



**HAL**  
open science

# Analyse multiéchelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol

Albéric Leclerc

► **To cite this version:**

Albéric Leclerc. Analyse multiéchelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01338846

**HAL Id: dumas-01338846**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01338846v1>**

Submitted on 29 Jun 2016

**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.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**Spécialité : Géomètre et Topographe**

**par**

**LECLERC Albéric**

---

Analyse multiéchelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol

**Soutenu le 16 décembre 2015**

---

**JURY**

**PRÉSIDENT :** Monsieur Jérôme VERDUN

**MEMBRES :** Monsieur Philippe LABAZUY, maître de stage  
Monsieur Laurent POLIDORI, professeur référent



## Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier Monsieur LABAZUY Philippe, mon maitre de stage, mais également directeur adjoint de l'OPGC et responsable du Pôle de Télédétection des Volcans au LMV et à l'OPGC, pour m'avoir accueilli au sein de sa division, et m'avoir beaucoup aidé et soutenu durant toute la durée de mon stage. Je tiens surtout à le remercier pour sa patience et sa compréhension quand j'ai eu des soucis de santé qui m'ont forcé à faire un arrêt de deux mois en fin de stage.

Je tiens à remercier toutes les personnes avec qui j'ai été amené à travailler, Monsieur SOURIOT Thierry, présent à toutes les missions d'acquisition, et qui m'a beaucoup aidé sur la manipulation des instruments et logiciels, et qui m'a conseillé beaucoup de sites à visiter dans la région de l'Auvergne qui m'était inconnue jusqu'alors ; monsieur BOIVIN Pierre, vulcanologue travaillant au LMV qui m'a appris beaucoup de chose sur les volcans du projet TELEPATH et qui m'a informé en détail sur le contexte de l'étude ; monsieur VAUTIER Franck, qui m'a remis à niveau en photogrammétrie et avec qui nous avons manipulé un scanner 3D ; monsieur GRUFFAT Stéphane, fondateur de l'entreprise TechniVue, avec qui j'ai eu l'occasion de voir pour la première fois un levé photogramétrique par drone et enfin Monsieur THOURET Jean-Claude pour m'avoir donné accès à une station de calcul et permis de travailler sur des images Pléiades.

Mes remerciements s'adressent également à toute ma famille et mes amis, particulièrement DEHODENT Kévin, qui a lui-même fait son travail de fin d'études à Clermont-Ferrand, et qui m'a beaucoup changé les idées quand ça n'allait pas et qui m'a soutenu quand ça allait. Je tiens également à remercier mes 8 colocataires que j'ai rencontrés là-bas, qui m'ont fait vivre une expérience incroyable et qui m'ont aidé à la correction du rapport.

Pour terminer je remercie l'ensemble du corps enseignant de l'ESGT ainsi que l'EBTP, pour m'avoir fourni les bases pour mener à bien ce TFE, et qui m'ont donné le goût de la topographie. Mes remerciements s'adressent plus particulièrement à Monsieur POLIDORI Laurent et à Madame SIMONETTO Élisabeth, qui ont su orienter mes recherches et répondre avec précision à mes questions.

## Liste des abréviations

### -C-

**CNES** : Centre National d'Études Spatiales  
**CRAIG** : Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique

### -G-

**GCP**: Ground Control Point

### -I-

**InEE** : Institut Écologie et Environnement  
**IGN** : Institut Géographique National

### -L-

**LiDAR**: Light Detection And Ranging  
**LMV** : Laboratoire Magmas et Volcans

### -M-

**MicMac** : Multi-image correspondances, Méthodes automatiques de corrélation  
**MNH** : Modèle Numérique de Hauteur  
**MNS** : Modèle Numérique de Surface  
**MNT** : Modèle Numérique de Terrain  
**MSH** : Maison des Sciences de l'Homme

### -O-

**OPGC** : Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand

### -T-

**TFE** : Travail de Fin d'Études  
**TIN**: Triangulated Irregular Network

### -W-

**WFS**: Web Feature Service  
**WMS**: Web Map Service

## Glossaire

**Aérotriangulation** : ensemble des méthodes permettant de géoréférencer toutes les images d'un bloc pour lequel on dispose d'un nombre réduit de points d'appui

**Couze** : nom générique des cours d'eau dans le Puy-de-Dôme

**Éruption limnique** : type d'éruption au cours de laquelle le dioxyde de carbone accumulé sort soudainement d'un lac dont les eaux de surface et de profondeur se mélangent périodiquement (une fois par an, par décennie, par siècle, voire plus). Ce type de lac est appelé lac méromictique.

**Géoréférencement** : s'applique à des images numériques, appelées raster. Son but est d'affecter une référence spatiale, dans une projection géographique donnée, à une image qui n'en a pas.

**Image panchromatique** : image obtenue à partir de l'enregistrement du rayonnement dans un unique intervalle de longueur d'onde situé dans le domaine du visible (entre 0,4 et 0,7 m). Représentation en niveaux de gris.

**Maar** : cratère d'explosion en forme de cuvette large de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, entouré d'un anneau de projections volcaniques. Souvent, ces cratères sont occupés par des lacs.

**Orbite héliosynchrone** : désigne une orbite géocentrique (autour de la Terre) dont on choisit l'altitude et l'inclinaison de façon à ce que l'angle entre le plan d'orbite et la direction du soleil demeure à peu près constant. Un satellite placé sur une telle orbite repasse au-dessus d'un point donné de la surface terrestre à la même heure solaire locale.

**Point d'appui** : point connu en coordonnées terrain et identifiable sur les images. (GCP)

**Point de liaison** : point non connu en coordonnées terrain, mesurable sur plusieurs images et utilisé pour les calculs de géoréférencement.

**Stéréoscopie** : ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images plane.

<b>Table des matières</b>
---------------------------

Remerciements .....	3
Liste des abréviations .....	4
Glossaire.....	5
Table des matières .....	6
Introduction .....	9
1. Présentation du projet TELEPATH (TELEdéttection et Photogrammétrie Appliquées à la Terre et aux Hommes) .....	11
1.1. Le projet .....	11
1.1.1. Principaux enjeux méthodologiques et techniques du projet .....	11
1.1.2. La zone d'étude .....	11
1.1.3. Domaines d'application et principaux livrables .....	12
1.1.3.1. Thème 1 : Géomorphologie des Monts Dore .....	12
1.1.3.2. Thème 2 : Aléas associés au maar du Lac Pavin .....	12
1.1.3.3. Thème 3 : Géoarchéologie en Monts Dore et Nord Cézallier .....	12
1.2. Les acteurs.....	13
1.2.1. Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) .....	14
1.2.2. GEOLAB.....	14
1.2.3. IntelEspace .....	14
1.2.4. Recherche et développement.....	14
1.2.4.1. TechniVue .....	14
1.2.4.2. Altran Ouest.....	15
2. La représentation du relief : les MNT .....	16
2.1. Qu'est-ce qu'un MNT ?.....	16
2.2. Mode de production des modèles numériques de terrain .....	16
2.2.1. Les différentes plateformes d'acquisition de données.....	16
2.2.1.1. Par levé terrestre .....	17
2.2.1.1.1. GPS.....	17
2.2.1.1.2. Tachéomètre .....	17
2.2.1.1.3. Scanner 3D .....	17
2.2.1.2. Par levé aérien et satellitaire.....	18
2.2.1.2.1. Photogrammétrie aérienne.....	18
2.2.1.2.2. Photogrammétrie par satellite.....	19
2.2.1.2.3. LiDAR .....	20

2.2.1.2.4.	RADAR .....	21
2.2.2.	Tableau récapitulatif .....	22
2.2.3.	Formats et modes de représentation des MNT .....	22
2.2.3.1.	Le raster .....	23
2.2.3.2.	Le vecteur .....	23
3.	Jeux de données et dispositifs d’acquisition du projet TELEPATH .....	24
3.1.	Imagerie tri-stéréo : satellite Pléiades.....	24
3.1.1.	Présentation .....	24
3.1.2.	Acquisition .....	25
3.2.	Choix du logiciel .....	25
3.3.	Les dispositifs d’acquisition par drones .....	26
3.3.1.	Présentation des drones (société Technivue).....	26
3.3.2.	Présentation technique de la mission drone.....	27
3.3.3.	Travail préalable : calcul du nombre de GCP et positionnement. ....	28
3.3.3.1.	Calcul du nombre de GCP .....	28
3.3.4.	Acquisition des coordonnées précises des GPC .....	30
3.3.5.	Post-traitement des données .....	32
3.3.6.	Résultats .....	33
3.4.	Photographies aériennes (acquisition IGN, 2013).....	34
3.4.1.	Acquisition .....	34
3.4.2.	Traitement .....	36
3.4.3.	Résultat .....	36
3.5.	Levé scanner 3D.....	37
3.5.1.	Présentation .....	37
3.5.2.	Présentation de la mission Scanner 3D.....	38
3.5.3.	Travail préalable : le choix des zones à lever .....	38
3.5.4.	L'acquisition .....	39
3.5.5.	Traitement des nuages de points.....	40
4.	Comparaison et Analyse des résultats .....	42
4.1.	Étude et comparaison des Modèles Numériques de Terrain .....	42
4.1.1.	Comparaison des MNT produits par MicMac et Agisoft Photoscan.....	42
4.1.1.1.	Résultat MicMac .....	42
4.1.1.2.	Comparaison des résultats .....	43
4.1.1.2.1.	Qualité des modèles.....	43
4.1.1.2.2.	Résidus entre GCP et modèles.....	44



4.1.1.2.3. Écarts entre les deux modèles.....	47
4.1.1.2.4. Conclusion générale .....	49
4.1.2. Comparaison du MNT drone et du MNT Avion .....	50
4.1.2.1. Qualité des modèles.....	50
4.1.2.2. Comparaison des modèles avec les GCP.....	53
4.1.2.3. Écart en Z des deux modèles. ....	55
4.1.3. Comparaison des modèles avec le scanner.....	56
4.2. Comparaison des facteurs temps et financier .....	58
4.2.1. Facteur temps .....	58
4.2.2. Facteur financier.....	60
4.3. Conclusion.....	60
Bibliographie.....	62
Table des Annexes.....	65
Table des illustrations.....	112
Liste des tableaux .....	114
Synthèse .....	115
Abstract .....	115

## Introduction

Dès l'antiquité, les hommes ont cherché à représenter leur territoire. Le plus ancien témoignage de cartographie date de 2200 ans avant Jésus Christ. On a retrouvé près de Kirkouz, en Mésopotamie, un fragment de tablette d'argile où sont identifiées des formes de cartographie. Plus de 1500 ans plus tard, pendant la Grèce antique, les savants grecs se sont beaucoup interrogés sur la représentation de la Terre. Pendant près de 8 siècles, ils vont chercher à mesurer et à identifier la forme de la Terre, à l'image d'Eratosthène qui a réussi à estimer la circonférence de la planète à moins de 600 km de la réalité. Il a pu faire une telle estimation grâce aux ombres portées par le soleil sur un bout de bois à deux endroits différents et à la même heure pendant le solstice d'été. Depuis, les techniques de mesure ont grandement évolué et l'une des techniques utilisées pour représenter la terre est la photogrammétrie.

En 1849, un officier de l'armée française, Aimé Laussedat (1819-1907), a eu l'idée d'utiliser des photographies, non seulement pour observer, mais aussi pour mesurer l'Hôtel des Invalides à l'aide de couples stéréoscopiques pris du sol. C'est à ce moment-là que la photogrammétrie a vu le jour. Plus tard, en 1858, Gaspard-Félix Tournachon, plus connu sous le nom de Nadar, a réalisé la première photographie aérienne de Paris, où il survola à 80 mètres de hauteur le Petit-Bicêtre (actuellement appelé Petit-Clamart) à bord d'un ballon. Trente ans après cet exploit, Arthus Batut a réalisé des photographies aériennes par cerf-volant, malheureusement non exploitées pour la photogrammétrie car sur les représentations du terrain provenant de ces photos, il manquait la composante verticale, l'altitude. Il était, en effet, indispensable de trouver les bases mathématiques, les instruments, et les techniques de prise de vue pour obtenir la troisième dimension. Il faudra attendre les guerres mondiales, avec le développement de l'aviation, pour que la photographie aérienne devienne un outil important pour les militaires et que l'on commence à utiliser des couples stéréoscopiques avec des photographies prises du ciel. Enfin, en 1946 a eu le lieu le premier cliché spatial pris depuis une fusée V2 à 130 km d'altitude.

Au cours de la dernière décennie, et grâce aux avancées technologiques, la photogrammétrie aérienne a connu une grande évolution. De nombreux véhicules aériens et spatiaux se sont développés dans ce domaine, équipés de capteurs photographiques de plus en plus performants, offrant des résolutions d'images submétriques. On compte également, parmi les progrès technologiques, l'apparition des aéronefs non habités tels que les drones, mais aussi les satellites offrant des photographies ou imageries radar de haute résolution spatiale (Pléiades, Ikonos, Quickbird, etc.). Grâce à ces nouvelles technologies, la production de modèles numériques de terrain (MNT) a gagné en efficacité, en précision et en coût. Ces derniers sont utilisés pour de nombreuses applications : création de cartes en relief, tracé de profils topographiques, SIG, analyses de terrain en géomorphologie et géographie physique, etc.

L'histoire des volcans est souvent difficile à décrypter, car leur formation et leurs activités éruptives datent de plusieurs milliers à millions d'années, dans le cas des provinces volcaniques du Massif Central Français. L'étude de la morphologie d'un volcan et des formations à sa périphérie, fournit aux volcanologues beaucoup de renseignements concernant son histoire, son état, son type d'activité volcanique, sa stabilité, etc. En effet, les terrains volcaniques sont marqués par différents événements de construction et de destruction qui laissent des évidences dans la topographie. C'est

pourquoi la reconstruction tridimensionnelle du terrain et les traitements quantitatifs de la topographie sont des outils largement utilisés en volcanologie.

