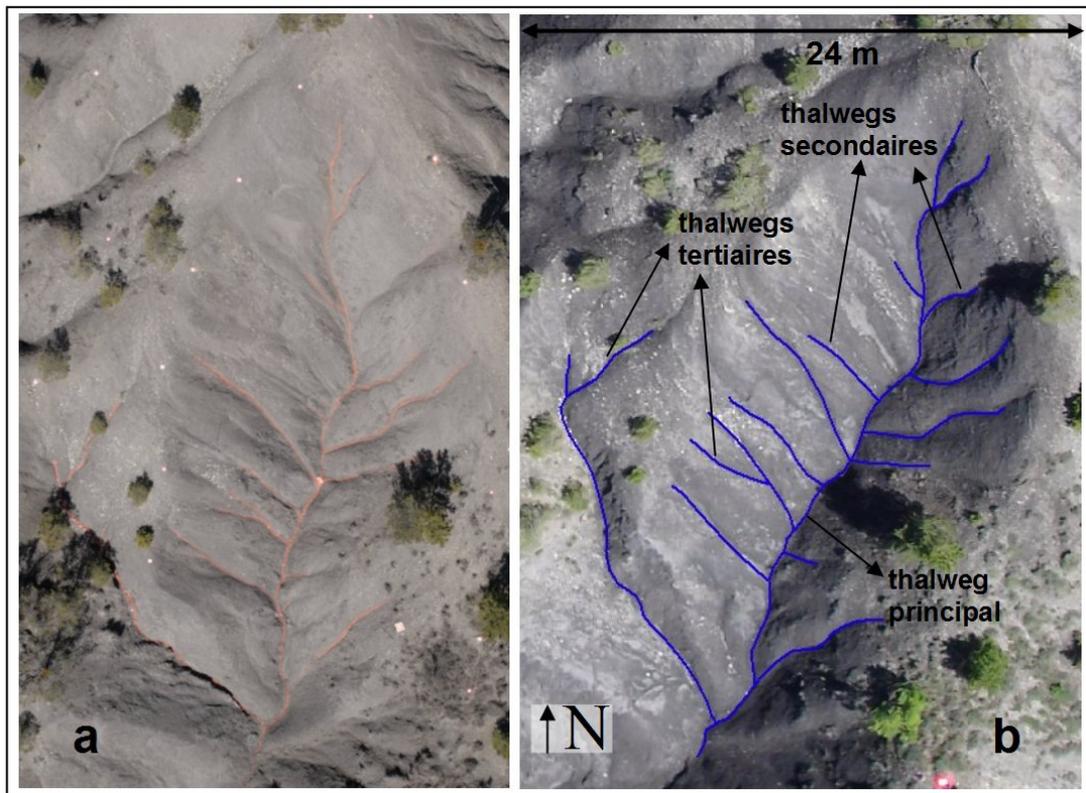


Figure III.40 - Réseau hydrographique de référence, sur une image drone mission2008 sans corrections (a) et sur une orthophoto drone mission 2005 (b).

Nous avons extrait trois réseaux hydrographiques des MNT : ceux de la mission drone 2005 (par ERDAS et MicMac), et celui du MNT-LiDAR terrestre mission 2007. Toutes les extractions sont effectuées par analyse numérique d'accumulation de flux superficiel, en utilisant l'algorithme D8. Pour les MNT-drone mission 2005 (ERDAS et MicMac), l'objectif était d'évaluer l'effet des deux types de corrélateurs d'image utilisés sur la capacité des MNT résultants à représenter le réseau de drains. Pour le MNT-LiDAR terrestre mission 2007, l'objectif était d'évaluer la capacité de cette source de données terrain 3D à représenter le réseau de drains.

L'étendue des références terrain utilisées n'est pas la même pour les missions analysées (drone et LiDAR), vu les emprises différentes.

Une des contraintes dans l'utilisation d'un LiDAR terrestre provient des parties cachées sur ce type de relief. Il est souhaitable de faire plusieurs scans à partir d'angles de vue différentes afin d'obtenir une bonne homogénéité des points en ravine. Le LiDAR terrestre n'est pas un appareillage facile à transporter dans les paysages de badlands, avec autant de ravines profondes.

III.2.2.3.1.2 Réseaux hydrographiques extraits des MNT drone et LiDAR

Remplissage des puits

Une étape préalable à l'application des algorithmes d'accumulation de flux, est le remplissage des puits ou des trous présents dans les MNT à utiliser, afin de garantir un réseau interconnecté où le flux d'écoulement concentré soit dirigé sans interruption jusqu'à l'exutoire de la ravine.

Si on n'établit pas le remplissage de puits avant d'appliquer l'algorithme, il est possible d'obtenir des tronçons de cours d'eau non interconnectés au réseau. Ces tronçons de cours d'eau peuvent alors correspondre à des erreurs du MNT (puits dérivé de l'interpolation ou d'une fausse corrélation entre pixels), ou bien peuvent représenter des objets réels du microrelief comme les thalwegs saisonniers non interconnectés.

Il est possible de trouver ces types de thalwegs saisonniers sur les versants marneux nus, avec des dimensions moins importantes que celles de thalwegs permanents (autour de 5 cm de profil) mais toujours identifiables sur les images drone très détaillées. Ils se développent comme conséquence de la dynamique de changement superficiel qui caractérise les badlands sur la géologie de marnes noires.

Nous avons évalué cette présomption en utilisant le MNT drone de la mission 2008 pour calculer le réseau de drains avec et sans remplir les puits. Dans les figures III.41a et III.41b nous avons des exemples de thalwegs non interconnectés comme résultats de l'application de l'algorithme D8 sans remplissage de puits.

Avec l'utilisation de l'algorithme D8 après remplissage de puits ce type de thalwegs (ou d'anomalies) devrait disparaître par forçage de connexion au réseau principal de la ravine (les tronçons en rouge dans la figure III.41c). Il est indispensable d'effectuer le remplissage afin d'obtenir un réseau de drains interconnectés, même en utilisant des MNT précis et détaillés.

Extraction des réseaux hydrographiques

Dans la figure III.42 nous pouvons observer le réseau de thalwegs de référence (ligne bleue) pour l'orthophoto mission drone avion 2005, ainsi que les réseaux des thalwegs obtenus par traitement numérique d'accumulation de flux (en utilisant l'algorithme D8 après remplissage de puits) à partir des MNT choisis :

- mission 2005 – MNT drone ERDAS (pixel 15 cm, ligne rouge), figure III.42a
- mission 2005 – MNT drone MicMac (pixel 4 cm, ligne verte), figure III.42a ;
- mission 2007 – MNT LiDAR terrestre (pixel 2,5 cm, ligne verte), figure III.42b.

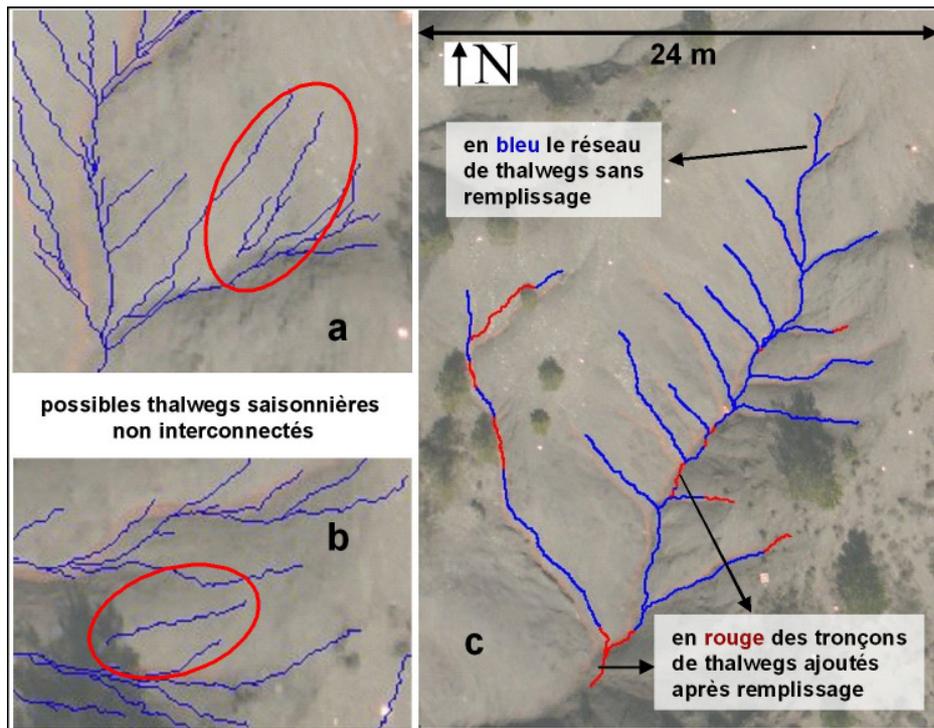


Figure III.41 - Possibles thalwegs non interconnectés au réseau (a et b), et réseau de thalwegs obtenu sans remplissage de puits (en bleu) et avec remplissage (rouge), ravine au Moulin (c).

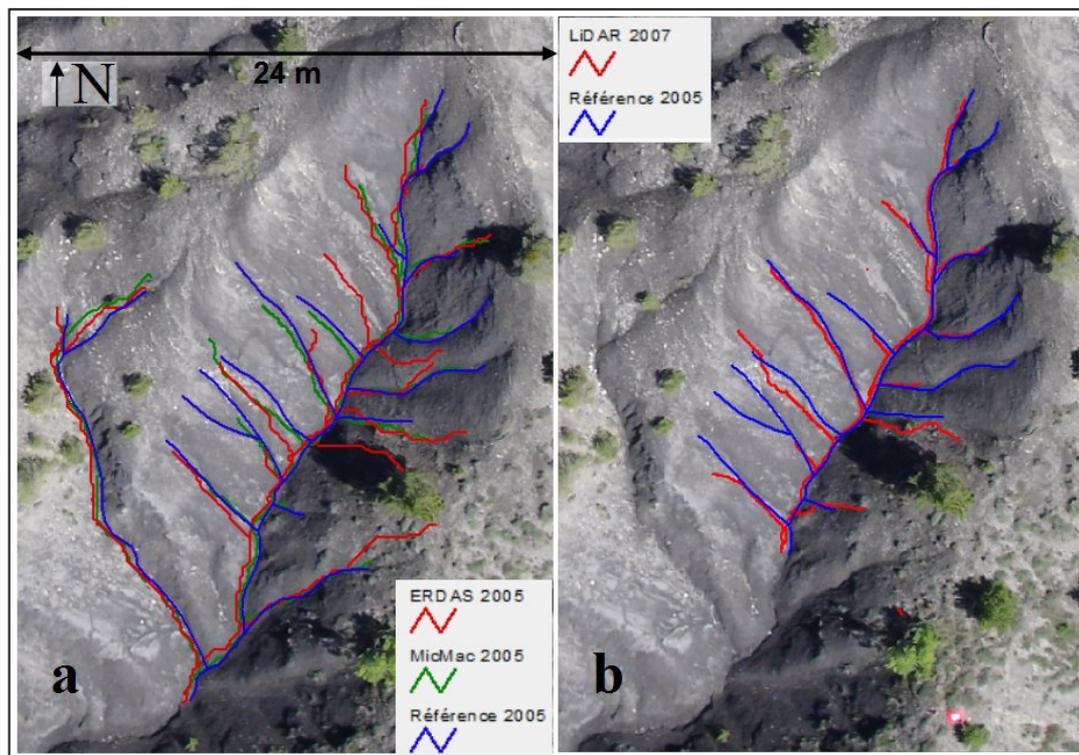


Figure III.42 - Réseaux des thalwegs pour l'évaluation de précision hydrographique des MNT dans la ravine au Moulin, a) mission 2005, et b) mission 2007.

Le seuil d'accumulation pour le calcul du réseau a été fixé en 4 m^2 en fonction du niveau de similitude avec le réseau de référence (nombre de tributaires). Le réseau de thalwegs de « référence terrain » a été établi par opérateur comme indiqué au paragraphe « méthodologie » (page 80) sur la ravine correspondante.

III.2.2.3.1.3 Evaluation de la précision planimétrique

Les critères de comparaison

Pour l'évaluation planimétrique des réseaux de drains extraits des MNT, nous nous sommes basés uniquement sur les branches principales, identifiées sur le tracé de référence. Les critères considérés sont la longueur et surtout la proximité planimétrique des tronçons par rapport à la référence. Pour ce critère de planimétrie, nous avons utilisé une zone buffer autour du réseau référence. La taille de la zone buffer est égale à 4 fois la taille de pixel de l'image drone originale (20 cm).

Evaluation de l'effet du corrélateur d'image

La longueur du thalweg principal pour les MNT-ERDAS, MicMac et LiDAR correspond à la référence (tableau III.16), et cette correspondance se dégrade quand on remonte vers l'origine de l'écoulement concentré (thalwegs secondaires et tertiaires). Pour le réseau secondaire, les MNT-MicMac et LiDAR terrestre 2007 correspondent mieux à la référence terrain.

Tableau III.16 - Evaluation de la longueur du réseau de thalwegs aux différents niveaux hiérarchiques (en mètres) pour les MNT drone 2005 (MicMac et ERDAS) et le MNT LiDAR terrestre 2007 (pixel des MNT en centimètres).

hiérarchie des thalwegs	MNT drone et taille de pixel (cm)	longueur du réseau (m)	longueur de la référence terrain (m)	différence (m)
principal	MicMac (4)	38,31	31,91	6,40
	ERDAS (15)	34,17		2,25
	LiDAR07 (2,5)	26,20	24,34	1,87
secondaire	MicMac (4)	93,69	75,17	18,52
	ERDAS (15)	103,69		28,52
	LiDAR07 (2,5)	46,01	56,06	-6,05
tertiaire	MicMac (4)	36,99	14,93	22,06
	ERDAS (15)	9,65		-5,28

Nous observons une correspondance plus importante pour la longueur du réseau tertiaire obtenu par le MNT-ERDAS malgré sa résolution moins détaillée. Le MNT-LiDAR terrestre 2007 n'est pas arrivé à représenter le réseau tertiaire principalement à cause des zones cachées (problème géométrique fonction du point d'observation).

L'évaluation de la proximité planimétrique des tracés pour la totalité du réseau (figure III.43), montre une différence significative dans le calcul du réseau hydrographique, les MNT-drone MicMac et LiDAR terrestre étant les plus proches de la référence terrain.

On obtient des résultats encore plus contrastés pour le thalweg principal, avec 98% de similitude pour le réseau du MNT-LiDAR et 85% pour le réseau du MNT-drone MicMac. Par contre pour le réseau du MNT-ERDAS on atteint seulement 32% de similitude (figure III.44).

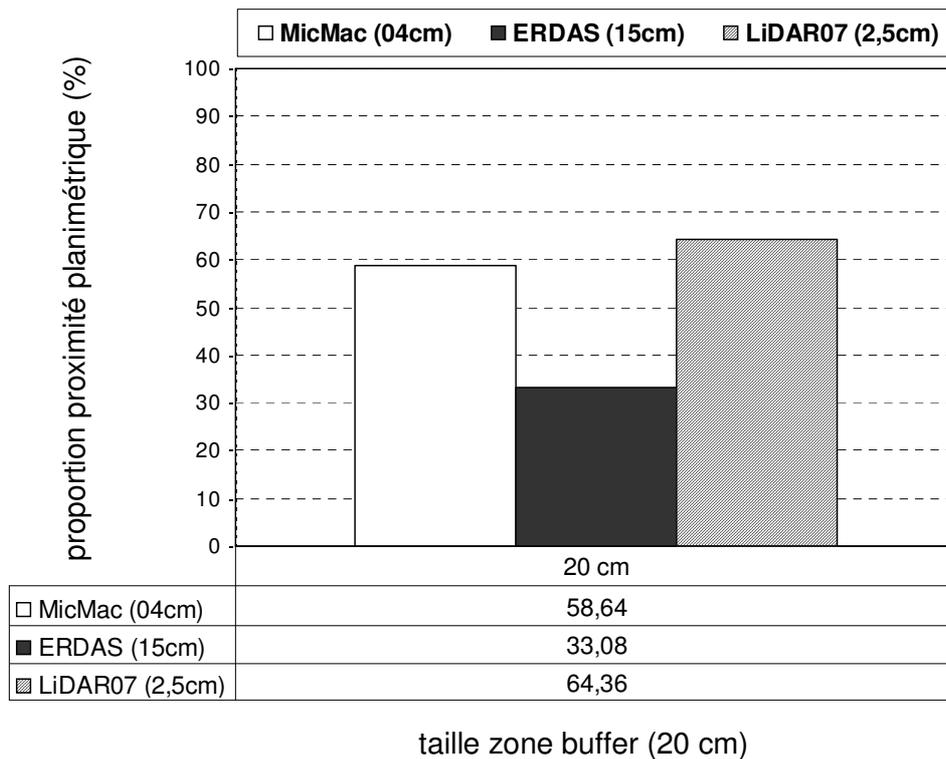


Figure III.43 - Précision planimétrique pour la totalité du réseau des thalwegs extraits à partir des MNT drone ERDAS et MicMac, mission 2005 (seuil d'accumulation de 4m²).

Pour les thalwegs secondaires et tertiaires, la qualité de restitution du réseau se dégrade significativement pour les MNT-MicMac et LiDAR terrestre, descendant à environ 50% de similitude. La similitude s'améliore légèrement à environ 40% pour les thalwegs secondaires calculés à partir du MNT-ERDAS. Enfin, le réseau de thalwegs tertiaires n'a pas été détecté par le MNT-LiDAR terrestre (effet des zones cachées comme déjà indiqué) et, contrairement à ce qui est attendu, c'est le MNT ERDAS qui a été le plus efficace.

La résolution plus fine des MNT-drone MicMac se traduit par un détail plus important dans la représentation du relief de la ravine, et ceci est responsable de la meilleure performance de ce MNT dans l'extraction du réseau de thalwegs.

Néanmoins, les résultats obtenus pour le MNT-ERDAS sont satisfaisants aussi dans la représentation du réseau de thalwegs tertiaires, même s'il a une résolution trois fois moins importante que le MNT-MicMac. Les résultats montrent que pour les MNT LiDAR terrestre et MicMac, le thalweg principal de la ravine étudiée est le plus cohérent par rapport à la référence terrain, autant pour la longueur que pour la proximité planimétrique des tracés.

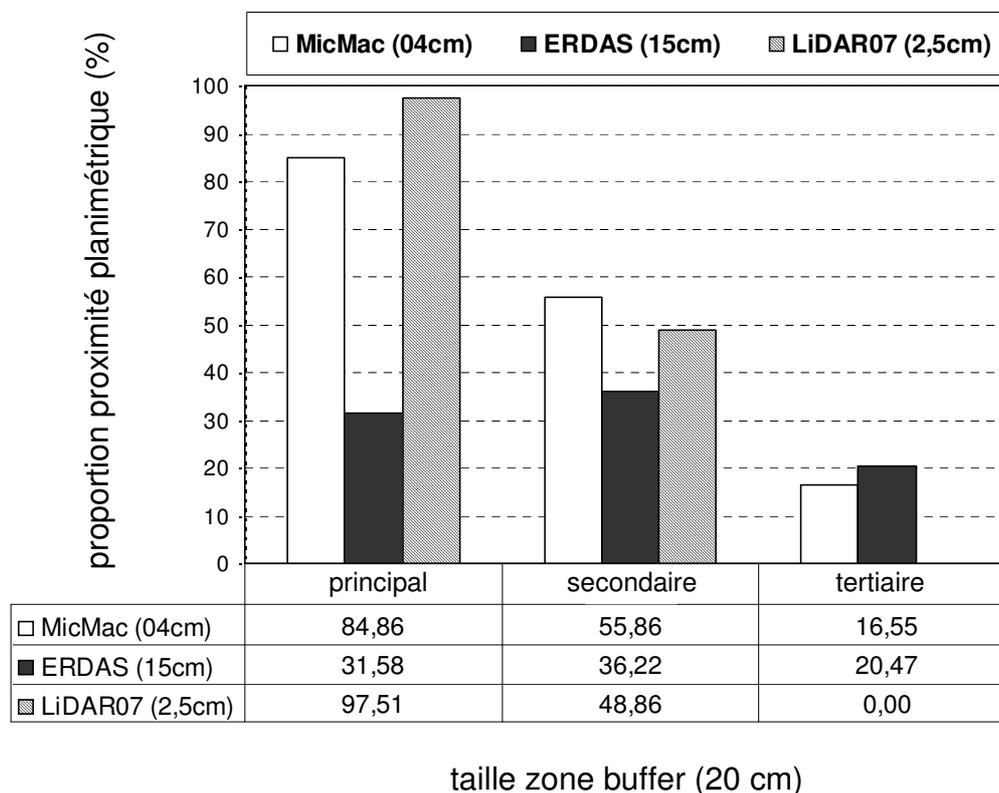


Figure III.44 - Précision planimétrique des réseaux de thalwegs, par niveau hiérarchique, extraits à partir des MNT drone ERDAS et MicMac 2005 (seuil d'accumulation de $4m^2$) : drain 1 (thalweg principal), drain 2 (thalwegs secondaires), drain 3 (thalwegs tertiaires).

III.2.2.3.2 Comparaison quantitative des réseaux (les pentes)

Afin d'évaluer la représentation de la pente des thalwegs établie par les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, nous avons utilisé deux séries de points de validation « vérité terrain » prises par DGPS-Tachéomètre 2006 sur la ravine du Moulin (figure III.45). Trois profils des versants ont été évalués aussi sur la même ravine, à partir du même jeu des points terrain DGPS-Tachéomètre 2006. Pour les trois profils de versants, nous avons évalué aussi le MNT LiDAR terrestre 2007, à part les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac.

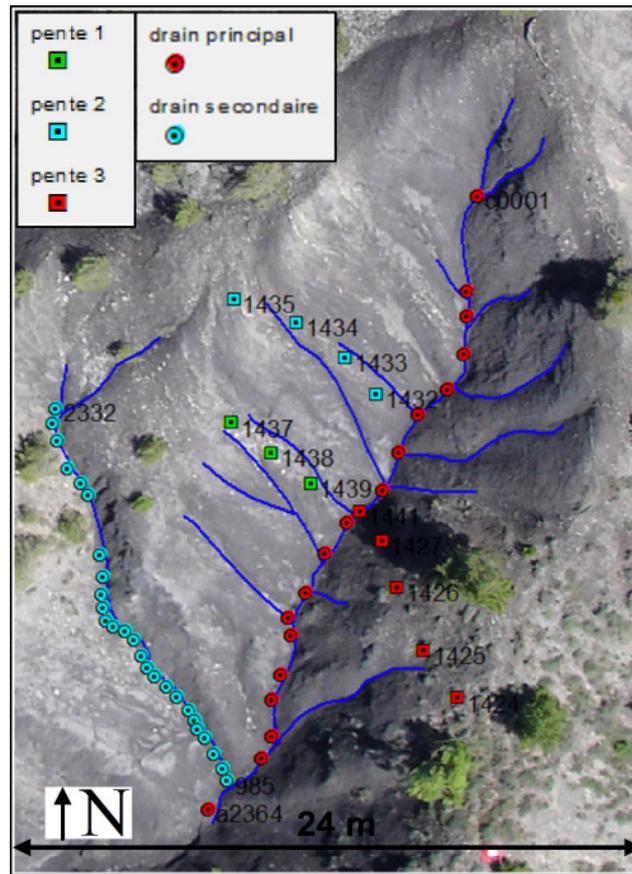


Figure III.45 - Jeu de points de validation utilisés dans l'évaluation de la précision altimétrique du réseau de thalwegs extraits des MNT (drone et LiDAR), ravine du Moulin.

La pente de chaque tronçon sera calculée en utilisant l'écart d'altitude et la distance horizontale entre nœuds ou confluences du réseau des thalwegs à comparer. Postérieurement, le même travail de choix de points et de calcul de pente sera effectué sur les MNT calculés. Les deux jeux de pentes seront alors comparés en calculant la différence des valeurs par tronçons (pente « vérité terrain » moins pente MNT), appelé Δ pente, pour établir ainsi l'évaluation quantitative par comparaison directe. Nous avons aussi calculé la moyenne des valeurs absolues de Δ pente afin de comparer la performance générale de chaque MNT à évaluer.

Pour les réseaux des thalwegs, nous avons utilisé deux séries des points de validation prises avec un pas plus court le long de la ravine. Nous avons donc évalué le thalweg principal ainsi que le thalweg secondaire le plus long de la ravine du Moulin.

Comme discuté pour les contraintes techniques dans l'évaluation de la précision planimétrique précédemment, l'évaluation quantitative de la pente requiert que le traçage de thalwegs effectué par analyse numérique des MNT soit comparable « spatialement » à sa référence terrain. Or des déformations géométriques perturbent la comparaison le long du thalweg : les points d'extrémité de tronçon ne se correspondent pas exactement entre le réseau de la référence et les réseaux extraits des MNT. Pour éviter les confusions nous

avons choisi d'utiliser les points issus du réseau de référence comme points de mesure des altitudes des nœuds et pentes des tronçons dans tous les cas.

Le traçage du thalweg principal est cohérent avec l'emplacement des points DGPS (figure III.46), tel que nous avons vu dans l'évaluation planimétrique. Le thalweg principal est bien net dans l'image drone, il n'existe pas de zones d'ombres portées qui peuvent affecter la corrélation d'images.

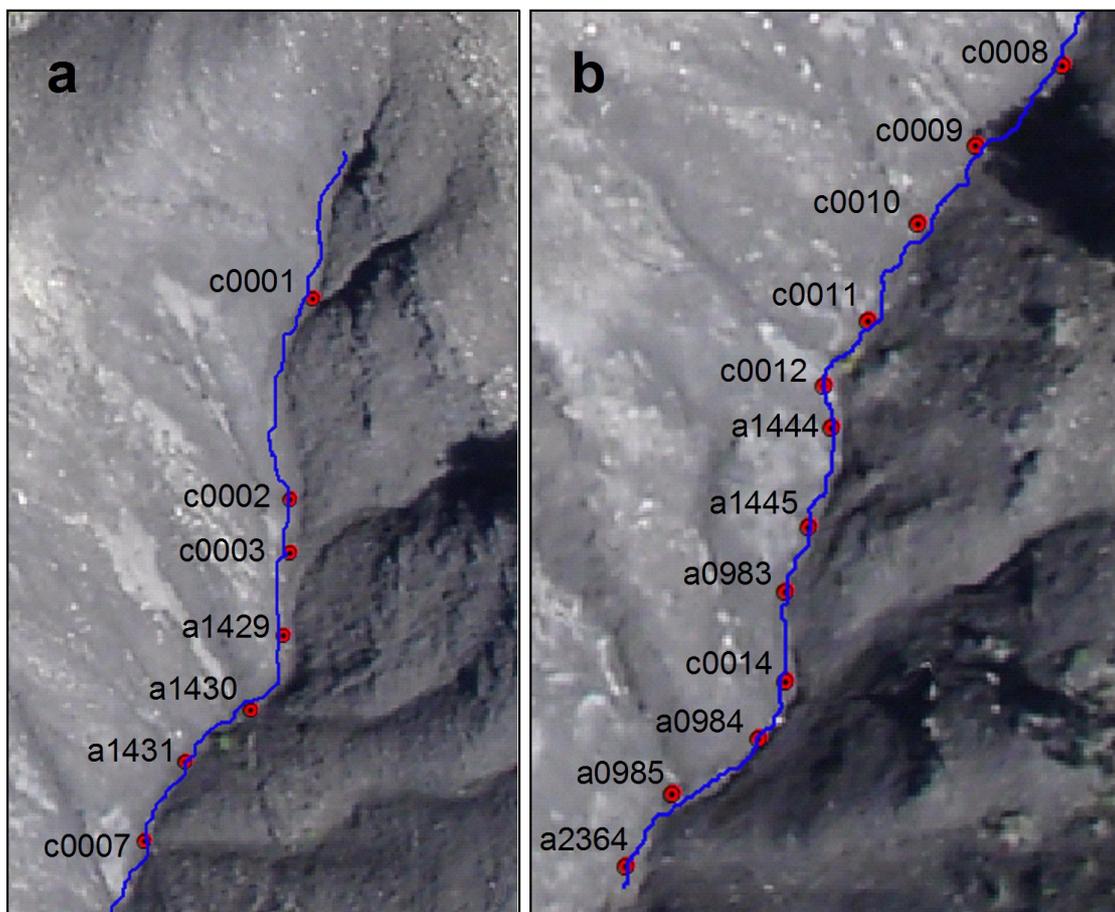


Figure III.46 - Détail du thalweg principal extrait du MNT drone MicMac 2005 (ligne bleue), ravine du Moulin : a) partie amont, b) partie aval.

Le tableau III.17 donne les valeurs de la pente par tronçon calculées à partir des données DGPS de référence et ces respectives Δ pentes pour chaque MNT évalué (MNT drone mission 2005 ERDAS-LPS et MicMac) pour le thalweg principal, ainsi que les moyennes des valeurs absolues.

Pour le MNT drone 2005 MicMac les valeurs de pente sont cohérentes pour la plupart des tronçons du thalweg principal évalué. Tandis que pour le MNT drone 2005 ERDAS les valeurs du Δ pente reflètent un calcul de pente moins précis. Ceci est évident dans la moyenne des valeurs absolues de Δ pente, qui est plus importante pour le MNT ERDAS.

Tableau III.17 - Pente par tronçon (en pourcentage) du thalweg principal et Δ pente (validation moins MNT) pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, moyenne des valeurs absolues de Δ pente par MNT (de l'amont vers l'aval, figure III.46).

Point	pente % DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac	Point	pente % DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac
c0001	85	5	0	c0010	32	10	6
c0002	51	-13	-4	c0011	34	-7	-4
c0003	59	-19	-5	c0012	36	-6	3
a1429	62	-4	-1,	a1444	57	16	1
a1430	52	7	1	a1445	77	3	7
a1431	50	-4	4	a0983	45	-11	-8
c0007	49	14	11	c0014	39	2	16
c0008	38	-2	-12	a0984	34	-6	-4
c0009	20	-8	4	a0985	44	20	19
c0010	moyenne Δ pentel ERDAS = 9			a2364	moyenne Δ pentel MicMac = 6		

Dans la figure III.47 nous pouvons apprécier le thalweg secondaire analysé, tel qu'il est représenté par le MNT drone 2005 MicMac. Il est évident sur l'orthoimage que ce thalweg est plus affecté par les ombres portées que le thalweg principal. En effet, les résultats de l'évaluation de la pente (tableau III.18) de ce thalweg renforcent cette observation.

Les moyennes des valeurs absolues de Δ pente sont plus fortes que dans le thalweg principal, pour les deux MNT analysés. Le MNT ERDAS est toujours moins précis que le MNT MicMac dans le calcul de la pente du thalweg secondaire analysé.

Pour les deux types d'évaluations de la précision de calcul des thalwegs (planimétrique et pentes), le thalweg principal extrait par analyse numérique des MNT drone reflète une bonne correspondance avec la référence terrain. Tandis que cette correspondance se dégrade progressivement pour le réseau de tributaires du thalweg principal.

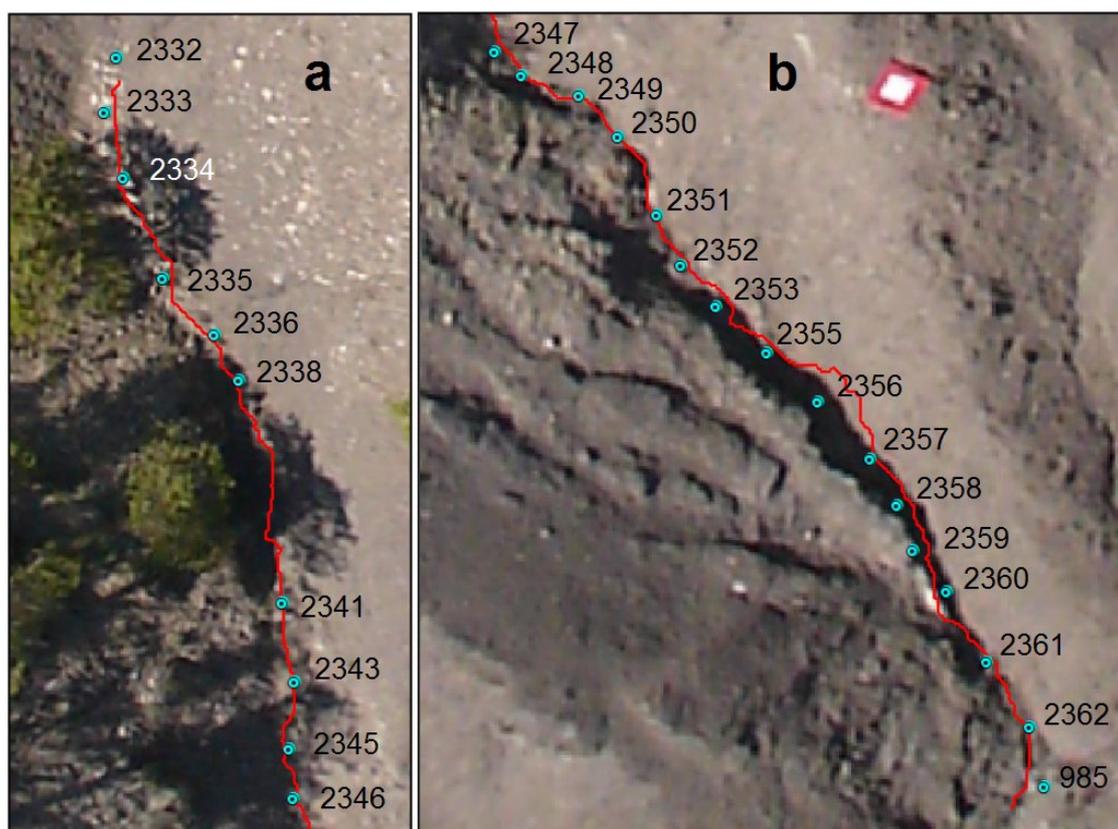


Figure III.47 - Détail du thalweg secondaire extrait du MNT drone MicMac 2005 (ligne rouge), ravine du Moulin : a) partie amont, b) partie aval.

Les résultats de la validation de la pente des versants sur la ravine du Moulin sont dans le tableau III.19. Les valeurs de la pente par tronçon de versant (en pourcentage) pour les MNT drone 2005 évalué (ERDAS et MicMac) et pour le MNT LiDAR terrestre 2007, sont cohérentes avec celles des données « vérité terrain », dans les trois séries de points analysées.

Les valeurs de Δ pente sont beaucoup plus faibles pour les versants que pour le réseau de thalwegs (tableau III.19). Cette fois si il n'a pas eu de différences importantes entre les moyennes des valeurs absolues de Δ pente pour les MNT évalués (MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, MNT LiDAR terrestre 2007).

Tableau III.18 - Pente par tronçon (en pourcentage) du thalweg secondaire et Δ pente (validation moins MNT) pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac (de l'amont vers l'aval, figure III.47).

Point	pente % DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac	Point	pente % DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac
2332	32	8	-1	2349	63	40	33
2333	44	6	7	2350	70	-23	3
2334	34	-10	-6	2351	51	-5	-24
2335	45	31	18	2352	62	-17	11
2336	49	32	18	2353	53	20	-8
2338	40	-17	-4	2355	57	2	9
2341	78	-23	-11	2356	38	1	-2
2343	80	49	20	2357	59	-4	15
2345	51	-3	-2	2358	74	19	-4
2346	49	-5	4	2359	57	24	-3
2347	43	0	-9	2360	37	-18	-11
2348	35	5	4	2361	47	-13	-7
2349	moyenne Δ pentel ERDAS = 16			2362	moyenne Δ pentel MicMac = 10		

Tableau III.19 - Evaluation de la pente par tronçon (en pourcentage) des trois versants pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, et LiDAR terrestre 2007 (de l'amont vers l'aval, figure III.45).