Le sujet de mon stage au sein du Laboratoire Magmas et Volcans consistait à analyser différents modèles numériques générés à partir de plusieurs méthodes de restitution, à partir de photographies aériennes, de jeux de photographies acquises par drone et d'images satellites haute résolution (images Pléiades) puis d'effectuer une analyse comparée de ces différentes méthodes, afin notamment d'évaluer la qualité des MNT issus de l'analyse stéréoscopique Pléiades. Ce sujet fait partie intégrante d'un projet porté par le LMV et financé par le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), qui sera présenté dans la première partie. Dans la deuxième partie, après une définition des MNT, seront présentées les différentes méthodes d'acquisition des données utilisées pour la génération des MNT. La troisième partie de ce mémoire sera consacrée à la description des données utilisées dans le cadre de ce projet de recherche, aux différents algorithmes de traitement des données pour le calcul des MNT ainsi qu'aux résultats des différents travaux d'acquisition. Enfin, en quatrième et dernière partie, une comparaison entre les différents MNT générés sera effectuée, suivie d'une conclusion où seront abordées finalement les perspectives d'amélioration des procédures d'acquisition, de traitement et de restitution des MNT.

## 1. Présentation du projet TELEPATH (TELEdtection et Photogrammétrie Appliquées à la Terre et aux Hommes)

### 1.1. Le projet

Le projet TELEPATH est un projet pluridisciplinaire en télédétection, focalisé sur l'étude des provinces volcanique du secteur des Monts Dore et du Nord Cézallier en Auvergne, qui a bénéficié d'un financement du Centre National d'Études Spatiales (CNES) en 2015.

#### 1.1.1. Principaux enjeux méthodologiques et techniques du projet

Dans ce projet, il y a trois principaux enjeux méthodologiques et techniques :

- Se doter de référentiels topographiques à haute résolution, multi-échelles (résolutions pluri-centimétriques) et multi-sources (spatiale, aérienne et sol), inter-calibrés et validés ;
- Définir et mettre en application une méthodologie d'exploitation et d'analyse des modèles calculés sur des chantiers ciblés correspondant aux thématiques de recherche des entités proposées, et transposables à d'autres sites d'étude ;
- Évaluer l'apport de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale Pléiades comparativement à celle obtenue à partir des techniques classiques (aérienne et sol).

#### 1.1.2. La zone d'étude

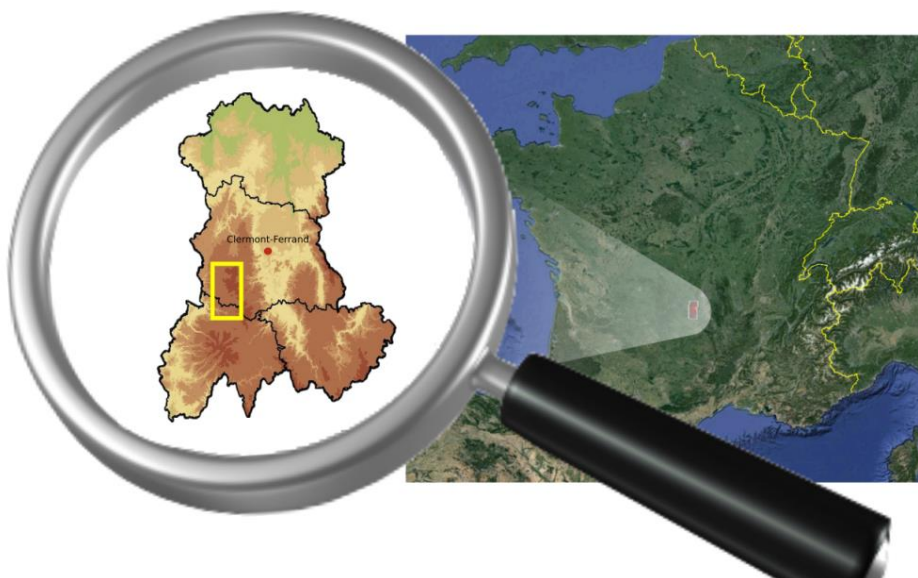


Figure 1 - Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude du projet TELEPATH est focalisée sur les secteurs des Monts Dore et du Nord Cézallier, dans le Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne. Ces secteurs ont l'avantage de représenter toutes les problématiques de recherche, ainsi qu'une bonne diversité de la topographie propre aux volcans et aussi une grande variabilité des types de structures à caractériser.

### 1.1.3. Domaines d'application et principaux livrables

#### 1.1.3.1. Thème 1 : Géomorphologie des Monts Dore

L'analyse géomorphologique quantitative des formes de relief volcaniques, des structures volcano-tectoniques et des modelés quaternaires des Monts Dore (couverture de l'imagerie Pléiades, Tableau 1 et Figure 2) est notamment dédiée à l'étude des processus de déformation et de démantèlement à grande échelle, des empreintes géomorphologiques de l'englacement pléistocène, à l'analyse du volcanisme sous-glaciaire et de l'impact du réchauffement holocène sur la morphogénèse (instabilité de versants).

#### 1.1.3.2. Thème 2 : Aléas associés au maar du Lac Pavin

Une analyse géomorphologique quantitative de détail (échelle décimétrique) des secteurs de la Plaine du Gelat et de la Couze Pavin (Tableau 1 et Figure 2) sera également réalisée, sur la base de la détection sur le terrain d'indices d'instabilités de paroi du Lac Pavin et de débordements potentiels, passés ou futurs. Grâce aux MNT haute résolution élaborés dans le cadre du projet sur ce secteur d'étude, des approches de modélisation et de simulation numériques des débordements et de la propagation des coulées de boue seront également effectuées, afin d'établir une cartographie de détail des zones potentiellement affectées.

#### 1.1.3.3. Thème 3 : Géoarchéologie en Monts Dore et Nord Cézallier

Le volet de géoarchéologie (secteurs Montchal-Pavin et Brion, Tableau 1 et Figure 2) vise à élaborer des procédures et méthodes de détection, de cartographie et de mesures des vestiges archéologiques à partir de modèles topographiques multi-échelles, couplées à une modélisation à très haute résolution (pluri-centimétrique) de sites archéologiques connus ou détectés.

Secteurs	Capteur d'acquisition	Délivrables et modèles exploités	Thématiques
Ensemble de la zone d'étude	Images Pléiades	MNS Pléiades (2 m)	Analyse globale (Thèmes 1,2 et 3)
Gelat-Pavin	Orthophotos IGN Drone / Scanner 3D	MNS IGN (50 cm – 1 m) MNS cm à pluri-cm	Analyse/modélisation (Thème 2)
Sud Montchal	Drone Scanner 3D	MNS cm à pluri-cm "	Analyse/restitution (Thème 3)
Brion	Drone Scanner 3D	MNS cm à pluri-cm "	Analyse/restitution (Thème 3)
Cézallier	Scanner 3D	MNS cm à pluri-cm	Analyse/détection (Thème 3)

Tableau 1 - Secteurs d'études, méthodes, livrables et thématiques de recherche.

Le secteur Gelat-Pavin a été sélectionné pour être la zone d'étude des comparaisons de modèle puisqu'il présente l'avantage de regrouper toutes les méthodes d'acquisition prévues dans le projet TELEPATH (cf. le Tableau 1 et la Figure 2).

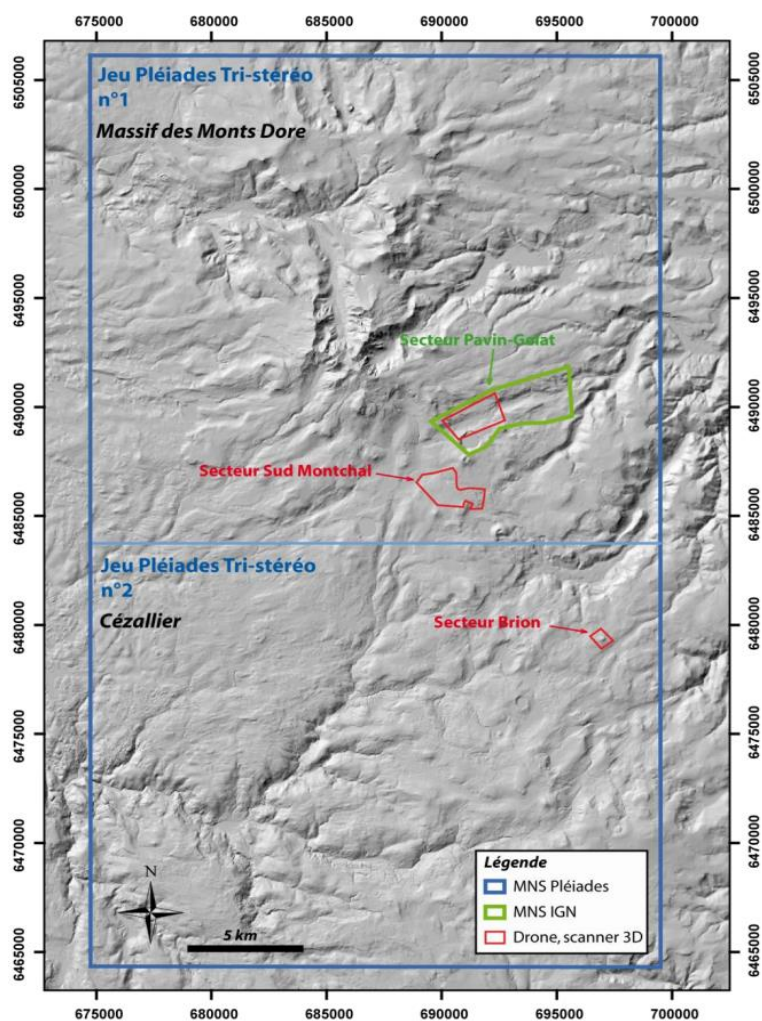


Figure 2 - Présentation de la zone d'étude et des différentes acquisitions

## 1.2. Les acteurs

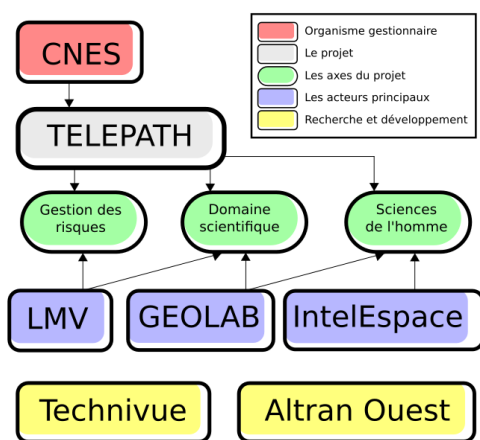


Figure 3 - Organigramme du projet TELEPATH

Le CNES (Centre National d'Études spatiales) est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), qui propose aux pouvoirs publics la politique spatiale de la France. C'est cet organisme qui assure le financement du projet TELEPATH, grâce au programme de recherche TOSCA. Ce projet implique plusieurs structures de recherches de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), le laboratoire de géographie physique GEOLAB et la Plateforme instrumentale Intelspace de la Maison des Sciences et de l'Homme (MSH). Les équipes de ces différentes structures présentent des expertises et des champs disciplinaires complémentaires, afin de répondre aux objectifs scientifiques définis dans le projet.

### **1.2.1. Laboratoire Magmas et Volcans (LMV)**

Le Laboratoire Magmas et Volcans est une unité mixte de recherche de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, du CNRS et de l'Institut de Recherche pour le Développement. Les thématiques de recherches effectuées au LMV sont focalisées sur la compréhension des processus magmatiques et volcaniques et leurs effets sur l'environnement, depuis la fusion dans le manteau terrestre jusqu'à l'éruption en surface.

Le LMV est l'un des principaux acteurs du projet TELEPATH. Tout d'abord, le LMV sera en charge de créer les MNT à partir des photos aériennes et satellitaires. Ensuite, à partir de ces MNT, les chercheurs du laboratoire auront comme tâche, en partenariat avec GEOLAB, d'analyser la géomorphologie des Monts Dore. Enfin, les aléas associés au maar du Lac Pavin relèveront aussi de la compétence du LMV.

### **1.2.2. GEOLAB**

Le Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale (GEOLAB) fait partie de l'INstitut Écologie et Environnement du CNRS (INEE), au sein de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand. Les chercheurs et enseignants-chercheurs de GEOLAB travaillent essentiellement sur les interactions entre les sociétés et l'environnement, notamment sur l'étude des processus géomorphologiques et biogéomorphologiques des systèmes naturels impactés par les activités humaines.

GEOLAB est lui aussi l'un des acteurs principaux du projet TELEPATH. En plus des recherches sur la géomorphologie des formes de relief volcanique des Monts Dore avec le LMV, GEOLAB sera en charge avec la plateforme IntelEspace du volet géoarchéologie dans la zone des Monts-Dore et du Nord Cézallier.

### **1.2.3. IntelEspace**

IntelEspace (pour intelligence de la donnée spatiale) est une plateforme instrumentale de la MSH (Maison des Sciences de l'Homme) dédiée aux SIG, à la photogrammétrie, à l'analyse des levés LiDAR, et à la cartographie. Cette plateforme apporte également un soutien technique et thématique sur les principales étapes de la recherche à dominante spatiale : l'acquisition, le traitement, l'analyse des données spatiales.

L'équipe de la plateforme IntelEspace a pour objectif principal d'étudier les sites de géoarchéologie dans la zone des Monts-Dore et du Nord Cézallier, en collaboration avec les chercheurs de GEOLAB.

### **1.2.4. Recherche et développement**

#### **1.2.4.1. TechniVue**

TechniVue est une société de prise de vues aériennes par drones. Elle propose de nombreux services dédiés à l'imagerie, allant de la simple prise de vue photographique pour illustrer un site internet, à l'analyse des espaces naturels, en combinant vues aériennes, photogrammétrie et imagerie infrarouge. La société a été sollicitée par le LMV afin de réaliser les prises de vues aériennes par drones du secteur Pavin-Gelat, pour une restitution photogramétrique de la topographie.

#### 1.2.4.2. Altran Ouest

Altran Ouest est un partenaire majeur des secteurs de l'industrie, des télécoms, des systèmes d'informations, etc. Sur les activités de système d'information, Altran bénéficie d'un savoir-faire particulier en assistance à maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage, notamment en ingénierie logicielle. Pour le projet TELEPATH, la société Altran Ouest a été sollicitée par le LMV afin de réaliser, grâce au logiciel MicMac, un modèle numérique de terrain par photogrammétrie.



## 2. La représentation du relief : les MNT

### 2.1. Qu'est-ce qu'un MNT ?

Un modèle numérique de terrain (MNT) est un ensemble de points définis en planimétrie et en altimétrie modélisant le relief du terrain naturel, en format numérique. A partir de cette représentation numérique de la topographie, de nombreux calculs peuvent être effectués, grâce à des logiciels dédiés, afin de décrire quantitativement la morphologie (cartes des pentes et de variations de pentes, cartes d'exposition, de drainage, etc.). Ne nombreux modes représentations des MNT, en 2 ou 3 dimensions sont également possibles afin de faire ressortir les éléments morphologiques : cartes de contours, représentations ombrées, etc. Ce type d'information topographique est utilisé par un ensemble de professions diverses et variées, comme, par exemple, les aménageurs, pour la construction de lotissement ou de grands ouvrages, les collectivités locales, les bureaux d'études, etc. Les MNT sont également très largement utilisés pour l'étude et l'analyse quantitative des objets d'étude dans de nombreuses disciplines scientifiques et pour des applications variées, en géologie, volcanologie, archéologie, géographie physique, etc.

Les données d'un modèle numérique peuvent être structurées de différentes façons : semis de points irréguliers, grille de points à maille carrée ou triangulée. L'important c'est d'avoir l'élévation de n'importe quel point du MNT grâce à une interpolation.

Il existe deux autres produits de représentation numérique des altitudes, de structure comparable aux MNT, mais qu'il ne faut pas confondre :

- Modèle Numérique de Hauteur (MNH), qui représente uniquement le sursol, c'est-à-dire la végétation et le bâti.
- Modèle Numérique de Surface (MNS), qui combine à la fois un MNT et un MNE, c'est-à-dire qu'il représente les éléments du sol et les éléments du sursol.

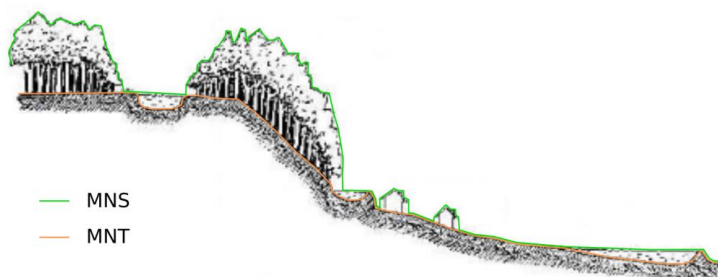


Figure 4 - Schéma montrant la différence entre MNT et MNS

### 2.2. Mode de production des modèles numériques de terrain

#### 2.2.1. Les différentes plateformes d'acquisition de données

Les différentes méthodes et dispositifs d'acquisition permettant la génération de MNT seront brièvement présentés dans ce paragraphe. Les méthodes spécifiques utilisées dans le cadre du projet TELPATH seront expliquées plus en détail dans le paragraphe 3, p.24.

## 2.2.1.1. Par levé terrestre

## 2.2.1.1.1. GPS

La méthode de levé avec un GPS pour la création d'un MNT consiste à quadriller une zone, en répartissant les points à lever soit de manière régulière (en prenant un point tous les cinq mètres, par exemple), soit de manière irrégulière, c'est-à-dire en levant précisément les éléments de relief caractéristiques.

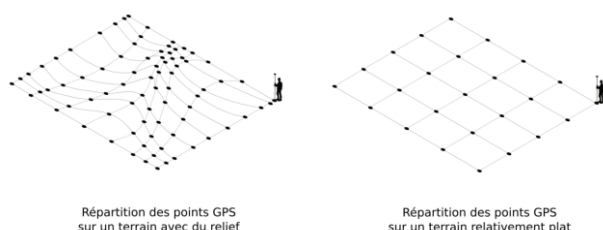


Figure 5 - Répartition des points GPS

Le principe de levé par GPS est très contraignant, en raison du temps d'acquisition nécessaire sur chaque point mesuré (tout dépend de la méthode employée et de la distance avec la base) afin d'obtenir un positionnement précis (allant de moins de 2cm en statique à 5cm en cinématique). De plus, avec cette méthode, seule une petite zone peut être couverte. Cette technique est très peu utilisée et ne concerne que des cas spécifiques d'étude sur des sites particuliers, comme le suivi de l'évolution du lit d'une rivière ou le suivi de stabilité de talus. La précision du MNT va dépendre du semis de points, de sa répartition et de la méthode employée pour lever les points (RTK, NRTK, PPK, ...).

## 2.2.1.1.2. Tachéomètre

La méthode de levé par tachéomètre est similaire à la méthode GPS. L'avantage d'utiliser celle-ci est qu'elle est plus rapide à mettre en œuvre (quelques secondes par point) et ne nécessite pas l'installation d'une base. De plus, utiliser un tachéomètre pour réaliser un MNT peut se révéler être une bonne stratégie en présence de masques (végétation ou bâtiment) qui rendraient impossible ou inapproprié l'utilisation de GPS ou de photos aériennes. Cependant, cette technique nécessite au moins trois points connus en coordonnées, à proximité de la zone (bornes ou repères de coordonnées (x, y, z) connues).

## 2.2.1.1.3. Scanner 3D

Pour faire un MNT avec un scanner 3D, il est indispensable que le nuage de points issu du levé soit géoréférencé. Pour cela, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, par exemple mettre des cibles Black & White, bien visibles depuis la position du scanner, sur une surface verticale (arbre, bâtiment, clôture, etc.) et déterminer leurs positions à l'aide d'un tachéomètre, afin de pouvoir renseigner leurs coordonnées dans le nuage de points et ainsi géoréférencer ce dernier.

Le levé par laser-scanner 3D présente l'avantage d'être très précis et rapide. En effet, un appareil classique permet de relever plus de 1000 points par m<sup>2</sup> jusqu'à 300 mètres de distance, ce qui produit un maillage très fin et précis. En contrepartie, cette méthode d'acquisition présente des inconvénients, et pas des moindres, car le post-traitement du nuage de points peut s'avérer très long et fastidieux, car il faut le nettoyer des artefacts et éléments du sursol, etc. De plus, cette technique se

révèle très onéreuse, car il est nécessaire de disposer d'un scanner, d'un tachéomètre et d'un GPS s'il n'existe pas de point de coordonnées connues à proximité (environ 100 000€ de matériel et licence).

### 2.2.1.2. Par levé aérien et satellitaire

La photogrammétrie aérienne ou spatiale consiste à prendre, des images de la surface de la Terre à l'aide d'une caméra embarquée sur une plateforme aéroportée (avion, drone, etc.) ou sur un satellite. En plus de la photogrammétrie, il existe d'autres techniques d'acquisition depuis le ciel, comme la lasergrammétrie et la radargrammétrie.

#### 2.2.1.2.1. Photogrammétrie aérienne

La photogrammétrie aérienne est de loin la méthode la plus utilisée pour générer des MNT, son coût étant relativement peu élevé. La méthodologie de cette technique d'acquisition, quelle que soit la plateforme aéroportée (avion, drone, ULM, etc.), suit le même schéma. Le véhicule embarquant l'appareil photo, doit effectuer un plan de vol précisément défini à l'avance, en fonction des paramètres caméra, des paramètres météorologiques, de la précision attendue et de la dimension de la zone. L'avion (ou le drone) doit effectuer un balayage de la zone d'un seul tenant en formant plusieurs axes de vol parallèles entre eux et en gardant la même altitude pendant toute la phase d'acquisition. Tout le long du vol, la caméra embarquée prend des photographies du sol à une cadence telle que deux images successives aient une partie commune (recouvrement longitudinal) qui varie entre 60 et 80%. Il faut aussi prévoir lors de l'élaboration du plan de vol, la trajectoire des axes pour qu'il y ait un recouvrement inter-bandes, ou latéral, compris entre 20 et 40%.

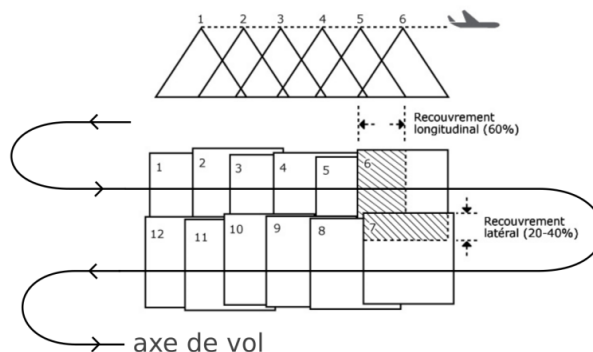


Figure 6 - Principe de la prise de vue aérienne (source: <http://www.photographeprofessionnel.ovh>)

Il est très important de bien respecter le recouvrement, c'est sur ce principe que se base la photogrammétrie aérienne. En effet, pour retrouver une sensation de relief, il faut qu'au moins deux images voient le même objet avec des points de vue parallèles, mais décalés suivant un axe perpendiculaire à l'axe optique (comme pour la vision humaine). Ces images forment ce que l'on appelle un couple stéréoscopique.

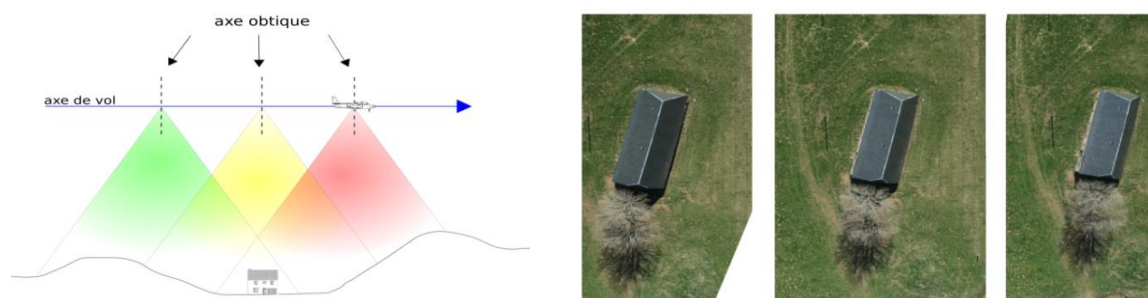


Figure 7 - principe de la stéréoscopie

La photogrammétrie par avion est une bonne technique adaptée pour la création d'un MNT de moyenne et grande envergures. La qualité du MNT résultant dépend de la résolution spatiale des images, dépendante de la hauteur de vol (plus l'avion est bas, plus grande est la précision) et de la résolution du capteur. Il s'agit du secteur d'activité le plus utilisé en photogrammétrie, même si l'utilisation d'autres aéronefs (ULM, drones, etc.) et des satellites devient de plus en plus courante.

La mise en œuvre de l'acquisition de photographies par drone identique à la technique de photogrammétrie par avion, mais n'est pas utilisée pour les mêmes finalités. Contrairement à l'avion qui peut atteindre une hauteur de 5000 mètres d'altitude (hauteur maximum pour un avion non pressurisé), le drone ne peut excéder une hauteur de vol de 150 mètres, en raison de la réglementation en vigueur (voir annexe 7). Cette contrainte limite donc l'emprise des photographies réalisées par drone. Utiliser un tel appareil peut toutefois se révéler plus intéressant qu'un avion, si la zone à étudier est petite et bien dégagée.

#### 2.2.1.2.2. Photogrammétrie par satellite

Depuis une cinquantaine d'années, les satellites fournissent des images à différentes résolutions soit en prenant une image du paysage avec une matrice de détecteurs soit à partir de capteurs à barrettes balayant la surface de la Terre (le push-broom). L'image n'est pas acquise instantanément comme avec la matrice, elle se forme au fur et à mesure que le balayage progresse, pour cela il faut que le satellite avance le long de sa trajectoire.

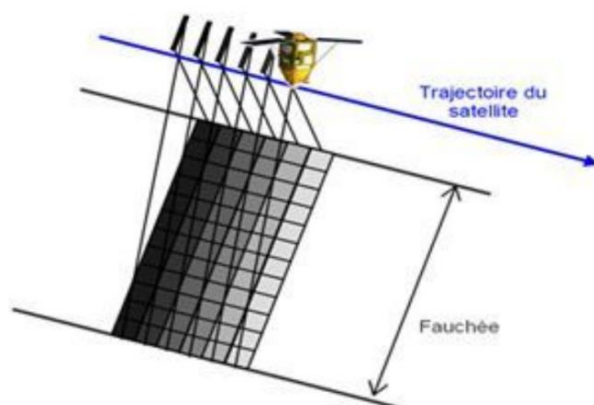


Figure 8 - Balayage du satellite (source: Centre canadien de la télédétection)

La création d'un MNT à partir d'images satellites implique plusieurs points de vue (principe de la stéréoscopie). Pour ce faire, il y a différents protocoles d'acquisition existents :

- Le satellite est dit « agile », c'est-à-dire qu'il est capable de pointer vers l'avant, puis vers l'arrière en changeant la direction de visée (satellites Pléiades 1A et 1B).
- Le satellite possède deux capteurs visant dans deux directions différentes, c'est le cas de SPOT 5 (un capteur vise à  $+20^\circ$  vers l'avant et un autre à  $-20^\circ$  vers l'arrière, suivant la trajectoire).
- Si le satellite ne se trouve pas dans l'un des deux cas précédents, il faut attendre que le satellite ait réalisé une révolution complète autour de la Terre, sur une trajectoire proche de la précédente et ainsi permettre un recouvrement satisfaisant des images successives.

La réalisation de MNT par la méthode spatiale est de plus en plus utilisée pour les études à grande échelle. Toutefois, cette technique n'est pas forcément adaptée aux applications en milieu urbain, pour lesquelles la résolution nécessaire est fréquemment d'une dizaine de centimètres, alors que la meilleure résolution obtenue avec les satellites est de 50 cm, comme dans le cas des images Pléiades.

#### 2.2.1.2.3. LiDAR

La technique d'acquisition par LiDAR aéroporté est comparable à celle employée pour la prise de vues aériennes. Cette méthode utilise un laser-scanner 3D qui va émettre et recevoir des impulsions à très haute fréquence. Le temps de trajet aller/retour permet de définir précisément la distance entre le sol et le capteur.