Point	pente 1			
	DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac	Δ pente LiDAR
1437	53	5	-1	-7
1438	92,	7	5	5
1439	74	10	1	-3
1441	moyenne Δ pentel	7	2	5
	pente 2			
	DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac	Δ pente LiDAR
1435	56	1	3	1
1434	70	-11	-4	-1
1433	78	8	6	11
1432	moyenne Δ pentel	7	4	4
	pente 3			
	DGPS	Δ pente ERDAS	Δ pente MicMac	Δ pente LiDAR
1424	34	9	5	0
1425	8	-7	-6	1
1426	56	-2	-4	3
1427	68	3	9	-3
1441	moyenne Δ pentel	5	6	2

III.2.3 Synthèse des résultats

III.2.3.1 Tests pour les orientations interne et externe

Les vecteurs légers ne permettent pas d'utiliser des appareils photo professionnels, certes plus précis mais trop lourds pour être placés sur des drones. Les prises de vue par appareil « grand public » permettent une grande souplesse d'utilisation. Notre objectif était de préciser les points où la méthode devient particulière, et de vérifier jusqu'où les incertitudes citées sont surmontables et à quel compromis « qualité-souplesse d'utilisation » on peut arriver.

L'application de la méthode IGN (Poivilliers E) pour le calcul des paramètres d'orientation interne - dont ceux de déformation de lentille - a été traduite par une amélioration très significative dans la précision du MNT, en passant d'une EQM totale de 1,09 à 0,31 mètre.

Ces tests mettent en évidence l'importance des travaux de corrections d'image et de réajustement des paramètres pour obtenir un bon MNT dans nos conditions de prise de vue. La correction de déformation de lentille est apparue comme un élément majeur de l'amélioration des résultats, ce qui traduit la nécessité d'effectuer cette manipulation avant tout travail de qualité.

A ce stade, il reste toujours des erreurs systématiques résiduelles. Elles sont probablement dues à plusieurs effets : instabilité de vol et disposition non régulière des mires dans les images ; déformations de lentille non parfaitement corrigées liées au modèle (polynomial) de correction utilisé. L'approche par auto-calibrage (Ebner, 1976) compense en partie ces erreurs systématiques. La moyenne finale de l'erreur est de 8 cm, proche de la taille du pixel de l'image drone (6 cm). L'EQM totale obtenue est alors de 22 cm, soit trois fois et demi la taille de pixel initial de l'image.

Par rapport à la spatialisation de l'analyse de qualité (ou distribution d'erreurs par rapport à la position dans le paysage), il faut remarquer que les observations sur les crêtes atteignent une précision significativement meilleure que sur les fonds des ravines. Ceci est dû au contraste entre les images et les effets d'ombres portées, toujours plus présentes au fond des ravines très profondes.

III.2.3.2 Tests pour la corrélation d'images

Les clefs de la qualité dans la restitution du relief par corrélation d'image sont le nombre et la disposition des pixels effectivement corrélés et des fausses corrélations. La densité et l'homogénéité des pixels contrôlent la résolution d'un MNT. Tandis que la minimisation de fausses corrélations a une influence déterminante sur la précision.

La stratégie de corrélation d'images par l'approche multi-résolution (MicMac) permet d'exploiter tout le potentiel d'un stéréo-couple, même sur des photos à faible contraste. On peut remarquer en effet l'importance du contraste des images dans la qualité de corrélation.

Si l'on compare les essais à partir d'ERDAS-LPS, on a pu noter une qualité altimétrique variable d'entre les images : par exemple pour la mission 2005 la EQM est de 22 cm sur marnes bien contrastées ; et cette valeur se dégrade avec la mission 2007 : 40 cm pour un sol plus sec et donc moins contrasté, et ceci malgré une taille de pixel plus petite. Ce problème semble moins crucial avec le corrélateur MicMac, qui donne une EQM très proche de la taille du pixel et ceci dans toutes les conditions de contraste que nous avons testé.

Le corrélateur MicMac réduit fortement le problème des fausses corrélations grâce à ses stratégies de multi résolution et de régularisation du relief pendant la corrélation d'image. Ceci améliore la qualité et la cohérence du MNT drone. De plus, il permet d'exploiter tout le potentiel d'un stéréo couple, même sur des photos à faible contraste. Le corrélateur en une dimension (ERDAS-LPS) utilise une fonction de corrélation qui traduit la ressemblance radiométrique entre fenêtres, ce qui le rend plus sensible à la qualité du contraste entre photos.

Le MNT-drone 2007 MicMac a une qualité significativement supérieure, avec une dispersion de l'erreur (5 cm) qui s'approche de la qualité atteignable par l'appareillage et le mode de mesure des coordonnées géographiques des repères utilisés (DGPS-RTK, vers 3 cm en altimétrie).

III.2.3.3 Evaluation de la qualité « hydrographique » des MNT

Les MNT drone MicMac (mission 2005) et le MNT LiDAR terrestre (mission 2007) montrent une bonne proximité planimétrique pour la totalité du réseau de thalwegs évalué, tandis que le MNT drone ERDAS (mission 2005) est le moins précis. Cependant, cette performance de la proximité planimétrique générale ne se manifeste pas de la même manière quand on considère les différents niveaux hiérarchiques du réseau de thalwegs.

En ce qui concerne le thalweg principal, la proximité planimétrique est nettement meilleure que celle de la totalité du réseau, pour les MNT drone MicMac (mission 2005) et le MNT LiDAR terrestre (mission 2007), mais le pourcentage de proximité se dégrade fortement, et de façon progressive, quand on analyse les réseaux de tributaires.

La largeur du fond du thalweg principal (près de la tête de la ravine) mesure 10 cm (figure III.38), ce qui correspond approximativement à 2 fois la taille du pixel des photos aérienne drone utilisées. Les largeurs correspondantes du fond des thalwegs tributaires de la ravine observée sont au maximum d'une taille équivalente au pixel des images. Ceci limite la possibilité d'observer ces types de manifestations de l'érosion sur les photos aériennes drone analysées (rapport résolution R des données et taille de l'objet O étudié).

En outre, le thalweg principal ne paraît pas être affecté par les ombres portées (figure III.46), tandis que les tributaires ont été nettement plus affectés (figure III.47). Le MNT LiDAR terrestre 2007 a été très performant dans la restitution du thalweg principal, mais il a été très affecté par l'effet de zones cachées pour reconstituer le réseau de tributaires, depuis le point de perspective utilisé pour le scan LiDAR.

En général, les résultats montrent que le MNT drone MicMac a une meilleure qualité dans la restitution du réseau de thalwegs permanents à partir de l'analyse numérique du flux superficiel, d'après les critères utilisés ici pour la définition du réseau de référence.

QUATRIÈME PARTIE
APPROCHE TERRESTRE

Au cours du développement de la méthodologie à base de photos aériennes nous avons utilisé des données LiDAR terrestre essentiellement comme un jeu alternatif de mesure topographique pour la validation des MNT drone. Ce jeu va donc compléter les données par DGPS et par tachéomètre décrites dans la troisième partie (Approche Aérienne).

Mais le LiDAR terrestre constitue en soi également une source de données que l'on pense suffisamment précises pour surveiller les évolutions de la surface des versants marneux nus. Ces changements de forme peuvent être associés au processus physico-chimiques de météorisation de la roche mère, responsables de la formation de l'altérite, ou bien au processus d'érosion comme l'ablation de l'altérite, le transport et l'accumulation des matérielles. A terme ce qui nous intéresse c'est l'ablation des versants marneux, mais cette évolution est *a priori* très lente et elle nécessite plusieurs années avant de pouvoir être mesurable par cette technique. Dans ce chapitre on va se focaliser sur le potentiel de la mesure LiDAR terrestre à travers les problèmes de précision.

La « résolution-précision » de ces mesures devrait être de quelques centimètres (voire de quelques millimètres) et la « fréquence temporelle » devrait être de plusieurs observations par saison, en fonction de la magnitude des changements dans la morphologie (bilan « résolution-précision-fréquence »).

Les techniques topographiques (théodolite, GPS, ou mesures directes d'angles et distances) sont le principal moyen disponible afin d'établir une description détaillée du terrain. Même si ces techniques sont assez précises, il reste des questions de résolution, rapidité et répétitivité. Le LiDAR offre des précisions proches avec une densité potentielle de points terrain énorme (résolution). C'est une technologie relativement nouvelle, qui a été utilisée en architecture et récemment dans le suivi de gros mouvements de terrains, recul de falaise, entre autres.

Le LiDAR permet une mesure du relief « directe et sans perturbation du milieu », avec une précision, une résolution et une rapidité potentiellement utiles pour la connaissance de la dynamique de changements fins en ravines. Les éléments fins que l'on cherche à détecter sont des linéaires permanents ou temporaires (création ou disparition de rigoles élémentaires), ainsi que de changements fins sur la position de la surface, révélateurs de l'ablation, du gonflement ou de dépôt, comme une aide pour améliorer notre connaissance sur les processus d'érosion.

Nous cherchons à vérifier dans quelle mesure cet appareil peut permettre une telle application, avec des précisions de l'ordre de quelques centimètres, voire millimètres.

Le LiDAR terrestre (ou système imageur laser) employé est un Optech ILRIS-3D (figure IV.1), ou scanner à longue portée (de 3m jusqu'à 1 500m), entièrement portable et imperméable pour son utilisation en cas d'intempérie. Le taux de stockage de données est de 2.500 points par seconde, la divergence du faisceau laser $0,00974^\circ$, la tache minimale dans les axes x et y $0,00115^\circ$. La précision brute de mesure est de 7mm à 100m de distance, tandis que la précision brute de positionnement est 8mm à 100m de distance. Le champ de vision est de 90° en vertical et de 360° en horizontal, pendant que la température de fonctionnement va de entre 0° à 40° Celsius.



Figure IV.1 - LiDAR terrestre Optech ILRIS-3D, utilisé dans l'approche terrestre.

IV.1 MÉTHODOLOGIE

L'utilisation du système LiDAR terrestre dans cette recherche peut être séparée en deux objectifs principaux :

1. servir de « référence terrain » pour les MNT drone (approche aérienne) ;
2. établir un suivi non intrusif de l'érosion en versant marneux, en s'attachant à la fois à deux termes :
 - a. les processus d'ablation et de dépôt ;
 - b. le potentiel de suivi des rigoles et griffures élémentaires saisonnières.

Ces deux objectifs posent plusieurs questions :

- la qualité d'estimation en Z (t), ainsi que la capacité à retrouver des dépressions allongées de tailles différentes qui dépendent tous les deux des conditions d'observation, du bruit de la mesure et de l'impact du matériau (humidité, couleur, ...).
- la stratégie d'acquisition de scans dans le cadre de versants marneux, qui inclut le problème de géoréférencement.

Des tests ont été menés pour répondre à ces différentes questions. On se focalisera dans ce chapitre sur l'analyse de la mesure LiDAR pour la détection de linéaire sur des objets avec des géométries connues, l'effet de la teneur en eau de la marne noire, et sur le problème du géoréférencement conjoint de plusieurs scans.

IV.1.1 Analyse de la mesure LiDAR

IV.1.1.1 Le matériel (les tôles)

L'objectif de ce test spécifique est multiple :

- mesurer la dispersion de la mesure (bruit) ;
- évaluer l'effet de la couleur sur la réponse du LiDAR ;
- vérifier les capacités de restitutions de formes géométriques connues.

Pour cela on a construit une série de tôles censées représenter un versant avec des linéaires proches des griffures d'érosion que l'on veut détecter. On a donc choisi des tôles avec des profils transversaux à formes triangulaires (en V) et demi-cercles (en U) de différentes tailles, de façon à recréer approximativement les possibles manifestations de l'érosion linéaire sur les pentes marneuses (figure IV.2).

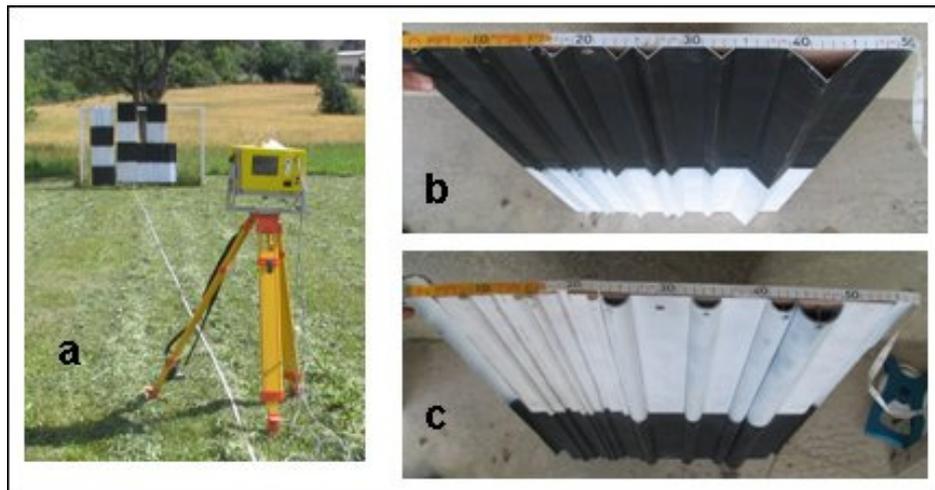


Figure IV.2 - a) Mesure de formes géométriques connues par le LiDAR terrestre Optech (ILRIS-3D), b) détail d'une tôle en « V », et c) détail d'une tôle en « U ».

Chaque tôle a une longueur d'un mètre et une largeur d'environ cinquante centimètres. Elles ont été peintes moitié blanche et moitié noire, et scannées à une distance de 30m.

Ces tôles sont parfaitement connues en géométrie à partir des mesures sur les tôles originales (figure IV.3). Ceci permet de constituer un modèle numérique des tôles (référence) que l'on peut comparer aux nuages de points LiDAR terrestre scannés.

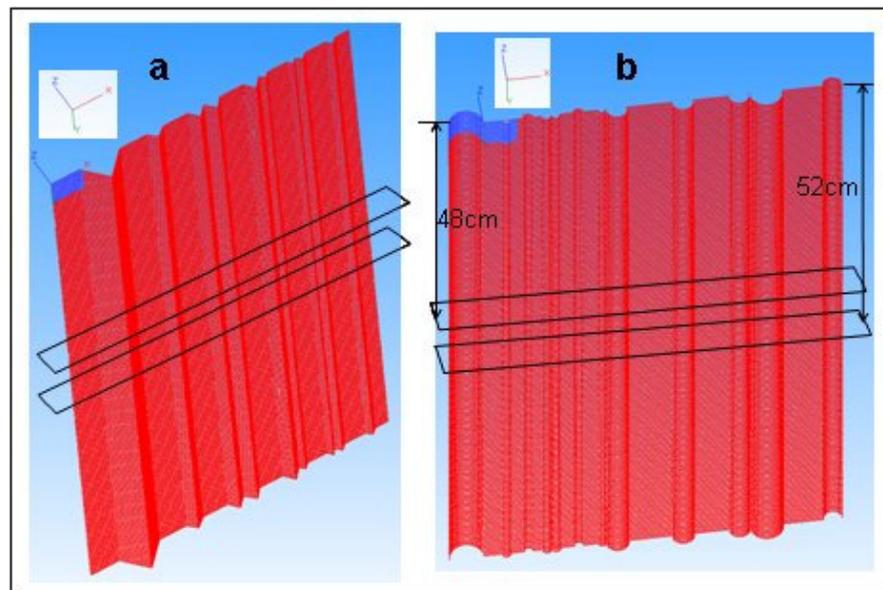


Figure IV.3 - Représentation numérique des tôles en « V » et en « U » (a et b, respectivement) et profils transversaux où l'analyse de bruit a été établie.

Afin d'établir leur comparaison, les deux nuages de points (scanné et virtuel) sont convertis dans le même système de projection, à l'aide du logiciel 3Dreshaper. De l'ensemble des points LiDAR on sélectionne uniquement deux profils de 5 mm d'épaisseur qui serviront pour les tests de qualité (figure IV.3). Ces profils sont extraits l'un sur la partie blanche, l'autre sur la partie noire des tôles (à 48 et à 52 cm du bord).

IV.1.1.2 Le bruit et la couleur

Le bruit est estimé à partir de l'écart type de la mesure de la distance par le LiDAR terrestre avec les seuls points scannés (sans référence terrain). L'impact de la couleur sur le retour du signal est testé sur des éléments plans dans les tôles (blanc et noir).

IV.1.1.3 Restitution de formes géométriques

L'évaluation de la précision de mesure de formes géométriques connues par le LiDAR terrestre Optech (ILWIS-3D), sera présentée en formes demi-cercles et triangulaires, de petite taille, en positifs et négatifs, en couleur noir et blanc (figures IV.2 et IV.3). L'objectif est de quantifier la dispersion de la mesure pour chaque forme géométrique et pour chaque dimension de creux ou de bosse.

Afin d'évaluer la précision en distance de l'appareil utilisé, nous nous intéressons au nombre de points LiDAR proches de la référence numérique. Pour cela nous allons réduire le bruit de la mesure en généralisant le volume de points scannés. Ceci réduit graduellement le nombre des données originales jusqu'à que les points restants soient représentatifs de la forme géométrique scannée.

On testera l'effet de la généralisation de l'information LiDAR (réduction du bruit) sur l'amélioration du potentiel de détection des formes géométriques. Ceci à partir de l'utilisation d'une moyenne glissante, soit appliqué directement sur les points LiDAR terrestre (en gardant l'ensemble des points scannés), soit sur des points préalablement moyennés à un pas régulier très fin (2,5 mm).

La moyenne glissante est effectuée sur un nombre de points voisins impair (3, 5 ...) et affectée au point central. Une autre méthode de généralisation est l'application d'une moyenne simple mais à un pas régulier plus grossier (1 cm).

La représentation numérisée des tôles sur la tranche de 5 mm d'épaisseur (figure VI.3) est utilisée comme référence afin d'évaluer visuellement la représentation des formes géométriques connues de différentes tailles, dans les tôles utilisées (en V et en U). Des statistiques de la dispersion de la mesure LiDAR (écart type et plage de variation) sont estimées pour chaque méthode évaluée.

IV.1.2 Test d'humidité

Nous allons aussi évaluer *in situ* la sensibilité du retour d'onde du LiDAR à deux conditions d'humidité de la marne noire : marne sèche et marne mouillée. Pour cela le LiDAR est placé face à un versant marneux à l'exutoire du BVRE du Laval, à une distance de 20 mètres. Deux panneaux en plastique servent de référence stable aux comparaisons (figure IV.4a).

Deux scans successifs sont effectués l'un sur marne sèche, puis un deuxième sur marne après arrosage (figure IV.4b). Les deux scans (sec et mouillé) sont convertis dans le même système de projection en utilisant les panneaux en plastique. L'évaluation de l'effet de l'humidité sur la dispersion de la mesure est faite en comparant les deux nuages de points.



Figure IV.4 - Evaluation de l'effet du teneur en eau sur la performance du LiDAR terrestre.

IV.1.3 Géoréférencement

Les points principaux de la méthodologie d'acquisition et de préparation des données LiDAR terrestre, afin qu'elles soient adéquates pour leur utilisation dans les applications ici considérées, sont : la densité du scan (d'après la distance de prise de vue), le problème du géo référencement à travers la transformation du référentiel, et le filtrage.

Pour les mesures directes à courte distance (télé-détection) par LiDAR terrestre, le rapport avantages/désavantages est exactement l'inverse que pour les mesures directes *in situ* (telle que le GPS ou le tachéomètre). Ce type de mesure peut produire des données topographiques potentiellement denses et précises, et il n'est pas invasif. La limitation la plus importante est le besoin de repérage pour transformer le référentiel LiDAR terrestre, étant donné qu'il utilise un système de projection polaire qui lui est propre.

Le LiDAR terrestre utilisé n'est pas équipé d'un système de repérage tel qu'une station centrale (par exemple GPS incorporé, niveau de bulle, plomb optique, entre autres), il ne possède pas de moyen interne pour rendre cohérent plusieurs scans successifs.

Les applications du LiDAR pour l'étude de l'érosion en montagne considéré dans cette recherche, ont besoin d'établir des comparaisons entre représentations 3D du relief :

- à partir de la même source de données topographiques :
 - même date et différents points de vue,
 - différentes dates (analyse diachronique) ;
- à partir de différentes sources de données topographiques (ex. MNT LiDAR terrestre pour la validation des MNT drone).

Dans tous ces cas, il est indispensable d'avoir le même référentiel, soit dans un système de projection connu (ex. Lambert III) pour la validation des MNT drone, soit en utilisant un référentiel LiDAR comme référence pour le suivi diachronique de l'érosion. Toutefois, c'est dans la maîtrise de la stratégie de transformation du référentiel LiDAR que se trouve le point clef de la précision atteignable avec cet appareillage. Nous avons deux méthodes envisageables pour cette transformation : le calage sans repères terrain (par techniques de corrélation), et le calage avec repères terrain (amovibles ou fixes).

Dans le cas d'un suivi diachronique, il est intéressant d'avoir plusieurs points de prises de vues pour compléter les parties cachées et d'avoir ainsi une couverture totale de la ravine à surveiller.

IV.1.2.1 Transformation du référentiel LiDAR sans repères de terrain

Sans repère sur le terrain, le recalage des deux mesures différentes dans une même géométrie est un processus délicat (aussi bien pour le changement de point de vue ou pour le changement de date). Dans ce cas, on peut faire l'hypothèse de zones a priori stables entre les diverses mesures qui pourront servir comme base pour le recalage des nuages des points LiDAR (par corrélation de formes). Cette procédure est intéressante par exemple pour valoriser tout scan ancien disponible sur une ravine. La précision de recalage dépend du choix de zones supposées stables qui ne doivent pas comporter de végétation dans le cas où l'on recherche des précisions centimétriques.

IV.1.2.2 Transformation du référentiel LiDAR avec repères de terrain

Avant de mettre en place le réseau de repères de terrain, il est impératif de répondre à une série de questions par rapport aux objets de forme géométrique connue à utiliser, comme : quel type de matériel, couleur, taille et forme ? Quel nombre de repères et sa distribution sur le terrain ? Comment nous allons les installer ?

Le matériel et la couleur des repères à utiliser doivent bien refléter l'énergie reçue du LiDAR. La forme géométrique du repère conditionne la facilité avec laquelle nous pouvons récupérer ces objets dans le nuage de points LiDAR. La taille des repères conditionne, en fonction de la distance à l'objet, la densité d'impacts des faisceaux laser par repère qui permettra la reconstruction de cet objet à partir de points LiDAR et son utilisation dans la reversion du système de projection.

Il faut un minimum de cinq repères pour connaître l'erreur quadratique moyenne (EQM) du calcul de coordonnées terrain pendant la reversion du système de projection. Les repères doivent être bien distribués et ils ne doivent pas être placés dans la même ligne de perspective du scan LiDAR terrestre.

L'installation des repères doit être effectuée de sorte qu'on garantisse une certaine stabilité pendant la durée du scan, ce qui peut aller jusqu'à deux heures. Les repères ne doivent pas bouger pendant ce temps, la référence terrain ne doit pas changer. Le repère ne doit pas être en contact avec le terrain, ni entouré de végétation de façon à être facilement isolé dans le nuage de points LiDAR.

Une solution plus robuste pour la transformation du référentiel LiDAR consiste à installer des repères de terrain qui vont permettre un recalage fin des deux géométries différentes. Notre solution consiste en un système de sphères réparties autour de la zone d'intérêt. La sphère est une forme géométrique qui n'est pas affectée par l'angle de visée du faisceau laser et elle est plus facile à reconnaître dans la nature. L'objectif est d'isoler les points LiDAR qui constituent les repères dans le nuage de points général (figure IV.5a).

Un point important dans l'utilisation des repères de terrain est le fait qu'il faut les maintenir suspendues au dessus du sol. Si les objets sont en contact direct avec le sol, leurs repérages deviennent difficiles sur le nuage de points LiDAR et le risque de confusion augmente. Une fois isolé le repère, il faut ajuster une sphère virtuelle au nuage de points sélectionné afin d'estimer le centre de chaque repère dans le système de coordonnées LiDAR (figure IV.5b).

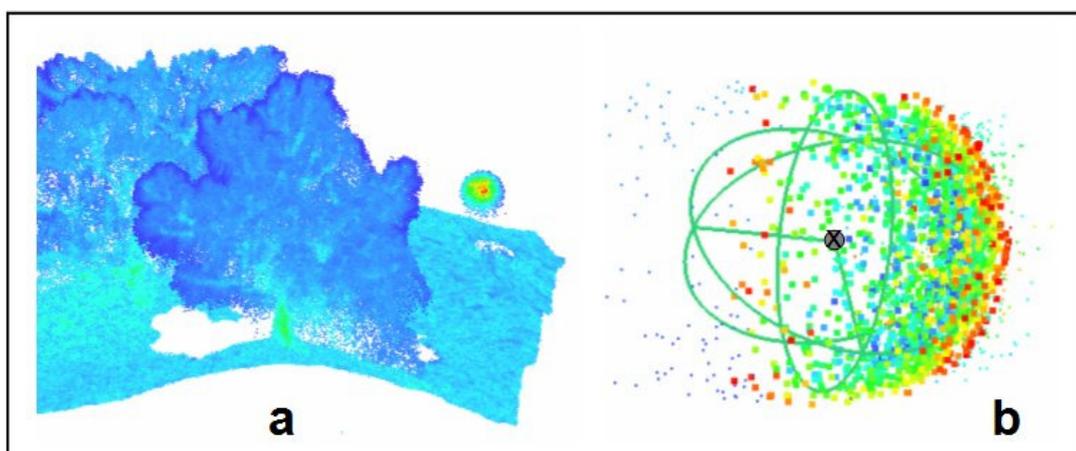


Figure IV.5 - a) Repérage de boules dans le nuage de points LiDAR terrestre, et b) ajustement d'une sphère virtuelle pour l'estimation des coordonnées du centre.

Il est alors indispensable (au moment de la prise du scan LiDAR) de faire, en plus du scan général, des scans spécifiques plus denses sur chaque repère (de type zoom). En effet la précision d'ajustement d'une forme virtuelle connue avec les points LiDAR est liée à la densité des points disponibles et au bruit de la mesure. Notons que la densité de points et la distance de prise de vue sont liées, et que, dans le cas de badlands, cette distance s'avère très contrainte par la topographie tourmentée de ce type de relief.

La prochaine étape consiste à calculer la matrice de passage pour le recalage de points, à partir d'une transformation d'Helmert par la méthode de moindre carrés (Watson, 2006), à l'aide des sept paramètres : trois de translation, un d'échelle, trois de rotation.

Dans le cas où nous avons besoin de comparer deux représentations 3D du relief obtenus à partir de différentes sources de données topographiques (ex. MNT LiDAR et MNT drone), il est indispensable d'utiliser le même système de projection pour toutes les mesures de terrain (pour cette recherche, le système de projection Lambert III est utilisé).

Un recalage en absolu est alors impératif. Pour ceci, la matrice de passage doit être calculée en utilisant les coordonnées terrestres des centres des sphères (par DGPS ou tachéomètre). Le recalage des points scannés dans le même système de projection que les MNT drone va nous permettre d'établir une comparaison MNT drone contre MNT LiDAR terrestre.

Ici, nous proposons des repères amovibles, plus faciles à transporter et à installer étant donné les conditions de terrain à Draix. Cependant, une source importante d'incertitude de cette méthode est le calcul des coordonnées du centre des sphères, étant donné la difficulté que la pointe de la tige que soutient chaque sphère soit précisément placée. Il faut garantir que le calcul de ces coordonnées sur le terrain soit cohérent avec l'estimation du centre de la sphère dans le nuage de points LiDAR terrestre.

Comme sphères amovibles, nous avons choisi des boules en polystyrène blanc placées pour la durée du scan sur des fers à béton jusqu'au centre de la sphère, fichés dans le sol (figure IV.6). Les boules en polystyrène sont toujours disponibles et à un faible coût.

Dans le cas de l'utilisation du LiDAR pour le suivi diachronique de changements fins de la morphométrie de ravines, notre proposition est d'utiliser des repères fixes sur le pourtour d'une ravine pour éviter de modifier le déroulement naturel de l'érosion. Avec cette méthode le recalage est relatif, sans lien obligatoire avec un système de coordonnées géographique officiel. On omet l'erreur de calcul des coordonnées du centre des sphères par DGPS ou tachéomètre.

L'un des scans est pris comme référence géométrique, et les autres scans seront recalés à cette référence. Le calcul de la matrice de passage utilisera uniquement les coordonnées XYZ LiDAR des centres de repères (scan de référence et scans à recalés).

Pour le recalage par repères fixes nous proposons un réseau de boules en béton solidaires d'une tige en acier enfoncée à une profondeur de 60 cm pour atteindre la marne consolidée et d'éviter les changements de position lors des cycles gel-dégel (figure IV.6). De cette façon la position du centre des sphères ou des boules à utiliser comme repères terrain sera suffisamment stable afin de garantir la mise au point d'un système de référencement permanent.

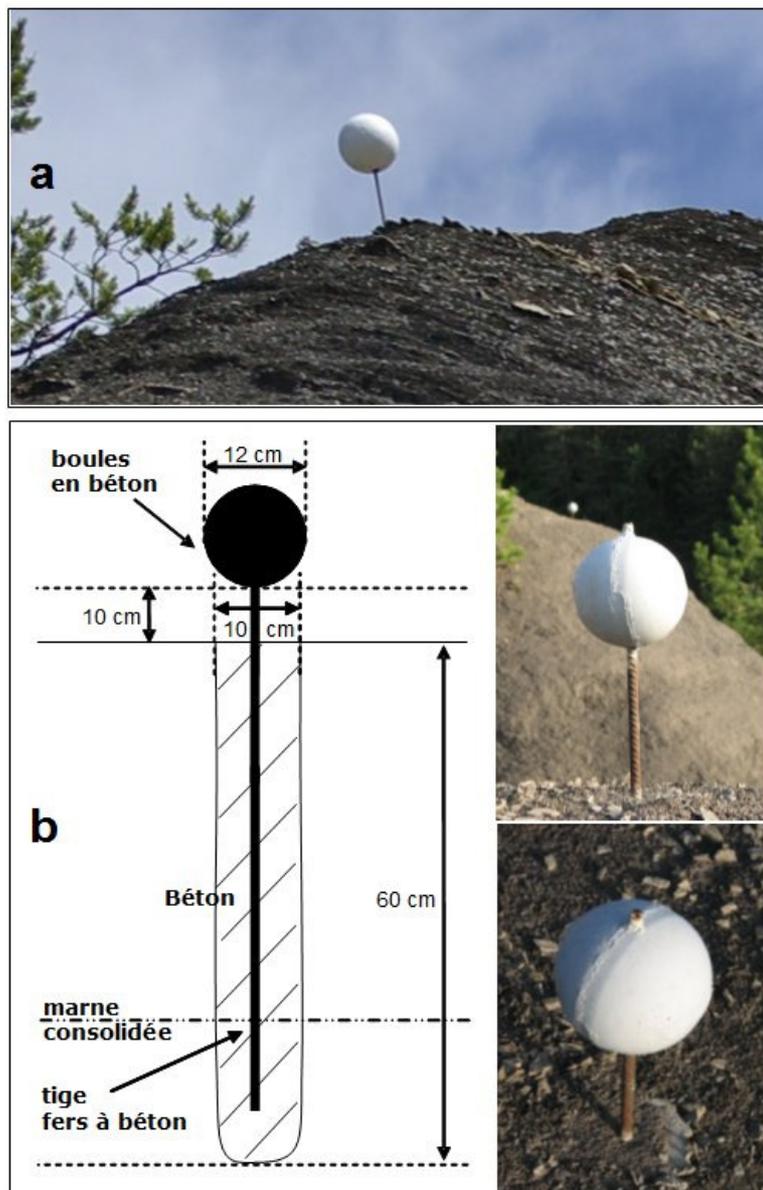


Figure IV.6 - a) boule en polystyrène sur une fer à béton fichée dans le sol dans la crête d'une ravine à Draix (bassin du Moulin) ; b) boule en béton comme repère fixe (bassin de la Roubine).

IV.1.2.3 Filtrage

Le signal LiDAR est l'objet d'un bruit aléatoire qui dépend du type d'appareil utilisé. Afin de surmonter cette condition, nous avons le choix de choisir la densité du scan la plus forte possible et d'effectuer *a posteriori* un filtrage du bruit du type moyen ou médian (généraliser l'information, moins de détail mais plus de précision).

Les données LiDAR terrestre à utiliser pour la validation des MNT drone doivent être généralisées afin que la densité de l'information topographique soit correspondante aux MNT à évaluer. Elles seront aussi traitées afin d'éliminer les zones végétalisées. Les secteurs où la densité de points est plus faible seront aussi éliminés (élimination des zones cachées).

Bien que les scans LiDAR terrestre apportent une grande quantité d'information de terrain, la couverture du scan peut être affectée par l'effet d'écran de la végétation ou même du relief. Les nuages de points bruts seront interpolés en utilisant une moyenne simple comme interpolateur, afin de produire une maille de points à pas régulier équivalente à celle du MNT drone à évaluer et finalement stockés sous forme raster que nous appellerons MNT LiDAR terrestre. Cette généralisation de l'information permettra réduire aussi l'effet du bruit de la mesure LiDAR sur la précision du MNT LiDAR.

Pour les données LiDAR terrestre à utiliser dans le suivi diachronique de l'érosion, l'objectif est de exploiter la densité et le détail maximal que cet appareillage peut nous rendre afin d'étudier l'évolution de changements fins des ravines d'érosion. Il est ainsi que la première partie de l'approche terrestre, ou l'analyse du bruit de la mesure LiDAR, constitue une étape clef dans la définition du filtrage à appliquer aux données LiDAR terrestre dans le suivi diachronique. Ceci, plus l'erreur dans la transformation du référentiel LiDAR, définira la précision-résolution vraiment atteignable pour ce type d'application en zone de montagne marneuse.

IV.2 APPLICATION

IV.2.1 Analyse de la mesure LiDAR

Deux types d'évaluation de la précision-résolution des données LiDAR ont été réalisés. D'une part, nous avons étudié le bruit de la mesure LiDAR pour la précision de positionnement du versant et pour le potentiel de restitution de formes géométriques linéaires. D'autre part, nous avons évalué l'impact du teneur d'humidité de la marne noire *in situ* sur la précision-résolution des données LiDAR.

IV.2.1.1 Le bruit et la couleur

Afin d'évaluer le bruit de la mesure LiDAR terrestre, nous avons sélectionné deux morceaux planes des tôles de formes régulières connues (en V et en U) utilisées, pour les couleurs noir et blanc. Sur chaque nuage de points LiDAR obtenus par tôle et couleur évalués, nous avons estimé l'écart type de la mesure et la plage de variation.

Dans la figure IV.7 nous pouvons apprécier la dispersion de points LiDAR terrestre (tôle triangulaire, couleurs noir et blanc), et dans le tableau IV.1 les statistiques correspondantes aux zones planes utilisées pour le calcul de la dispersion.