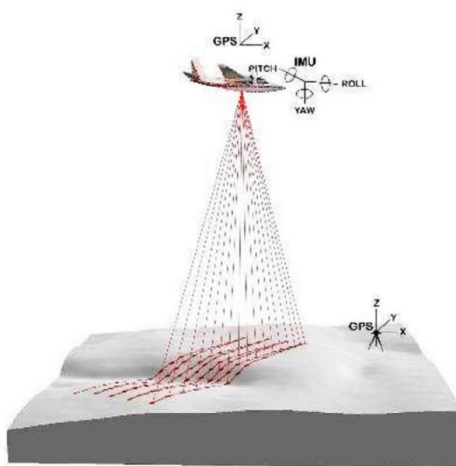


Figure 9 - Principe du LiDAR (source : USDA Forest Service)

Le LiDAR offre plusieurs avantages par rapport à la photographie. Tout d'abord, c'est la seule technique aéroportée à pouvoir détecter simultanément la surface du sol et la végétation grâce aux échos multiples du rayon laser. Dans le cas où il y a beaucoup de végétation dans la zone à lever, l'utilisation du LiDAR est un plus, puisqu'il permet d'obtenir, après filtrage des échos du sursol, le semis de points représentatifs du sol, contrairement à la photographie qui va imager principalement la canopée et les feuillages, qui masquent le terrain naturel. Un autre point fort de cette technique est que l'acquisition des données peut se faire de jour comme de nuit, même par temps nuageux, les mesures étant indépendantes de la luminosité.

## 2.2.1.2.4. RADAR

L'acquisition de données par RADAR (Radio Detection And Ranging) peut se faire, soit à partir de plateformes aéroportées, soit à partir de satellites. L'émetteur du RADAR envoie de courtes impulsions d'hyperfréquence à pas régulier en formant un angle avec l'horizontale. Cette succession d'impulsions est concentrée en un faisceau qui illumine latéralement la surface de la Terre. Les différents objets illuminés par le faisceau réfléchissent les impulsions, ce qui permet de déterminer la distance entre les objets et le RADAR, en mesurant le délai entre la transmission et la réception des hyperfréquences de l'antenne.

Le RSO (RADAR à Synthèse d'Ouverture) ou SAR (Synthetic Aperture Radar) permet la génération de MNT. En effet, le principe du RSO est d'utiliser de multiples sondages successifs, décalés dans le temps et à une position relative légèrement différente, ce qui a pour but de balayer de nombreuses fois une même cible et d'avoir plusieurs points de vue, selon le principe de la stéréoscopie (voir le point P de la Figure 10).

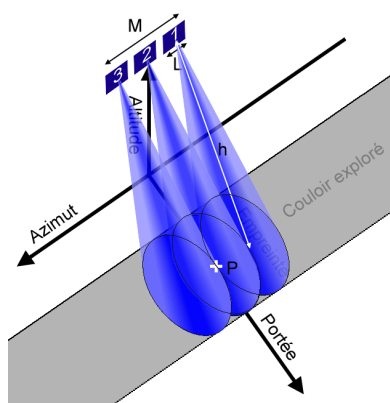


Figure 10 - Principe d'acquisition RADAR (source: Centre Canadien de Télédétection)

Cette méthode a l'avantage d'être peu coûteuse et de couvrir de grandes zones, mais présente toutefois quelques limitations. En effet, le signal du RADAR fait un angle avec l'horizontale, ce qui entraîne des distorsions du champ oblique (Figure 11) : effet de rapprochement (l'écho de la base a et l'écho b arrive au capteur dans un intervalle de temps très court, donnant une impression de rapprochement), de repliement (l'écho du sommet b arrive au capteur avant celui de la base a) et d'ombrage (du fait du point de vue oblique, certaines zones ne seront pas visibles).

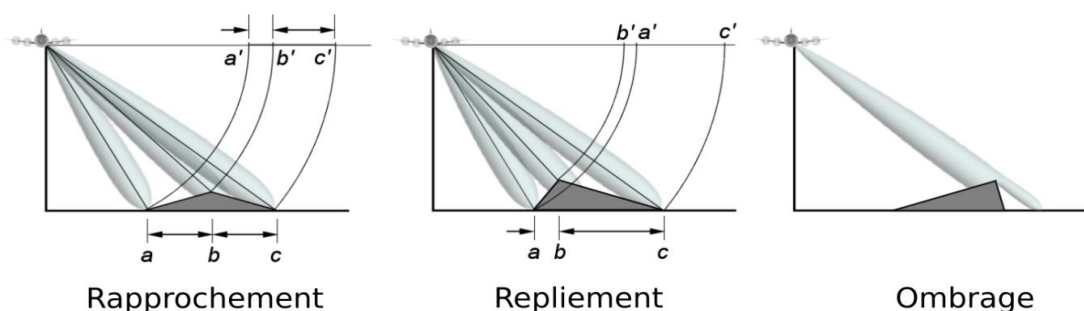


Figure 11 - Distorsion du champ oblique (Source: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu))

2.2.2. Tableau récapitulatif

	Avantages	Inconvénients	Problème lié au sursol	Précision alti / plani
<b>GPS</b>	Précision	- très long - zone dégagée - petites zones	non	50 mm alti 20 mm plani
<b>Tachéomètre</b>	Précision	- très long - petites zones - points connus à proximité	non	3 mm
<b>Scanner 3D</b>	-Précision	- temps de traitement - points connus à proximité - petites zones - masque donc beaucoup de stations - matériel lourd	non	5 mm
<b>Photogrammétrie par avion</b>	- facilement interprétable - grandes zones	- temps de traitement - travail fastidieux	oui	1 à 10m
<b>Photogrammétrie par drone</b>	- facilement interprétable	- temps de traitement - travail fastidieux - petites zones	oui	5 à 10 m en alti 1 à 3m en alti
<b>Photogrammétrie par satellite</b>	- facilement interprétable - très grandes zones	- temps de livraison des données	oui	50 cm après rééchantillonnage pour les satellites les plus précis
<b>LIDAR aéroporté</b>	- précision - vitesse d'acquisition - échos multiples - grandes zones	- très gros volume de données - long traitement - répartition inégale des points à cause du recouvrement.	non (si le sursol n'est pas trop opaque)	Tout dépend de la hauteur de vol
<b>RADAR</b>	- très grandes zones	- distorsion du champ oblique	non	2 - 4m pour le WorldDEM

Tableau 2 - Caractéristiques des différentes méthodes d'acquisition de données avec pour objectif de créer un MNT

2.2.3. Formats et modes de représentation des MNT

Parmi les nombreuses représentations possibles d'une surface 3D, deux modes sont beaucoup utilisés pour les MNT : le raster (grille de pixels) et le vecteur (points, lignes, polygones).

### 2.2.3.1. Le raster

Le MNT sous forme raster, ou matrice d'altitudes, est un maillage de pixels où chacun représente une altitude moyenne d'un élément de surface du terrain.

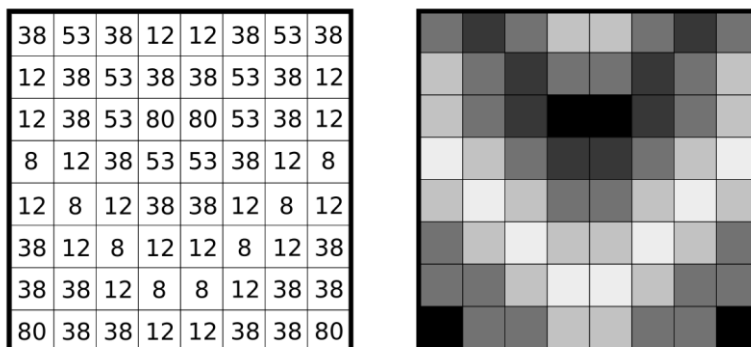


Figure 12 - Exemple d'un MNT Raster

L'inconvénient avec ce type de représentation, c'est qu'elle est trop régulière et la taille de la grille ne peut être ajustée localement. De ce fait, beaucoup de détails ne sont pas représentés quand le terrain naturel est très accidenté, comme dans une zone de fort relief, par exemple les volcans. Pour avoir un maillage précis, il faut donc une résolution très grande, c'est-à-dire que l'espacement entre le centre d'une maille et le centre de la maille voisine est court.

### 2.2.3.2. Le vecteur

Le MNT sous forme vecteur est une représentation du relief à l'aide d'un réseau de triangles irréguliers (TIN). Chaque sommet de triangles correspond à une valeur d'élévation du terrain.

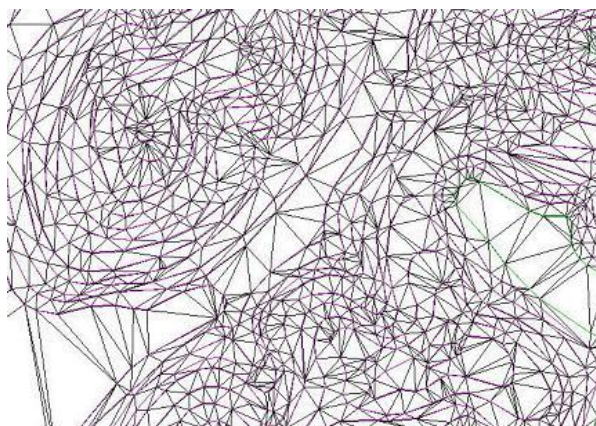


Figure 13 – MNT vecteur de type TIN (source: <http://vrlab.whu.edu.cn>)

À partir des données brutes (semis de point irrégulier) connues en coordonnées (X,Y,Z), un réseau de triangles est généré, en connectant chaque point par une ligne sur le principe du plus proche voisin. Ce réseau ne doit laisser apparaître aucun trou, c'est-à-dire que chaque côté d'un triangle doit être confondu avec le côté d'un triangle voisin, sans qu'aucun d'entre eux ne se chevauche.

L'inconvénient de cette représentation, c'est que dans la surface de chaque triangle, la pente est constante. Ce qui entraîne une discontinuité brutale de la pente entre deux triangles.



### 3. Jeux de données et dispositifs d'acquisition du projet TELEPATH

Dans le cadre du projet TELEPATH, plusieurs méthodes d'acquisition et de restitution de la topographie ont été utilisées : imagerie satellite Pléiades, photogrammétrie aérienne, par drones ou avion, et levés scanner 3D, dont les résultats seront utilisés pour valider la qualité des différents MNT produits par les méthodes de stéréo-photogrammétrie. Les principes détaillés de ces différentes méthodes seront présentés dans cette partie, notamment les modalités de mise en œuvre, l'acquisition ainsi que le traitement des données.

#### 3.1. Imagerie tri-stéréo : satellite Pléiades

##### 3.1.1. Présentation

À l'origine, Pléiades a été développé pour le programme d'observation de la terre franco-italien Orfeo (Optical and Radar Federated Earth Observation). Au sein de ce programme, l'équipe italienne était en charge de la composante radar, avec les satellites Cosmo-SkyMed (quatre satellites capables de fournir des images radar à très haute définition). La collaboration française était en charge de la composante optique, avec les satellites Pléiades (deux satellites capables de fournir des images à haute résolution). Le système Pléiades a été développé par le Centre National d'Études Spatiales (CNES). Il a été financé en grande partie par le gouvernement français, avec la contribution d'autres pays : l'Autriche, la Belgique, l'Espagne et la Suède.

La constellation Pléiades est composée de deux satellites : Pléiades 1A lancé le 17 décembre 2011 et en service depuis début juin 2012, et Pléiades 1B lancé le 1<sup>er</sup> décembre 2012 et en service depuis avril 2013. Les deux satellites suivent la même orbite héliosynchrone, à 694 km d'altitude. Ce type d'orbite est très intéressant en photogrammétrie car le satellite repasse au-dessus d'un point donné de la surface de la terre à la même heure solaire locale, ce qui limite les différences d'éclairément et les ombres portées qui peuvent être gênantes dans le cas des prises de vue aériennes. Les passages s'effectuent toujours en fin de matinée, les satellites passent au-dessus de la France vers 10h40 TU (Temps Universel). Le cycle global du satellite est de 26 jours, c'est-à-dire qu'il repasse à la verticale d'un même lieu exactement 26 jours plus tard.

La constellation Pléiades permet l'acquisition de  $n$  couples d'images stéréoscopiques ( $n$  compris entre 2 et 25). Dans le cas du projet TELEPATH,  $n$  est égal à 3 : on parle de mode tri-stéréoscopique, avec un rapport B/H de 0.15 (la base B correspond à la distance entre deux sommets de prise de vue et H correspond à la hauteur du satellite par rapport à la Terre).

Le capteur des satellites Pléiades, sont des capteurs dits "agiles". Chacune des images produites est acquise avec des angles d'incidence et d'azimut différents. La tri-stéréoscopie permet de limiter au maximum les occlusions existant sur l'image avant et sur l'image arrière (Figure 14). L'acquisition approximativement située au Nadir est nécessaire pour assurer la stéréo et limiter au maximum les occlusions existantes sur les deux autres prises de vues.

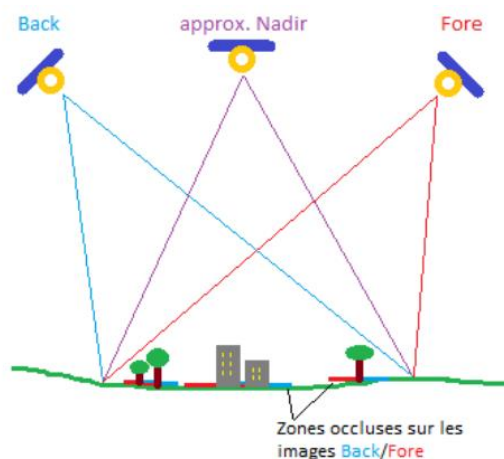


Figure 14 - Principe de la tri-stéréo

### 3.1.2. Acquisition

Lors de la prise de vue, les satellites Pléiades (connus aussi sous le nom de PHR1A et PHR1B) acquièrent en même temps une image panchromatique à 70cm de résolution spatiale et une image multispectrale (contenant 4 bandes spectrales : bleu, vert, rouge, proche infrarouge) à 2,8m de résolution spatiale. Les produits fusionnés sont ensuite rééchantillonnés à 50cm de résolution.

Les couvertures sont obtenues sous forme de bande de 20km de large et de 300km de long maximum. Elles sont orientées selon la trajectoire des satellites c'est-à-dire nord-sud géographique.

Le Laboratoire Magmas et Volcans a effectué une commande auprès du CNES d'images Pléiades de la zone d'étude, pendant la période printanière, saison favorable, la neige ayant presque totalement fondue et la végétation n'étant pas encore trop gênante. Malheureusement, à cause d'une forte demande d'images auprès du CNES la commande n'a pu aboutir. De plus, comme la zone se situe dans une chaîne de volcans, notamment le puy de Sancy (haut de 1885m), la neige a tendance à tenir pendant le printemps. La neige, mais surtout les nuages sont un réel problème pour les photographies spatiales. Ces deux phénomènes cachent des éléments du sol, et donc rend inexploitable l'endroit ciblé. Le laboratoire avait demandé un maximum de 10% de nuage et de neige sur les photographies et d'après le CNES, il n'y a pas eu les conditions requises ni au printemps, ni en été.

### 3.2. Choix du logiciel

Le logiciel choisi pour générer les MNT à l'aide des photographies aériennes (avion ou drone) est le logiciel Agisoft Photoscan. Ce logiciel est reconnu pour être très puissant, rapide, et présente une interface graphique simple à utiliser. Les logiciels MicMac (développé par l'IGN) ainsi que ERDAS Imagine Photogrammetry (développé par Leica Géosystème) étaient disponibles, mais ces deux derniers présentaient quelques désavantages comparés à Agisoft Photoscan.

Agisoft Photoscan est fréquemment utilisé pour des travaux de photogrammétrie aérienne. Ce logiciel présente l'avantage de permettre l'"alignement" automatique des photographies aériennes. Ceci signifie que le calcul des points homologues, des points de liaisons et des orientations, peut être effectué grâce à un processus automatisé avec les seules photographies. Les logiciels MicMac ainsi que ERDAS, ne possèdent pas cette option. Il est nécessaire de saisir les paramètres de calculs et de placer manuellement quelques points homologues sur chaque couple de photographies (3 minimum

pour ERDAS). Bien que la possibilité de modifier les paramètres en fonction du type de travail parait intéressante, elle n'est pas forcément adaptée aux grands jeux de données. En effet, dans le cas de l'acquisition par drone, avec près de 900 photographies à traiter (voir Tableau 4, p. 32), la recherche manuelle des points homologues est très longue et fastidieuse, surtout avec un recouvrement longitudinal entre clichés avoisinant 80%, pour un recouvrement latéral de 60%.



Le logiciel Agisoft Photoscan possède une interface intuitive, facile à prendre en main, au contraire de MicMac, qui fonctionne en lignes de commande dont la maîtrise du langage est plus délicate. Ce logiciel a été mis en œuvre par la société Altran pour l'élaboration d'un MNT avec un jeu identique de photographies acquises par drone, dans l'objectif d'effectuer une comparaison qualitative et une analyse quantitative des deux chaînes de traitement Photoscan (§ 4.1.1, p.42).

Enfin, une étude comparative de différents logiciels de traitement dédiés à la photogrammétrie aérienne, dont Agisoft Photoscan et ERDAS Imagine Photogrammetry, a été réalisée par J. Poser (2...). Les résultats de cette étude établissent la qualité des algorithmes implémentés dans Agisoft Photoscan, certaines étapes de la chaîne de traitement Agisoft Photoscan se révélant meilleures ou plus efficaces que le logiciel Imagine Photogrammetry d'ERDAS, notamment en ce qui concerne la classification des points ou la représentation de la surface topographique.

### 3.3. Les dispositifs d'acquisition par drones

#### 3.3.1. Présentation des drones (société Technivue)

Comme expliqué dans le chapitre précédent (§ 2.2.1.2.1, p. 18), le drone est une méthode d'acquisition de photographies aériennes en plein essor. De plus en plus de sociétés ou de cabinets de géomètre utilisent ce moyen pour faire de la photogrammétrie. Dans le cadre du projet TELEPATH, le Laboratoire Magmas et Volcans a fait appel à l'entreprise Technivue pour l'acquisition de prises de vue photographiques pour photographier la zone du Pavin / Gelat. Durant la mission, deux drones ont été utilisés, un dispositif multirotor (quadricoptère) et une plateforme légère à aile fixes (LA300), dont les caractéristiques techniques (ainsi que celles des caméras embarquées) sont présentées dans le tableau 3.

	Quadricopter	Drone à voilure fixe (LA300)
photo		
Poids	1.5kg à vide, 2kg avec charge max	0.7kg à vide, 1kg avec charge max
Autonomie	12 minutes	30 minutes
Mode automatique	Oui	Oui
Rayon d'action	500m	1km
Vitesse	40 km/h en manuel 20 km/h en automatique	Entre 30 et 80 km/h
Résistance au vent	50km/h	35km/h

Appareil photo embarqué	Sony NEX-5	Canon S110
Poids	269 g	198 g
Taille de l'image	4592 x 3056 pixels	4048x3048 pixels
Taille du pixel	4,8 microns	1,8 micron
Focale	24.5 mm	25 mm

Tableau 3 - présentation du matériel utilisé pour la mission drone

Le choix des appareils photo embarqué n'est pas anodin et doit être envisagé en fonction de la qualité de la matrice (nombre de pixels) mais également du poids total de l'appareil photographique. Comme rappelé dans le Tableau 3, le quadricoptère peut embarquer un poids plus important que le drone à voilure fixe, ce qui lui permet d'embarquer le Sony NEX-5, capteur d'excellente qualité technique, mais plus lourd de 30% que le Canon S110 (embarqué sur le dispositif à voilure fixe).

Du point de vue législatif, les vols de drones sont encadrés par une réglementation très stricte. D'après l'article du 11 avril 2012 (voir Annexe 7), plusieurs scénarios sont possibles, allant du S1 au S4. Le scénario utilisé par Technivue pour la mission sur la zone Pavin/Gelat est le S2+. Ce scénario permet à un drone automatisé (évolution en vol programmée avant le décollage) de voler à 150 mètres de hauteur, à une distance maximale de 1km du pilote. Cette hauteur maximale de 150 m n'est possible que pour un aéronef d'une masse totale de 2 kg maximum (catégorie D).

### 3.3.2. Présentation technique de la mission drone

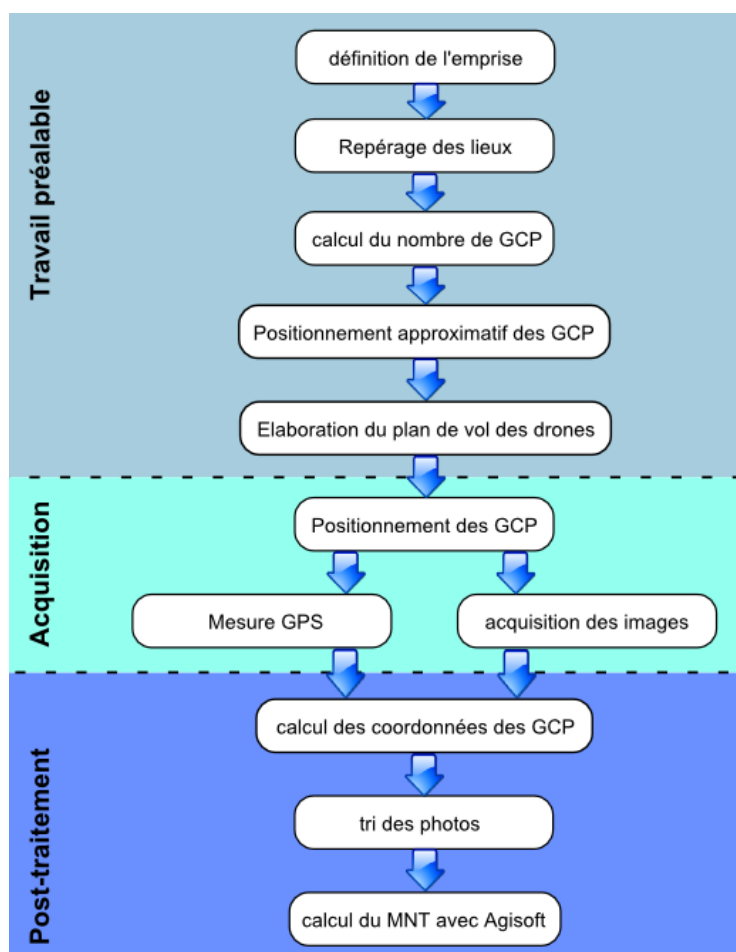


Figure 15 - Organigramme des tâches réalisées lors de la mission drone

L'ensemble des étapes méthodologiques et techniques de l'expérimentation d'acquisition de MNT à partir de la méthode de stéréophotogrammétrie aérienne par drones est synthétisée dans l'organigramme de la Figure 15 et sera détaillée dans les paragraphes suivants.

### 3.3.3. Travail préalable : calcul du nombre de GCP et positionnement.

#### 3.3.3.1. Calcul du nombre de GCP

L'étape de détermination du nombre de GCP (Ground Control Point) nécessaires pour le géoréférencement correct des images est relativement complexe. En théorie, dans le cas d'une plateforme aéroportée non équipée d'une centrale inertielle (IMU) ni d'un GPS embarqué, il est préférable d'imposer au moins un point d'appui connu en planimétrie (X,Y) tous les 5/6 couples de photographies et de définir un point altimétrique pour chaque couple. Il est cependant difficile de prévoir l'emprise exacte d'un cliché acquis par drone, notamment dans une région vallonnée. Dans le cas de cette étude, le nombre et la position des GCP ont été choisis de telle sorte qu'ils soient régulièrement répartis sur l'ensemble du site avec une plus densification en bordure. Cette densification des GCP en périphérie est indispensable, en raison du recouvrement photographique moins important sur les bordures. Ce plus faible recouvrement serait susceptible de créer de plus fortes déformations lors de la création des modèles, en l'absence de contraintes altimétriques suffisantes par les GCP. Une première sélection d'un ensemble de 40 GCP a été réalisée, mais par souci de contrôle et de redondance, 12 GCP supplémentaires ont été ajoutés, ce qui permet d'assurer une couverture complète, régulière et dense de la zone d'étude (Figure 16).

Afin de vérifier le nombre suffisant de points d'appui sélectionnés, le bilan inconnues/observation a été réalisé, suivant la méthode de l'IGN. S'il y a plus d'équations d'observations que d'inconnues, alors le bilan est équilibré et ne nécessite pas de points d'appui supplémentaires. Pour vérifier cela, il faut utiliser l'équation de colinéarité (Eq. 1) pour les points de liaison (point non connu en coordonnées terrain, mesurable sur plusieurs images et utilisé pour les calculs de géoréférencement) :

$$m_i^j = F - \frac{t_{kFR^j}(M_i-S^j)}{t_{kR^j}(M_i-S^j)} \quad (\text{Eq.1})$$

Les paramètres de l'équation sont :

- F : Sommet de la prise de vue dans le système image
- S : Sommet de la prise de vue dans le système terrain
- R : Matrice rotation du système terrain au système image
- m : Coordonnées du point dans le système image
- M : Coordonnées du point dans le système terrain
- i : Le numéro du point
- j : Le numéro de l'image où est vue le point  $M_i$  est vu

Cette équation de colinéarité est valable pour les points de liaison. Pour chaque point de liaison i, il existe 2n équations d'observations, avec n le nombre de clichés où le point est visible.

Pour les points d'appui, une autre équation est utilisée :

$$m = T \quad (\text{Eq. 2})$$

Où T représente les coordonnées terrain du point.

Grâce à ces équations, le bilan inconnues/observations peut être dressé :

- **Nombre d'équations d'observations :**

2\*nombre de points de liaisons\*nombre de clichés sur lesquels ils sont vus + 2\*nombre de GCP\* nombre de clichés sur lesquels ils sont identifiés.

- **Nombre d'inconnues :**

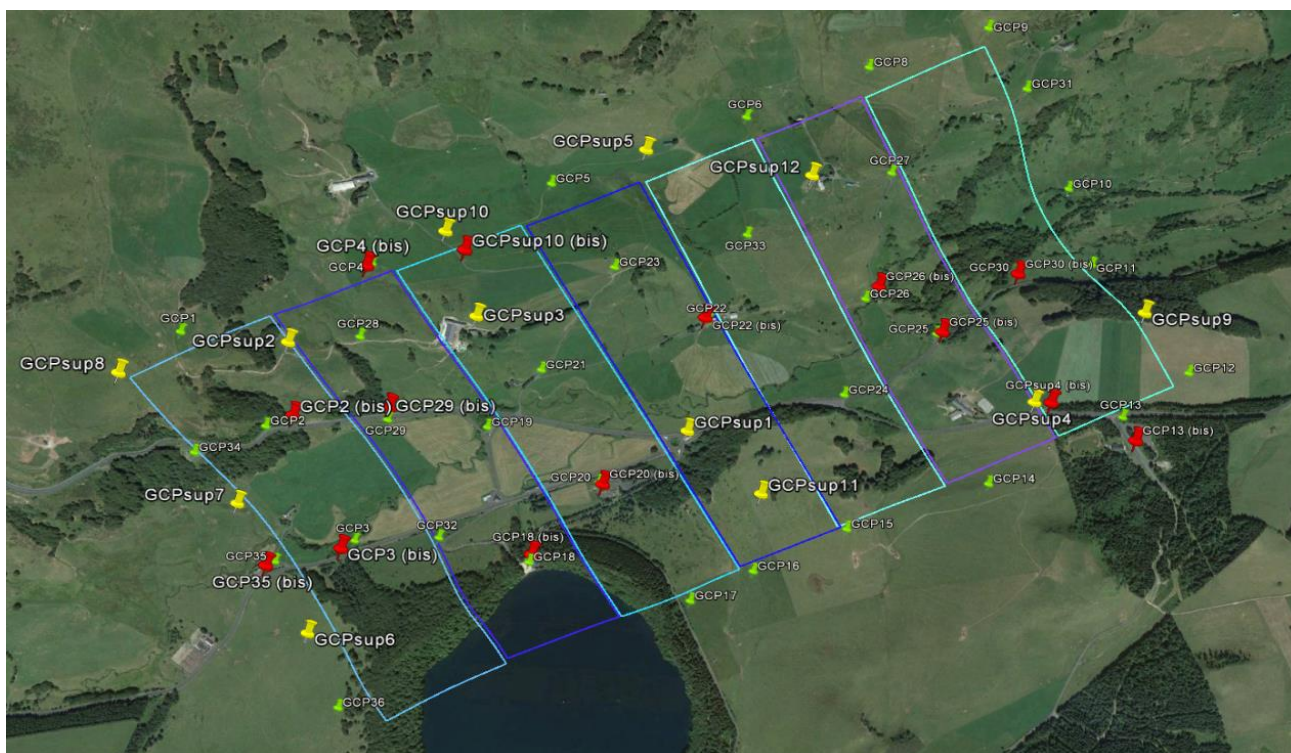
6\* nombre de clichés (paramètres externes) + 3\*nombre de points de liaisons

- **Bilan**

Nombre d'équations d'observations : 21 797 610

Nombre d'inconnues : 9 966 471

Étant donné qu'il y a beaucoup plus d'équations d'observations par rapport au nombre d'inconnues, le nombre de GCP est largement suffisant. Comme le montre la Figure 16, les GCP ont été placés ainsi afin d'avoir au moins 5 points d'appui par vol du drone.