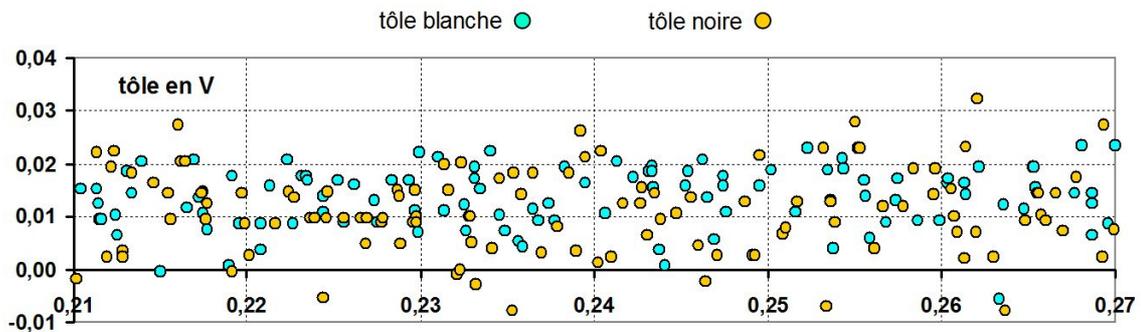


Figure IV.7 - Test du bruit de la mesure LiDAR terrestre sur une zone plate de la tôle triangulaire, couleur noir et blanc (toutes les unités en mètres).

Les deux profils des nuages de points LiDAR ont été extraits sur une tranche de 5mm d'épaisseur, à chaque côté de la zone de changement de couleur (à 48 et à 52 cm). Les résultats montrent une dispersion de la mesure (écart type du scan) autour d'un centimètre pour la tôle à couleur noire, et autour de six millimètres pour la tôle à couleur blanche, pour une distance de mesure de 30 mètres.

Tableau IV.1 - Bruit de la mesure LiDAR terrestre sur des tôles de formes régulières connues, couleur noir et blanc (toutes les unités en mètres).

forme	couleur	max.	min.	plage	écart type
tôle triangulaires (en V)	blanc	-0,0158	0,0137	0,0295	0,0062
	noir	-0,0201	0,0249	0,0450	0,0099
tôle en demi-cercle (en U)	blanc	-0,0057	0,0237	0,0294	0,0056
	noir	-0,0078	0,0424	0,0502	0,0085

Si l'on fait une moyenne glissante on peut réduire ce bruit. Nous avons testé le calcul de la moyenne glissante sur 3, 5 et 7 pixels (numéro impair), en affectant le résultat au pixel centrale (figure IV.8). L'écart type de la mesure est réduit progressivement avec l'application de la moyenne glissante pour 3, 5 et 7 pixels (0,0033, 0,0023, et 0,0019, respectivement), mais la possibilité de reconstruire la forme originale de la tôle ne montre pas une amélioration significative (figure IV.8).

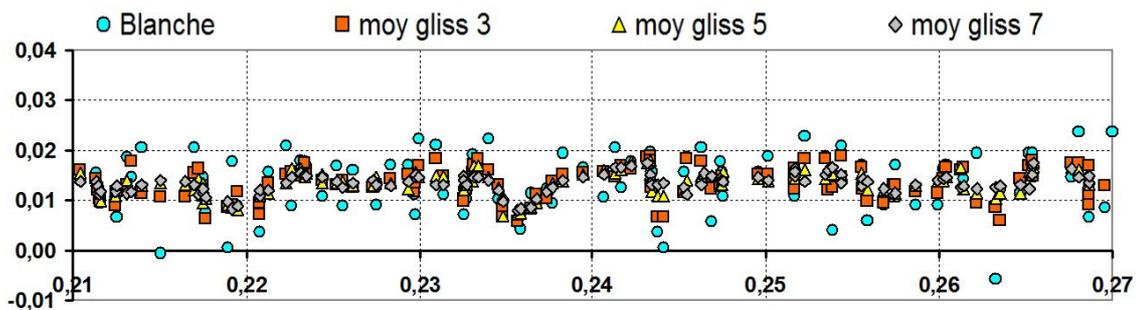


Figure IV.8 - Test de réduction du bruit par la moyenne glissante (moy gliss) sur le nuage de points LiDAR terrestre pour la tôle en V blanche (toutes les unités en mètres).

Ensuite, nous avons testé l'utilisation d'une moyenne simple et de la médiane de la mesure sur un pas régulier d'un centimètre, pour généraliser les données LiDAR terrestre (figure IV.9). Les résultats montrent que la réduction du bruit est encore plus effective que celle obtenue par la moyenne glissante. L'écart type résultant est de 0,0009 pour la moyenne et de 0,0017 pour la médiane.

Néanmoins, la généralisation de l'information en utilisant la moyenne simple ou la médiane à un pas régulier d'un centimètre, montre un effet nettement plus important sur la reconstitution de la forme originale de la tôle, comme on peut observer dans la figure IV.9. Ceci malgré que cette méthode implique une perte de résolution significative. La moyenne simple de la mesure est légèrement plus efficace dans la reconstitution de la forme originale de la tôle utilisée dans le test.

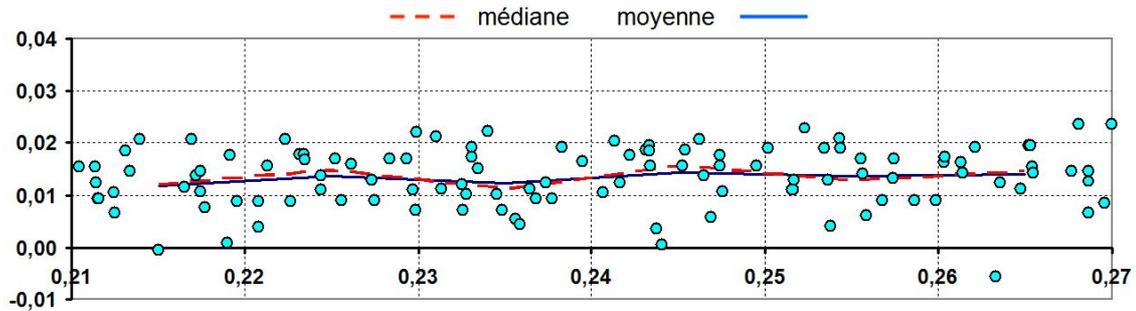


Figure IV.9 - Test de réduction du bruit par généralisation de l'information LiDAR terrestre (moyenne simple et médiane) pour la tôle en V blanche (toutes les unités en mètres).

IV.2.1.1 Précision dans la restitution des formes

Dans la figure IV.5 nous pouvons apprécier la dispersion de points LiDAR terrestre autour des tôles numériques en demi-cercle et triangulaires, couleur noir et blanc. Il est évident que sans réduction du bruit la possibilité de reconnaissance des formes à la distance de scan (30 m) sera réduite.

Nous avons évalué l'effet de la réduction du bruit sur l'amélioration du potentiel de détection des formes géométriques par LiDAR terrestre, en utilisant les méthodes testées dans la partie « bruit de la mesure » :

1. une moyenne glissante,
 - a. appliqué directement sur les points scannés ou,
 - b. sur des points préalablement moyennés à un pas régulier très fin (2,5 mm) ;
2. une moyenne simple à un pas régulier plus grossier (1 cm).

La représentation numérisée des tôles a été utilisée comme référence afin d'évaluer visuellement la représentation des formes géométriques en demi cercle et triangulaire, de différentes tailles, dans les tôles utilisées.

Nous pouvons apprécier l'effet de la réduction du bruit sur un morceau de tôle en demi cercle blanche (extrême droit de la tôle, compris entre 0,35 et 0,45 cm, figure IV.11a) : a) la moyenne glissante sur 9 points scannés, b) la moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et c) les moyennes glissantes sur 3 et 9 points moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm.

Des statistiques de dispersion ont été estimés (écart type et plage de variation) pour les mesures LiDAR terrestre sur les tôles de formes géométriques connues, avec les différentes méthodes de filtrage de bruit établies préalablement (tableau IV.2). Ces statistiques représentent une estimation de la dispersion globale des données LiDAR sur le morceau analysé, mais elles ne représentent pas la dispersion autour la tôle numérisée.

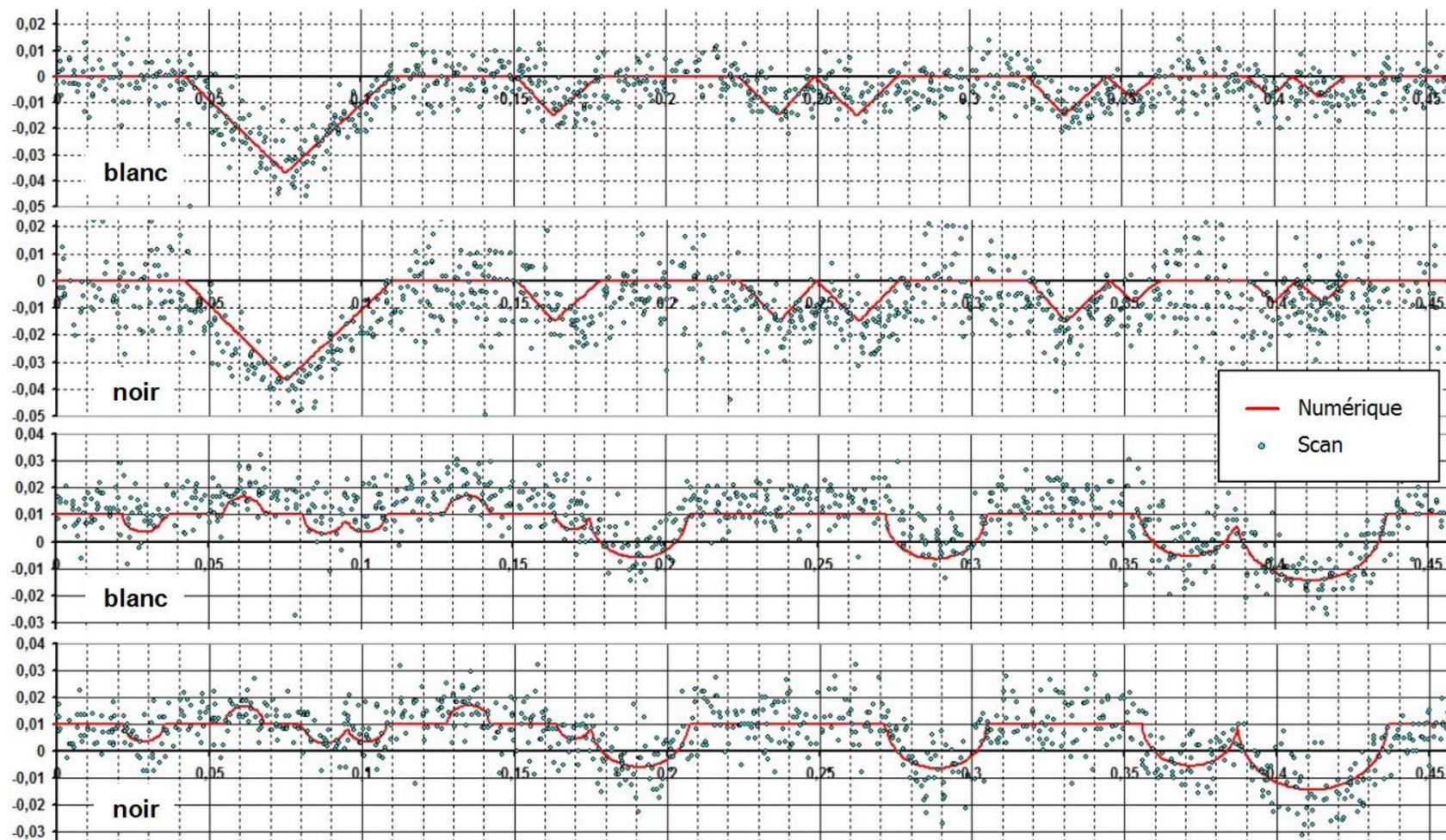


Figure IV.10 - Test des formes géométriques connues pour le LiDAR terrestre, tôles triangulaire et en demi cercle (toutes les unités en mètres).

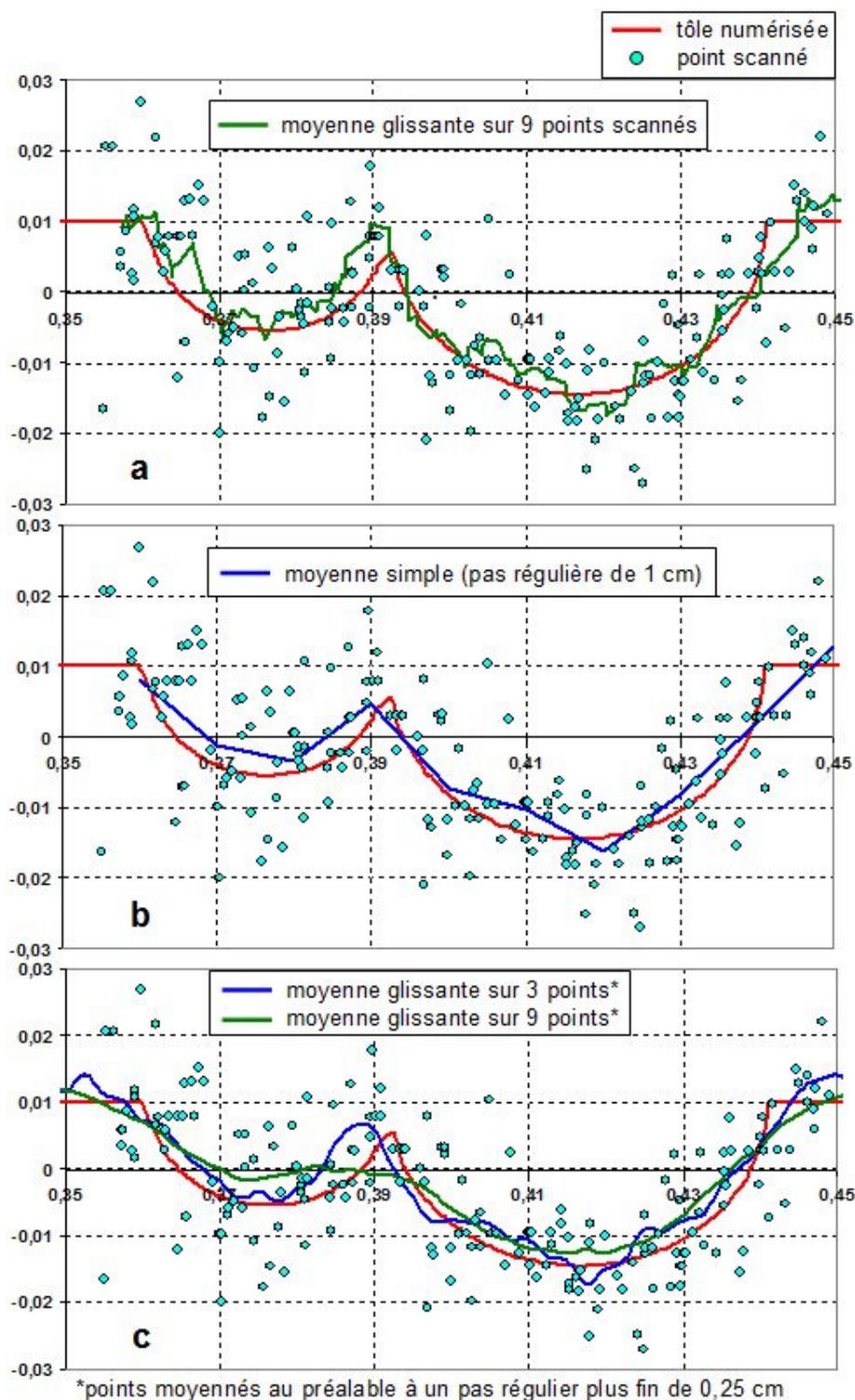


Figure IV.11 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques en demi cercle les plus grossières (couleur blanche), toutes les unités en mètres : a) moyenne glissante sur 9 points scannés, b) moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et c) moyennes glissantes sur 3 et 9 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).

Tableau IV.2 - Dispersion de la mesure LiDAR terrestre (écart type et plage de variation) sur des tôles de formes géométriques connues, avec différentes méthodes de filtrage de bruit (unités en mètres).

	ET	max.	min.	plage
tous les points scannés	0,011	0,031	-0,027	0,058
moyenne glissante sur 9 points scannés	0,008	0,013	-0,017	0,031
moyenne simple (pas régulier de 1 cm)	0,009	0,013	-0,016	0,029
moyenne simple (pas régulier de 0,25 cm)	0,010	0,017	-0,018	0,035
moyenne glissante sur 3 points	0,009	0,014	-0,017	0,031
moyenne glissante sur 9 points	0,008	0,012	-0,013	0,024

Dans la figure IV.11 nous analysons les formes en demi-cercle le plus grossières (> 5 cm). Les résultats obtenus en utilisant la moyenne glissante sur 9 points scannés montrent un bon ajustement général à la forme de la tôle numérisée (figure IV.11a), toutefois la très irrégulière ligne verte qui rallie les valeurs de la moyenne montre que le bruit de la mesure affecte toujours la représentation détaillée de ces formes.

Avec l'utilisation de la moyenne simple à un pas régulier de 1 cm (figure IV.11b) on obtient un résultat moins affecté par le bruit, même si on sacrifie la résolution ou le détail de l'information LiDAR originale.

Pour le dernier test de réduction du bruit on utilise toujours la moyenne glissante, mais cette fois si appliquée sur de points LiDAR préalablement moyennés à un pas régulier plus fin de 0,25 cm (figure IV.11c). Les résultats sont similaires à ceux obtenus en utilisant la moyenne simple directement à un pas régulier plus grossier. La moyenne glissant sur 9 points risque de lisser excessivement le relief.

En analysant les formes géométriques triangulaires le plus grossières (figure IV.12), les résultats sont similaires à ceux obtenus pour les formes en demi-cercle, avec les méthodes les plus efficaces pour la réduction du bruit de la mesure et la restitution des formes géométriques plus grossières, à partir d'un nuage de points LiDAR terrestre :

1. moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et
2. moyenne glissante sur 3 points LiDAR préalablement moyenné à un pas régulier plus fin de 0,25 cm.

La moyenne simple à un pas régulier de 1 cm peut offrir aussi une bonne restitution de formes en réduisant le volume total de données LiDAR à manipuler.

En ce qui concerne les formes géométriques moyennes et petites (< 5 cm), nous avons dans les figures IV.13 et IV.14 les résultats dans la réduction du bruit et la restitution de formes en demi-cercle et triangulaires, respectivement (en utilisant les méthodes : moyenne simple et moyenne glissante sur 3 points LiDAR).

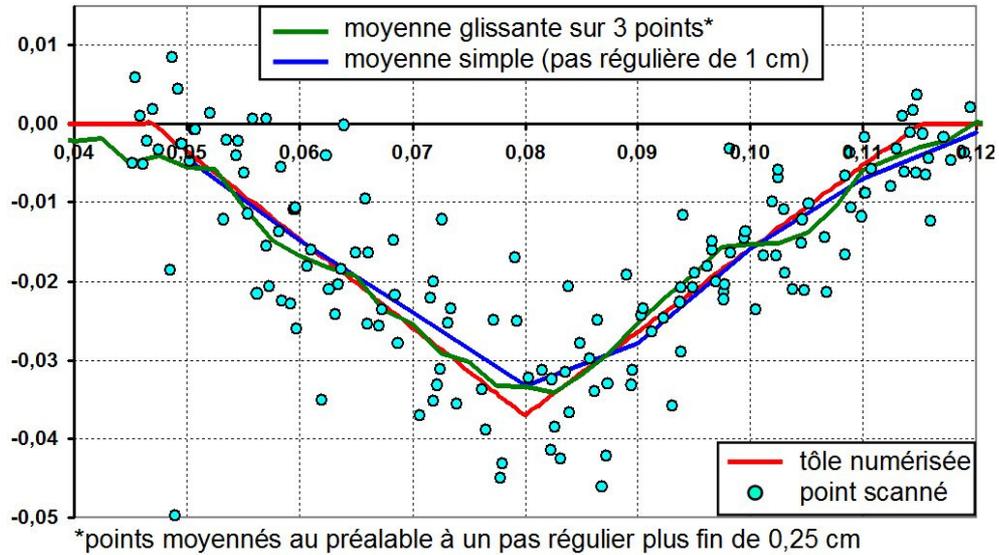


Figure IV.12 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques triangulaires les plus grossières (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).

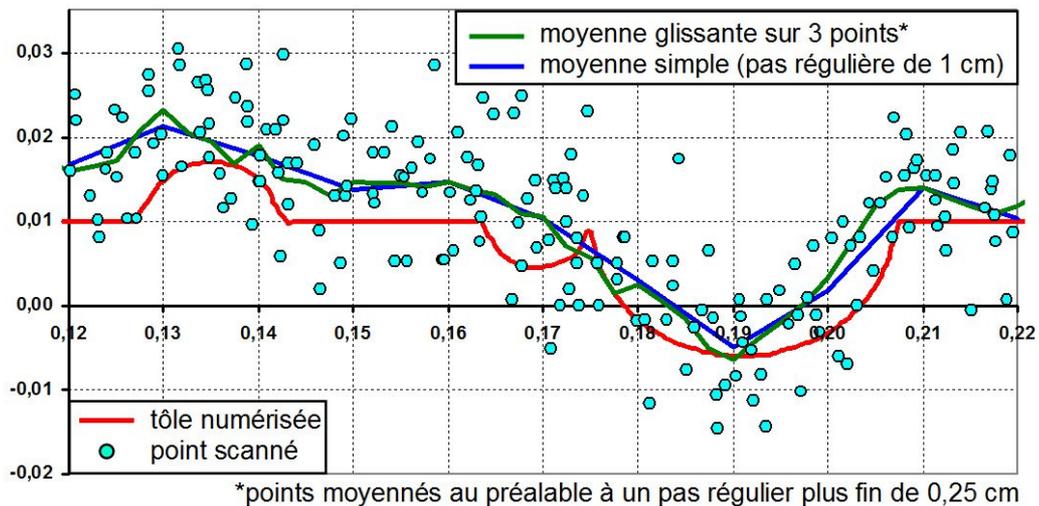


Figure IV.13 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques en demi cercle moyennes et petites (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).

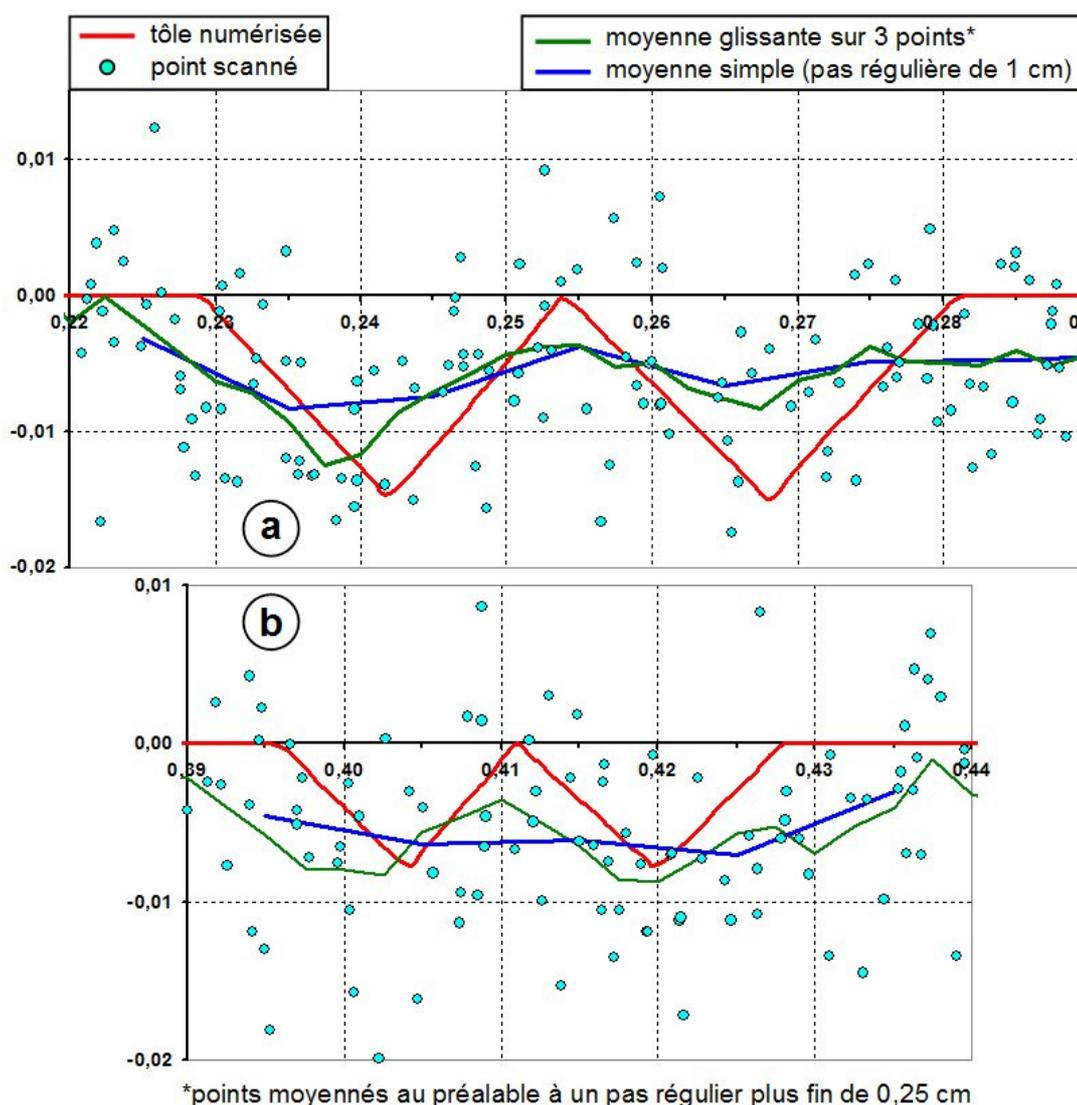


Figure IV.14 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques triangulaires moyennes (a) et petites (b) (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).

Comme prévu, le bruit de la mesure LiDAR affecte de façon plus forte la restitution des formes géométriques, de tailles moyennes et petites (figures IV.13 et IV.14). Les formes en demi-cercle de taille inférieure à 3 cm ne sont pas repérées après réduction de bruit par aucune de deux méthodes utilisées (figure IV.13).

Dans le cas de formes triangulaires de tailles moyennes et petites (< 3 cm, figure IV.14a et b, respectivement), la méthode de la moyenne glissante sur les points LiDAR (préalablement moyenné à un pas régulier plus fin), s'avère légèrement plus efficace à l'heure de reconstituer les formes géométriques. La dispersion de données LiDAR est tellement importante que la possibilité de restitution de formes à cette taille (< 3 cm) est très faible, même en réduisant le bruit.

IV.2.2 Test d'humidité

Nous avons testé le LiDAR terrestre sur un versant à l'exutoire du Laval. Deux scans successifs ont été réalisés, le premier sur marne sèche, le second sur marne humide après arrosage de la zone d'analyse. Une bande horizontale de 5cm de large a été extraite à mi hauteur des panneaux en plastique (ligne bleue dans la figure IV.15), afin de comparer les deux scans réalisés. Les panneaux ont servi de référence fixe pour le recalage des deux scans LiDAR.

Un premier scan a été effectué le 25 juin 2007 à 12h51 représentant la marne sèche. Ensuite, nous avons mouillé le versant à l'aide d'un arrosoir afin de réaliser le scan LiDAR correspondant à la marne humide

Dans la figure IV.16 nous pouvons observer la dispersion dans la mesure LiDAR sur le versant marneux sec et humide. La teneur en eau volumique a été calculée pour chaque condition : 2,85% pour la marne sèche, et 27,10% pour la marne humide.

Les résultats ne montrent pas de différences significatives dans la dispersion de la mesure LiDAR, pour les deux teneurs en eau. Entouré par un cercle noir dans la figure IV.16, nous avons une zone où la différence dans la réponse du signal LiDAR est peut être liée au déplacement de sédiments pendant l'arrosage.

Nous n'avons pas ajouté plus d'eau afin de tester d'autres teneurs en eau à cause du risque de déplacements des matériels par la pente du versant choisi, ce qui altérerait les mesures LiDAR. Il serait intéressant d'évaluer plusieurs teneurs en eau qui correspondent avec des valeurs réelles saisonnières de versants marneux à Draix, mais dans des conditions contrôlées de laboratoire, vu la difficulté d'humecter les versants sans produire des changements liés à l'écoulement résultant.

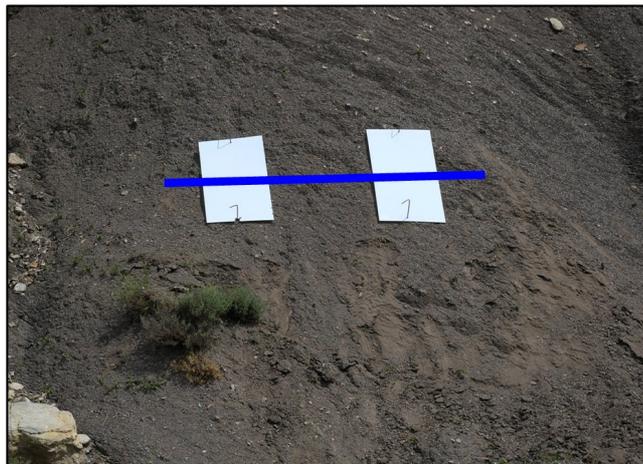


Figure IV.15 - Versant scanné pour l'évaluation de l'effet de la teneur en eau de la marne noire sur la performance du LiDAR terrestre, et bande de données analysées (ligne bleue).

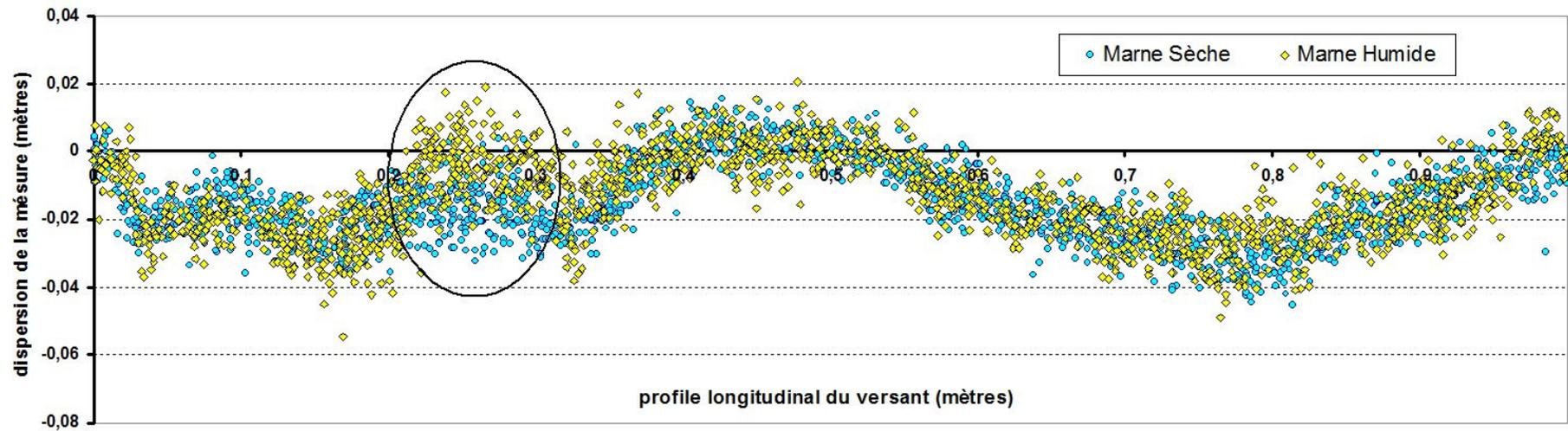


Figure IV.16 - Evaluation de l'effet du teneur en eau de la marne noire sur la performance du LiDAR terrestre, entouré par un cercle noir une zone où la différence dans la réponse du signal LiDAR est peut être liée au déplacement de sédiments pendant l'arrosage.

La dispersion « générale » de la mesure a été estimée autour de 3 cm, sur un morceau du profil compris entre 0,4 et 0,5 m (figure IV.11), autant pour la marne sèche que pour la marne humide, pour une distance de mesure de 20 mètres.

IV.2.3 Géoréférencement

Tel que nous avons mentionné auparavant, le problème principal pour l'utilisation du LiDAR terrestre dans l'étude de l'érosion en montagne marneuse est le recalage numérique de deux nuages de points dans le même repère géométrique. Nous avons testé deux méthodes afin de surmonter le problème de positionnement du LiDAR terrestre mal connu :

- Calage sans repères terrain (technique de corrélations) ;
- Calage avec repères terrain (amovibles ou fixes).

IV.2.3.1 Recalage numérique sans repères de terrain

Le recalage numérique direct entre deux nuages de points par corrélation de forme (« best fit ») se réalise en utilisant un des nuages comme référence et l'autre pour s'ajuster au mieux, par rotation et translation (logiciel utilisé : 3Dresaper). Il faut calculer 6 paramètres par minimisation d'une fonction objectif de type EQM (figure IV.17).

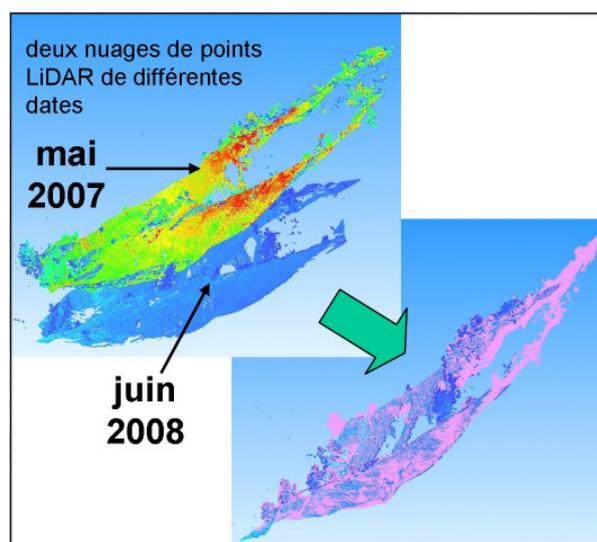


Figure IV.17 - Recalage numérique direct de deux nuages de points LiDAR terrestre par corrélation de forme.

Afin de calculer ces paramètres de corrélation entre deux scans LiDAR terrestre, nous avons deux possibilités : en utilisant tous les points disponibles, ou en utilisant les points supposés stables ou fixes. Pour l'estimation du décalage final entre les nappes LiDAR, nous avons utilisé le mur d'un cabanon localisé à l'exutoire du BVRE de La Roubine (Annexes : figure A.13).

Un essai de transformation du référentiel par corrélation sur tous les points a été faite. Les résultats sont globalement intéressants mais ce recalage montre un très fort effet du positionnement et des erreurs résiduelles fortes.

Nous avons profité de la présence d'un mur fixe (cabanon en béton) sur le site pour tester l'efficacité de la méthode de recalage. Normalement on devrait obtenir des nuages de points confondus pour les deux dates. Or l'erreur de positionnement est de l'ordre de 6 à 7 cm sur le mur du cabanon (figure IV.18a), ce qui montre des effets de compensation d'erreurs ou des artefacts de calcul.