**Figure 16 – Zone d'étude Gelat-Pavin – Localisation des zones de vol et des points de contrôle.**  
 Vols prévisionnels du drone (rectangles bleus), la position approximative initiale des GCP (points verts), les 12 GCP rajoutés pour le contrôle (points jaunes) et enfin les points rouges représentent des éléments remarquables du terrain pouvant être vue sur les clichés drone (marquage au sol, avaloirs, etc.)

### 3.3.4. Acquisition des coordonnées précises des GPC

La première étape de la phase d'acquisition consiste à repérer sur le terrain les points sélectionnés lors de l'étape précédente ou de placer des cibles s'il n'existe pas d'élément remarquable à proximité. La dégradation de la chaussée due aux conditions météorologiques et au passage des voitures, n'a pas permis l'identification de tous les points remarquables préalablement choisis, à l'exception des quelques points symbolisés par les triangles de couleur jaune (Figure 17).

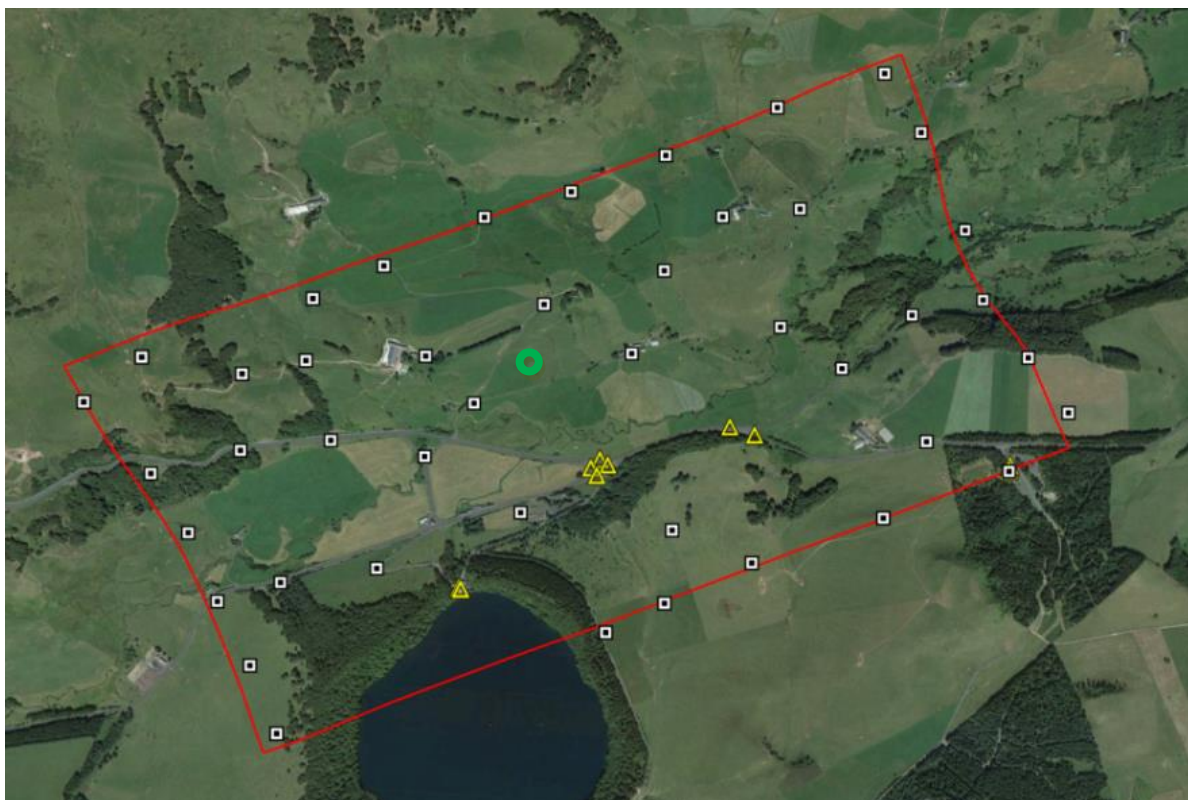


Figure 17 - Positionnement des GCP pour l'acquisition de données drone

Il a donc été procédé à l'installation sur le terrain d'un ensemble important de cibles (carrés blancs, Figure 17). Ces cibles de 50cm x 50cm sont marquées de 2 triangles noirs dont les sommets se font face et indiquent précisément le centre de la cible (Figure 18). Elles ont été mises en place avant l'acquisition sur des surfaces bien dégagées pour qu'elles puissent être vues depuis le drone.

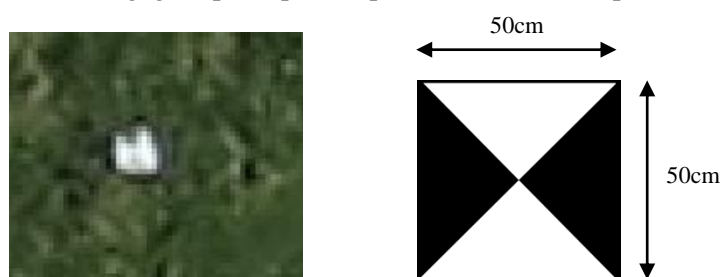


Figure 18 - Cible placée sur le terrain

Toutefois, comme on peut le remarquer sur l'extrait d'une photographie présenté sur la figure 18, l'exposition au soleil ainsi que la taille du pixel au sol (entre 2 et 4 cm si le drone est à 150m

d'altitude) ne permet pas toujours de correctement identifier le centre la cible, et donc de le positionner très précisément a posteriori dans les logiciels de traitement.

La plupart des cibles ont été placées sur des lieux accessibles depuis une route ou un chemin de randonnée pour éviter le plus possible de traverser les parcelles agricoles, en pleine floraison, l'acquisition ayant été faite au printemps. Malheureusement, l'emprise du projet ne suivant pas forcément les routes, certaines cibles ont dû être placées dans les champs. Le centre de ces cibles a mesuré par GPS différentiel, avec la technique du pivot central.

Le principe du pivot central est le suivant : un GPS est implanté tout au long de l'acquisition au centre de la zone d'étude (cercle vert, Figure 17) pour que les lignes de base entre le mobile et la base soient les plus courtes possible dans toute la zone de levé. En effet, plus la distance entre le récepteur et la base est petite, plus le temps d'acquisition des données GPS avec le récepteur est court, le temps de mesure étant estimé à environ 1 minute par kilomètre. En post traitement, le calcul des coordonnées de la base est réalisé à l'aide de plusieurs stations permanentes du RGP (Réseau GNSS Permanent), implantées à plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres de la base. Une fois les coordonnées de la base définie, les coordonnées des GCP, mesurées avec le récepteur mobile, sont calculées en prenant cette fois-ci, non pas les stations du RGP comme référence, mais la base. Cette méthode permet d'obtenir une cohérence optimale entre les GCP. Plus la ligne de base est courte, plus les erreurs et incertitudes sur la position des points sont faibles, d'où l'intérêt de placer le pivot au centre de la zone.

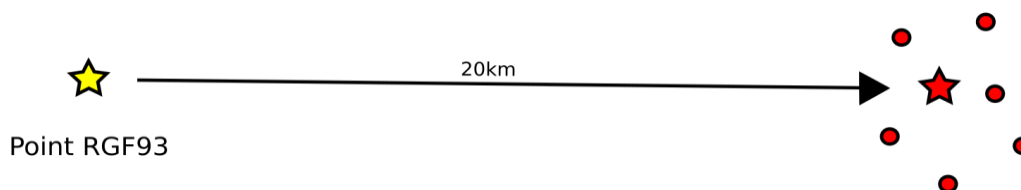


Figure 19 - Rattachement du pivot central (source: cours de géodésie 2ème année partie 1 de Monsieur Laurent MOREL)

Une fois les cibles placées sur le terrain, l'acquisition faite par le drone a été réalisée. Compte tenu de la réglementation (cf. Annexe 7) et des caractéristiques techniques des appareils, les drones n'ont pas l'autonomie nécessaire, pour survoler toute la zone, au cours d'un seul vol. Par exemple, dans le cas du drone à voilure fixe (LA300), le poids total embarqué étant au maximum d'1 kg, il ne peut transporter suffisamment de batteries pour voler plus de 30 minutes. Le levé de la zone a donc été divisé en plusieurs secteurs, sur deux jours d'acquisition proprement dite, plus un jour supplémentaire pour le placement des cibles. Huit vols ont été nécessaires pour couvrir l'ensemble de la zone (Tableau 4) par le drone à voilure fixe, en mode de pilotage automatique.

Étant donné que l'aile volait à une altitude constante par rapport à son point de décollage, choisi en hauteur afin de pouvoir mieux surveiller le drone à vue, la hauteur de vol moyenne est supérieure à la hauteur maximale de 150m imposée par l'article de 11 avril 2012 (Annexe 7). Seuls les clichés obtenus grâce à l'aile fixe ont été retenus, dans le cadre du travail réalisé pendant le stage. Le quadricoptère a photographié le fond de la vallée à une altitude plus basse, mais étant donné le très grand nombre de clichés déjà disponible, avec un recouvrement largement suffisant, il n'a pas été jugé nécessaire d'utiliser ce jeu de photographies.




	Drone LA 300	Emprise des vols couverts par le drone à voile fixe
Nombre de vols	8	
Nombre de bandes par vol	7	
Nombre de clichés total	2608	
Recouvrement moyen	80-90%	
Hauteur de vol moyenne (par rapport aux points bas)	211	

Tableau 4 - Statistique sur les vols du drone

### 3.3.5. Post-traitement des données

Le calcul des GCP a été réalisé avec le logiciel Topcon Tools, logiciel disponible avec les GPS différentiels Topcon HyperPro et GB 1000, utilisés lors des diverses missions. De bons résultats sont obtenus concernant la précision des points mesurés par pivot central, avec des résidus allant de 1 à 5mm (voir Annexe 8, fiche technique des points GPS).

Le nombre de clichés du jeu de données brut est très important (2608 clichés) et intègre des prises de vues inutilisables. En effet, l'acquisition des photographies avec le drone à voile fixe en mode de vol automatique, est faite à cadence régulière, depuis le décollage jusqu'à l'atterrissage. Il est donc indispensable de procéder à un tri préliminaire des clichés, par suppression des photos acquises lors du décollage, de l'atterrissage, et lors des virages (clichés en rouge sur la Figure 20).

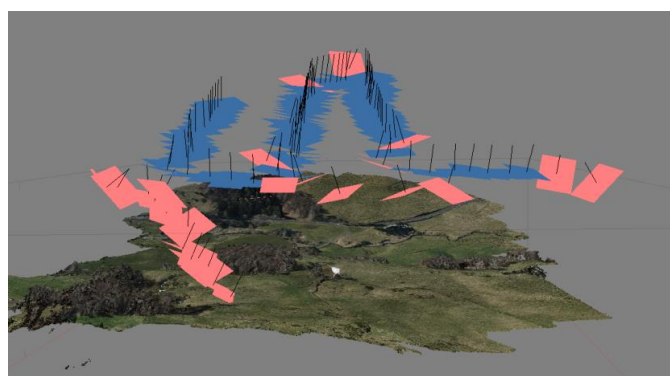


Figure 20 - sélection des clichés à supprimer

Il est également indispensable de réduire le recouvrement trop important constaté lors de l'analyse des jeux de données photographiques, ce qui permet d'alléger et d'optimiser les procédures de calcul. Pour cela, une photographie sur deux seulement a été conservée, afin d'atteindre un recouvrement optimal de 60 à 80%, ce qui donne finalement un jeu de données trié constitué de 908 photographies.

La procédure de réalisation des MNT réalisée avec le logiciel Agisoft Photoscan est expliquée en Annexe 6. Comme précisé précédemment, la société Altran Ouest a été chargée par le LMV de réaliser le MNT à partir des photos drone avec le logiciel MicMac, afin de réaliser une inter-comparaison des procédures de stéréophotogrammétrie par différentes chaînes de traitement, avec un jeu de données identique (voir § 4.1.1, p. 42)

### 3.3.6. Résultats

Le MNS a été généré à partir de la chaîne de traitement du logiciel Agisoft Photoscan (procédure détaillée en Annexe 6). Le tableau 6 résume les différentes caractéristiques du MNS, caractéristiques qui sont présentées de manière détaillée en Annexe 9.