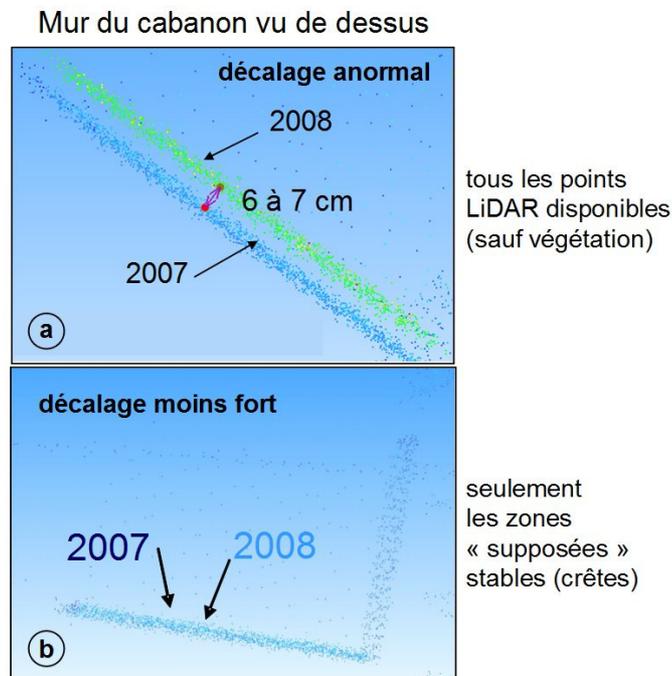


Figure IV.18 - Recalage numérique sans repères de terrain sur tous les points LiDAR terrestre (a), et en utilisant les zones « supposées » stables (b).

Ce premier essai a été effectué en gardant tous les points, ce qui serait une méthode correcte sans changement de surface. Or ce sont les changements que l'on veut obtenir. En cas de modification entre une date et l'autre l'algorithme va compenser les écarts et finalement indiquer des changements atténués.

Cette méthode sans repères est sensible aux choix des 2 ensembles de points comme référence pour le calage. Une méthode adaptée devra se baser uniquement sur les zones que l'on suppose fixes entre deux dates. Ainsi doivent être éliminés tous les points douteux : les arbres peuvent introduire du bruit dans le calcul des paramètres de corrélation, étant

donné les nombreux branches nouvelles ou branches cachées existantes ; les versants pentus où l'on suppose que la dynamique de changements sera plus intense (érosion). Au contraire, nous pouvons supposer fixes les crêtes du moins pour des écarts temporels de quelques mois.

Un deuxième essai de référencement avec calage direct par corrélation a été faite (figure IV.18b), mais cette fois ci à partir de points sélectionnés sur des zones supposées stables. Ces zones ont été choisies principalement sur les crêtes du bassin, en éliminant les zones végétalisées et les pentes. Le résultat sur le mur du cabanon montre un décalage pratiquement éliminé, en tout cas inclus dans le bruit de la mesure observé dans les deux nuages de points LiDAR, entre 2 ou 3 cm.

L'utilisation du mur du cabanon nous a permis d'avoir une estimation du décalage final après le recalage des nappes LiDAR diachronique, mais ce seul objet fixe disponible ne nous permet pas de connaître la distribution spatiale de ce décalage.

Afin d'observer la cohérence spatiale du recalage numérique nous avons comparé deux nappes LiDAR diachronique (juin 2007 et 2008) recalées en utilisant les zones supposées stables. La visualisation des points les plus hauts montre des résultats qui semblent cohérents avec les possibles changements dans la morphométrie de la ravine, même si c'est sur un couple trop proche dans le temps (figure IV.19).

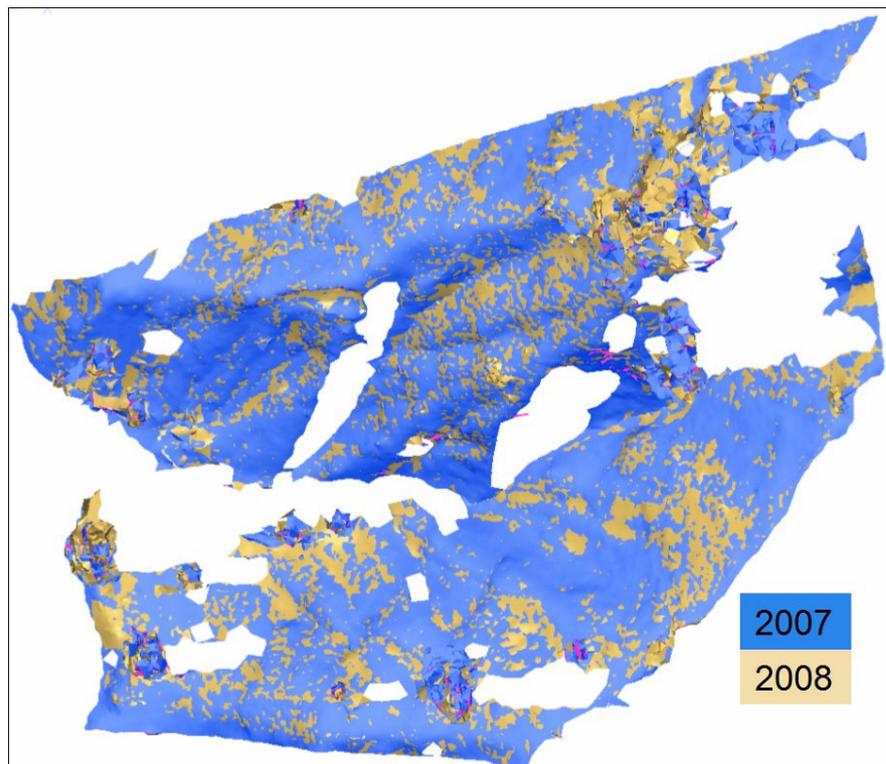


Figure IV.19 - Recalage numérique sans repères de terrain sur des points LiDAR terrestre sélectionnés (zones stables : les crêtes).

Le fait d'utiliser des zones « supposées » stables améliore la correspondance entre nuages de points LiDAR. Les résultats confortent l'idée que les versants sont plus variables que les crêtes ce qui permet la spatialisation des changements entre deux dates. Il est impératif que le Δt soit suffisamment important pour que les changements que l'on cherche à quantifier soient supérieurs au bruit de recalage.

Cette méthode offre des bonnes possibilités pour valoriser les scans LiDAR terrestre existants à Draix sans repères de terrain, pour le calcul des paramètres de corrélation entre deux nappes. Cette méthode pourra offrir des meilleurs résultats quand on aura des mesures suffisamment décalées dans le temps, afin de d'établir une spatialisation fine des évolutions superficielles.

IV.2.3.2 Recalage numérique avec repères terrain

IV.2.3.2.1 Repères amovibles

La méthode de repérage des scans LiDAR terrestre en utilisant les boules de polystyrène a été évaluée en mai 2007. Un scan est réalisé à Draix sur deux ravines pour l'évaluation de qualité des MNT drone, en utilisant une dizaine de boules en polystyrène de 8 cm de diamètre. Pour une distance moyenne de mesure de 70 m, la densité d'impacts ne permettrait pas de bien identifier les boules de 8 cm dans le nuage de points LiDAR.

Pour le scan postérieur (juin 2007), le diamètre des boules a été augmenté à 12 cm ce qui s'est avéré suffisant pour la même distance de mesure à la densité maximale du scan (1 point chaque 2 millimètres pour une distance moyenne de mesure de 70 m).

Dans la figure IV.20 nous pouvons observer les directions de balayage des scans LiDAR terrestre utilisés pour la validation des MNT drone, sur les deux sites d'étude. Tandis que dans la figure IV.21 on observe la distribution des boules en polystyrène sur les ravines aux bassins du Moulin (IV.21a) et La Roubine (IV.21b), ainsi que leurs nuages de points LiDAR terrestre résultants.

Avec ce système de boules en polystyrène amovibles sur fers à béton, l'EQM est d'environ 3 cm, ce qui est cohérent avec la précision atteignable avec le DGPS (mode RTK) utilisé pour le calcul des coordonnées géographiques du centre de chaque boule. Cette incertitude est trop élevée pour l'utilisation des scans LiDAR diachroniques dans le suivi « intra-saisonnier » de l'ablation.

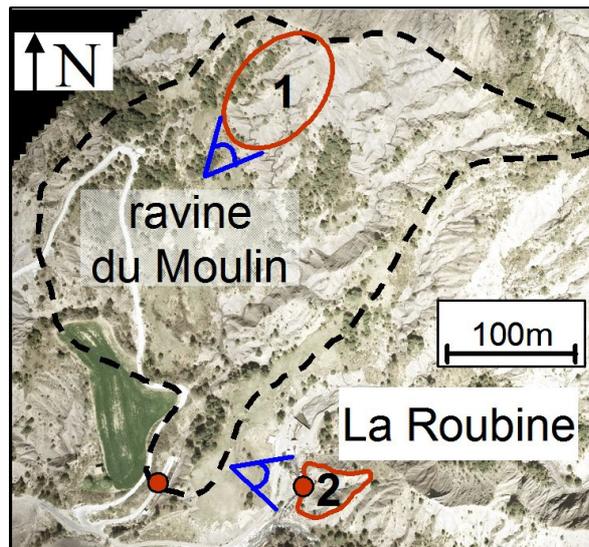


Figure IV.20 - Directions des scans LiDAR terrestre de validation, sur les deux sites d'étude.

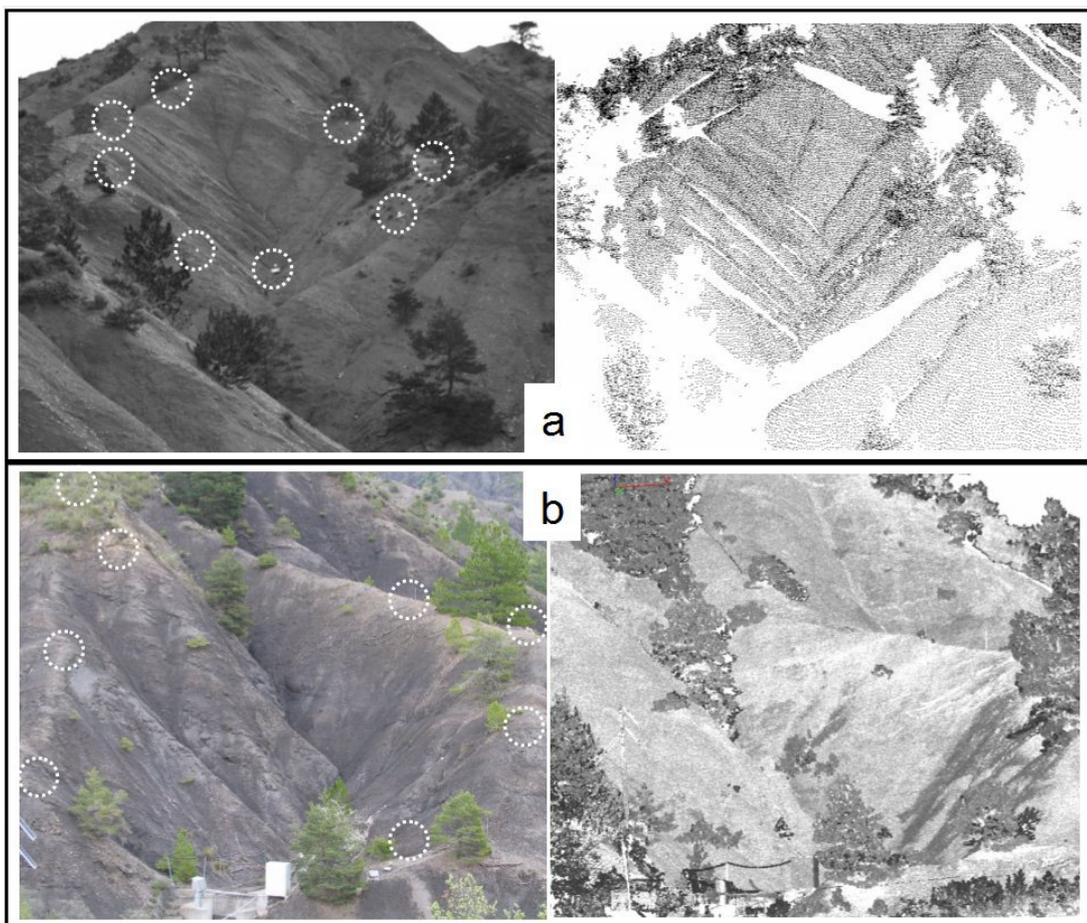


Figure IV.21 - Réseau de boules en polystyrène (cercle pointillé blanc) et les nuages de points LiDAR terrestre résultants, sur les bassins du Moulin et La Roubine (a et b, respectivement).

Les données LiDAR terrestre utilisées pour la validation ont été généralisées afin de les faire correspondre à la densité des MNT drone à évaluer, et en même temps, réduire le bruit qui peut affecter la fiabilité de son utilisation comme « vérité terrain ». Les nuages de points bruts ont été interpolés en utilisant une médiane simple comme interpolateur, afin de produire une maille de points à pas régulier de 2 cm. Ces nuages de points maillés ont été convertis en MNT-LiDAR terrestre.

De façon identique à ce que est fait avec les points de validation pris par DGPS-Tachéomètre, les MNT-LiDAR terrestre sont traités afin d'éliminer les zones de végétation et les secteurs à faible densité de points scannés. Bien que les scans LiDAR terrestre apportent une grande quantité d'information de terrain, la couverture du scan est affectée par l'effet de masque de la végétation ou même du relief.

IV.2.3.2.2 Repères fixes

Avec les boules en polystyrène, l'incertitude pour le calcul des coordonnées du centre de chaque repère était importante, même si leur diamètre était suffisant pour son utilisation dans la validation des MNT drone.

L'idée ici est de fournir une ravine avec un système de références fixes ou permanentes qui sert à établir un recalage relative des nuages LiDAR, en éliminant ainsi la nécessité de calculer les coordonnées de ces repères dans un système de projection général géoréférencé. Celle-ci serait une meilleure solution à condition d'avoir une continuité dans la disposition de ces repères.

Le bruit de la mesure LiDAR terrestre doit être moins important que le taux d'érosion annuel moyen dans le paysage à étudier, afin que cette information soit utilisable pour étudier l'évolution fine du changement morphométrique des versants.

Une évaluation de la précision de mesures en relative du LiDAR terrestre a été réalisée. Une série de 8 boules de polystyrène de 12 cm de diamètre ont été placées en maille dans un terrain à côté de la Maison de la Télédétection à Montpellier (Albretch, 2007). Ensuite, les boules ont été scannées depuis quatre emplacements différents à une distance équivalente. En utilisant un scan comme référence, l'EQM de mesure du positionnement des 8 boules pour chaque scan a été calculée (figure IV.22 et tableau IV.3).

Nous pouvons déduire d'après les résultats correspondants au scan 3 que plus dense est le scan, plus haute est la densité d'impacts par sphère, et plus précise est la restitution des formes par ce nuage de points LiDAR (tableau IV.3). L'EQM totale de chaque scan par rapport au scan de référence est la moyenne des EQM de huit boules utilisées dans le calcul des paramètres de la matrice de rotation (transformation d'Helmert).

L'EQM des différents scans par rapport au scan de référence (autour de 5 mm) montre la précision atteignable avec un recalage relatif.

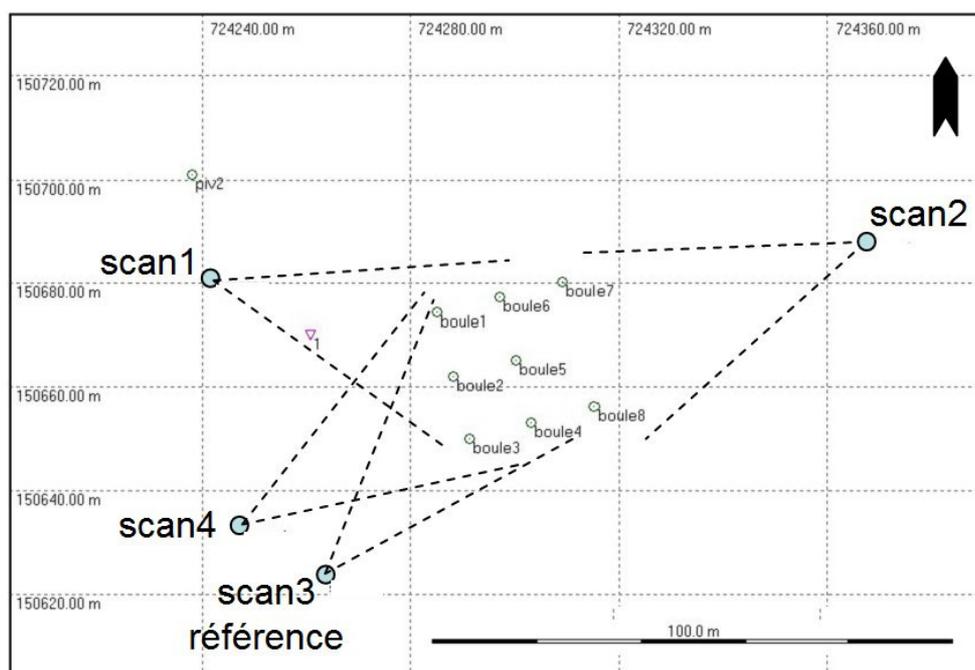


Figure IV.22 - Emplacement des scans LiDAR terrestre pour l'évaluation de la précision de mesure en relative.

L'incertitude est plus importante dès que l'on utilise un recalage géoréférencé, elle sera de l'ordre de la grandeur de l'incertitude du système de calcul de coordonnées qu'on utilise (autour de 3cm pour un DGPS en mode RTK).

Tableau IV.3 - Moyenne de l'erreur et écart type (ET) des nuages de points LiDAR terrestre sur des tôles de formes géométriques connues, avec filtrage de bruit (unités en mètres).

scan LiDAR	densité du scan (points/mm)	distance du scan (m)	densité moyenne d'impacts par sphère	EQM (m) par rapport à la référence
scan 3	1 / 3,9	45	-	-référence-
	1 / 5,3		406	0,0020
	1 / 7,9		156	0,0030
	1 / 9,3		129	0,0037
scan 4	1 / 5,3	45	316	0,0046
scan 1	1 / 5,3	40	341	0,0062
scan 2	1 / 5,3	50	206	0,0076

IV.2.4 Synthèse des résultats

IV.2.4.1 Mesure LiDAR terrestre

Nous avons estimé le bruit de la mesure LiDAR terrestre en utilisant des tôles avec des formes géométriques connues (triangulaires et demi-cercle) sensées à représenter des linéaires proches des griffures d'érosion, en couleurs noir et blanc. Les résultats montrent une dispersion de la mesure (écart type du scan) plus importante pour la tôle noire par rapport à la tôle blanche (0,01 et 0,006 m, respectivement), pour une distance de mesure de 30 mètres.

Nous avons testé plusieurs méthodes pour réduire le bruit de la mesure et améliorer la restitution des formes sur les tôles (moyenne glissante directement sur des points scannés, moyenne glissante sur des points préalablement moyennés à un pas régulière fin de 0,25 cm, sur moyenne simple à un pas régulière de 1 cm). Les résultats montrent que l'application d'une moyenne simple à un pas régulier de 1 cm est la plus effective dans la réduction du bruit et elle permet aussi de recréer les formes de plus de 3 cm. Toutefois, pour les formes géométriques plus petites, la dispersion des données est tellement importante qu'il n'est pas possible de les détecter.

Le filtrage du bruit par la moyenne simple à un pas régulier d'un centimètre permettra d'établir un jeu de données topographique suffisamment précis pour le suivi de zones de changements fins dans la morphologie de ravine (spatialisation). Ceci signifierait une perte en détail mais un profit dans la cohérence de l'information.

Globalement, la manipulation sur la teneur en eau n'a pas donné de résultat très clair du point de vue évolution de la mesure LiDAR en marne sèche ou humide. Le bruit de la mesure sur un versant marneux (sèche ou humide) a été estimé en 3 cm, à une distance de mesure de 20 m. On peut cependant rajouter que le changement d'humidité s'accompagne d'un changement de couleur, c'est-à-dire un fort assombrissement des marnes.

Les tests effectués avec les tôles montrent que les zones sombres retournent un signal plus fiable (puissance du signal de retour), ce qui diminue le nombre de points résultant. Ceci implique que des versants éloignées et noirs sont difficiles à scanner par suite d'un signal de retour trop faible.

IV.2.4.2 Géoréférencement

Afin d'établir le calage des scans LiDAR sans repères de terrain (par technique de corrélations), des points scannés ont été sélectionnés sur des zones supposées stables (les crêtes du bassin de La Roubine) en éliminant les zones végétalisées. Le résultat sur le mur du cabanon montre un décalage pratiquement éliminé, en tout cas inclus dans le bruit estimé entre 2 ou 3 cm, pour la distance de mesure (autour de 70 m).

Cette méthode offre des bonnes possibilités pour valoriser les scans LiDAR terrestre existants à Draix sans repères de terrain. Toutefois, la qualité générale du recalage dépend de la sélection des zones « supposées » stables, et la stabilité des ravines est l'objet à étudier à partir des nuages de points LiDAR diachroniques. Il semblerait plus cohérent avec les objectifs d'utiliser des repères terrain indépendantes à l'objet à étudier.

Nous avons préposé l'utilisation de sphères comme repères de terrain. Dans le cas d'utilisation des données LiDAR terrestre pour la validation des MNT drone, on a mis en place un système de boules amovibles en polystyrène amovibles sur fers à béton. L'EQM obtenue dans le calage des scans LiDAR en utilisant ces repères amovibles est égal à 3 cm (distance de mesure moyenne 70 m). Ce résultat est cohérent avec la précision atteignable avec le système DGPS (mode RTK) utilisé pour le calcul des coordonnées géographiques du centre de chaque sphère. L'incertitude obtenue par cette méthode permet l'utilisation des données LiDAR terrestre dans la validation des MNT drone mais elle est peut être trop élevée pour le suivi diachronique « intra-saisonnier » de l'ablation.

Les magnitudes du bruit de la mesure plus l'incertitude dans le calage des nuages de points LiDAR doivent être inférieures au taux d'érosion annuel moyen dans le paysage à surveiller, afin que cette information soit valable pour l'étude du changement morphométrique des versants.

Un système de repères permanents (sphères en béton) sert à établir un recalage relatif des nuages LiDAR, en éliminant ainsi la nécessité de calculer les coordonnées de ces repères dans un système de projection général géoréférencé. La précision atteignable avec un calage relatif des différents scans LiDAR terrestre par rapport à un scan de référence (EQM) a été estimée en 5 mm approximativement. En utilisant un filtrage de bruit type moyenne simple (pas régulier de 1 cm), plus le système de calage par repères fixes, l'incertitude globale sera inférieure à un centimètre.

CINQUIÈME PARTIE
DISCUSSION GÉNÉRALE

Notre but de thèse était de tester la possibilité d'obtenir des MNT fins et précis (résolutions et des précisions centimétriques) sur zones de ravines en montagnes, par des techniques non intrusives. Plusieurs solutions paraissent possibles aujourd'hui (stéréophotogrammétrie drone et LiDAR terrestre) grâce à l'amélioration d'un certain nombre de points techniques qui n'étaient pas disponibles il y a quelques années.

V.1 MNT DRONE

Pourquoi peut-on aujourd'hui penser obtenir de tels produits alors que l'on ne pouvait pas il y a peu ? Qu'est-ce qui a changé ? Qu'est-ce qui est nouveau et déterminant dans la nouvelle approche possible ? Qu'est-ce qui nous permet d'obtenir aujourd'hui une telle précision ?

Tout d'abord, nous avons une avancée importante dans la disponibilité des systèmes de positionnement par satellite, ou GPS, avec une meilleure précision pour son utilisation civile. Ceci permet de calculer avec plus de précision les coordonnées des points de contrôle terrestre, indispensable à l'heure d'ajuster le modèle d'aérotriangulation.

Un élément clef est la qualité de l'imagerie numérique disponible aujourd'hui. Ceci a ouvert la porte à l'utilisation des appareils photo « grand public » dans le domaine de la stéréophotogrammétrie. Il est possible de bien repérer une image en utilisant la matrice numérique, et de bien estimer les autres paramètres de l'orientation interne comme le point principal de symétrie, ainsi que modéliser la déformation de lentille.

Un autre point concernant le développement de la technologie informatique, est la capacité de stockage numérique, ce qui facilite la manipulation d'images lourdes ainsi que des calculs mathématiques complexes. Ceci a permis le développement et l'application d'une nouvelle génération de corrélateurs d'images qui peuvent utiliser des stratégies complexes (très pertinentes et très performantes), afin d'améliorer significativement la qualité dans la restitution numérique des MNT.

V.1.1 Sur l'application en ravines marneuses

Les résultats de l'application de la stéréophotogrammétrie sur des images drones dans des zones de montagnes marneuses montrent une amélioration significative par rapport aux résultats précédents (Henry et al., 2002 ; Maatouk, 2004 ; et Raclot et al., 2005), dans des conditions similaires de relief.

Il existe trois éléments clefs dans la chaîne de traitement stéréoscopique qui permettent surmonter les contraintes établies pour cette application, en contrôlant ainsi la qualité finale des MNT drone :

1. préparation de terrain et vol :
 - a. nombre, distribution et précision du positionnement de mires semi permanentes, 10 mires en moyenne par image (un minimum de 5 ou 6 mires opérationnelles) ;
 - b. heure et saison des vols, le contraste entre images est fondamental pour obtenir un bon résultat, à ce propos la marne noire mouillée facilite l'obtention des MNT plus précis, surtout quand on utilise des corrélateurs d'image comme ERDAS LPS ;
2. obtention et calibrage des paramètres d'orientation interne et externe : compensation des erreurs systématiques issues de la géométrie d'acquisition d'images et de l'ajustement du modèle d'aérotriangulation ;
3. stratégie de corrélation d'image et de régularisation du relief : en maximisant la correspondance pixel à pixel entre couples stéréoscopiques (plus de détail), et en diminuant les fausses corrélations (moins d'incertitude).

Une combinaison adéquate de ces trois éléments nous a permis d'obtenir une précision, un détail et une cohérence des MNT drone, à la limite de la donnée (résolution des images drones originales), et de la technologie de géoréférencement utilisées (DGPS).

V.1.2 Evaluation de qualité

V.1.2.1 Calcul de l'altitude

L'évaluation de la précision altimétrique des MNT aussi détaillés et précis a été un défi important, et dans un contexte de relief accidenté, constitue un point fort du développement méthodologique : la définition des critères de spatialisation des points de validation (le long les lignes de rupture du relief), et l'approche de lever terrain (mixte, en utilisant le DGPS et un tachéomètre).

Nous avons utilisé également un scan LiDAR terrestre qui nous a apporté une densité considérable de points terrains assez précis pour cette application. En effet, le LiDAR terrestre a été le seul moyen possible d'obtenir des points terrain par moyens « non invasifs », afin d'évaluer la qualité des MNT drone sur des zones d'accès difficile où interdit, en raison de la possibilité d'altérer le mesure d'érosion (ex. le bassin de la Roubine).

Les données « vérité terrain » par LiDAR terrestre ont permis de détecter les irrégularités des MNT drone, et elles constituent un excellent complément aux données DGPS-Tachéométrie dans la validation de MNT très détaillés. Ceci conduit à un très grand nombre de points de validation (ex. plus de 100 000 points sur une surface de 2 400 m²).

Toutes ces données de validation ont rendu possible la caractérisation de l'erreur, pas seulement à partir des statistiques générales, mais aussi à partir d'une analyse spatialisée de l'incertitude. Les données de validation nous ont permis de préciser où la méthode devient particulière et jusqu'où les incertitudes citées sont surmontables.

Dans le tableau V.1, nous avons une synthèse des évaluations de qualité altimétrique des MNT drone (missions 2005 et 2007). La comparaison établie par les valeurs de précision (écart type de l'erreur, tableau V.1) entre les MNT drone ERDAS-LPS 2005 et MicMac 2007, nous montre l'impact du calibrage des paramètres d'orientation interne et externe, ainsi que la stratégie de corrélation d'images sur la qualité finale atteignable.

Tableau V.1 - Synthèse des évaluations de qualité altimétrique des MNT drone.

	mission 2005		mission 2007	
	Moulin	Moulin	Roubine	Roubine
bassin	Moulin	Moulin	Roubine	Roubine
résolution d'images (m)	0,05	0,05	0,03	0,03
contraste du couple stéréoscopique	bon	bon	faible	faible
calibrage des paramètres OI-OE	non	oui	oui	oui
algorithmes de corrélation	ERDAS-LPS	ERDAS-LPS	ERDAS-LPS	MicMac
résolution du MNT (m)	0,15	0,15	0,05	0,03
étendue du MNT (m²)	~5 000	~5 000	~1 400	~1 400
donnés de validation	DGPS Tachéomètre	DGPS Tachéomètre	MNT LiDAR terrestre	MNT LiDAR terrestre
nombre de points de validation	388	388	183 555	183 555
Type de validation du MNT	validation ponctuelle	validation ponctuelle	validation sur une surface de ~450 m ²	validation sur une surface de ~450 m ²
précision du MNT écart type de l'erreur (m)	0,76	0,20	0,39	0,05
précision/résolution	15,2	4	13	1,6

OI : Orientation Interne ; OE : Orientation Externe ; ET : écart type de l'erreur

Le calibrage des paramètres d'orientations interne et externe est un point clef dans l'amélioration de la qualité finale des MNT drone dans nos conditions de prise de vue. La correction de déformation de lentille est apparue comme un élément majeur de l'amélioration des résultats, ce qui traduit la nécessité d'effectuer cette manipulation avant tout travail de qualité. Différents auteurs (Lascelles et al., 2002 ; Chandler et al., 2005 ; Rieke-Zapp & Nearing, 2005) ont déjà remarqué ces observations, en utilisant la stéréophotogrammétrie à courte distance sur modèles réduits de bassins versants.

Toutefois, des erreurs systématiques résiduelles sont toujours présentes dues probablement à plusieurs effets combinées, comme l'instabilité de vol et la disposition non régulière des mires dans les images, ainsi que des déformations de lentille non parfaitement corrigées. L'approche par auto calibrage (Ebner, 1976) compense en partie ces erreurs systématiques.

Pour le MNT drone sans calibrage de paramètres OI-OE, développé avec le corrélateur ERDAS-LPS, l'écart type de l'erreur représente 15 fois la taille du pixel original des images drone (tableau V.1). Le rapport précision/résolution diminue de 15 à 4 avec le calibrage de paramètres OI-OE.

Néanmoins, le saut en qualité le plus important dans l'approche méthodologique utilisée pour la stéréophotogrammétrie drone est atteint en adoptant une stratégie adéquate de corrélation d'images. Le rapport précision/résolution diminue à moins de 2 en utilisant MicMac (tableau V.1). La comparaison établie entre algorithmes de corrélation nous a permis de quantifier l'impact de ce choix dans la performance de la restitution du relief.

L'algorithme de corrélation d'images disponible sur ERDAS Imagine LPS ne dispose pas de mécanismes pour contrôler les fausses corrélations entre pixels d'un couple stéréoscopique, résultant en nombreuses irrégularités dans la surface du MNT (pics et fossés). Le développement de routines plus performantes destinées à augmenter la densité de points effectivement corrélés en modifiant le critère de sélection des points, représente certainement une avancée dans ce domaine.

D'autre part, la performance des algorithmes de corrélation d'images directes comme ERDAS-LPS sont plus sensibles au faible contraste entre stéréo couples. Ceci peut être observé dans le tableau V.1 (caisses grisées) on comparant le rapport précision/résolution des MNT drone Moulin 2005 et Roubine 2007, développés en utilisant la même chaîne de traitement stéréophotogramétrique et le même corrélateur d'image (ERDAS LPS). Les images drone 2007 ont un faible contraste qui a été déterminant dans la diminution de la qualité du MNT 2007 par rapport au MNT 2005 (précision/résolution 13 et 4, respectivement), même si la résolution des images drone 2007 est plus détaillée.

Les manipulations établies pour l'obtention et le calibrage des paramètres d'orientation interne et externe sont à la portée des utilisateurs non spécialisés. Toutefois, le paramétrage et ajustement d'un corrélateur d'images aussi complexe que MicMac est une manipulation assez compliquée pour les utilisateurs non spécialisés.

Malgré le type de relief très tourmenté à Draix, les ravines marneuses ont une caractéristique intéressante pour le développement des MNT drone : l'absence de couverture végétale. Ceci élimine l'interférence de la végétation et nous offre un type de surface comme le sol nu ou le régolithe. Ce sont des conditions très favorables pour la restitution 3D du relief par stéréophotogrammétrie.

Deux sources d'incertitudes dans la restitution du relief par stéréophotogrammétrie drone (sans sacrifier la souplesse d'utilisation), sont toujours soumises à amélioration. D'une part nous avons la qualité de la géométrie d'acquisition d'images, à la fois contrôlée par l'instabilité de vol du vecteur aérien drone et les déformations de lentille des appareils photo « grand public ». L'utilisation d'un drone avec un meilleur contrôle du vol, ainsi qu'une meilleure modélisation de déformation de lentille pourraient diminuer les erreurs systématiques.

D'autre part, nous avons le géoréférencement des mires (calcul des coordonnées) par le système GPS Différentiel. Nous avons choisi la méthode RTK (real time kinematic) étant donné qu'elle permet d'effectuer beaucoup plus de mesures que la méthode statique dans le même temps (Mora et al., 2003) avec un récepteur complètement mobile. Un autre point important de cette méthode est la possibilité d'établir un contrôle de qualité du levé terrain en temps réel, or il n'y a pas besoin de post-traitement de données.

Toutefois, la méthode statique de lever différentiel a une incertitude potentiellement égale ou inférieure au centimètre, à condition de disposer de toutes les fichiers de navigation des satellites utilisés pendant la mesure. Ceci pourrait diminuer l'incertitude dans le calcul des MNT drone en améliorant la qualité de positionnement des points d'amer.

V.1.2.2 Calcul du réseau de thalwegs

Par rapport à l'évaluation « hydrographique » des MNT drone, l'établissement d'une méthodologie qui soit à la fois objective et quantitative requiert la définition de critères réutilisables sur d'autres sites. La méthode développée ici nous a permis d'évaluer la précision dans le calcul du réseau de thalwegs par analyse numérique de l'accumulation du flux superficiel (algorithme D8). Le MNT drone MicMac a montré une représentation plus juste du réseau de thalwegs permanents, évaluée ici comme la proximité planimétrique au réseau de référence.

Pourtant, quelques questions lors de son application méritent toujours discussion :

1. L'obtention d'une référence hydrographique par un observateur sur le terrain ou par interprétation visuelle sur photo est elle fiable, exhaustive ?

La méthodologie hybride (d'observation directe du réseau hydrographique plus traçage sur le terrain) établie ici a été satisfaisante pour les thalwegs de type permanents et interconnectés. Néanmoins, pour certains thalwegs permanents secondaires (largeur du fond de thalweg ≤ 5 cm), ainsi que pour les thalwegs saisonniers, il faudrait développer des méthodes plus adaptées. Même l'observation directe sur le terrain de ce type de thalwegs ne garantit pas un traçage correct du microrelief caractéristique des versants marneux.

A ce propos, l'interprétation des orthoimages drone peut constituer une alternative intéressante afin d'obtenir une cartographie des états de surface, qui dépendent en partie de la rugosité du microrelief. La spatialisation de la dynamique des états de surface du sol (rugosité du microrelief) qui contrôlent l'infiltration et le ruissellement (Malet et al., 2003), permettrait une meilleure description de l'écoulement sur les versants.

2. Quel est l'impact du paramétrage de l'algorithme D8 pour l'obtention du réseau hydrographique (seuil d'accumulation, longueur de drains) ?

Dans cette recherche, nous avons décidé de limiter l'évaluation de la qualité hydrographique des MNT au réseau de thalwegs qui a été effectivement identifié sur le terrain. Le traitement numérique des dérivés des MNT par l'algorithme D8 a été fait avec un seuil de surface d'accumulation très petit (4m^2). Ceci a produit des réseaux hydrographiques très riches en thalwegs, plus riches que le réseau référence. D'une part, il est probable que certains drains détectés par l'algorithme et non vus sur le terrain soient réels. D'autre part, dans notre solution, les réseaux issus de D8 ont ensuite été filtrés pour ne garder que les drains présents dans le réseau de référence : l'impact du seuil d'accumulation est donc quasiment nul.

3. Comment comparer des MNT de résolutions différentes, même s'ils ont été obtenus à partir d'une même source (ici un couple stéréoscopique d'images) ?

Dans le cas des MNT de résolutions différentes, il n'y a pas de comparaison directe objective possible. En effet un changement de résolution induit un changement de précision. Des solutions partielles à cette comparaison peuvent être trouvées en se basant sur des analyses par dégradation de résolutions pour obtenir des produits comparables. Si l'on ramène les 2 MNT à des résolutions plus grossières, on peut obtenir une idée hiérarchique de leur qualité en fonction de la résolution (sachant que le choix de la méthode de dégradation peut influencer sur les résultats). Mais cette comparaison ne peut porter sur la qualité du MNT le plus fin.

V.2 MNT LIDAR TERRESTRE

Le LiDAR terrestre constitue une source de données terrain précises, avec une facilité de mise en œuvre, malgré des gros problèmes de bruit pour la donnée initiale (précision de quelques centimètres) et de géoréférencement. Ces contraintes nécessitent des post-traitements comme un filtrage du bruit, et un protocole d'acquisition de données en utilisant des repères terrain. Ce système est en constante amélioration et d'autres LiDAR terrestres plus précis voient le jour.

Le LiDAR est aussi un système de mesure topographique non invasif, idéal pour une application comme le suivi diachronique de changements fins dans la morphométrie des versants marneux. Les critères d'utilisation du scan LiDAR terrestre dans ce contexte sont à discuter : densité du scan, type de filtrage, précision et résolution atteignable, méthode de géoréférencement, accès aux différentes zones, etc.

V.2.1 Analyse du bruit de la mesure

Pour l'analyse du bruit de la mesure LiDAR, nous avons utilisé des tôles noir et blanc avec des formes géométriques connues (triangulaires et demi-cercle) sensées à représenter des linéaires proches des griffures d'érosion. Les résultats montrent une dispersion de la mesure (écart type du scan) plus importante pour la tôle noire (autour d'un centimètre) par rapport à six millimètres pour la tôle blanche, pour une distance de mesure de 30 mètres.

Cette solution permettra d'établir un jeu de données topographique suffisamment précis pour le suivi de zones de changements fins dans la morphologie de ravine (spatialisation). Ceci signifierait une perte en détail mais un profit dans la cohérence de l'information.

Des méthodes ont été testées pour réduire le bruit de la mesure et améliorer la restitution des formes sur les tôles. Les résultats montrent que l'application d'une moyenne simple à un pas régulier de 1 cm est la plus effective dans la réduction du bruit et elle permet aussi de recréer les formes de plus de 3 cm. Toutefois, pour les formes géométriques plus petites, la dispersion des données est tellement importante qu'il n'est pas possible de les détecter.

Même si ces tests nous ont fourni des informations précieuses par rapport à la résolution et précision réelles (après filtrage du bruit) de l'appareillage LiDAR, ils ont été menés sur des matériaux avec une réponse différente de celle attendue des marnes noires.

Des manipulations pour évaluer l'effet de la teneur en eau des versants marneux (marne sèche ou humide) sur le retour du signal LiDAR n'ont pas donné des résultats très clairs. Toutefois, le bruit mesuré sur le versant marneux évalué est plus important que sur les tôles, à une distance de mesure inférieure : ET de 3 cm à 20 m de distance pour le versant marneux, et ET de 1 cm à 30 m de distance pour les tôles.

On peut cependant rajouter que le changement d'humidité s'accompagne d'un changement de couleur, c'est-à-dire un fort assombrissement des marnes. Les tests effectués avec les tôles montrent que les zones sombres retournent un signal plus faible (puissance du signal

de retour), ce qui diminue le nombre de points résultant. Ceci implique que des versants éloignés et noirs sont difficiles à scanner par suite d'un signal de retour trop faible.

V.2.2 Géoréférencement

Nous avons testé deux solutions au problème de géoréférencement des scans LiDAR terrestre, recalage sans repère et recalage avec repère de terrain.

Le calage sans repères de terrain a été établi par technique de corrélations, en sélectionnant des points scannés sur des zones supposées stables. A ce propos nous avons utilisé les points LiDAR localisés sur les crêtes du bassin de La Roubine, en éliminant les zones végétalisées. Même si le décalage des scans LiDAR obtenu par cette méthode est inclus dans le bruit de la mesure, la qualité générale du recalage dépend de la sélection des zones « supposées » stables. La stabilité des ravines est justement l'objet à étudier à partir de la comparaison des nuages de points LiDAR diachroniques.

Dans des pentes marneuses soumises à des processus intensifs d'altération physico-chimique superficielle et d'ablation, trouver des zones stables n'est pas une tâche simple. Il semblerait plus cohérente avec les objectifs établis d'utiliser des repères terrain indépendants de l'objet à étudier.

Malgré ces observations, la méthode de recalage sans repère de terrain offre des bonnes possibilités pour valoriser des scans LiDAR terrestre existants à Draix, qui ont été acquis sans repères de terrain.

Nous avons proposé l'utilisation de sphères comme repères de terrain. Dans le cas d'utilisation des données LiDAR terrestre pour la validation des MNT drone, on a mis en place un système de boules en polystyrène amovibles sur fers à béton. L'EQM obtenue dans le calage des scans LiDAR en utilisant ces repères amovibles a été calculé à 3 cm (distance de mesure moyenne 70 m). Ce résultat est cohérent avec la précision atteignable avec le système DGPS (mode RTK) utilisé pour le calcul des coordonnées géographiques du centre de chaque sphère.

L'incertitude obtenue par cette méthode permet l'utilisation des données LiDAR terrestre dans la validation des MNT drone mais il est peut être trop élevé pour le suivi diachronique « intra-saisonnier » de l'ablation. Pourtant, l'incertitude de recalage en utilisant des repères amovibles est soumise à amélioration aussi, si on utilise une méthode de calcul des coordonnées GPS différentiel plus précise comme la méthode statique, ou bien par tachéométrie.

Les magnitudes du bruit de la mesure plus l'incertitude dans le calage des nuages de points LiDAR doivent être inférieurs aux taux d'érosion annuel moyen dans le paysage à surveiller, afin que cette information soit valable pour l'étude du changement morphométrique des versants.

Un système de repères permanents (sphères en béton) sert à établir un recalage relatif des nuages LiDAR, en éliminant ainsi la nécessité de calculer ces coordonnées dans un système de projection général géoréférencé. La précision atteignable avec un calage relatif des différents scans LiDAR terrestre par rapport à un scan de référence (EQM) a été estimée en 0,5 cm approximativement. En utilisant un filtrage de bruit type moyenne simple (pas régulier de 1 cm), plus le système de calage par repères fixes, l'incertitude globale sera inférieure au centimètre.

V.2.3 Suivi diachronique

Un élément important à discuter ici concerne l'évaluation « hydrographique » du MNT LiDAR terrestre 2007, réalisée sur la ravine au bassin du Moulin. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance majeure de la perspective choisie pour le scan LiDAR afin de diminuer l'effet de zones cachées sur l'obtention d'un signal de retour.

Le MNT LiDAR terrestre 2007 a été très performant dans la restitution du thalweg principal avec une proximité planimétrique par rapport à la référence terrain de presque 100% (tolérance de 20 cm de large évaluée par buffer).

Toutefois, la possibilité de reconstituer le réseau de tributaires présent dans les versants à chaque côté du thalweg principal a été très affectée par les zones cachées depuis le point de perspective utilisé pour le scan LiDAR.

Dans la figure V.1 nous pouvons observer la perspective utilisée pour scanner la ravine du Moulin, en face du thalweg principal. Afin de constituer une représentation complète des thalwegs de la ravine avec un niveau de détail équivalent, il est impératif de compléter l'information topographique en réalisant des scans additionnels sur chaque versant de la ravine.

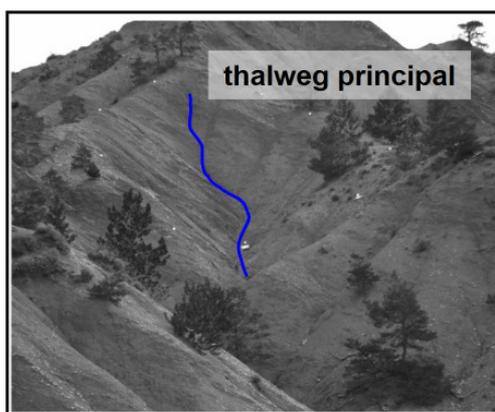


Figure V.1 - Thalweg principal de la ravine étudiée au bassin du Moulin.

Le besoin de réaliser des scans multiples représente une contrainte à l'utilisation du LiDAR terrestre dans tout le paysage de ravines profondes, étant donné les problèmes d'accessibilité à un relief aussi accidenté, de la transportabilité de l'appareillage, et du temps total des scans. Néanmoins, il est possible d'établir une stratégie de surveillance diachronique de l'érosion par LiDAR terrestre sur certaines ravines où les conditions de visibilité et d'accessibilité sont adéquates.

Pour faire ceci, il est impératif de stabiliser les modes de mesure LiDAR terrestre pour l'observation de changements fins en versants marneux. Ceci implique l'utilisation de différents points de vue et de repères stables et fixes, d'un protocole standard pour le paramétrage du LiDAR, comme le type de pulse et la densité des scans.

D'autres activités sont importantes aussi, comme la réalisation d'un scan plus dense (ou zoom) sur les repères pour chaque scan LiDAR général à accomplir ; et le nettoyage de la végétation autour des boules avant les scans, afin d'améliorer la possibilité de repérer les points LiDAR correspondants aux repères de terrain.

Un autre aspect à considérer est le format de stockage des données LiDAR terrestre, après filtrage à un pas régulier. Classiquement, ces données sont transformées en MNT raster (ex. pour la validation des MNT drone). Toutefois, pour certaines applications telles que l'analyse de changements des versants, la solution raster peut ne pas être la meilleure. En effet, le MNT raster est une projection horizontale alors que le changement des versants se manifeste dans les trois dimensions.

Quand on est en forte pente, il est préférable de rester en nuage de points pour une analyse de l'évolution de la surface, celle-ci étant considérée comme une nappe variable. La mesure d'ablation par différence entre 2 nappes doit être effectuée selon la normale à la nappe et non pas selon la verticale (différence directe d'altitude sur 2 MNT).

V.3 DRONE-STEREO OU LIDAR TERRESTRE ?

Nous avons synthétisé les caractéristiques les plus importantes des MNT drone et LiDAR terrestre obtenus dans cette recherche, afin d'établir une comparaison entre ces deux sources d'information topographique par rapport aux possibles applications dans l'étude de l'érosion en montagnes marneuses (tableau V.2). Aujourd'hui, la précision et la résolution atteignable dans la représentation 3D du relief avec une mission stéréoscopique drone et avec un LiDAR terrestre sont proches : une précision meilleure pour le LiDAR mais avec des difficultés pour la continuité et l'étendue du domaine analysé.

Tableau V.2 - Comparaison MNT drone et MNT LiDAR terrestre.

	approche aérienne MNT drone	approche terrestre MNT LiDAR
résolution	3 à 5 cm	1 cm *
précision	5 à 10 cm	~1 cm (bruit sur tôle)**
		~3 cm (bruit sur marne)**
		~0,5 cm (recalage)
étendue	importante et continue	restreinte
éléments contraignants	végétation	les zones cachées (par la végétation et le relief) transportabilité de l'appareillage

* après filtrage de bruit

** avant l'application d'un filtrage de bruit

En ce qui concerne les MNT drone, la résolution finale sera conditionnée par l'appareil photo numérique « grand public » à utiliser, ainsi que par la hauteur de vol : avec un drone à 60 m d'altitude de vol approximativement, les images auront une résolution au sol autour de 3 cm (avec les conditions de vol et les matérielles utilisées dans cette recherche).

Pour un scan LiDAR, même si la densité de points terrain qui peuvent être obtenus est beaucoup plus importante, le bruit de la mesure nous oblige à généraliser l'information. La résolution finale du nuage de points LiDAR sera fonction de la densité initiale du scan et du type de filtrage à utiliser. Dans les conditions de lever terrain à Draix et avec l'appareillage LiDAR utilisé, il est recommandable d'appliquer un filtre type moyen simple à un pas régulier de 1 cm, d'après les résultats obtenus.

Les valeurs de précision pour les MNT obtenus avec l'approche aérienne, on utilisant la chaîne de traitement stéréophotogrammétrique la plus performante (calibrage des paramètres OI-OE plus corrélateur d'images MicMac), sont proches du double de la résolution initiale des images drone utilisées. Plus exactement, pour une résolution autour de 3 cm nous avons obtenu une précision de 5 cm.

Dans le cas d'un lever LiDAR terrestre, la précision sera contrôlée par le bruit de la mesure. L'application d'un filtre de bruit permettra d'améliorer significativement la précision mais au prix d'une perte en résolution. Le recalage des nuages de points dans un

système de projection commun risque aussi d'introduire de l'incertitude aux données LiDAR, cette incertitude a été estimée en 0,5 cm en utilisant de repères fixes.

L'étendue et la continuité atteignable dans le développement des MNT à partir d'imagerie drone est beaucoup plus importante de celle que nous pourrions obtenir même à partir de plusieurs scanners terrestres, surtout dans des conditions de relief de ravines profondes. L'élément contraignant pour l'application de l'approche aérienne est la végétation, tandis que pour l'approche terrestre sont les zones cachées par la végétation et le relief, ainsi que la transportabilité de l'appareillage.

Dans la figure V.2 nous avons repris l'évaluation de qualité du MNT drone MicMac 2007, à partir d'un MNT LiDAR terrestre 2007. Ceci afin de montrer visuellement les différents éléments analysés dans le tableau V.2. Nous pouvons apprécier que l'écart sur Z entre ces deux couches est faible et uniformément spatialisé, ce qui nous indique la similarité entre eux, même avec le niveau de détail et la précision obtenus.

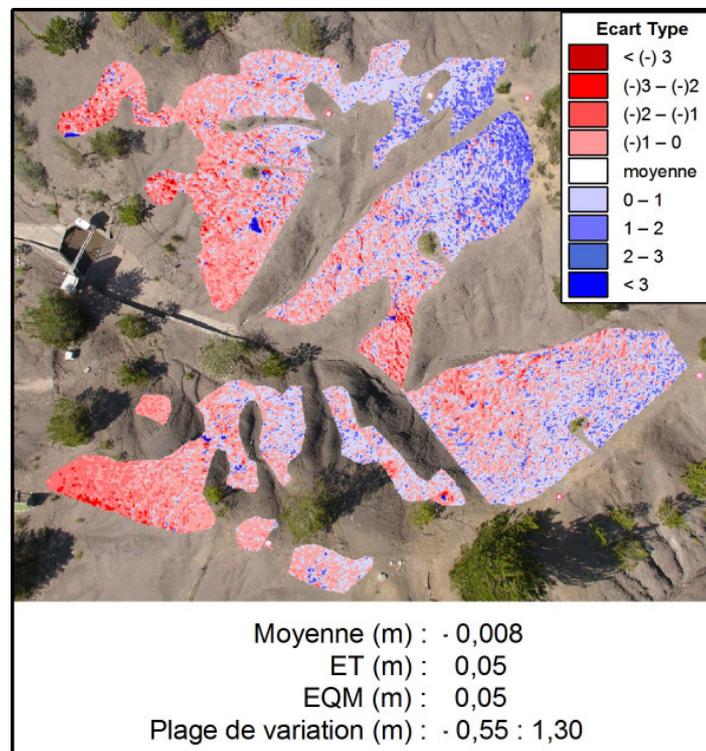


Figure V.2 - MDT drone MicMac Mai 2007 « moins » MDT LiDAR terrestre, (La Roubine, Mai 2007).

La différence la plus évidente sur la figure V.2 est l'étendue et la continuité des MNT atteignables par les deux approches ici analysées, même si le MNT drone MicMac représenté par l'orthoimage de la Roubine a été développé avec un seul couple stéréoscopique.

D'autres éléments à considérer ici concernent la facilité, la rapidité et le coût des missions drone ou LiDAR terrestre. Par rapport à la réalisation des missions drone afin d'obtenir les images stéréoscopiques, il existe deux possibilités :

- s'appuyer sur des entreprises privées spécialisées (ex. « l'avion jaune ») ;
- acheter un système drone, équipé et adapté pour ce type de mission.

Pour les essais initiaux d'application de la stéréophotogrammétrie drone à Draix (utilisées dans cette recherche), le GIS Draix a engagé la société « l'avion jaune ». Toutefois, si on compte établir une surveillance diachronique de l'érosion, il serait recommandable avoir sur place un système prêt pour son utilisation en fonction d'un calendrier d'événements importantes pour la compréhension des processus d'érosion en montagne. Ceci requiert un investissement initial important et un personnel préparé pour le pilotage du drone.

L'alternative actuelle à l'utilisation des vecteurs légers comme le drone pour la représentation 3D fine et précise des ravines, est le LiDAR aéroporté. Cette technique pourrait dans un futur proche nous permettre des résultats similaires, au niveau de résolution et de précision, à condition d'améliorer les algorithmes de post traitement de retour d'onde en ce qui concerne le filtrage de bruit.

Toutefois, pour l'acquisition de données LiDAR aéroporté il est toujours nécessaire d'utiliser un vecteur aérien piloté comme un avion ou un hélicoptère adapté à ce type de missions. Or, on ne parle pas du même coût, de la même facilité, répétitivité, et fréquence d'acquisition de données que les missions aériennes avec un vecteur léger télécommandé comme le drone.

D'autre part, avec le vecteur léger nous avons aussi la possibilité d'obtenir un jeu d'images optiques aériennes d'une très haute résolution spatiale utilisables dans l'analyse de l'évolution des états de surface.

Tel que nous avons mentionné auparavant, le choix de base clef d'une mission aérienne est la résolution cherchée, étant donné qu'il conditionne la hauteur de vol, et par conséquent la mise en place des mires (nombre et distribution). Ceci est un des points le plus délicats à gérer dans cette approche, étant donné que le vecteur léger drone est instable et que le relief accidenté de la zone d'étude ne facilite pas le contrôle du vol.

Dans le cas d'une application au niveau des zones de ravinement du bassin du Moulin (8 ha), ou de bassins encore plus grands, la distribution et l'installation de mires seront déterminant dans le résultat final. Cette phase de terrain demanderait un grand effort de préparation initial quoique l'établissement d'un réseau de mires semi permanentes permettrait d'alléger les coûts pour des missions drone ultérieures.

Planifier et mettre en œuvre une mission LiDAR terrestre sur une ravine donnée (déjà équipée avec des repères fixes), est plus facile et moins coûteuse qu'une mission drone, or la fréquence d'acquisition des données terrain sera plus importante avec le LiDAR. Ces éléments, plus la précision et résolution atteignables par le système, rend la technologie LiDAR terrestre plus adéquate pour son utilisation dans le suivi diachronique des changements morphométriques des versants marneux, à un pas de temps plus court. Ceci bien à condition de choisir des ravines où les règlements de la visibilité et de l'accessibilité seront appropriés (ex. La Roubine).

Le LiDAR terrestre peut être loué de façon journalière à un prix moins important par rapport au coût d'une mission drone (à réaliser *via* service privé). Toutefois, acheter un LiDAR terrestre est nettement plus cher qu'acquérir un système drone adapté pour son utilisation dans la stéréophotogrammétrie aérienne.

Le rapport « avantages-contraintes » entre les deux approches ici analysées est nivelé par les aspects « étendue-continuité » et « résolution-précision » des MNT résultants. Ces deux approches peuvent être considérées comme complémentaires à l'heure d'étudier les manifestations superficielles de l'érosion hydrique en montagnes marneuses, par moyen des données topographiques détaillées et précises. A ce propos, nous allons analyser leurs utilisations potentielles dans l'étude des processus d'érosion hydrique en montagnes marneuses.

V.3.1 Applications

Trois types de choix de base des données topographiques vont conditionner le type d'approche à utiliser pour de nouvelles applications afin d'étudier les manifestations superficielles de l'érosion hydrique :

1. la résolution ;
2. l'étendue et la continuité ;
3. le pas de temps entre observations.

Toutefois, ces trois choix sont d'une certaine façon bloquée étant donné que les échelles spatiale et temporelle de processus d'érosion sont aussi liées. Les différentes manifestations superficielles de l'érosion en montagne possèdent un lien spatio-temporelle d'autant quelles correspondent à une évolution naturelle du processus d'érosion hydrique sur le terrain.

Par exemple, si on veut observer des érosions fines comme les griffures, la fréquence d'acquisition des données doit être forte. D'autres types d'érosion hydrique comme l'érosion en nappe (particules fines) ou les coulées boueuses, ont une échelle spatio-temporelle différente lors de leur manifestation sur le terrain.

Cet ainsi qu'on pourrait établir deux groupes des choix de base des données topographiques (figure V.3), avec une limite en commun entre eux : la résolution (centimètre-décimètre), l'étendue (un hectare), et le pas de temps entre observations (événementiel-annuel).

La taille des manifestations superficielles des phénomènes d'érosion hydrique à étudier déterminera le choix méthodologique pour le lever de terrain. D'après la résolution, le système LiDAR terrestre sera le plus adéquate pour le suivi de griffures d'érosion étant donné son meilleur potentiel pour l'observation des phénomènes de tailles centimétriques.

	résolution centimétrique étendues limitées (<ha) pas de temps court (évènement)	résolution décimétrique grandes étendues (>ha) pas de temps moyen (annuel)
MNT, pentes	LiDAR ←	Drone →
Réseau hydrographique		Drone →
Griffures d'érosion	LiDAR ←	
Ablations / Glissements	LiDAR ←	Drone →
Dépôts	LiDAR ←	Drone →

Figure V.3 - Utilisation potentielle des MNT Drone et LiDAR terrestre.

La résolution et l'étendue atteignables avec la stéréophotogrammétrie drone sont intéressantes pour son utilisation dans le suivi des dépôts de sédiments tout au long du réseau hydrographique de bassins expérimentaux. Une autre application serait la restitution du chevelu hydrographique afin d'établir des simulations hydrologiques distribuées des bassins versants de recherche et d'expérimentation.

La possibilité d'observer l'évolution de certains phénomènes d'érosion ne dépendra pas seulement des aspects opérationnels de la méthodologie de lever topographique, telles que la rapidité et la répétitivité d'utilisation. D'autres facteurs comme la précision atteignable par chaque approche analysée ainsi que la dynamique elle-même du phénomène d'érosion à étudier, vont établir le pas de temps effectif entre observations de façon que le phénomène puisse être suivi.

Le suivi de l'ablation de versants par scans LiDAR terrestre sera possible si le taux d'érosion ne dépasse pas l'incertitude de calcul de l'altitude. Pour une incertitude autour d'un centimètre, certains versants à Draix pourrons être suivi à un pas de temps événementiel ou intra-annuel.

Toutefois, la stéréophotogrammétrie drone serait plus adéquate pour le suivi des processus d'érosion d'une plus grande ampleur, comme le glissement de terrain, ou bien pour le suivi de l'ablation de versants mais à un pas de temps plus important.

Pour la stéréoscopie drone, la rapidité et la répétitivité sont dépendantes de la disponibilité d'un système drone sur place ainsi que de l'automatisation de la chaîne de traitement stéréophotogrammétrique à utiliser. Dans le cas du LiDAR terrestre, cela dépendra de la mise en œuvre d'un système de repères fixes sur une ravine sélectionnée en fonction des conditions de visibilité et d'accessibilité adéquates.

Il existe un fort intérêt dans la complémentarité entre ces deux approches, est fonction de l'étendue et de l'échelle spatio-temporelle dans lesquelles les différents processus d'érosion se manifestent.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le suivi et la compréhension de la dynamique spatio-temporelle de l'érosion par ravinement en montagnes marneuses ont besoin de méthodes de caractérisation rapide et facilement reproductibles de ces phénomènes et leurs manifestations sur le terrain, ainsi que des facteurs qui la contrôlent. Ceci exige une très grande flexibilité dans l'acquisition des données, c'est-à-dire, une très haute résolution spatio-temporelle (détail, répétitivité), une rapidité dans l'utilisation de la méthode, et un faible coût.

L'absence de données terrain quantitatives assez précises et fiables, à une résolution cohérente à l'échelle à laquelle les attributs morphologiques se manifestent, représente une contrainte importante afin de comprendre l'interaction entre les différents facteurs qui interviennent dans la formation de ravines. Le développement d'une technique de caractérisation des expressions superficielles des phénomènes de ravinement, via des MNT précis, détaillés et cohérents, serait nécessaire afin de prévoir l'évolution de l'érosion par ravinement en montagnes marneuses.

Un point majeur de ce travail concerne la stratégie de validation des MNT fins. Cela touche d'une part la prise de points terrain, nombreux et hiérarchiques, d'autre part des considérations de validation qui dépassent l'évaluation statistique de qualité sur la variable « classique » altitude, par un effort d'analyse sur la distribution spatiale de l'erreur et par l'observation de la qualité de restitution de produits hydrographiques dérivés du MNT, en l'occurrence ici le réseau hydrographique. La partie terrain, forte dans cette thèse, est intéressante pour les validations, calages et compréhension des produits

Globalement les résultats montrent la possibilité d'établir des représentations 3D du relief à une échelle centimétrique, aussi bien par moyen de la stéréoscopie aérienne (appareil photo numérique, DGPS, informatique, algorithmes de corrélation d'images) qu'à partir de l'utilisation d'un LiDAR terrestre. La résolution spatio-temporelle a été améliorée significativement, ce qui peut ouvrir des champs nouveaux pour la recherche.

MNT DRONE

La solution testée est basée sur l'utilisation d'un vecteur aérien léger (drone). Comme contraintes initiales que l'on s'impose, nous avons l'utilisation des appareils photos « grand public » et des méthodes de traitement informatique existant pour la restitution numérique du relief afin d'obtenir un bilan « résolution-précision-fréquence » des données et une souplesse d'utilisation de la méthode adéquate au besoin.

Toutefois, cette souplesse d'utilisation combinée à un relief fortement accidenté, entraîne des conditions défavorables pour l'application de la stéréophotogrammétrie (images très différentes par hauteur et angle de prise de vue, non verticalité, fort dénivelé, ombres portées).

L'état des techniques dans la restitution du relief par stéréophotogrammétrie nous permet d'automatiser la chaîne de traitement informatique jusqu'à l'obtention du produit final : le MNT en format raster.

La correction de déformation de lentille est apparue comme un élément majeur de l'amélioration des résultats. L'application de la méthode IGN (Poivilliers E) pour le calcul des paramètres d'orientation interne -dont ceux de déformation de lentille- a été traduite par une amélioration très significative dans la précision du MNT, en passant d'une EQM totale de 1,09 à 0,31 mètre.

L'approche par auto calibrage (Ebner, 1976) compense en partie les erreurs systématiques résiduelles. La moyenne finale de l'erreur est de 8 cm, proche de la taille du pixel de l'image drone (6 cm). L'EQM totale obtenue est alors de 22 cm, soit trois fois et demi la taille de pixel initial de l'image.

Par rapport à la corrélation d'image, la densité et l'homogénéité des pixels effectivement corrélés contrôlent la résolution d'un MNT, tandis que la minimisation de fausses corrélations a une influence déterminante sur la précision. La stratégie de corrélation d'images par l'approche multi-résolution (MicMac) permet d'exploiter tout le potentiel d'un stéréo couple, même sur des photos à faible contraste.

Le corrélateur MicMac réduit fortement le problème des fausses corrélations grâce à ses stratégies de multi résolution et de régularisation du relief pendant la corrélation d'image (dispersion de l'erreur 5 cm). Ceci améliore la qualité et la cohérence du MNT drone. Le corrélateur en une dimension (ERDAS-LPS) utilise une fonction de corrélation qui traduit la ressemblance radiométrique entre fenêtres, ce qui le rend plus sensible à la qualité du contraste entre photos.

En ce qui concerne la qualité hydrographique des MNT drone, les résultats montrent que le MNT drone MicMac a une meilleure qualité dans la restitution du réseau de thalwegs permanents à partir de l'analyse numérique du flux superficiel. La proximité planimétrique obtenue pour le thalweg principal est nettement meilleure que celle de la totalité du réseau, pour le MNT drone MicMac. En effet, le pourcentage de proximité se dégrade fortement et de façon progressive, quand on analyse les réseaux de tributaires.

La largeur du fond du thalweg principal (près de la tête de la ravine) mesure 10 cm, ce qui correspond approximativement à 2 fois la taille du pixel des photos aériennes drone utilisées. Les largeurs correspondantes du fond des thalwegs tributaires de la ravine observée sont au maximum d'une taille équivalente au pixel des images. Ceci limite la possibilité d'observer ces types de manifestations de l'érosion sur les photos aériennes drone analysées.

Les résultats révèlent le potentiel du vecteur drone pour le développement des MNT peu coûteux, avec une très haute résolution spatiale et une cohérence hydrographique, malgré de nombreuses contraintes.

LIDAR TERRESTRE

Le LiDAR terrestre a d'abord aidé à la validation fine et spatialisée du MNT drone. Dans ce cadre la qualité obtenue par les MNT drone sur les ravines étudiées, après application de toutes les corrections possibles, s'est révélée très proche de la qualité obtenue par les techniques LiDAR. Ceci a permis de consolider les résultats de l'un par l'autre au delà de la simple comparaison. D'autre part, le LiDAR terrestre a un potentiel intéressant pour son utilisation comme source nouvelle de données 3D fines pour le suivi diachronique de la morphométrie des versants.

Nous avons estimé le bruit de la mesure LiDAR sur tôles avec des formes géométriques connues sensées à représenter des linéaires proches des griffures d'érosion. Les résultats montrent une dispersion de la mesure (écart type du scan) plus importante pour la tôle noire par rapport à la tôle blanche (0,01 et 0,006 m, respectivement), pour une distance de mesure de 30 mètres.

L'application d'une moyenne simple à un pas régulier d'un centimètre a été effective à l'heure de réduire le bruit de la mesure et améliorer la restitution des formes sur les tôles. Cette méthode permet aussi de recréer les formes de plus de 3 cm de taille. Toutefois, pour les formes géométriques plus petites la dispersion des données est tellement importante qu'il n'est pas possible de les détecter.

Le filtrage du bruit par la moyenne simple à un pas régulier d'un centimètre permettra d'établir un jeu de données topographique suffisamment précis pour le suivi de zones de changements fins dans la morphologie de ravine (spatialisation). Ceci signifierait une perte en détail mais un profit dans la cohérence de l'information.

La manipulation sur la teneur en eau n'a pas donné de résultat très clair du point de vue évolution de la mesure LiDAR en marne sèche ou humide. Le bruit de la mesure sur un versant marneux (sèche ou humide) a été estimé en 3 cm, à une distance de mesure de 20 m. Les tests effectués avec les tôles montrent que les zones sombres retournent un signal plus faible (puissance du signal de retour), ce qui diminue le nombre de points résultant. Ceci implique que des versants éloignées et noirs sont difficiles à scanner par suite d'un signal de retour trop faible.

Le calage des nuages de points LiDAR par technique de corrélations offre des bonnes possibilités pour valoriser les scans existants à Draix acquis sans repères de terrain. Toutefois, la qualité générale du recalage dépend de la sélection des zones « supposées » stables, et la stabilité des ravines est l'objet à étudier à partir des nuages de points LiDAR diachroniques. Il semblerait plus cohérent avec les objectifs d'utiliser des repères terrain indépendantes à l'objet à étudier.

Nous avons utilisé de sphères comme repères de terrain. Dans le cas d'utilisation des données LiDAR terrestre pour la validation des MNT drone, on a mis en place un système de boules amovibles en polystyrène sur fers à béton. L'EQM obtenue dans le calage des scans LiDAR en utilisant ces repères amovibles a été calculé en 3 cm (pour une distance de mesure moyenne de 70 m). Ce résultat est cohérent avec la précision atteignable avec le

système DGPS (mode RTK) utilisé pour le calcul des coordonnées géographiques du centre de chaque sphère. L'incertitude obtenue par cette méthode permet l'utilisation des données LiDAR terrestre dans la validation des MNT drone mais elle est peut être trop élevée pour le suivi diachronique « intra-saisonnier » de l'ablation.

Les magnitudes du bruit de la mesure plus l'incertitude dans le calage des nuages de points LiDAR doivent être inférieures au taux d'érosion annuel moyen dans le paysage à surveiller, afin que cette information soit valable pour l'étude du changement morphométrique des versants.

Un système de repères permanents (sphères en béton) sert à établir un recalage relatif des nuages LiDAR, en éliminant ainsi la nécessité de calculer les coordonnées de ces repères dans un système de projection général géoréférencé. La précision atteignable avec un calage relatif des différents scans LiDAR terrestre par rapport à un scan de référence (EQM) a été estimée en 5 mm approximativement. En utilisant un filtrage de bruit type moyenne simple (pas régulier de 1 cm), plus le système de calage par repères fixes, l'incertitude globale sera autour d'un centimètre.

Globalement, le LiDAR terrestre est un système de lever de terrain permettant une rapidité et répétitivité de mesure, ainsi qu'un niveau de détail intéressant pour le suivi des processus élémentaires d'érosion hydrique et ses manifestations sur le terrain.

PERSPECTIVES

Les améliorations futures de précision, résolution, et de corrélation des nuages de points allègeront significativement le travail de terrain pour des applications concrètes, comme la description quantitative de la structure complexe du relief ou des réseaux hydrographiques ; la modélisation de la morphogénèse ; ou l'analyse de déplacement des matériaux sur les versants et les fonds de thalwegs.

Il existe un développement de différents types de vecteurs drone aujourd'hui : des vecteurs « drone avion » avec une autonomie de vol plus importante ; des vecteurs « drone hélicoptère » pour observer des zones à difficulté d'accès ou à survol dangereux (planètes, volcans, zone toxiques, avalanches, entre autres).

Les corrélateurs d'images qui se développent actuellement vont permettre plus facilement d'utiliser des couples stéréoscopiques pour obtenir un relief fin.

La technologie LiDAR est aussi en amélioration. Les entreprises qui fabriquent ces équipements surveillent les travaux des utilisateurs (scientifiques ou non) afin d'utiliser les évaluations et améliorer leurs équipements. Une meilleur LiDAR terrestre sera disponible pour le suivi diachronique de changements de versants avec des bruits réduits (cf. LEICA) : moins de bruit, détection plus fine d'objets (versants).