Résolution	0.273 m
Densité de point du nuage dense	13.40 points / m <sup>2</sup>
Nombre de points	63 521 562
Nombre de faces du maillage	12 465 031
Surface totale	4 km <sup>2</sup>
Écart avec les GCP	< 4cm
Élévation minimum	1072.16 m
Élévation maximum	1332.99 m

Tableau 5 - Caractéristiques du MNT drone obtenu par Agisoft Photoscan

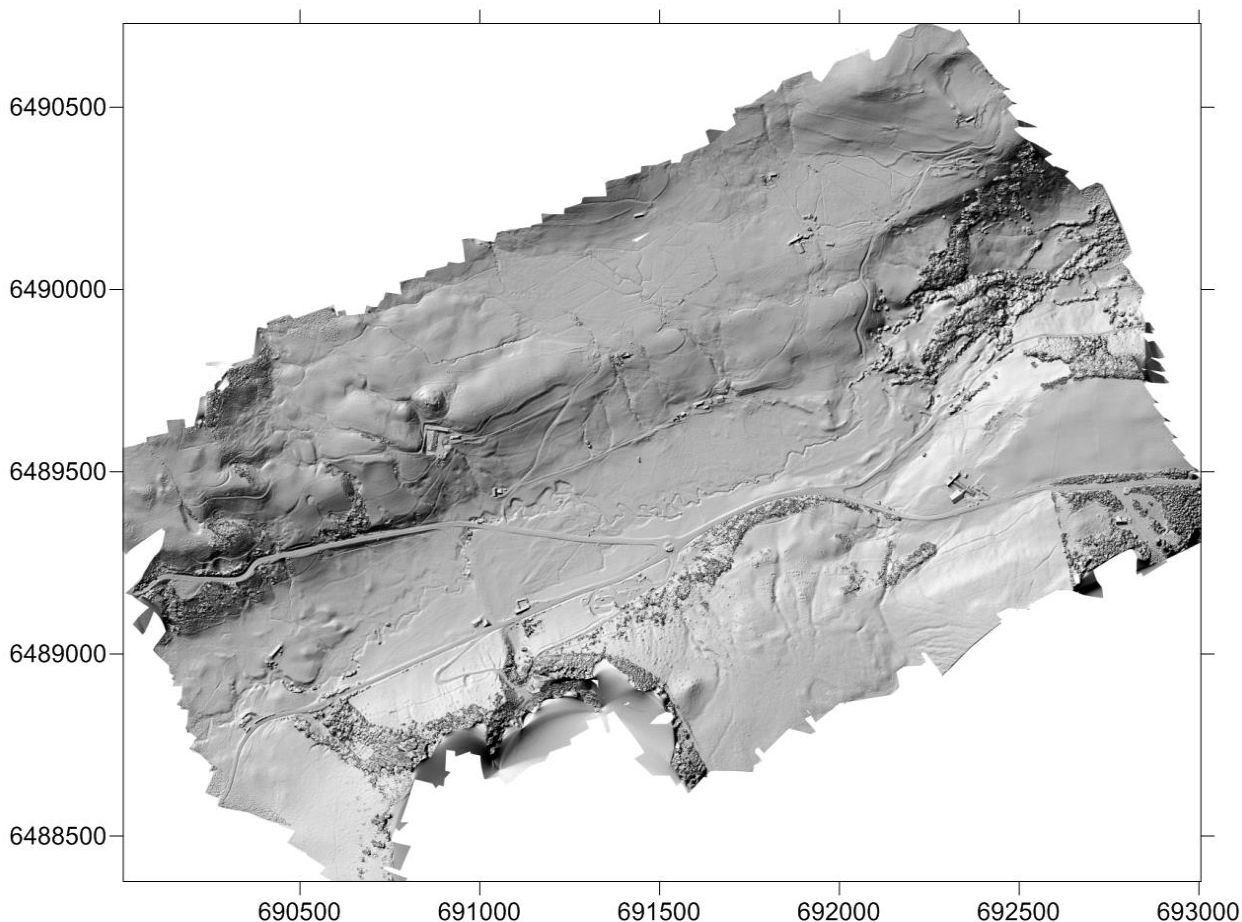


Figure 21 - MNS issu des photographies prises par drone (LA 300) – représentation ombrée (Annexe 1)

Pour l'étape de comparaison entre les différentes chaînes de traitement (MicMac et Agisoft Photoscan, voir § 4.1.1, p.42), le produit MNS a été préféré au MNT. Malgré une bonne classification générale, certains éléments de relief du modèle IGN sont susceptibles d'être classés en sursol, ce qui crée inévitablement des incohérences lors de la comparaison des modèles.

### 3.4. Photographies aériennes (acquisition IGN, 2013)

#### 3.4.1. Acquisition

La procédure d'acquisition et de traitement des photographies aériennes est quasi identique à celle adoptée dans le cas des photographies acquises par drone (voir Figure 15).

Les photographies aériennes utilisées pour réaliser le modèle numérique proviennent d'une mission organisée par l'IGN en 2013, les dernières en date. Elles sont disponibles gratuitement sur la base de données du CRAIG (Centre Régional Auvergnat de l'Information Géographique), structure qui a pour vocation de favoriser les échanges de données entre les acteurs publics.

Dans le cas notre d'étude, il était important de disposer des photographies les plus récentes, afin de minimiser les changements (marquage au sol effacé ou repeint, nouveau tronçon de route, pousse de la végétation, etc.). Toutes les photographies recouvrant la zone d'étude (partiellement ou totalement) ont été sélectionnées, afin d'optimiser le recouvrement, ce qui donne une très grande surface couverte par le jeu de données IGN, par rapport à la surface de la zone d'étude sensu stricto.

Nombre de bandes	4
Nombre de clichés total	42
Nombre de clichés par bande	10-11
Recouvrement moyen	60%
Hauteur de vol moyen (m)	4604

Tableau 6 - caractéristiques du vol avion

La seule différence notable par rapport à la procédure d'acquisition/traitement de la mission de photogrammétrie par drone, concerne la non-utilisation de cibles, les photographies datant de 2013. Ceci implique une étude préalable très précise de ces photographies (plus précise que la mission drone), pour le placement des points d'appui. Cette phase d'analyse a consisté à repérer des points remarquables mesurables sur le terrain, en espérant qu'il n'y ait pas eu de changement depuis. Auparavant, il est nécessaire d'estimer approximativement la localisation souhaitable des points d'appui et le nombre nécessaire pour réaliser le calcul de l'aérotriangulation.

Lors de l'acquisition des photographies aériennes, les avions de l'IGN sont équipés d'un GPS et d'une centrale inertielle. En règle générale, lorsqu'un véhicule aérien est muni de ce genre d'équipement, il faut au minimum un point d'appui connu en (X,Y,Z) tous les 15 à 20 couples en bordure du bloc de photographies, et un tous les 15 à 25 couples à l'intérieur. Étant donné que les différentes bandes composant le bloc ne dépassent pas 15 clichés, seul 1 point à chaque coin du bloc devrait suffire. Toutefois, par souci de contrôle, des points ont été placés au centre de chaque bordure ainsi qu'au centre du bloc (Figure 22).

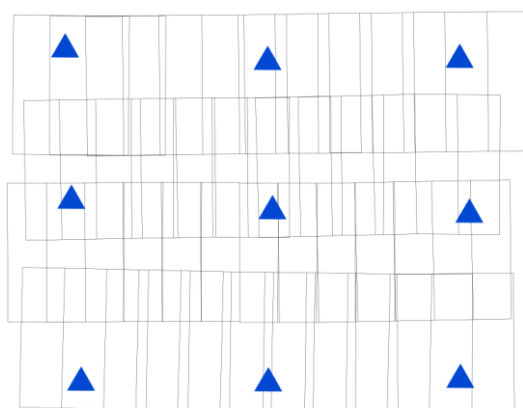


Figure 22 - localisation des GCP dans le bloc

Afin de vérifier que le nombre de points d'appui est suffisant, il convient d'établir le bilan observations/inconnues, comme dans le cas de l'acquisition avec le drone, à la différence près que l'avion était équipé d'un GPS et d'une centrale inertielle. Donc, en plus des équations (1) et (2) présentées précédemment (Eq. 1 et Eq. 2, § 3.3.1, p.26), une troisième équation est utilisée:

- L'équation d'appui des sommets

$$S = GPS + a + bt + {}^tRV \quad (\text{Eq. 3})$$

Les paramètres de l'équation sont :

- S : coordonnées du sommet de prise de vue
- GPS : Coordonnées approchées du sommet de prise de vue, déterminées par GPS embarqué
- a : Vecteur translation
- bt : Dérive en temps
- R : Matrice rotation
- V : Bras de levier

Cette équation permet de déterminer la position précise des sommets de prise de vue.

À partir de ce système de 3 équations, il est donc possible de dresser le bilan observations/inconnues :

- **Nombre d'équations d'observations :**

2\*nombre de points de liaisons\*nombre de clichés sur lesquels ils sont vus + 2\*nombre de GCP\* nombre de clichés sur lesquels ils sont vus + 3\*nombre de clichés (3 coordonnées XYZ du GPS pour chaque image) + 3\*nombre de clichés (angle de la centrale inertielle)

- **Nombre d'inconnues :**

6\* nombre de clichés (paramètres externes) + 3\*nombre de points de liaisons (connus en XYZ) + 10 paramètres internes + 3 (bras de levier entre le GPS et le centre de la caméra) + 2\*3\*nombre de bandes (2 paramètres de dérive entre point GPS et sommet de prise de vue) + 3 (angles de rotation de la centrale inertielle vers la caméra)

- **Bilan** :

Nombre d'équations d'observation : 1 420 796

Nombre d'inconnues : 857 863

Étant donné qu'il y a beaucoup plus d'équations d'observations par rapport au nombre d'inconnues, le nombre de GCP préconisés pour l'étude (15 au final) est largement suffisant.

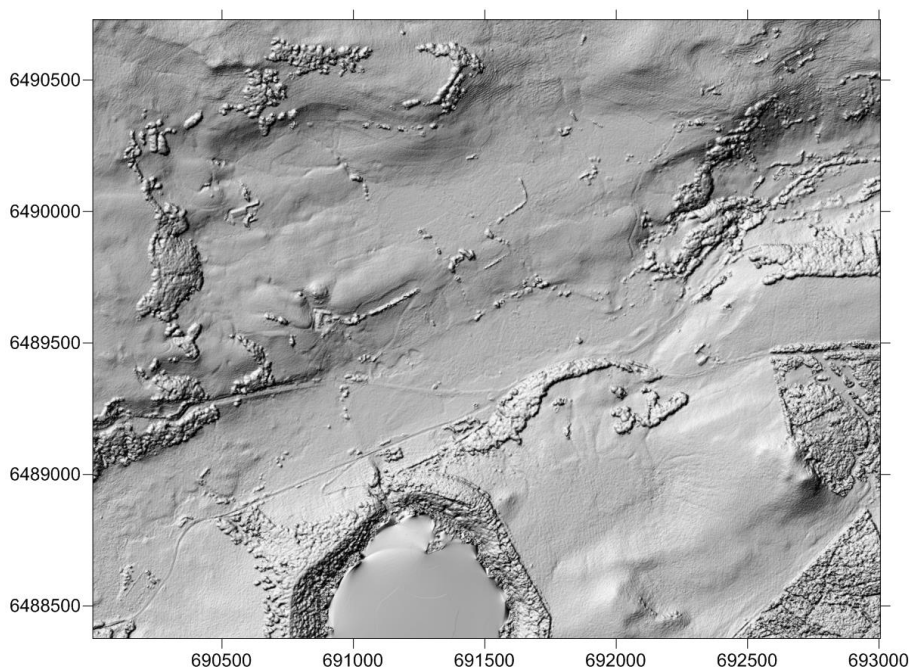
Une fois que le nombre, ainsi que la position approximative des GCP ont été définis, il faut identifier des points remarquables au site approximatif correspondant à chaque GCP. Pour cela, les photographies sont analysées afin de sélectionner des éléments identifiables au sol. Pour être sûrs de retrouver au moins un point sur le terrain, 2 ou 3 points ont été identifiés sur les photographies pour chaque « site GCP » sélectionné. Ces points ont été calculés par GPS différentiel avec la méthode du pivot central.

### **3.4.2. Traitement**

Le calcul des GCP a été réalisé avec le logiciel Topcon Tools, logiciel disponible avec les GPS différentiels Topcon HyperPro et GB 1000, utilisés lors des diverses missions. De bons résultats sont obtenus concernant la précision des points mesurés par pivot central, avec des résidus allant de 2 à 18mm (voir Annexe 10, fiche technique des points GPS).

La démarche présentée en Annexe 6 sur l'utilisation du logiciel Agisoft Photoscan a été employée pour générer le MNS issu des photographies aériennes de la campagne IGN de 2013. Néanmoins, en raison de la performance insuffisante de la station de calcul pour générer un MNS de résolution maximale avec l'ensemble du jeu de données de photographies aériennes IGN, il a été décidé de réduire la résolution des MNS avion et drone, qui ont été calculés à partir du nuage de points de densité moyenne.

### **3.4.3. Résultat**



**Figure 23 - MNS calculé à partir des photographies prises par avion (campagne IGN, 2013) (Annexe 3)**

Pour la présentation du résultat de l'élaboration du MNS avion (IGN 2013), il a été décidé de se focaliser sur la zone d'étude, commune avec le relevé drone, afin d'alléger le poids des données et d'ainsi réduire le temps de calcul.

Ce MNS a été généré à l'aide du logiciel Agisoft Photoscan (présentation détaillée des procédures de traitement et de calcul en Annexe 6). Le Tableau 7 résume les principales caractéristiques du MNS, caractéristiques explicitées en détail en Annexe 11.

<b>Résolution</b>	0.884 m/pixel
<b>Densité de point du nuage dense</b>	1.28 points / m <sup>2</sup>
<b>Nombre de points</b>	191 779 519 *
<b>Nombre de faces du maillage</b>	45 283 592 *
<b>Surface totale</b>	132 km <sup>2</sup> *
<b>Écart avec les GCP</b>	< 50cm **
<b>Élévation minimum</b>	691.465 m *
<b>Élévation maximum</b>	1759.93 m *

**Tableau 7 - Caractéristiques du MNT avion obtenu par Agisoft Photoscan**

\* Ces valeurs correspondent aux MNS complets de la zone faite par avion.

\*\* Les GCP utilisés sont ceux qui ont servi à faire le MNS complet de la zone et non de la zone réduite.

### 3.5. Levé scanner 3D

#### 3.5.1. Présentation

Afin de contrôler la qualité des modèles produits, des acquisitions sur secteurs spécifiques ont été réalisées grâce à un laser scanner 3D terrestre, le modèle OPTECH ILRIS (Tableau 8). En effet, la précision du scanner est nettement supérieure à la précision que peut offrir la photogrammétrie aérienne (environ 5mm pour le scanner 3D et quelques cm pour la photographie aérienne).

OPTECH ILRIS	
Photo	
Précision distance	4mm à 100m
Précision angulaire	8 mm à 100m
Densité de point (espace entre deux points)	2cm à 1000m
Taille de la fenêtre	40° x 40°

**Tableau 8 - Présentation du scanner utilisé**

Le scanner OPTECH ILRIS n'est pas doté d'une embase mobile et ne peut donc tourner sur lui-même. Une fois implanté, l'acquisition des points ne peut être faite que dans une fenêtre de 40° sur 40°, soit une fenêtre d'environ 73m sur 73m à une distance de 100m.

### 3.5.2. Présentation de la mission Scanner 3D

Les paragraphes suivants traiteront de la méthodologie mise en œuvre pour la réalisation des levés scanner, dont les principales étapes sont présentées sur la Figure 24.