D'autre part, il existe aussi la possibilité d'utiliser des logiciels de traitement de données LiDAR plus complets et puissants, comme « Terrascan », logiciel de traitement et d'analyse de nuages de points qui fonctionne sous Microstation. Les améliorations futures

(de précision, résolution, corrélation des nuages de points), devraient permettre de limiter fortement le terrain pour des applications concrètes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adams, M. 2008. MicroDEM 6.03 User's Guide. Terrain Visualization Center, Fort Leonard Wood. pp. 301.
2. Auzet, V., Boiffin, J., Pappy, F., Maucorps, J. & J.F. Ouvry. 1990. An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris basin, France. In: Boardman, J., Foster, I.D.L. & J.A. Dearing (Eds), *Soil erosion on agricultural land*, Wiley, p. 383-400.
3. Auzet, V., Boiffin, J. & B. Ludwig. 1995. Erosion hydrique dans les bassins versants agricoles des régions limoneuses du Nord-Ouest de la France. *Annales de Géographie*, 104(581) : 187-191.
4. Band, L.E. 1986. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*. 22(1): 15-24.
5. Band, L.E. 1993. Extraction of channel networks and topographic parameters from digital elevation data. In Beven, K. & M.J. Kirkby (eds) *Channel Network Hydrology*. Chichester, John Wiley and Sons: 13-42.
6. Batson, R.M., Edwards, K. & E.M. Eliason. 1975. Computer-generated shaded relief images. *J. Res. U.S. Geol. Survey*. 3(4): 401-408.
7. Beven, K.J. & M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*. 24:43-69.
8. Berry, J.K. 2007. *Map Analysis - Understanding Spatial Patterns and Relationships*. University of Denver, GeoTec Media publisher. 236 pp.
9. Bishop, M., Shroder, J. & J. Colby. 2003. Remote sensing and geomorphometry for studying relief production in high mountains. *Geomorphology* (55): 345-361.
10. Blaszcynski, J.S. 1997. Landform characterization with geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 63:183-191.
11. Bolongaro-Crevenna, A., Torres-Rodríguez, V., Sorani, V., Frame, D. & M.A. Ortiz. 2004. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology* (7): 407-422.
12. Brasington, J. & R.M.A. Smart. 2003. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basins evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 231-247.
13. Brice, J.B. 1966. Erosion and deposition in the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska. U.S. Geological Survey Professional Paper 352H: 235– 339.
14. Brochot, S. 1999. Les bassins versants de Draix, expérimentaux ... et représentatifs. In Mathys, N. (Ed.), *Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne*. Cemagref éditions, Anthony, pp. 223-234 (in French, with English Abstr.).

15. Brochot, S. & M. Meurnier. 1995. Erosion de Badlands dans les Alpes du sud. *Compte-rendu de recherches n°3, BVRE de Draix*. Cemagref Editions. 141-174.
16. Bryan R. & A. Yair. 1982. Perspectives on studies of badland geomorphology. In *Badland Geomorphology and Piping*, Bryan R, Yair A (eds). GeoBooks (Geo Abstracts Ltd): Norwich; 1–12.
17. Cantón, Y., Domingo, F., Solé-Benet, A. & J. Puigdefábregas. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*. 252:65-84.
18. Casalí, J., López, J.J. & J.V. Giráldez. 1999. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*. 36: 65-84.
19. Casson, B., Delacourt C. & P. Allemand. 2005. Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface – Application to the La Clapière landslide (France). *Natural Hazards and Earth Sciences*. 5: 425-437.
20. Casson, B., Delacourt C., Baratoux D. & P. Allemand. 2003. Seventeen years of the “La Clapière” landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*. 68: 123-139.
21. Chandler, J.H., Fryer, J.G. & A. Jack. 2005. Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement. *The Photogrammetric Record*. 20(109): 12-26.
22. Charleux-Demargne, J. 2001. Qualité de modèle numérique de terrain pour l’hydrologie. Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. Thèse de doctorat (Université de Marne-La-Vallée / Cemagref – France). 350 pp.
23. Coulmeau, P. 1987. Quelques éléments sur la géomorphologie et les processus érosifs observés dans le bassin du Laval. *Bassins Versants Expérimentaux de Draix, Compte rendu de recherche N°1 en érosion hydraulique torrentielle*. Grenoble, division protection contre les érosions.
24. Daba S., Rieger, W. & P. Strauss. 2003. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. *Catena* 50: 273-291.
25. Delaunay, B. 1934. “Sur la sphère vide”. *Bulletin of the Academy of Science of the USSR* : 793-800.
26. Descroix, L. 1994. L’érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud. Thèse de doctorat de géographie, Université Lyon II.
27. Descroix, L., Olivry, J.-C., 2002. Spatial and temporal factors of erosion by water of black marls in the badlands of the French Southern Alps. *Hydrological Sciences Journal* 47 (2), 227–242.
28. Descroix, L. & N. Mathys. 2003. Processes, spatio-temporal factors and measurements of current erosion in the French Southern Alps: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28:993-1011.
29. Demoulin, J. 2006. Monitoring and mapping landslide displacements: a combined DGPS-stereophotogrammetric approach for detailed short- and long-term rate estimates. *Terra Nova*. 18 (4): 290-298.

30. Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R. & J. McKean. 1993. Analysis of erosion thresholds, channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *J. Geol.* (101): 259-278.
31. Ebner, H., 1976. Self-calibrating block adjustment. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 21 (Part 3).
32. Egels, Y. (1999). Poivilliers E - restituteur numerique. ENSG. Version 5.5-d.
33. El-Sheimy, N., Valeo, C. & A. Habib. 2005. *Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulations and Applications*. Artech House Ed. 257 pp.
34. Etzelmüller, B. 2000. On the quantification of surface changes using grid-based digital elevation models (DEMs). *Transactions in GIS*. 4(2): 129-143.
35. Evans, I.S. 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie Suppl Bd.* 36:95-274.
36. Gallart, F., Latron, J., Llorens, P. & D. Rabadà. 1997. Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: some challenges for hydrological modelling. *Hydrological Processes*. 11:1263-1272.
37. Gallart F., Llorens P., Latron J. & D. Regüés. 2002. Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(3):527–537.
38. Ganas, A., Pavlides, S. & V. Karastathis. 2005. DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates. *Geomorphology* (65): 301-319.
39. Glenn, N., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G.D & S.J. Dorsch. 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*. 73: 131-148.
40. Grissinger, E. 1996a. Rill and gullies erosion. In: Agassi, M. (Ed.), *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*. Marcel Dekker, New York, pp. 153– 167.
41. Grissinger, E. 1996b. Reclamation of gullies and channel erosion. In: Agassi, M. (Ed.), *Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation*. Marcel Dekker, New York, pp. 301– 313.
42. Grün, A. 1978. Experiences with self calibrating bundle adjustment. Paper presented at the American Congress on Surveying and Mapping/American Society of Photogrammetry (ACSM-ASP) Convention, Washington, D.C., February/March 1978.
43. Guth, P.L. 1995. Slope and aspect calculations on gridded digital elevation models: examples from a geomorphometric toolbox for personal computers. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Supplementband* 101: 31-52.
44. Hancock, G. & G. Willgoose. 2001. The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 26: 475-490.
45. Hauge, C. 1977. Soil erosion definitions. *California Geology*. 30:202– 203.

46. Helmlinger, K.R., Kumar, P. & E. Foufoula-Georgiou. 1993. On the use of digital elevation model data for hortonian and fractal analyses of channel networks. *Water Resources Research*. 29(8): 2599-2613.
47. Henry, J-B., Malet, J-P., Maquaire, O. & P. Grussenmeyer. 2002. The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: application to the Super-Sauze Earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*. 27: 1339-1350.
48. Hetrick, W.A., Rich, P.M., Barnes, F.J. & S.B. Weiss. 1993a. GIS-based solar radiation flux models. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*. (Volumen 3, GIS Photogrammetry and Modeling): 43-132.
49. Holmes, K.W., Chadwick, O.A. & P.C. Kyriakidis. 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modelling. *Journal of Hydrology*. 233: 154-176.
50. Horn, B.K.P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*. 69:14-47.
51. Horton, R.E., 1932. Drainage-basin characteristics. *EOS Transactions of AGU*, 13: 350-361.
52. Hudson, N.W. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. Chapter 2: Reconnaissance methods. FAO, Natural Resources Management and Environment Department. <http://www.fao.org/docrep/t0848e/t0848e-07.htm>
53. Imeson, A.C. & F.J. Kwaad. 1980. Gully types and gully prediction. *KNAG Geografisch Tijdschrift XIV* 5:430–441.
54. James, L.A., Watson, D.G. & W.F. Hansen. 2007. Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. *Catena*. 71: 132-144.
55. Jenson, S.K. & J.O. Domingue. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographical information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54:1593-1600.
56. Jones, K.H. 1998. A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. *Computers & Geosciences*. 24(4): 315-323.
57. Keating, T.J., Wolf, P.R. & F.L. Scarpace. 1975. An Improved Method of Digital Image Correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 41 (8): 993.
58. King, C., Maucorps, J., Aumonier, R., Renaux, B. & N. Lenotre. 1989. Détection d'indices d'érosion par SPOT dans les sols limoneux du Nord-Pas de Calais, une étude multi-date. *Bull. SFPT* 114. (1989-2), 10-13.
59. Kienzle, S. 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*. 8(1): 83-11.
60. Kraus, K. et Waldhäusl, P. 1998a. Manuel de Photogrammétrie. Principes et Procédés Fondamentaux. Hermès editor, Paris, 407 pp.

61. Kuhn, N., Yair, A. & M.K. Grubin. 2004. Spatial distribution of surface properties, runoff generation and landscape development in the Zin Valley Badlands, northern Negev, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29:1417-1430.
62. Lane, S.N. 2000. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric Record*. 16:937-961.
63. Lascelles, B., Favis-Mortlock, D., Parsons, T. & J. Boardman. 2002. Automated digital photogrammetry: a valuable tool for small-scale geomorphological research for non-photogrammetrist? *Transactions in GIS*. 6(1): 5-15.
64. Leica Geosystems GIS & Mapping. (2003). *OrthoBASE & OrthoBASE Pro User's Guide*. 516 p.
65. Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T. Trémélo, M-L. & P. Allemand. 2007. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32:1705-1725.
66. Li, Z., Zhu, Q. & C. Gold. 2004. *Digital Terrain Modeling: Principles And Methodology*. CRC Ed. 323 pp.
67. Liu, H., Jezek, K.C. & B. Li. 1999. Development of an Antarctic digital elevation model by integrating cartographic and remotely sensed data: A geographic information system approach. *Journal of Geophysical Research*. 104(B10): 23199-23213.
68. Lilin Ch. & A.P. Koohafkan. 1987. *Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti*. FAO, 36 p.
69. Maatouk, F. 2004. Precise DEM extraction from drone images. Rapport de stage de DESS (TRISIG), Cemagref/ENGREF, GDTA. 51 p.
70. Macmillan, R.A., Pettapiece, W.W., Nolan, S.C. & T.W. Goddard. 2000. A generic procedure for automatically segmentation landforms into landform elements using DEM, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*. 112:81-109.
71. Malet, J.F., Auzet, A.V., Maquaire, O., Ambroise, B., Descroix, L., Esteves, M., Vandervaere, J.P. & E. Truchet. 2003. Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the Super-Sauze earthflow (southern alps, france). *Earth Surface Processes and Landforms* 28:547-564.
72. Mark, D.M. 1984. Automated detection of drainage networks from digital elevation models. *Cartographica*. (21):168-178.
73. Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C. & M. Ribes-Dasi. 2002. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma*. 105: 125-140.
74. Martínez-Casasnovas, J.A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*. 50: 293-308.
75. Martínez-Casasnovas, J.A., Antón-Fernandez, C. & M.C. Ramos. 2003. Sediment production in large gullies of the Mediterranean area (NE Spain) from high-

- resolution digital elevation models and geographical information system analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 443-456.
76. Martz, L.W. & J. Garbrecht. 1992. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers and Geosciences*. 18:747-761.
 77. Mathys, N, Brochot, S & M. Meunier. 1996. L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du Sud contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins-versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France). *Revue de Géographie Alpine* 84(2):17–28.
 78. Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M. & D. Richard. 2003. Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence). Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. *Catena* 50: 527-548.
 79. Mathys N. & J. Poesen. 2005. Ravinement en montagne : processus, mesures, modélisation, régionalisation. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1/2005, [En ligne], mis en ligne le 01 juillet 2007. URL : <http://geomorphologie.revues.org/index187.html>.
 80. Mathys, N., Klotz, S., Esteves, M., Descroix, L. & J.M. Lapetite. 2005. Runoff and erosion in the Black Marls of Frech Alps: Observations and measurements at plot scale. *Catena*. 63: 261-281.
 81. Maune, D.F., Koff, S.M., Crawford, C.A. & C.E. Zervas. 2001. Introduction. In Maune DF (ed). *Digital Elevation Model Technologies and Applications: the DEM user's Manual* (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, MD), 1-34.
 82. McKean, J. & J. Roering. 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*. 57: 331-351.
 83. McNamara, J.P., Ziegler, A.D., Wood, S.H. & J.B. Vogler. 2006. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management*. 224: 147-156.
 84. Miller, C.L. & L.A. Laflamme. 1958. The digital terrain model – theory and application. *Photogrammetry Engineering*. 25:433-442.
 85. Mita, C, Catsaros, N & N Gounaris. 2001. Runoff cascades, channel network and computation hierarchy determination on a structured semi-irregular triangular grid. *Journal of Hydrology*. 244(3-4): 105-118.
 86. Moore, I.D., Turner, A.K., Wilson, J.P., Jenson, S.K. & L.E. Band. 1993. GIS and land surface-subsurface processes modeling. In Goodchild M.F., Parks B.O. & L.T. Steyaert (eds) *Environmental Modeling with GIS*. New York, Oxford University Press: 197-230.
 87. Mora, P., Baldi P., Casula, G., Fabris M., Ghirotti, M., Mazzini,E. & A. Pesci. 2003. Global Positioning Systems and Digital Photogrammetry for the Monitoring of Mass

- Movements: Application to the Ca' di Malta Landslide (Northern Apennines, Italy). *Engineering Geology* 68: 103-121.
88. Mouton, A. 2005. Generating stream maps using LiDAR derived digital elevation models and 10 USGS DEM. Master of Science thesis (University of Washington-USA). 86 pp.
 89. Mulders, M.A. 2001. Advances in the application of remote sensing and GIS for surveying mountainous land. *JAG*. 3(1): 3-10.
 90. Nadal-Romero, E., Regüés, D., Martí-Bono, C. & P. Serrano-Muela. 2007. Badlands dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32:888-904.
 91. Nichol J.E., Shaker, A. & M-S. Wong. 2006. Application of high-resolution stereo images to detailed landslide hazard assessment. *Geomorphology*. 76: 68-75.
 92. O'Callaghan, J.F. & D.M. Mark. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 28: 323-344.
 93. Oksanen, J. & T. Sarjakoski. 2005. Error propagation of DEM-based surface derivatives. *Computers & Geosciences*. 31: 1015-1027.
 94. Oksanen, J. 2006. Digital elevation model errorin terrain analysis. Academic Dissertation in Geography. Faculty of Science, University of Helsinki. 59p.
 95. Olivier, J.E. 1995. Matériel de mesure de matières en suspension: préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle. Test et étalonnage en canal. Bassins Versants Expérimentaux de Draix, Compte rendu de recherches no 3. Cemagref: 43-62.
 96. O'Neill, M.P. & D.M. Mark. 1987. On the frequency distribution of land slope. *Earth Surface Processes and Landforms*. 12: 127-136.
 97. Oostwoud Wijdenes, D.J. & Ergenzinger P. 1997. Rainfall simulations and soil temperature measurements at steep marly slopes in the Draix experimental research basin. In Actes du colloque « Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne », Digne. Cemagref:143-154.
 98. Oostwoud Wijdenes, D.J. & P. Ergenzinger. 1998. Erosion and sediment transport on steep marly hillslopes, Draix, Faute-Provence, France: an experimental field study. *Catena* 33:179-200.
 99. Quinn, P.F., Beven, K.J., Chevallier, P. & O. Planchon. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*. 5: 59-80.
 100. Quinn, P.F. & K.J. Beven. 1993. Spatial and temporal prediction of soil moisture dynamics, runoff, variable sources areas and evapotranspiration for Plynlimon, mid-Wales. *Hydrological Processes*. 7:425-448.
 101. Quinn, P.F., Beven, K.J. & R. Lamb. 1995. The $\ln(a/\tan \beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes*. 9(2): 161-182.

102. Papo, H.B. & E. Gelbman. 1984. Digital terrain models for slopes and curvatures. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 50 (6): 695-701.
103. Peckham R.J. & G. Jordan (Eds.). 2007. *Digital Terrain Modelling*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 307.
104. Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J. & D.M. Mark. 1978. The triangulated irregular network. In: *Proc. Auto Carto III, Am. Congress on Surveying and Mapping*, Fallschurch, VA, pp. 516-540.
105. Pierrot D., M & N. Paparoditis. 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In *IAPRS vol XXXVI-1/W41 in ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turquie, 02-2006.
106. Pierrot D., M. 2007. MicMac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique. *Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN n° 77*. 12 p.
107. Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. In: *Wicherek, S. (Ed.), Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Elsevier, Amsterdam, pp. 221– 239.
108. Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, C. & C. Valentin. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*. 50:91-133.
109. Pozzobon, E. SD. Levantamiento de cárcavas usando fotogrametría terrestre. Trabajo de grado. Ingeniero Forestal, Universidad de Los Andes.
110. Puech, C., Bailly, J.S., Raclot, D., Alquier, M., Chorda, J., Dartus, D. & M. Maubourguet. 2004. Expertise sur l'utilisation des données spatiales dans le domaine de l'hydrologie : Apport des Modèles Numériques de Terrain à « la liaison hydrologie - hydraulique - images satellitales » dans le transfert sur les bassins versants et champs d'inondations. Rapport RIO2, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (France). Convention « risques d'inondations » n° 01008, 89 p.
111. Raaflaub, L.D. & M.J. Collins. 2006. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environmental Modelling & Software*. 21: 710-732.
112. Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jácome A., Asseline J. & J-S. Bailly. 2005. Photographies aériennes par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*. N° 1, p. 7-20.
113. Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. & R. Bamler. 2003. The shuttle radar topography mission, a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 57: 241-262.
114. Regüés D., Pardini, G. & F. Gallart. 1995. Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*. 25:199-212.

115. Regues & Gallart. 1997. Physical weathering as a key process of badland dynamics at Vallcebre, Eastern Pyrenees. Actes de Colloque "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne. Cemagref Editions. 173-185.
116. Rieke-Zapp, D.H. & M.A. Nearing. 2005. Digital close range photogrammetry for measurement of soil erosion. *The Photogrammetric Record*. 20 (109): 68-87.
117. Rieke-Zapp, D.H. & M.A. Nearing. 2005. Slope shape effects on erosion: a laboratory study. *Soil Science Society of America Journal*. 69: 1463-1471.
118. Robert, Y. 1997. Erosion et colonisation végétale dans les badlands marneuses des Alpes du Sud, l'exemple du bassin versant du Saignon. TER de géographie, Université Joseph Fourier.
119. Rodriguez-Iturbe, R.E. & A. Rinaldo. 1997. *Fractal River Basins: Chance and Self-organization*. Cambridge University Press: New York.
120. Roose, E. 1991. Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèses et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES. Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVI, n° 2: 145-181.
121. Sancho, C., Benito, G. & M. Gutiérrez. 1991. Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. *Geoforma, Logroño*.
122. Seibert, J. & B.L. McGlynn. 2007. A new triangular multiple flow-direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research*. 43: W04501, doi:10.1029/2006WR005128.
123. Sneddon, J., Williams, B.G., Savage, J. & C. Newman. 1988. Erosion of a gully in duplex soils of a long term photogrammetric monitoring program. *Aust. J. Soil Res.* 26: 401-408.
124. Soille, P. 2004. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 40(12): W12509, doi:10.1029/2004WR003060.
125. Sorriso-Valvo, M., Bryan, R.B., Yair, A. & L. Antronico. 1995. Impact of afforestation on hydrological response and sediment production in a small Calabrian catchment. *Catena*. 25:89-104.
126. Stojic, M., Chandler, J., Ashmore, P. & J. Luce. 1998. The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64 (5): 387 - 395.
127. Stevens, N.F., Manville, V. & D.W. Heron. 2002. The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 119: 89-105.
128. Tarboton, D.G., Bras, R.L. & I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*. 5:81-100.
129. Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow direction and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 33(2): 309-319.

130. Tarboton, D.G. & M. E. Baker. 2008. Towards an Algebra for Terrain-Based Flow Analysis. Representing, Modeling and Visualizing the Natural Environment: Innovations in GIS 13, Edited by N. J. Mount, G. L. Harvey, P. Aplin and G. Priestnall, CRC Press, Florida. 28 pp.
131. Taylor, J. 1997. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties In Physical Measurements. University Science Books, Sausalito, CA. 327 p.
132. Torri, D., Regüés, D., Pellegrini, S. & P. Bazzoffi. 1999. Within-storm soil surface dynamics and erosive effect of rainstorms. *Catena*. 38:131-150.
133. Valcárcel, M., Taboada, M.T., Paz, A. & J. Dafonte. 2003. Ephemeral gully erosion in Northwestern Spain. *Catena*. 50: 199-216.
134. Voiron-Canicio, C. 1995. Analyse spatiale et analyse d'images par la morphologie mathématique. Montpellier, GIP RECLUS. 190 pages.
135. Watson, G.A. 2006. Computing Helmert transformations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 197: 387-395.
136. Warren, S.D., Hohmann, M.G., Auerswald, H. & H. Mitasova. 2004. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. *Catena*. 58: 215-233.
137. Wechsler, S.P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1481-1500.
138. Wischmeier, W.H. & D.D. Smith. 1961. A universal equation for predicting rainfall erosion losses – An aid to conservation farming in humid regions. USDA-ARS, Special Report: 22-66.
139. Wolf, P.R. & B.A. Dewitt. 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, Inc.
140. Young, R.A. & C.K. Mutchler. 1969b. Effect of slope shape on erosion and runoff. *Trans. ASAE*. 12:231-233.
141. Zevenbergen, L.W. & C.R. Thorne. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*. 12: 47-56.
142. Zinck, J.A., López, J., Metternicht, G.I., Shrestha, D.P. & L. Vázquez-Selem. 2001. Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *JAG*. 3(1): 43-53.

INDEX DES FIGURES

Figure I.1 - Localisation du bassin versant de La Durance et le village de Draix.	7
Figure I.2 - Système d'hydroélectricité « Durance-Vernon » (EDF).	8
Figure I.3 - a) Localisation des bassins versants expérimentaux de Draix, et b) vue générale de la zone avec les deux sites d'étude (1 et 2).	10
Figure II.1 - Altération des roches marneuses à Draix (adapté de Coulmeau, 1987).	15
Figure II.2 - Morphologie des six classes de surface marneuses décrites par Malet et al. (2003).	17
Figure II.3 - Orientation de la pente et incidente solaire.	18
Figure II.4 - Relation entre la pente et l'orientation du versant, et le pendage de la stratification dans les Alpes du Sud (d'après Descroix & Mathys, 2003).	20
Figure II.5 - Succession d'événements d'érosion intra annuelle des roches marneuses à Draix selon la saison.	21
Figure II.6 - Principe de calcul de la hauteur d'un objet par parallaxe (d'après Casson et al., 2003).	33
Figure II.7 - Evolution de la stéréophotogrammétrie.	34
Figure II.8 - Types de représentation numérique du terrain (adapté de Oksanen, 2006).	35
Figure II.9 - Les différents types de stockage en grille (d'après Puech et al., 2004).	36
Figure II.10 - Relation entre les polygones Thiessen et la triangulation Delaunay (a), et le principe du « cercle vide » de la triangulation Delaunay (b).	37
Figure II.11 - Paramètres de vol (d'après Kraus & Waldhäusl, 1998).	39
Figure II.12 - Rapport B/h en fonction du terrain.	40
Figure II.13 - Types de recouvrement entre stéréo images (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).	41
Figure II.14 - Le plan focal et la zone de netteté.	42
Figure II.15 - Paramètres d'orientation interne (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).	43
Figure II.16 - Deux types de déformation des lentilles.	43
Figure II.17 - Paramètres de position de l'orientation externe (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).	45
Figure II.18 - Paramètres d'orientation angulaire de l'orientation externe.	45
Figure II.19 - Ajustement par paquets de blocs (www.geodesie-maintenance.com).	47
Figure II.20 - Paramètres additionnels d'image pour l'auto calibrage (d'après Ebner, 1976).	48
Figure II.21 - Corrélation d'images contraint par la ligne épipolaire (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).	51
Figure II.22 - La géométrie épipolaire et la condition de coplanéité (d'après Keating et al. 1975).	52
Figure II.23 - Corrélation d'image multi résolution (Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003).	54
Figure II.24 - Mesure d'une ravine : a) diffusion horizontale, et b) changements verticaux (Hudson, 1993).	59
Figure II.25 - Méthode de mesure par contact direct (Sneddon et al., 1988).	59
Figure II.26 - Mesure de l'ablation (Hudson, 1993).	60
Figure II.27 - Etapes dans la production d'un MNT et l'incertitude (Oksanen, 2006).	62
Figure II.28 - Les éléments contraignants de la recherche.	66

Figure III.1 - Stratégie hiérarchique pour la normalisation du levé terrain : connexion au réseau des bornes IGN, et connexion au réseau des bornes locales.....	74
Figure III.2 - Schéma d'outils assemblés pour la construction d'un MNT drone.	79
Figure III.3 - a) Photo-interprétation du réseau des thalwegs de référence, b) zone « buffer » autour ce réseau, et c) intersection du réseau extrait par traitement numérique des MNT-drone (ravine du Moulin).....	85
Figure III.4 - Représentation du réseau de thalwegs par des arêtes linéaires joignant les points de confluence ou des nœuds pour le calcul de la pente par tronçon.	87
Figure III.5 - Différents modèles de drones utilisé pendant les trois missions réalisées, et le pilote du drone (Bruno ROUX).	89
Figure III.6 - Schéma approximatif de la mission drone avion du 15 Juin 2005, chaque couleur représente un passage différent du vecteur drone.	90
Figure III.7 - Deux couples stéréoscopiques choisis sur les bassins du Moulin (01a-02a, juin 2005) ; et La Roubine (01b-02b, mai 2007), la flèche blanche signale la direction du Nord Géographique.	91
Figure III.8 - Deux mires sur la crête d'une ravine (plaques plastifiées carrées de taille différente et superposées, rouges et blanches).	92
Figure III.9 - Distribution des mires (en rouge) sur le bassin versant du Moulin (ligne rouge), au nord du bassin la ravine étudiée plus en détaille (carré noir).	93
Figure III.10 - Distribution des mires (en rouge) sur la ravine étudiée au bassin du Moulin.	94
Figure III.11 - Système GPS Leica 1200 et tachéomètre Sokkia.....	95
Figure III.12 - Réseau de bornes IGN à Draix.	97
Figure III.13 - Les bornes permanentes (BP) en béton.	98
Figure III.14 - Distribution de bornes permanentes (en jaune) sur les bassins du Moulin (ligne rouge) et le Laval (ligne violet).	98
Figure III.15 - Trois couples stéréoscopiques pris dans le bâtiment de l'IGN à Paris, utilisés dans le calcul de paramètres d'orientation interne pour la mission Juin 2005.	101
Figure III.16 - Paramètres d'orientation interne et vecteurs de déformation de lentille (2005).....	102
Figure III.17 - Calcul de la déformation de lentille par rapport à la distance au centre de l'image (mission Juin 2005), d'après l'équation polynomiale (3).....	102
Figure III.18 - Des photos prises dans le bâtiment d'Agropolis International à Montpellier, utilisés dans le calcul de paramètres d'orientation interne pour les missions de Mai 2007 et de Mars 2008.	103
Figure III.19 - Calcul de la déformation de lentille par rapport à la distance au centre de l'image (mission Mai 2007), d'après l'équation polynomiale (3).	104
Figure III.20 - Distribution des PCT (cercles noirs) et des PH (carrés rouges) sur le stéréo couple de 2005 (ravine le Moulin).	105
Figure III.21 - Distribution des PCT (cercles noirs) et des PH (carrés rouges) sur le stéréo couple de 2007 (ravine la Roubine).....	107
Figure III.22 - Distribution des PCT (cercles noirs) sur plusieurs couples d'images drone de Mars 2008 (ravine le Moulin).....	108
Figure III.23 - Vue 3D du MNT drone ERDAS mission Juin 2005, le Moulin (pixel 15cm).	110
Figure III.24 - Courbes de niveau sur une ravine à partir de photos aériennes 1/4000 (a) ; courbes de niveau et points effectivement corrélés à partir du couple drone 2005 (b).	111
Figure III.25 - Deux zooms 3D sur le MNT drone ERDAS 2005 (ravine sur le Moulin), dans les cercles rouges des artéfacts de l'interpolation (pics).	112
Figure III.26 - Vue 3D du MNT drone MicMac mission de Mai 2007, la Roubine.....	112

Figure III.27 - Des zooms 3D sur les MNT drone ERDAS et MicMac (mission Mai 2007, la Roubine), dans les cercles rouges des artéfacts de l'interpolation avec ERDAS.	114
Figure III.28 - Vue 3D du MNT drone mission Mars 2008, ravine Le Moulin.....	115
Figure III.30 - Réseau de points de validation (388) prises par campagne mixte DGPS-tachéomètre sur une ravine du Moulin (en rouge).....	117
Figure III.31 - Problème dans le calcul de l'altitude de points de validation avec un support canne pour antenne GPS (ou mire tachéomètre) sur l'altérite de marne noire dégradée...	118
Figure III.32 - Statistiques de contrôle de qualité (a) et histogrammes de fréquence des erreurs en Z (b), pour chaque MNT drone corrélé avec ERDAS 2005 analysés.....	120
Figure III.33 - Profils des écarts « vérité terrain moins chaque MNT » sur une crête (points A-B) et un talweg (points B-C).	121
Figure III.34 - Distribution des erreurs en Z par rapport à la distance (rayon) au centre de l'image, a) MNT.o, b) MNT.L, et c) MNT.LA.	123
Figure III.35 - MNT.LA (drone ERDAS 2005) moins MNT-LiDAR 2007 (moyenne -0,14 m, écart type 0,19 m).	124
Figure III.36 - Vue 3D du nuage de points LiDAR terrestre (mission Mai 2007) drapé sur le MNT drone (mission Mai 2007, pixel 3 cm) du Bassin de la Roubine.....	126
Figure III.37 - Visualisation des écarts entre les MNT-drone calculés (mission 2007) et le MNT-LiDAR. En haut avec ERDAS, en bas avec MicMac. Moyenne de l'erreur -0,125m et -0,008m, écart type (ET) 0,39m et 0,005m (ERDAS et MicMac, respectivement).	128
Figure III.38 - Thalwegs permanents et interconnectés (ligne noire) dans une photo panoramique prise vers la partie haute droite de la ravine du Moulin.....	130
Figure III.39 - a) Ravine du Moulin, b) détail des rigoles avec peinture rouge avant le vol du drone avion, et c) photo aérienne drone avion-jaune mission 2008.	131
Figure III.40 - Réseau hydrographique de référence, sur une image drone mission 2008 sans corrections (a) et sur une orthophoto drone mission 2005 (b).....	132
Figure III.41 - Possibles thalwegs non interconnectés au réseau (a et b), et réseau de thalwegs obtenu sans remplissage de puits (en bleu) et avec remplissage (rouge), ravine au Moulin (c).	134
Figure III.42 - Réseaux des thalwegs pour l'évaluation de précision hydrographique des MNT dans la ravine au Moulin, a) mission 2005, et b) mission 2007.	134
Figure III.43 - Précision planimétrique pour la totalité du réseau des thalwegs extraits à partir des MNT drone ERDAS et MicMac, mission 2005 (seuil d'accumulation de 4m ²).	136
Figure III.44 - Précision planimétrique des réseaux de thalwegs, par niveau hiérarchique, extraits à partir des MNT drone ERDAS et MicMac 2005 (seuil d'accumulation de 4m ²) : drain 1 (thalweg principal), drain 2 (thalwegs secondaires), drain 3 (thalwegs tertiaires).137	137
Figure III.45 - Jeu de points de validation utilisés dans l'évaluation de la précision altimétrique du réseau de thalwegs extraits des MNT (drone et LiDAR), ravine du Moulin.	138
Figure III.46 - Détail du thalweg principal extrait du MNT drone MicMac 2005 (ligne bleue), ravine du Moulin : a) partie amont, b) partie aval.	139
Figure III.47 - Détail du thalweg secondaire extrait du MNT drone MicMac 2005 (ligne rouge), ravine du Moulin : a) partie amont, b) partie aval.....	141
Figure IV.1 - LiDAR terrestre Optech ILRIS-3D, utilisé dans l'approche terrestre.	150
Figure IV.2 - a) Mesure de formes géométriques connues par le LiDAR terrestre Optech (ILRIS-3D), b) détail d'une tôle en « V », et c) détail d'une tôle en « U ».....	152
Figure IV.3 - Représentation numérique des tôles en « V » et en « U » (a et b, respectivement) et profils transversaux où l'analyse de bruit a été établie.....	152

Figure IV.4 - Evaluation de l'effet du teneur en eau sur la performance du LiDAR terrestre.	154
Figure IV.5 - a) Repérage de boules dans le nuage de points LiDAR terrestre, et b) ajustement d'une sphère virtuelle pour l'estimation des coordonnées du centre.	156
Figure IV.6 - a) boule en polystyrène sur une fer à béton fichée dans le sol dans la crête d'une ravine à Draix (bassin du Moulin) ; b) boule en béton comme repère fixe (bassin de la Roubine).	158
Figure IV.7 - Test du bruit de la mesure LiDAR terrestre sur une zone plate de la tôle triangulaire, couleur noir et blanc (toutes les unités en mètres).	160
Figure IV.8 - Test de réduction du bruit par la moyenne glissante (moy gliss) sur le nuage de points LiDAR terrestre pour la tôle en V blanche (toutes les unités en mètres).	161
Figure IV.9 - Test de réduction du bruit par généralisation de l'information LiDAR terrestre (moyenne simple et médiane) pour la tôle en V blanche (toutes les unités en mètres).	162
Figure IV.10 - Test des formes géométriques connues pour le LiDAR terrestre, tôles triangulaire et en demi cercle (toutes les unités en mètres).	163
Figure IV.11 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques en demi cercle les plus grossières (couleur blanche), toutes les unités en mètres : a) moyenne glissante sur 9 points scannés, b) moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et c) moyennes glissantes sur 3 et 9 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).	164
Figure IV.12 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques triangulaires les plus grossières (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).	166
Figure IV.13 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques en demi cercle moyennes et petites (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).	166
Figure IV.14 - Détail de l'effet de la réduction du bruit sur la représentation des formes géométriques triangulaires moyennes (a) et petites (b) (couleur blanche) : moyenne simple à un pas régulier de 1 cm, et moyenne glissante sur 3 points (moyennés au préalable à un pas régulier plus fin de 0,25 cm).	167
Figure IV.15 - Versant scanné pour l'évaluation de l'effet de la teneur en eau de la marne noire sur la performance du LiDAR terrestre, et bande de données analysées (ligne bleue).	168
Figure IV.16 - Evaluation de l'effet du teneur en eau de la marne noire sur la performance du LiDAR terrestre, entouré par un cercle noir une zone où la différence dans la réponse du signal LiDAR est peut être liée au déplacement de sédiments pendant l'arrosage.	169
Figure IV.17 - Recalage numérique direct de deux nuages de points LiDAR terrestre par corrélation de forme.	170
Figure IV.18 - Recalage numérique sans repères de terrain sur tous les points LiDAR terrestre (a), et en utilisant les zones « supposées » stables (b).	171
Figure IV.19 - Recalage numérique sans repères de terrain sur des points LiDAR terrestre sélectionnés (zones stables : les crêtes).	172
Figure IV.20 - Directions des scans LiDAR terrestre de validation, sur les deux sites d'étude.	174
Figure IV.21 - Réseau de boules en polystyrène (cercle pointillé blanc) et les nuages de points LiDAR terrestre résultants, sur les bassins du Moulin et La Roubine (a et b, respectivement).	174

Figure IV.22 - Emplacement des scans LiDAR terrestre pour l'évaluation de la précision de mesure en relative.	176
Figure V.1 - Thalweg principal de la ravine étudiée au bassin du Moulin.	189
Figure V.2 - MDT drone MicMac Mai 2007 « moins » MDT LiDAR terrestre, (La Roubine, Mai 2007).	192
Figure V.3 - Utilisation potentielle des MNT Drone et LiDAR terrestre.	195
Figure A.1 - Fenêtre d'une grille de trois par trois pixels utilisés pendant le calcul de la pente (d'après Adams, 2008).	225
Figure A.2 - Représentation des différents algorithmes pour déterminer la pente locale en x et y (d'après Raaflaub & Collins, 2006).	228
Figure A.3 - Méthode pour l'obtention du réseau de drain par écoulement unidirectionnel (d'après Puech et al., 2004).	232
Figure A.4 - Représentation unidimensionnelle du remplissage de puits (d'après Peckham & Jordan, 2007).	233
Figure A.5 - Incrustation d'un réseau de référence en dz (d'après Puech et al., 2004).	234
Figure A.6 - La pente et les caractéristiques de l'eau d'écoulement contrôlent le type de flux superficiel (unidirectionnel, en nappe ou plat ; d'après Berry, 2007).	234
Figure A.7 - Modèle de flux unidirectionnel diffus D_{∞} (Tarboton, 1997).	235
Figure A.8 - Représentation de l'écoulement par des méthodes de flux unidirectionnel simple (gauche) et diffus (droite) (Tarboton et Baker, 2008).	236
Figure A.9 - Comparaison du calcul de la surface de contribution à partir des algorithmes D_8 et D_{∞} (d'après Tarboton et Baker, 2008).	236
Figure A.10 - Représentation 3D de facettes triangulaires dans l'algorithme MD_{∞} (Seibert et McGlynn, 2007).	237
Figure A.11 - Représentation de flux d'écoulement dans des MNT en format de courbes de niveau et TIN (Seibert et McGlynn, 2007).	238
Figure A.12 - Représentation des courbures de plan et de profil (d'après Garg & Harrison, 1990).	239
Figure A.13 - Bassin de La Roubine, avec l'emplacement des repères fixes (points rouges) et des différents points de vu utilisés pour les scans LiDAR terrestre.	241

INDEX DES TABLEAUX

Tableau I.1 - Caractéristiques générales des BVRE de l'ORE Draix (Brochot & Meunier, 1995).....	9
Tableau II.1 - Définition de MNT et MNS (adapté d'Oksanen, 2006).....	25
Tableau II.2 - Légende des figures II.18 et II.19.....	46
Tableau II.3 - Equations des 12 paramètres additionnels d'Ebner (1976).....	48
Tableau II.4 - Relation entre l'échelle temporelle et les techniques utilisées pour l'étude de l'érosion par ravinement (adapté de Poesen et al., 2003).	58
Tableau III.1 - Réseaux hiérarchiques de bornes et points de contrôle terrestre.	74
Tableau III.2 - Missions drone avion-jaune sur les BVRE de Draix.	89
Tableau III.3 - Paramètres généraux des stéréocouples sélectionnées à Draix.	91
Tableau III.4 - Levé DGPS de points de contrôle terrestre à Draix (2002 - 2004).....	96
Tableau III.5 - Bornes IGN proches des BVRE à Draix.....	97
Tableau III.6 - Coordonnées de bornes permanentes à Draix (par DGPS Leica 1200 RTK).	99
Tableau III.7 - Evaluation de la précision dans le calcul des coordonnées de bornes permanentes (BP) à Draix.....	100
Tableau III.8 - Paramètres d'orientation interne des appareils photos utilisés à Draix (unités du centre de symétrie et la distance focale en pixels).	104
Tableau III.9 - Paramètres d'orientation externe calculés (unités XYZ en mètres et $\omega\phi\kappa$ en degrés) couple 2005 (ravine le Moulin).....	106
Tableau III.10 - Résiduels de PCT non rejetés après l'ajustement du modèle d'aérotriangulation (en mètres) couple Juin 2005 (ravine la Roubine).	106
Tableau III.11 - Paramètres d'orientation externe calculés (unités XYZ en mètres et $\omega\phi\kappa$ en degrés) couple 2007 (ravine la Roubine).....	107
Tableau III.12 - Altitude du vecteur au moment de la prise de vue pour chaque image de la mission de Mars 2008 (ravine le Moulin).	109
Tableau III.13 - Groupes des données « images-terrain », et types d'évaluations réalisées.	116
Tableau III.14 - Résultats de l'évaluation de qualité du MNT.LA 2005 (en mètres) pour les deux jeux de données « vérité terrain » : DGPS-Tachéométrie et LiDAR terrestre.	125
Tableau III.15 - Statistiques des différences entre les MNT-drone 2007 (ERDAS et MicMac) et le MNT-LiDAR terrestre 2007 (« vérité terrain ») dans la Roubine (unités en mètres).	127
Tableau III.16 - Evaluation de la longueur du réseau de thalwegs aux différents niveaux hiérarchiques (en mètres) pour les MNT drone 2005 (MicMac et ERDAS) et le MNT LiDAR terrestre 2007 (pixel des MNT en centimètres).	135
Tableau III.17 - Pente par tronçon (en pourcentage) du thalweg principal et Δ pente (validation moins MNT) pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, moyenne des valeurs absolues de Δ pente par MNT (de l'amont vers l'aval, figure III.46).	140
Tableau III.18 - Pente par tronçon (en pourcentage) du thalweg secondaire et Δ pente (validation moins MNT) pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac (de l'amont vers l'aval, figure III.47).....	142
Tableau III.19 - Evaluation de la pente par tronçon (en pourcentage) des trois versants pour les MNT drone 2005 ERDAS et MicMac, et LiDAR terrestre 2007 (de l'amont vers l'aval, figure III.45).....	143

Tableau IV.1 - Bruit de la mesure LiDAR terrestre sur des tôles de formes régulières connues, couleur noir et blanc (toutes les unités en mètres).....	161
Tableau IV.2 - Dispersion de la mesure LiDAR terrestre (écart type et plage de variation) sur des tôles de formes géométriques connues, avec différentes méthodes de filtrage de bruit (unités en mètres).	165
Tableau IV.3 - Moyenne de l'erreur et écart type (ET) des nuages de points LiDAR terrestre sur des tôles de formes géométriques connues, avec filtrage de bruit (unités en mètres).	176
Tableau V.1 - Synthèse des évaluations de qualité altimétrique des MNT drone.	183
Tableau V.2 - Comparaison MNT drone et MNT LiDAR terrestre.	191
Tableau A.1 - Description des missions LiDAR terrestre à Draix, pour la validation des MNT drone et pour l'étude de l'érosion fine des versants marneux.	242

ANNEXES

A1. PRODUITS DERIVES DES MNT

La prolifération des sources numériques d'altitude (MNT) et des outils d'analyse de terrain (SIG) permet aux chercheurs en science environnementale, agriculture, hydrologie, biologie et ingénierie de calculer des variables dépendantes de terrain et des indices plus facilement que jamais (Kienzle, 2004). La justesse avec laquelle ces méthodes caractérisent la surface de la Terre est fondamentale dans la certitude finale d'ultérieures applications.

De nos jours, tous les SIG offrent une gamme d'options d'analyse de terrain, dès les applications classiques comme la pente et l'azimut (Evans, 1980 ; Horn, 1981 ; Zevenbergen & Thorne, 1987), à l'application des algorithmes plus sophistiqués tels que le réseau de drainage (Jenson & Domingue, 1988 ; Tarboton et al., 1991 ; Garbrecht & Martz, 1997), l'index topographique d'humidité (Beven & Kirkby, 1979), ou les flux de rayonnement (Hetrick et al., 1993a ; Moore et al., 1993 ; Quinn & Beven, 1993). La topographie contrôle les flux d'énergie, la distribution des éléments, le mouvement en masse, et la dispersion d'eau dans les paysages (Holmes et al., 2000).

A partir d'une ou des plusieurs variables de terrain, un bassin versant peut être caractérisé en termes de géomorphologie (Jenson & Domingue, 1988 ; Moore et al., 1993 ; Blaszcynski, 1997 ; Macmillan et al., 2000), ou de différents types de réseau hydrographique (Tarboton et al., 1991 ; Band, 1993). Par conséquent, la modélisation d'un écosystème dépend de la représentation fiable du terrain et les résultats de ces modélisations vont être affectés par la qualité des MNT et leurs dérivés.

Le calcul des produits dérivés superficiels est un procédé par lequel de nouvelles variables décrivant les propriétés géométriques de la surface terrestre sont obtenues à partir d'un MNT (Oksanen & Sarjakoski, 2005). L'analyse « superficielle » directe d'un MNT va produire des informations dérivées de premier ordre, comme les plans de pente ou d'azimut. On peut produire des informations dérivées d'ordres supérieurs, ainsi au deuxième ordre : on peut obtenir le taux de changement de la pente dans une direction donnée (courbure d'un profil ou d'un plan), la délimitation de sous-bassin, l'ensoleillement, l'accumulation de flux, entre autres. Il existe aussi les produits dérivés combinés, calculés à partir de deux ou même de plusieurs produits dérivés de premier ou de deuxième ordre, comme l'indice topographique (Beven & Kirkby, 1979), la courbure, ou le réseau de drains.

Les types des produits dérivés peuvent être aussi exprimés en fonction de leurs propriétés spatiales (Oksanen & Sarjakoski, 2005). Les produits dérivés obtenus par le calcul du voisinage fixe peuvent être considérés contraints (paramètres ponctuels), alors que les produits dérivés obtenus par interactions spatiales de long portée peuvent être considérés sans contrainte. Comme exemples des index topographiques localement déterminés, nous pourrions mentionner la pente et l'azimut, ainsi que la courbure, tandis que pour les index de longue portée, la surface d'accumulation en amont (ou surface de contribution) et la distance au cours d'eau.

A1.1 La pente et la direction de flux

Les principaux produits dérivés de la surface représentée par un MNT sont la pente et l'azimut (les termes en anglais « slope and aspect », respectivement). Ces paramètres caractérisent localement la pente et ils représentent l'ampleur et la direction d'un vecteur tangent au versant (Raaflaub et Collins, 2006).

Le gradient de la pente est le taux de changement de l'altitude dans la direction de la descente plus raide. Ce paramètre est très important pour la modélisation étant donné qu'il commande l'écoulement et le déplacement de matière par la force gravitationnelle.

Même si les définitions des premiers produits dérivés d'un MNT sont assez directes (pente et azimut), leurs calculs numériques dans un SIG ne le sont pas autant. En raison des problèmes liés à dériver ces paramètres, surtout à partir d'un MNT raster, plusieurs algorithmes ont été développés pour accomplir ce but, généralement basé sur des opérations de voisinage.

Il existe deux approches pour calculer la pente : le premier emploie la trigonométrie et le deuxième est basé sur la géométrie différentielle (Warren et al., 2004). L'approche trigonométrique calcule la pente en pourcentage comme un changement de l'altitude ΔZ pour une certaine distance Δd :

$$\text{pente (slope)} = (\Delta Z / \Delta xy) \quad (10)$$

Le premier produit dérivé d'un MNT décrit le taux de changement de l'altitude, ce qui correspond à la pente (Horn, 1981). Ensemble, les taux de changement de l'altitude dans les directions x et y (les dérivées partielles de z ou ∂z dans les directions x et y , ∂x et ∂y respectivement), définissent le vecteur de la pente d'une surface. La pente maximale peut être déterminée par ce vecteur :

$$\text{pente (slope)} = \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

L'azimut dans le sens de la descente la plus raide, est l'angle horizontal entre le vecteur correspondant et l'origine choisie (souvent le Nord géographique) :

$$\text{azimut (aspect)} = \tan^{-1} \left(\frac{\partial z / \partial x}{\partial z / \partial y} \right) \quad (12)$$

La différence entre les algorithmes existants pour le calcul de la pente et l'azimut qui emploient les équations (10) et (11) sont liés à la façon dont ils déterminent la pente locale dans la direction x ($\partial z / \partial x$) et dans la direction y ($\partial z / \partial y$).

Ces algorithmes diffèrent par le nombre de pixels voisins utilisés dans le calcul, pour une fenêtre de trois par trois pixels entre deux et neuf pixels peuvent être employés. Plus de voisins sont employés dans le calcul, plus les algorithmes deviennent contraints. D'autres

paramètres qui diffèrent sont la contribution du point central et la restriction de nombre de directions (Guth, 1995 ; Raaflaub & Collins, 2006).

La détermination de la pente locale dans la direction x et dans la direction y est dépendante des pixels voisins (Raaflaub & Collins, 2006). Pour une grille de trois par trois pixels utilisés dans le calcul, huit pixels voisins sont dans les directions Nord (Z_n), Sud (Z_s), Est (Z_e), Ouest (Z_o), Nord-Est (Z_{ne}), Nord-Ouest (Z_{no}), Sud-Est (Z_{se}) et Sud-Ouest (Z_{so}), autour du pixel central Z (figure A.1).

Z_{no}	Z_n	Z_{ne}
Z_o	Z	Z_e
Z_{so}	Z_s	Z_{se}

Figure A.1 - Fenêtre d'une grille de trois par trois pixels utilisés pendant le calcul de la pente (d'après Adams, 2008).

La classification des algorithmes peut être établie en fonction du nombre de pixels utilisés dans le calcul, de deux jusqu'à neuf pixels :

- **Deux Voisins.** Batson et al. (1975) calculent le composant de la pente dans la direction d'un des voisins les plus proches. Cette valeur de pente de la pente devrait être assignée à une tache à mi-chemin entre le pixel central et le voisin utilisés. C'est l'algorithme le plus rapide, sans calcul de direction de la pente, avec une applicabilité limitée.
- **Trois voisins.** Trois points définissant un plan (O'Neill & Mark, 1987), l'algorithme emploie le pixel central et ses voisins au Nord et à l'Est (Z , Z_n , et Z_e). Ces algorithmes ont les plus basses corrélations avec les autres méthodes
- **Quatre voisins (pixel central exclu).** Il obtient un ∂x à partir de la direction Z_e-Z_o , et un ∂y à partir de la direction Z_n-Z_s . La valeur finale est assignée au pixel central, quoique sa valeur d'altitude ne soit pas employée dans le calcul. Jones (1998), a proposé les 4 voisins diagonaux : $Z_{no}-Z_{se}$ pour ∂x et $Z_{ne}-Z_{so}$ pour ∂y . La méthode diagonale fait la moyenne sur une distance plus importante. La valeur est assignée au pixel central, quoique son altitude ne soit pas employée dans le calcul.
- **Huit voisins (pixel central exclu).** Les points les plus proches ont un poids plus important dans la pondération que les voisins diagonaux (Horn, 1981). Jones (1998), discute deux variantes : en utilisant des pondérations $1/r$ ou $1/r^2$. La valeur est assignée au pixel central, quoique son altitude ne soit pas employée dans le calcul.
- **Neuf pixels.** Il existe plusieurs algorithmes qu'utilisent tous les pixels de la fenêtre pour le calcul de la pente et de l'azimut :

« Steepest Adjacent Neighbor », cette méthode donne systématiquement des valeurs d'inclinaison de pente plus raides que tous les autres. Elle sélectionne la pente la plus raide des huit pixels adjacents (considérant que la distance diagonale est plus longue et que les espacements en x et y pourraient être différents). Si la pente la plus raide est en amont du pixel central elle est assignée comme opposée de la direction de

pente en aval, mais celle-ci peut ne pas être la pente la plus raide en aval. A partir des quatre pixels voisins vers les quatre points cardinaux (N, S, E, O) on calcule la pente par rapport à l'espacement de la grille. A partir des quatre pixels voisins vers les quatre points diagonaux (NO, SO, NE, SE) on calcule la pente par rapport à l'espacement diagonal. Puis on sélectionne la valeur absolue la plus importante des huit candidats comme la pente finale.

« Steepest downhill neighbor », similaire à la méthode précédente mais le pixel à choisir pour le calcul de la pente doit être forcément en aval du pixel central. La valeur finale d'inclinaison de la pente est assignée au pixel central. La plupart des algorithmes de bassin versant emploient une variante de cet algorithme, regardant seulement pour le pixel voisin vers lequel l'eau coulera.

« Average neighbor », cette méthode calcule la moyenne de la pente vers les huit pixels voisins les plus proches. La valeur est assignée au pixel central.

L'inclinaison de la pente est calculée avec la valeur de l'écart d'altitude (∂z) divisée par une distance horizontale. La distance horizontale correspond à l'espacement de grille (est-ouest, nord-sud, ou diagonale) pour les méthodes à deux, trois et neuf voisins, et deux fois cette distance pour les méthodes à quatre et huit voisins.

Adams (2008) mentionne que trois méthodes semblent avoir le plus large soutien : « Four closest neighbors » (FCU), « Eight neighbors unweighted » (ENU), et « Steepest Adjacent Neighbor » (SAN). ENU est devenue la méthode par défaut pour le système d'analyse numérique de terrain MicroDEM, étant donné qu'elle produit les histogrammes de pente les plus réalistes. Cette méthode a toujours des problèmes avec le lissage des pentes dans les vallées et les crêtes.

D'autres auteurs ont comparé les différents algorithmes existants. Guth (1995) a évalué des nombreux algorithmes pour le calcul de l'inclinaison et la direction de la pente. L'auteur mentionne que la méthode « Steepest Adjacent Neighbor » fournit la meilleure estimation de la pente, et la méthode « Eight neighbors unweighted » fournit la meilleure estimation de l'azimut. Ceci est appelé l'algorithme hybride de pente de Guth. L'auteur a constaté aussi que le choix de l'algorithme peut faire varier le calcul de la pente jusqu'à 25%. Une variation si importante souligne la nécessité de bien choisir l'algorithme de calcul afin de produire une représentation précise du terrain, et mieux adaptée à l'application désirée.

Raaflaub & Collins (2006) ont testé 8 algorithmes pour le calcul de la pente : Three Point Plane (O'Neill & Mark, 1987) ; Four Closest Neighbours (Guth, 1995) ; Four Diagonal Neighbours (Jones, 1998) ; Eight Neighbours Unweighted (Papo & Gelbman, 1984) ; One Over Distance Squared (Horn, 1981) ; Maximum Downhill Gradient (O'Callaghan & Mark, 1984) ; Multiple Downhill Neighbours (Quinn et al., 1991) ; et Maximum Adjacent Gradient (Guth, 1995). Les résultats indiquent que la sensibilité des algorithmes de la pente à l'erreur du MNT diminue à mesure que le nombre de voisins utilisés dans l'algorithme augmente. Ceci est valable pour les algorithmes qui cherchent les voisins avec la descente maximale, ainsi pour les algorithmes avec un nombre fixe de voisins. Les algorithmes qui cherchent les voisins avec la descente maximale sont plus sensibles aux erreurs du MNT que les algorithmes avec un nombre fixe de voisins. Par rapport à la direction de la pente, les zones à faible inclinaison tendent à correspondre aux secteurs où l'erreur de calcul de la direction de la pente est plus élevée. En conclusion, des utilisateurs ayant besoin des calculs robustes de la pente et de l'azimut sont conseillés d'employer les algorithmes à huit voisins.

Il existe des méthodes qui sont mieux adaptées pour représenter la pente et l'azimut réel du terrain, alors que d'autres méthodes sont mieux adaptées à l'analyse hydrologique. L'algorithme « Steepest Adjacent Neighbor » pourrait être la solution la mieux adaptée pour le calcul du réseau de drains, mais si on cherche une représentation plus précise de la pente du terrain, l'algorithme « Eight Neighbours Unweighted » pourrait être une meilleure option, puisqu'il fournit des résultats qui représentent le terrain de façon plus réelle (Raaflaub & Collins, 2006).

Raaflaub & Collins (2006) ont testé 8 algorithmes pour le calcul de la pente. Afin de souligner les différences entre les algorithmes, les auteurs présentent un exemple graphique d'un calcul simple (figure A.2). Les pixels utilisés dans le calcul de la pente sont accentués en gris, alors que la flèche bleu-foncé représente la direction résultante (sens d'écoulement) à partir du pixel central. Les valeurs numériques des calculs réalisés (pente et azimut) sont également disponibles afin de comparer les 8 algorithmes utilisés. Les auteurs ont étudié l'effet des erreurs d'un MNT sur le calcul de la pente et de l'azimut. Les algorithmes utilisés sont :

- « **Three Point Plane** » (TPP) ou **plan de trois points** : O'Neill & Mark (1987) ont défini une surface topographique donnée en utilisant un plan de trois points, ou plutôt, de trois pixels d'une grille : le pixel pour lequel la valeur de la pente et de l'azimut doit être calculée, et ses points voisins à l'Est et au Nord.
- « **Four Closest Neighbours** » (FCN) ou **quatre voisins les plus proches** : utilise les quatre points cardinaux (Nord, Sud, Est et Ouest) en représentant un rapport de différence finie de second degré. Les valeurs d'altitude des quatre voisins les plus proches peuvent être employées pour définir deux composants orthogonaux de la pente qui définissent la pente et l'azimut les plus raides, mais ne définissent pas une surface au point d'intérêt (Guth, 1995).
- « **Four Diagonal Neighbours** » (FDN) ou **quatre voisins diagonaux** : une variation de l'algorithme de quatre voisins les plus proches (Jones, 1998) où les valeurs de la pente perpendiculaires sont pris sous un angle de 45° à l'axe principal de la grille du MNT.
- « **Eight Neighbours Unweighted** » (ENU) ou **huit voisins non-pondérés** : quand plus de quatre points de grille sont employés, il est possible de définir une surface topographique dont les valeurs de la pente et de l'azimut peuvent être déterminées. L'algorithme emploie les huit points de grille voisins dans le calcul, représentant un algorithme de différence finie de troisième ordre (Papo & Gelbman, 1984).
- « **One Over Distance Squared** » (OODS) ou **pondéré par le carré de la distance** : Horn (1981) a développé un algorithme où les huit voisins sont pondérés proportionnellement à la distance carré au pixel central de la grille.
- « **Maximum Downhill Gradient** » (MDG) **gradient de la descente maximale** : l'algorithme développé par O'Callaghan et Mark (1984) est basée sur une connectivité de huit voisins où la direction de drainage du pixel central est prise comme direction du voisin avec la dénivelé maximale. Les problèmes surgissent quand plus d'un voisin correspondent au critère simultanément, ou quand le pixel central est un puits où on ne trouve pas un voisin qui correspond au critère.
- « **Multiple Downhill Neighbours** » (MDN) **multiples voisins en aval** : un des inconvénients principaux de l'algorithme de la descente maximale est qu'il est

considérablement affecté par le biais de l'orientation de la grille. Des valeurs véritablement précises pour la pente et l'azimut ne sont pas obtenues en raison de la nécessité de suivre les points cardinaux principaux. L'algorithme de multiples voisins en aval (Quinn et al., 1991) distribue le flux depuis le pixel central vers tous les voisins en aval. La pente et l'azimut sont calculés à partir de la moyenne de tous les voisins en aval.

- « **Maximum Adjacent Gradient** » (MAG) (ou **Steepest Adjacent Neighbor**, déjà expliquée auparavant) **gradient maximal adjacent** : si la pente en amont est considérée, la pente en aval est dans la direction opposée directement. Cet algorithme emploie les mêmes équations appliquées dans l'algorithme de la descente maximale, et par conséquent souffre des mêmes limitations (Guth, 1995).

Les résultats indiquent que la sensibilité des algorithmes de la pente à l'erreur du MNT diminue à mesure que le nombre de voisins utilisés dans l'algorithme augmente. Ceci est valable pour les algorithmes qui cherchent les voisins avec la descente maximale, ainsi pour les algorithmes avec un nombre fixe de voisins (Raaflaub & Collins, 2006). Les algorithmes qui cherchent les voisins avec la descente maximale sont plus sensibles aux erreurs du MNT que les algorithmes avec un nombre fixe de voisins. Par rapport à la direction de la pente, les zones à faible inclinaison tendent à correspondre aux secteurs où l'erreur de calcul de la direction de la pente est plus élevée. En conclusion, des utilisateurs ayant besoin des calculs robustes de la pente et de l'azimut sont conseillés d'employer les algorithmes à huit voisins.

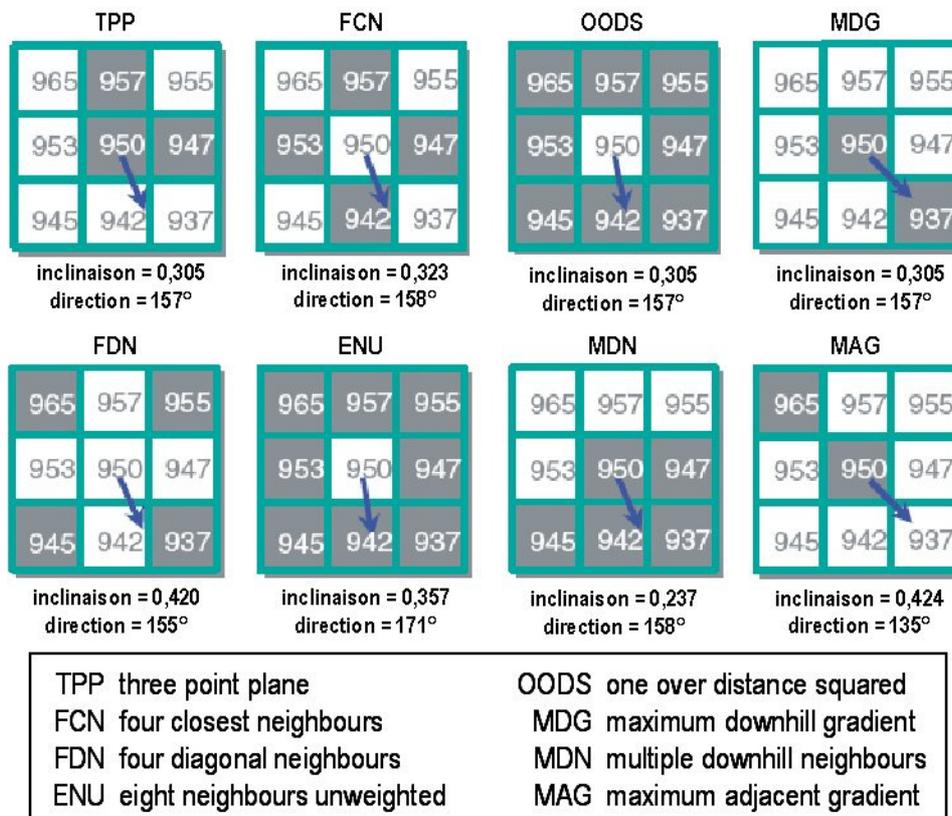


Figure A.2 - Représentation des différents algorithmes pour déterminer la pente locale en x et y (d'après Raaflaub & Collins, 2006).

Il existe des méthodes qui sont mieux adaptées pour représenter la pente et l'azimut réel du terrain, alors que d'autres méthodes sont mieux adaptées à l'analyse hydrologique. L'algorithme « Steepest Adjacent Neighbor » pourrait être la solution la mieux adaptée pour le calcul du réseau de drains, mais si on cherche une représentation plus précise de la pente du terrain, l'algorithme « Eight Neighbours Unweighted » pourrait être une meilleure option, puisqu'il fournit des résultats qui représentent le terrain de façon plus réelle (Raaflaub & Collins, 2006).

A1.2 Réseau de thalwegs

Les paramètres topographiques tels que la pente et l'azimut sont très utilisés dans les applications environnementales, spécialement dans la simulation hydrologique distribuée. Le cheminement des eaux sur le terrain dépend fortement de la forme de la surface des versants. D'un point de vue hydrologique, la pente est une indication de la quantité d'énergie gravitationnelle disponible pour conduire l'écoulement d'eau dans les versants. L'azimut peut être employé pour déterminer la direction de l'écoulement, qui est l'information nécessaire afin de déterminer d'autres variables hydrologiques telle que la surface drainée en amont (Zevenbergen & Thorne, 1987). Ceci est une indication de la quantité d'eau qui peut couler à travers un endroit donné dans la surface du terrain.

Une des applications les plus courantes des MNT est l'extraction automatique du réseau hydrographique ou de drains. Néanmoins, avant d'entrer dans les détails techniques de l'application, il est nécessaire de bien définir les différences entre réseau hydrographique ou réseau de drains, et souvent confondue par les utilisateurs non spécialisés des MNT et des SIG. Le terme « drain » est plus général dans le sens où « un réseau de drains » peut se définir comme un système de structures *naturelles* ou *artificielles* interconnectées qui permettent l'évacuation des eaux de surface et souterraine d'un secteur donné.

Topographiquement, un réseau de drains est synonyme d'un réseau de thalwegs si le drain est naturel, étant donné que les eaux cherchent les points les plus bas du relief sur son chemin vers la mer, sous les lois de gravité. Les drains artificiels ont une géométrie différente, en général de longues lignes droites.

D'autre part, il n'y a pas que la topographie pour définir un réseau hydrographique. Un MNT représente que la surface du terrain, il ne comporte pas d'information sur le sous-sol donc il ne représente pas vraiment le relief dans les trois dimensions (plutôt 2½ dimensions ou une nappe). Le réseau hydrographique trace le chemin des eaux sur la surface de la Terre. Ce sont les canaux naturels, superficiels ou souterrains, dans lesquels s'écoule un flux d'eau (ou cours d'eau) en continu ou temporaire.

Un cours d'eau est défini par l'interaction de plusieurs facteurs : la topographie (pente, rugosité superficielle) ; les conditions météorologiques (distribution, intensité, durée et fréquence de la précipitation, bilan précipitation-évaporation) ; le type de sol et/ou géologie superficiel (perméabilité, infiltration, rugosité, pendage, abondance d'éléments grossiers) ; les couches de sol et/ou couches géologiques souterrain (perméabilité et infiltration profonde, nappe phréatique) ; et la couverture végétale (densité, transpiration). Pour sa définition, on tombe dans la phase terrestre du cycle d'eau contrôlée par de complexes interactions entre les diverses facteurs et processus impliqués.

Une série d'algorithmes est disponible afin d'extraire le réseau hydrographique, ou plus exactement le réseau de thalwegs (Charleux-Demargne, 2001), à partir de l'analyse numérique d'un MNT. Le modèle de flux résultant comprend une représentation numérique du terrain et une représentation du réseau de flux qui relie les éléments adjacents du MNT (pixels) permettant le cheminement de l'écoulement de la surface d'un terrain.

Ces algorithmes s'appuient sur la pente et l'azimut comme facteurs qui contrôlent le flux superficiel du relief. Ils sont aussi spécifiques dépendant du format de représentation du relief choisi : courbes de niveau, TIN ou grille régulière.

Plusieurs algorithmes sont disponibles afin d'extraire automatiquement un réseau de thalweg à partir d'un MNT-grid, et ils peuvent être classifiés dans deux types principaux d'après la façon de gérer la pente vers l'aval et le type d'écoulement à représenter : unidirectionnel et multidirectionnel simple (ou concentré), ou unidirectionnel et multidirectionnel diffus (Siebert et McGlynn, 2007).

L'algorithme à écoulement unidirectionnel simple le plus connu est le D8 (Tarboton & Baker, 2008), proposé d'abord par O'Callaghan et Mark (1984). Il est le modèle à la base de la délimitation du réseau de thalwegs et des limites de sous bassins par traitement des MNT en grille. Pour cet algorithme il y a un seul pixel descendant possible pour chaque pixel analysé (figure A.3a), choisi par le critère de pente maximale (le voisin le plus bas parmi les 8 pixels voisins). Dans les cas où la descente la plus raide ne peut pas être déterminée, un rayon de recherche plus large peut être employé.

Une fonction de direction de flux est appliquée aux valeurs d'altitude d'un MNT grille (figure A.3b) et on obtient une grille des sens d'écoulement (figure A.3c). Puis, un seuil critique de surface drainé en amont ou d'accumulation doit être choisi (figure A.3d). L'accumulation de flux est le nombre de pixels en amont qui drainent sur un pixel donnée dans le réseau.

L'algorithme à écoulement unidirectionnel simple (D8) a des limitations : 1) il produit des pièges locaux quand l'altitude de pixel analysé est inférieure que celles des voisins ; 2) il est très sensible aux imperfections ou anomalies d'un MNT (dépressions et puits, pics) ; et 3) il peut produire du parallélisme d'écoulement dû aux effets de grille, particulièrement en secteurs à faible pente (Puech et al., 2004).

Etant donné qu'il n'y a aucune possibilité pour que le flux soit distribué vers deux cellules, l'écoulement tend à devenir concentré en lignes distinctes et souvent artificiellement droites (Siebert et McGlynn, 2007).

Le cours en aval d'un point est défini comme le chemin d'écoulement le plus raide liant ce point à l'exutoire du bassin. Il est possible que de faux puits doivent être enlevés avant d'appliquer les algorithmes d'extraction automatique des réseaux de drains pour éviter que certains de ces cours d'écoulement soient emprisonnés dans des minimums locaux (Peckham & Jordan, 2007). Afin d'assurer la continuité hydraulique il est nécessaire d'appliquer au préalable des algorithmes de correction (filtres de remplissages) au moins pour surpasser les deux premières limitations citée auparavant.

Tandis qu'il est possible que des puits soient trouvés dans les surfaces topographiques naturelles, la plupart des puits peuvent être considérés comme des erreurs étant donné que les processus d'érosion fluvial ne produiront pas de tels éléments du relief à l'échelle souvent représentée par un MNT (Band, 1986). Les puits apparaissent généralement dans des secteurs plats où même une erreur de 1 m dans l'élévation peut être assez importante pour produire une dépression fermée, alors que sur des pentes plus raides une erreur plus élevée serait nécessaire (Raaflaub & Collins, 2006). Les puits artificiels dans un MNT représentent des problèmes importants pour tous les algorithmes qui relient des régions hydrologiques reliées (p.e. calcul de la surface drainée en amont).

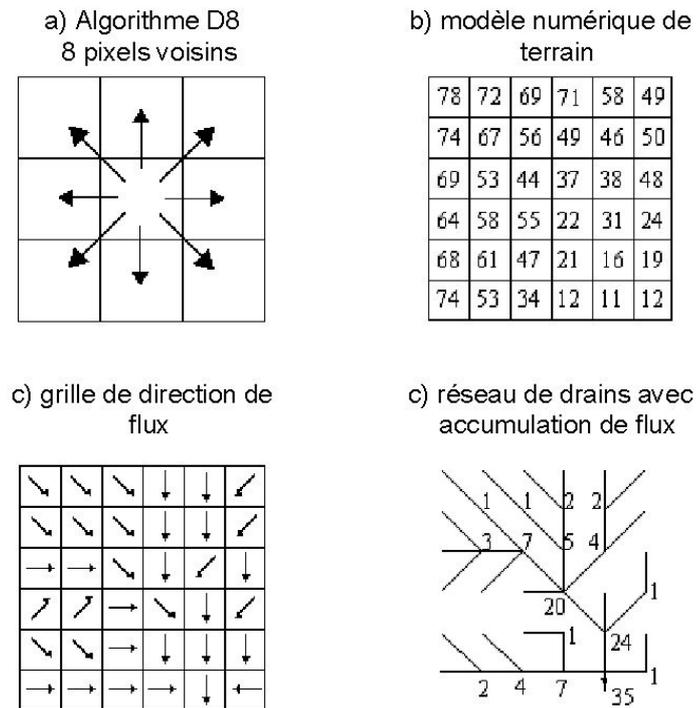


Figure A.3 - Méthode pour l'obtention du réseau de drain par écoulement unidirectionnel (d'après Puech et al., 2004)).

La méthode la plus directe pour le remplissage des puits consiste à les enlever manuellement. Malheureusement, ce processus demande beaucoup de temps et de main d'œuvre, et par conséquent une approche plus automatisée est préférée. La méthode la plus simple est un lissage numérique. Cette méthode réduit le nombre de puits, particulièrement les peu profonds, mais elle lisse aussi la topographie ce qui peut mener à une perte d'information significative (Raaflaub & Collins, 2006). Dans la figure A.24 nous pouvons apprécier trois approches pour le remplissage des puits, sur un exemple en une dimension. Une approche alternative est de préserver les chemins d'écoulement et les directions de drainage ce qui demande de trouver le point de sortie du flux de chaque puits (figure A.4A). Le remplissage peut être accompli en augmentant l'altitude du puits jusqu'à celle du point de sortie, de façon à ce que l'écoulement se produise (figure A.4B).

Une autre option est la création d'un chemin descendant partant du fond du puits jusqu'à ce qu'un point proche d'altitude plus basse soit atteint (figure A.4C). Une approche optimale pourrait être obtenue en combinant les deux méthodes de telle manière que la somme des différences d'élévation entre le MNT brut (figure A.4A) et le MNT sans puits (figure A.4D) soit réduite au minimum (Soille, 2004).

Dans l'exemple de la figure A.4, le « coût » de la méthode hybride optimale de remplissage de puits (figure A.4D) est égale à 6 pixels (3 de remplissage et 3 de découpage), tandis qu'il s'élève à 13 pixels pour le remplissage (figure A.4B) et la même quantité pour le découpage (figure A.4C).

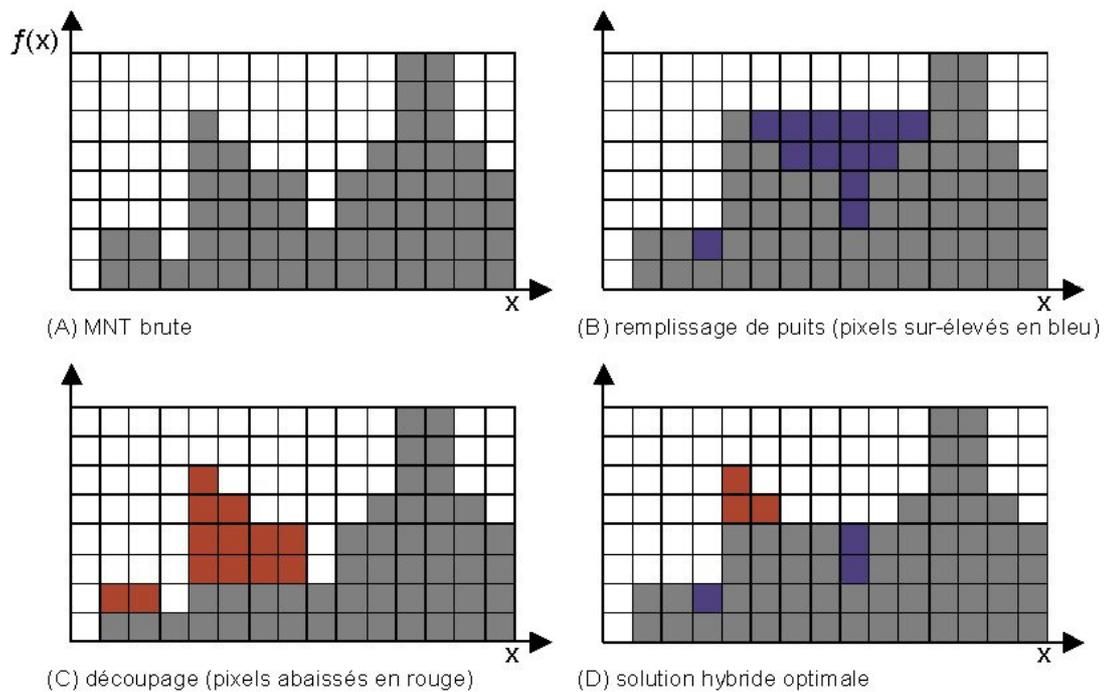


Figure A.4 - Représentation unidimensionnelle du remplissage de puits (d'après Peckham & Jordan, 2007).

Néanmoins ces corrections doivent être réalisées avec soin, de façon à ne pas « corriger » des puits réels ou à changer tellement la surface du MNT que des erreurs seront introduites dans les analyses hydrologiques. Le choix d'enlever ou de ne pas enlever des puits devrait se baser sur le type d'application à développer avec le MNT résultant (Tarboton et Baker, 2008).

En ce qui concerne le parallélisme d'écoulement, une solution possible serait les techniques d'incrustation du réseau (« stream burning ») dans les secteurs peu variables qui forceront le MNT à suivre un réseau de thalwegs choisi (figure A.5 ; Puech et al., 2004). La technique d'incrustation du réseau la plus directe implique : 1) la création d'une représentation en grille du réseau digitalisé de thalwegs et l'identification des pixels en tant que pixels du réseau de thalwegs ou des pixels de la surface du terrain ; 2) relèvement de l'élévation de pixels de la surface du terrain en relation aux pixels du réseau de thalwegs ; et 3) la dérivation du réseau de thalwegs basé sur la grille de sens d'écoulement définie par le MNT incrusté.

Les pixels qui font potentiellement partie d'un réseau de thalwegs auront une accumulation de flux plus importante, tandis que les pixels qui s'approchent des limites de sous bassins ou bien les pixels où l'écoulement en nappe domine auront une accumulation de flux plus faible.

Les algorithmes à écoulement unidirectionnel fonctionnent bien en dehors des zones plates. Il n'y a plus de pixel voisin avec une pente raide parce que toutes les valeurs environnantes d'altitude sont égales ou plus grandes, donc l'écoulement s'étend dans le secteur plat. Le critère d'écoulement unidirectionnel n'est pas une solution adaptée aux zones plates (Berry, 2007).

Cependant, la modélisation réaliste de l'écoulement dans des zones plates est bien plus subtile. Des secteurs de pente très douce mais pas parfaitement plats montrent un type d'écoulement en nappe qui s'étend vers les secteurs légèrement en aval (Berry, 2007). La figure A.6 montre les différents de types d'écoulement : unidirectionnel, en nappe et plat.

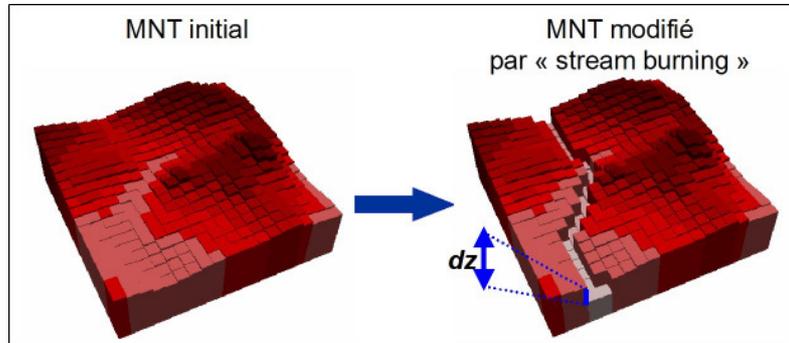


Figure A.5 - Incrustation d'un réseau de référence en dz (d'après Puech et al., 2004).

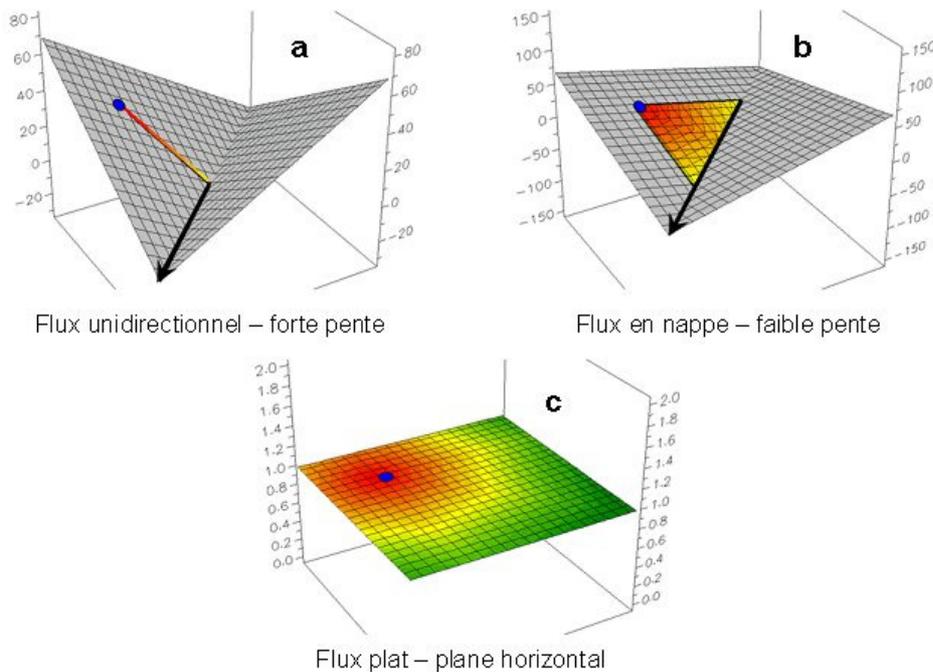


Figure A.6 - La pente et les caractéristiques de l'eau d'écoulement contrôlent le type de flux superficiel (unidirectionnel, en nappe ou plat ; d'après Berry, 2007).

La figure A.6a montre l'écoulement unidirectionnel simple selon la descente la plus raide dans des secteurs à forte pente. La figure A.6b montre l'écoulement en nappe en s'étendant vers les secteurs en aval quand la pente est moins forte. La figure A.6c montre le flux qui s'étale dans tous les sens quand le terrain est parfaitement plat.

L'algorithme de flux multidirectionnel (MD8) distribue l'écoulement vers tous les pixels en aval, pondéré par la pente (Quinn et al., 1991). Il tend à produire une représentation plus physique du flux superficiel concentré, étant donné que plusieurs directions de sortie sont prises en compte. Cet algorithme est plus robuste que le D8, mais l'inconvénient est que la surface de contribution d'une cellule est distribuée sur toutes les cellules en aval et ainsi elle est dispersée en grande partie même pour les versants convergents (Seibert et McGlynn, 2007).

Un des modèles de flux unidirectionnel diffus est le D_∞ (ou D infini, Tarboton, 1997). L'écoulement est défini comme la pente la plus raide vers l'aval en huit facettes triangulaires centré à chaque cellule de grille, et la direction d'écoulement est calculée comme une moyenne pondérée en fonction des écarts d'altitude entre les deux pixels voisins vers l'aval et le pixel central de la grille (figure A.7).

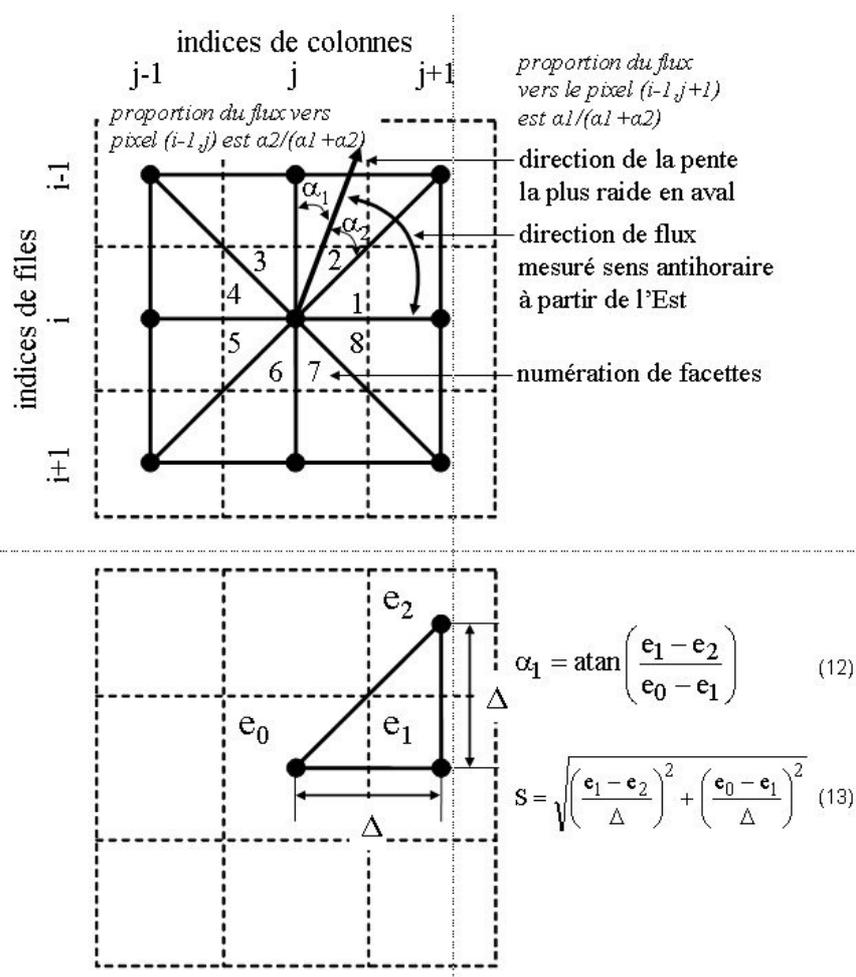


Figure A.7 - Modèle de flux unidirectionnel diffus D_∞ (Tarboton, 1997).

Cet algorithme tend à décrire le flux ou l'écoulement diffus en versants plutôt que le flux concentré dans le réseau hydrologique ou des thalwegs, donc il n'est pas destiné à dessiner précisément un cours d'eau (figure A.8). L'approche d'écoulement diffus en utilisant des

MNT en grille constitue un défi étant donné qu'il faut équilibrer le biais de l'acheminement de l'écoulement au long des directions de grille et l'introduction de la diffusion de flux.

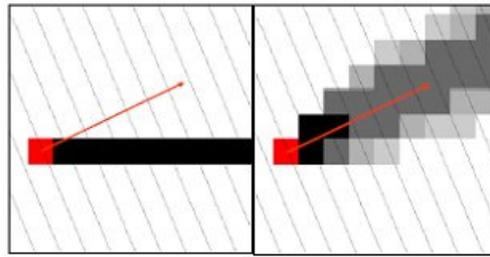


Figure A.8 - Représentation de l'écoulement par des méthodes de flux unidirectionnel simple (gauche) et diffus (droite) (Tarboton et Baker, 2008).

Pour le modèle D8 les proportions d'écoulement vers les pixels en aval sont 1 (relié) ou 0 (non relié). Pour les modèles d'écoulement diffus ces proportions tombent entre 0 et 1 pour chaque élément voisin. Il y a également une condition que l'écoulement partant d'un élément ne revient jamais au même élément après passage par un ou plusieurs de ses voisins.

Dans la figure A.9a, nous pouvons observer les alignements dans la direction de la grille ce qui illustre le biais de l'approche D8. La figure A.9b montre le secteur de contribution calculé en utilisant l'algorithme unidirectionnel diffus D^∞ . Le secteur de contribution adouci semble plus cohérent en comparant à la topographie indiquée par les courbes de niveau (Tarboton et Baker, 2008).

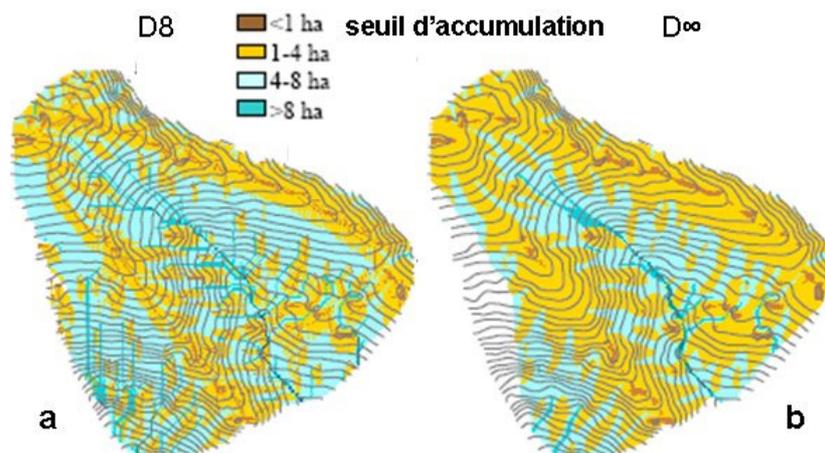


Figure A.9 - Comparaison du calcul de la surface de contribution à partir des algorithmes D8 et D^∞ (d'après Tarboton et Baker, 2008).

Tarboton (1997) a comparé les algorithmes D_8 et D_∞ pour une surface théorique où le secteur de contribution était connu. Les résultats montrent que l'algorithme D_∞ a un biais et une erreur quadratique moyenne plus faible.

Siebert et McGlynn (2007) ont créé le modèle de flux multidirectionnel diffus MD_∞ en combinant les idées de Tarboton (1997) et Quinn et al. (1991). MD_∞ partitionne l'écoulement sur les mêmes facettes triangulaires (comme le D_∞) entre les multiples directions de pente en aval (comme le MD_8). MD_∞ permet plus de diffusion que D_∞ puisqu'il est possible de diriger l'écoulement vers plusieurs pixels en aval. Ceci élimine le biais d'acheminement de l'écoulement au long des directions de grille, présent toujours sur D_∞ (Tarboton et Baker, 2008). La figure A.10 montre une représentation en 3D de la méthode MD_∞ de flux multidirectionnel diffus par facettes triangulaires.

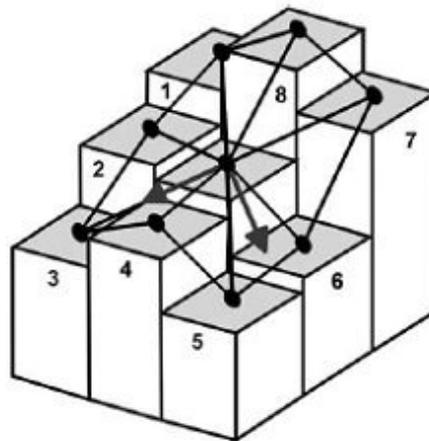


Figure A.10 - Représentation 3D de facettes triangulaires dans l'algorithme MD_∞ (Seibert et McGlynn, 2007).

Toutes les méthodes de calcul de flux assignent l'écoulement de chaque cellule à un ou à plusieurs de ses voisins adjacents. Dans des MNT en grille l'élément de base est une cellule carrée ou pixel, mais les mêmes concepts peuvent être appliqués aux éléments d'autres modèles de données numériques du relief (TIN et courbes de niveau), typologiquement reliés (Tarboton et Baker, 2008).

Pour le MNT-TIN, la méthode de représentation numérique du relief en triangles ou facettes irrégulières s'appuie sur les lignes de ruptures de la pente, comme les crêtes et les thalwegs. Ces accidents du relief sont exprimés numériquement comme un nuage de points en trois dimensions. Pourtant, chaque facette a par définition une orientation et un gradient de pente connu (figure A.11).

Une autre application importante de l'analyse spatiale des MNT dans l'hydrologie est l'indice topographique (Beven & Kirkby, 1979). Celui-ci est calculé à partir de la pente et de la surface drainée en amont. Ce paramètre est une expression de la distribution spatiale de la saturation superficielle et des processus de génération de l'écoulement. Il est l'un des paramètres utilisés dans la modélisation hydrologique distribuée, comme TOPMODEL (« a TOPography based hydrological MODEL » ; Beven & Kirkby, 1979).

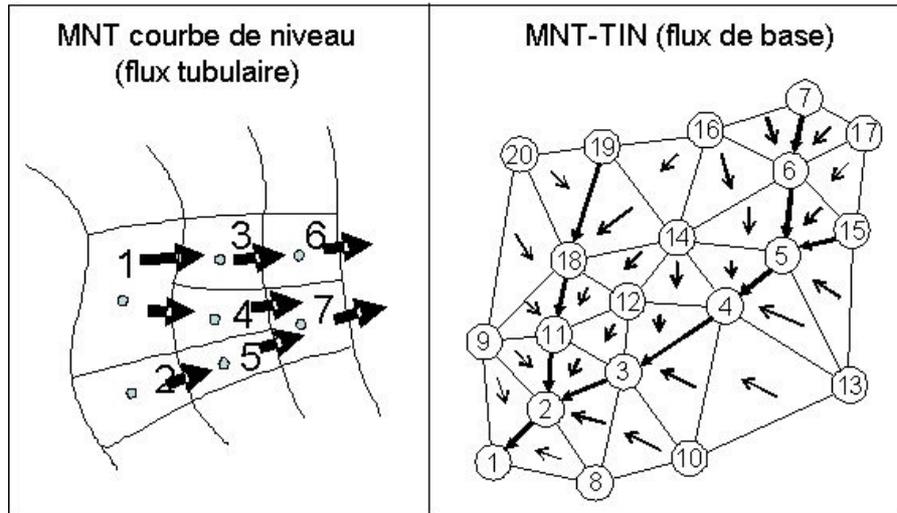


Figure A.11 - Représentation de flux d'écoulement dans des MNT en format de courbes de niveau et TIN (Seibert et McGlynn, 2007).

La simulation spatiale et la distribution statistique de l'indice topographique s'avèrent significativement différents pour différentes procédures de calcul et des tailles de pixel. Quinn et al. (1995) ont souligné l'importance de l'interaction entre la surface drainée en amont et la définition analytique du réseau de thalwegs dans le calcul de l'indice topographique. Les résultats montrent qu'un seuil critique « optimal » de surface drainée en amont doit se fixer afin de bien placer les têtes de thalwegs dans le MNT. Ce seuil s'est avéré dépendant de la taille du pixel du MNT, impliquant que le paramétrage « optimal » de TOPMODEL dépend de la taille de pixel utilisée dans l'application.

A1.3 Courbure

La courbure d'un plan identifie les zones où l'écoulement de matières dans la surface est convergent ou divergeant (profil transversal au plan du versant), alors que la courbure d'un profil longitudinal au plan du versant distingue l'accélération ou le ralentissement de l'écoulement (Etzelmüller, 2000) (figure A.12). Ces courbures spécifient si le terrain est convexe, plat, ou concave dans la section correspondante (Van Kreveld, 1997).

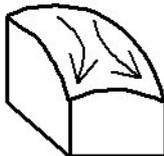
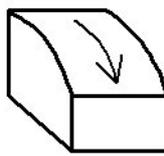
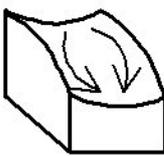
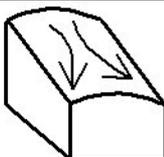
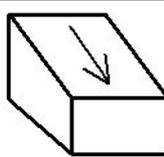
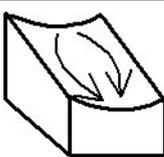
<i>courbure</i>			plan		
	<i>flux</i>		divergente		convergente
		<i>forme</i>	convexe	droit	concave
profil	accélération	convexe			
		droit			
	désaccélération	concave			

Figure A.12 - Représentation des courbures de plan et de profil (d'après Garg & Harrison, 1990).

La combinaison des deux courbures aide à la reconnaissance de formes de relief que peuvent favoriser la concentration de l'écoulement superficiel à une vitesse importante ou le risque d'érosion hydrique par ravinement. Au même temps, la caractérisation des géoformes dans les zones montagneuses pourrait être utile dans la compréhension de processus de formation de paysages en associant la géologie superficielle (lithologie, tectonique, pendage) et son interaction avec les facteurs biotiques (végétation naturelle et utilisation de la terre) et météorologiques.

La rugosité superficielle peut-être considérée comme une variation aléatoire de l'altitude. Les paramètres qui estiment la variation statistique (Davis, 1986) d'une mesure ponctuelle dans un voisinage local autour d'un pixel (« paramètre de fenêtre ») puis sont des mesures de rugosité. L'avantage de ces mesures est leur simplicité de calcul. L'inconvénient est qu'elles donnent seulement une valeur des variations autour la moyenne statistique sans fournir des informations sur la façon avec laquelle la fréquence de ces changements se produit réellement dans la surface. Par exemple, l'écart type de la courbure est une mesure de grandeur de courbure indépendamment du signe (Evans, 1980), dont une mesure de la

fréquence de changements de la pente dans un voisinage topographique. Le facteur de rugosité (IR) présenté près (Mark, 1975) est lié à cette mesure.

Dans la description géomorphologique du relief, la longueur d'onde la plus courte (« texture », Mark, 1975) est mise en rapport avec les plus petites formes à identifier dans un MNT. La longueur d'onde la plus longue est mise en rapport avec les composants principaux du terrain, tels que les vallées ou les crêtes principales (« grain », Mark, 1975). Les différentes amplitudes associées à ces longueurs d'onde correspondent au relief.

A2. MISSIONS LIDAR TERRESTRE

Dans le tableau A.1 nous pouvons observer la liste de missions LiDAR terrestre réalisées à Draix. Les éléments descriptifs de chaque mission montrent l'évolution de la technique. Un premier essai réalisé en novembre 2006, sans repérages terrain, nous a montré la potentialité de cet appareillage pour son utilisation dans la validation des MNT drone fins. Postérieurement, nous avons effectué des essais avec repérages terrain amovible mais d'une taille non adéquate pour la distance à l'objet scanné (mai 2007). Ensuite, des scans avec repérages terrain amovible et de taille adéquate ont été achevés, pour la validation des MNT drone fins (juin 2007).

D'autres scans LiDAR terrestre ont été réalisés dans les BVRE du Moulin et du Laval, afin d'étudier les mouvements de terrain. Nous avons aussi effectué des scans pour l'analyse de précision sur une série des tôles avec de formes géométriques connues, ainsi que des scans pour l'évaluation de l'effet de la teneur en eau de la marne noire sur la performance du LiDAR terrestre.

Les essais avec le LiDAR terrestre pour l'étude de changements morphométriques de versants, par altération superficielle et érosion, ont commencé en mars 2008, mais cette fois-ci avec les repères terrain fixes. L'objectif était d'évaluer la méthode de recalage numérique des scans LiDAR terrestre diachroniques avec l'utilisation des repères de terrain fixes (boules en béton).

Nous avons sélectionné le bassin de La Roubine afin de tester cette stratégie de suivi diachronique de l'érosion en versants marneux. Dans la figure A.13 nous pouvons observer l'emplacement des repères fixes sur les crêtes de La Roubine, ainsi que les différents points de vue utilisés pour les scans LiDAR terrestre, missions 2008.

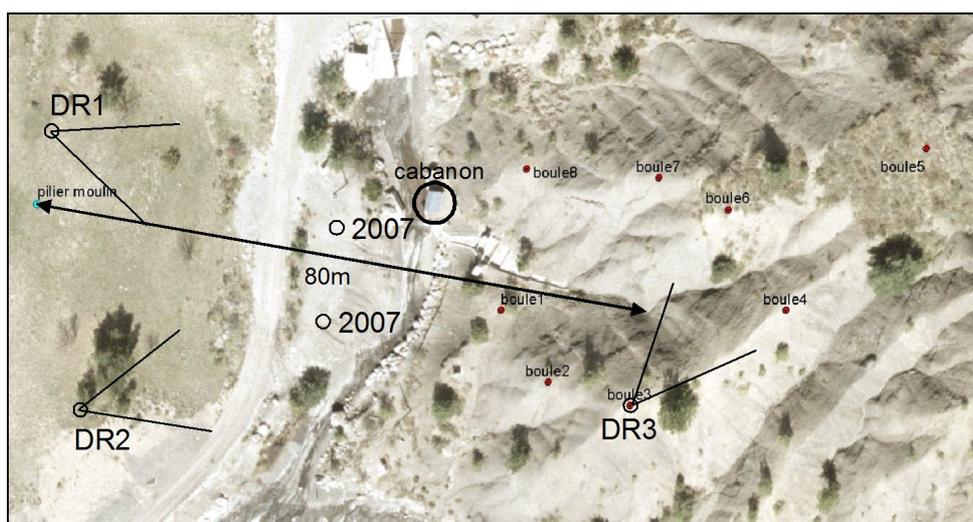


Figure A.13 - Bassin de La Roubine, avec l'emplacement des repères fixes (points rouges) et des différents points de vue utilisés pour les scans LiDAR terrestre.

Tableau A.1 - Description des missions LiDAR terrestre à Draix, pour la validation des MNT drone et pour l'étude de l'érosion fine des versants marneux.

date	zones scannées	nombre points de vue	position points de vue	système de repérage	pulsation	densité de points points/mm	équipe de terrain	zoom sur les repères	objectif du scan
2006 nov	Moulin	1	scan moulin	non	first	3/8	Université Sherbrooke	-	validation des MNT
2007 mai	Moulin	1	scan moulin	boules polystyrène (Ø 8 cm)	first	6/12,8	MTD et Université Sherbrooke	oui	validation des MNT
	Roubine	3	pilier et 2 autres scans	boules polystyrène (Ø 8 cm)	first	7/17,4 9/9,8 9/10,7		oui	validation des MNT
2007 juin	Moulin	1	scan moulin	boules polystyrène (Ø 12 cm)	first	3/6,5	MTD et Université Savoie	oui	validation des MNT
	Roubine	1	pilier	boules polystyrène (Ø 12 cm)	first	5/12,3		oui	validation des MNT
2008 mars	Roubine	3	DR1, DR2 et DR3	boules béton (Ø 12 cm)	last	7/11 10/5 7/11	MTD et Université Sherbrooke	non	analyse d'érosion
2008 juin	Roubine	3	DR1, DR2 et DR3	boules béton (Ø 12 cm)	last	6/14,3	Université Savoie	non	analyse d'érosion
					last	6/13,4			
					first	17/10,4			

MTD : Maison de la Télédétection

RÉSUMÉ

Le suivi et la compréhension de la dynamique spatio-temporelle de l'érosion par ravinement en zones de Badlands (montagnes marneuses à Draix, Alpes Françaises méridionales) ont besoin de méthodes de caractérisation détaillée, rapide et facilement reproductibles de ces phénomènes et de leurs manifestations sur le terrain. Nous avons testé deux approches d'observation spatiales afin de répondre à ces besoins : une approche aérienne à partir de la stéréophotogrammétrie d'images drone (en utilisant des appareils photos « grand public » et des méthodes de traitement informatique existant), et une approche terrestre à partir d'un scan LiDAR terrestre.

L'analyse de résultats pour l'approche aérienne montre qu'il existe trois éléments clefs dans la chaîne de traitement stéréoscopique qui permettent de surmonter les contraintes d'une telle application : la préparation de terrain (nombre et distribution des mires) ; la compensation des erreurs systématiques issues de la géométrie d'acquisition d'images (par correction de déformation de lentilles et autocalibrage) ; et la stratégie de corrélation d'image (par algorithme multi-résolution et normalisation du relief). Une combinaison adéquate de ces trois éléments nous a permis d'obtenir une précision, un détail et une cohérence hydrographique des MNT drone à la limite de la donnée (résolution d'image originale au sol autour de 3 cm, erreur moyenne en Z de 5 cm). Par rapport à l'approche terrestre, l'analyse du bruit de la mesure LiDAR sur tôles avec des formes géométriques connues nous montre une dispersion autour d'un centimètre pour une distance de mesure de 30 mètres. L'application d'une moyenne simple à un pas régulier d'un centimètre permet de réduire le bruit et aussi de recréer les formes de plus de 3 cm. Pour les formes géométriques plus petites, la dispersion des données est tellement importante qu'il n'est pas possible de les détecter.

Le rapport « avantages-contraintes » entre ces deux approches est nivelé par les éléments « étendue-continuité » et « résolution-précision » des MNT résultants. L'approche aérienne produit des MNT avec une étendue et une continuité importante, tandis que l'approche terrestre produit des MNT plus précis et détaillé. Ces deux approches peuvent être considérées comme complémentaires à l'heure d'étudier les manifestations superficielles de l'érosion hydrique en montagnes marneuses. La qualité obtenue par le MNT drone sur les ravines étudiées, après application de toutes les corrections possibles, s'est révélée très proche de la qualité obtenue par les techniques LiDAR. Les résultats révèlent l'énorme potentiel du vecteur drone pour le développement des MNT peu coûteux, avec une très haute résolution spatiale, malgré de nombreuses contraintes. D'autre part, le LiDAR terrestre se révèle comme un système de lever de terrain permettant une rapidité et une répétitivité de mesure, ainsi qu'un niveau de détail intéressant pour le suivi des processus élémentaires d'érosion hydrique et ses manifestations sur le terrain.

Mots-clés : drones, stéréophotogrammétrie, MNT, érosion par ravinement, LiDAR, Badlands

ABSTRACT

Assessment and comprehension of gully erosion dynamics at their temporal and spatial scale in Badlands (marl's geology, south of French Alps) need fast and easy reproducible methods of characterization of these phenomena. This requires a very great flexibility in topographic data acquisition, very high temporal and spatial resolution, an easy to use methodology, and low costs. We tested two approaches of spatial observation in order to accomplish this goal: an aerial approach by stereophotogrammetry from unmanned aerial vehicle (UAV or drone) images, using non metric digital frame cameras and available data processing methods; and a terrestrial approach by ground laser scanner.

Results for the aerial approach shows that there are three key elements in the stereoscopic data processing sequence which make it possible to overcome the constraints of such application: ground preparation (number and distribution of ground control points); systematic errors compensation resulting from image acquisition geometry (by correction for lens distortions and self-calibrating methods); and an image matching strategy (by multi-resolution and relief regularization algorithms). An adequate combination of these three elements enabled us to obtain a drone DTM with resolution, accuracy, and hydrologic coherence within the limit of the data (average image ground resolution 3 cm, average error in Z of 5 cm). In regard to the terrestrial approach, results of LiDAR measurement test on different geometric surfaces show that the noise is of one centimetre from a measure distance of 30 meters. The application of a simple average filter in a regular grid of 1 centimetre makes it possible to reduce the noise and also to recreate geometric forms of more than 3 cm large. For the smaller geometrical forms, the dispersion of the data is so important that it is not possible to detect them, and after application of noise filter the detail is lost.

The "advantage-constraints" ratio between these two approaches is levelled by the aspects "extent-continuity" and "resolution-precision" of the resulting DTM. The aerial approach produces DTM with better extent and continuity, while the terrestrial approach produces more precise and detailed DTM. There is a strong potential for the complementary use of these two approaches in the assessment and comprehension of gully erosion dynamics in marly mountains. The quality obtained by drone DTM on the gullies studied, after application of all the possible corrections, appeared very close to the quality obtained by ground LiDAR techniques. These results reveal the enormous potential of drone images for the development of inexpensive DTM, with a very high spatial resolution, in spite of many constraints. In addition, ground LiDAR arises as an interesting topographic surveying system for the monitoring of elementary processes of gully erosion, allowing for very detailed measurements in space and time.

Key words: UAV, stereophotogrammetry, DTM, gully erosion, LiDAR, Badlands