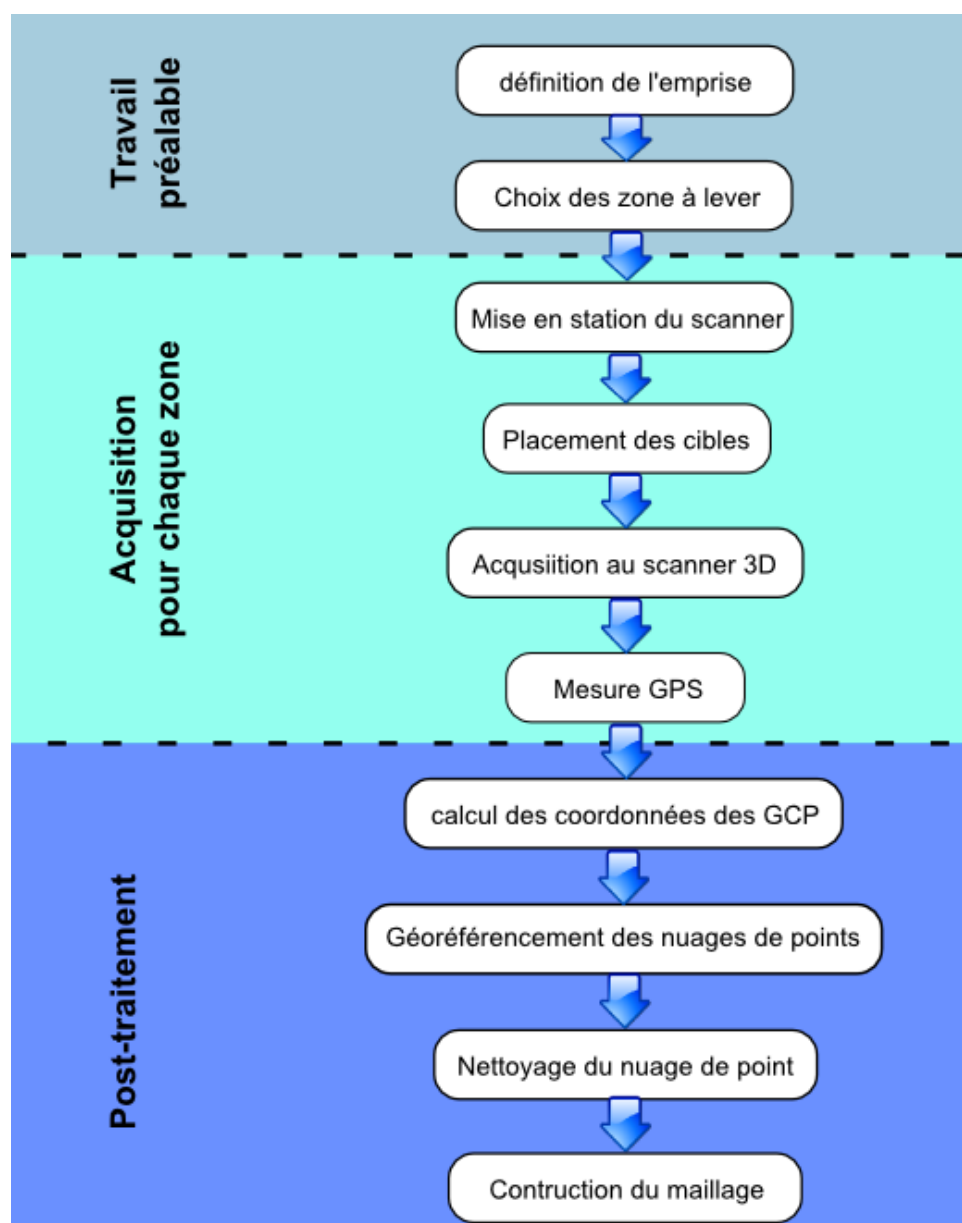


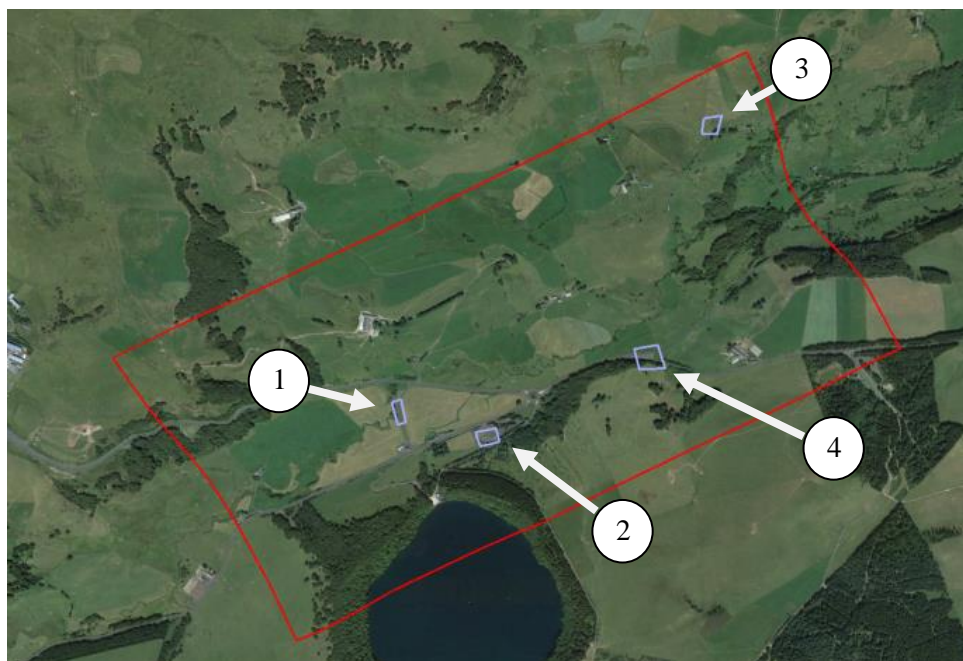
Figure 24 - Organigramme des tâches réalisées lors de la mission scanner 3D

### 3.5.3. Travail préalable : le choix des zones à lever

L'acquisition au scanner 3D présente deux inconvénients. Le premier est que les zones levées par chaque station sont de faible extension et représentent un nombre très élevé de points, il sera donc très difficile et long de lever une grande zone de plusieurs kilomètres. Le deuxième inconvénient est que la végétation évolue de façon permanente, surtout au printemps. La floraison et la pousse de

l'herbe peuvent générer une différence de plusieurs centimètres par rapport à des données acquises quelques semaines auparavant, voire quelques années (exemple de la campagne de prise de photographies aériennes de l'IGN, en 2013).

Le levé scanner se limite donc à plusieurs petites zones, réparties sur l'ensemble du secteur étudié. Pour ne pas être confronté au problème lié à la végétation, les levés au scanner 3D ont été réalisés sur des tronçons de route bitumineuse qui n'ont, a priori pas subi de dégradation majeure depuis 2013, au vu de la comparaison des photographies aériennes de la campagne IGN et des reconnaissances sur le terrain.



**Figure 25 - Positionnement des tronçons choisis pour le levé scanner 3D (en violet)**

Chacune de ces zones (Figure 25) a été choisie en fonction de caractéristiques spécifiques, dans l'objectif d'effectuer un contrôle de la qualité et de la précision des différents MNT élaborés dans le cadre de cette étude :

- Zone 1 : longue ligne droite en fond de vallée et bien dégagée ;
- Zone 2 : parking en deux parties à des niveaux différents, séparé par un talus ;
- Zone 3 : virage serré sur le flanc du versant amont de la Couze Pavin (NE du secteur d'étude), présentant un fort relief ;
- Zone 4 : carrefour routier ayant une large surface bitumineuse et à proximité des arbres.

#### **3.5.4. L'acquisition**

Pour le géoréférencement des nuages de points, 4 cibles sur des pancartes ont été placées sur chaque tronçon. Les pancartes sont fixées sur un piquet en bois, dont l'extrémité supérieure se situe au même niveau que le centre de la cible positionnée sur la pancarte. La mesure du centre de l'extrémité supérieure du piquet en bois, à l'aide d'un GPS différentiel monté sur une petite canne, permet donc d'obtenir directement les coordonnées du centre de la cible (décalage dans l'axe de visée de 1 cm pris en compte). Lors de l'acquisition des données, il est important de densifier le nuage de point au niveau des cibles, afin de pouvoir identifier au mieux leur centre de ces dernières, lors de l'étape de



géoréférencement. En post-traitement, il ne faut pas oublier le décalage d'un centimètre qui correspond à la distance entre le centre de la cible et le centre du piquet. Les mesures GPS ont été réalisées suivant la méthode du pivot central.

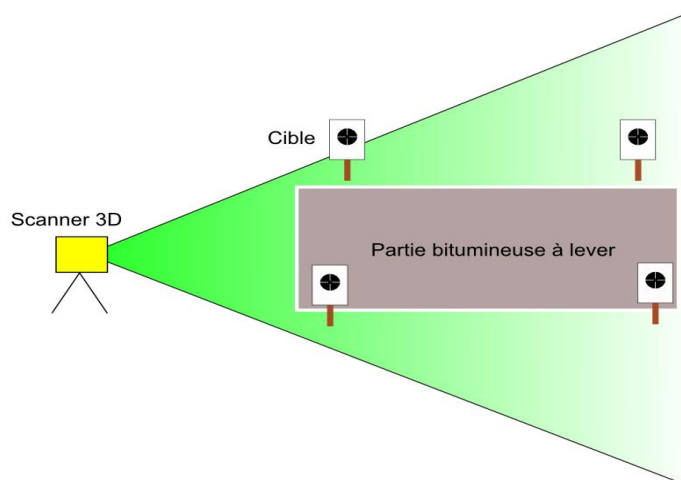


Figure 26 - Acquisition d'un tronçon avec le scanner 3D

### 3.5.5. Traitement des nuages de points

Le calcul des GCP a été fait avec le logiciel Topcon Tools, logiciel fourni avec le GPS différentiel Topcon utilisé lors des diverses missions. (Voir Annexe 12 pour la fiche technique des points GPS.)

Le géoréférencement des nuages de points a été réalisé à l'aide des modules IAlign et IMAspect du logiciel de traitement Polyworks, grâce au positionnement DGPS des cibles.

Afin que ce nuage de points soit utilisable comme référence de contrôle des différents produits MNT calculés par stéréophotogrammétrie, il est indispensable de procéder au nettoyage des artefacts potentiellement présents au sein des nuages de points (voir (a) de la Figure 27), avant la création d'un maillage précis des différentes zones scannées de contrôle. Ces bruits et artefacts peuvent être causés par le passage de voiture lors de l'acquisition ou par la végétation en bordure de chaussée. Il faut également veiller à supprimer du nuage de points, les points correspondant aux pancartes qui ont servi au géoréférencement.

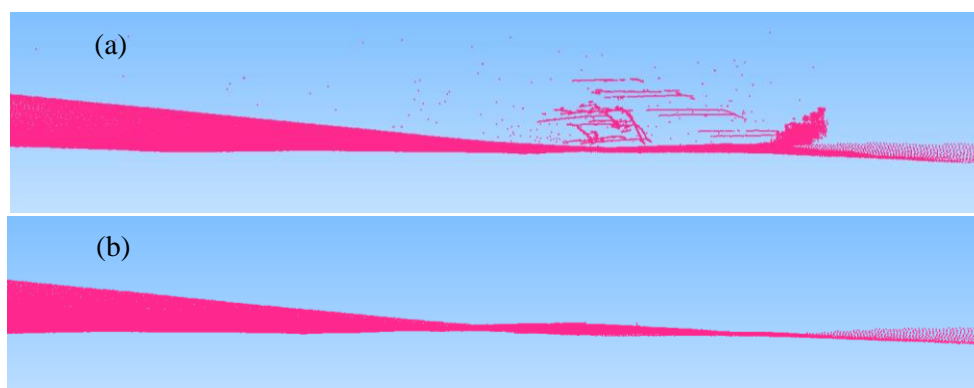


Figure 27 - Nuage de point nettoyé

Une fois ces nuages de points nettoyés du bruit (voir (b) de la Figure 27), la création du maillage final est réalisée à l'aide de la fonction maillage 3D du logiciel 3DReshaper en utilisant les mêmes paramètres pour chaque maillage (Figure 28), afin d'obtenir un résultat homogène (Utilisation du logiciel 3DReshaper présentée dans l'Annexe 13).

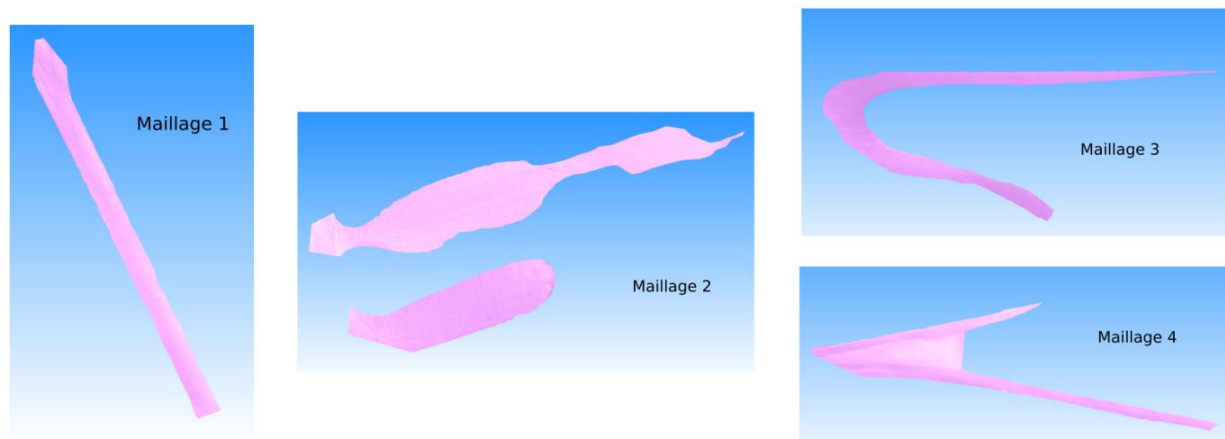


Figure 28 - Maillage de toutes les zones générées à partir des nuages de points nettoyés (voir Figure 25 pour leur localité)

## 4. Comparaison et Analyse des résultats

Avant de présenter l'analyse comparée des MNT calculés à partir des différents jeux de données, une comparaison des résultats des deux logiciels de traitement (MicMac et Agisoft Photoscan) utilisés pour réaliser les MNT générés à partir des photographies drone, a été réalisée.

### 4.1. Étude et comparaison des Modèles Numériques de Terrain

#### 4.1.1. Comparaison des MNT produits par MicMac et Agisoft Photoscan

##### 4.1.1.1. Résultat MicMac

La société Altran Ouest a utilisé le logiciel MicMac pour élaborer le MNT sur le secteur de la Plaine du Gelat, à partir du jeu de photographies acquises par drone. MicMac (Multi-Images Correspondances, Méthodes automatiques de Corrélation) est un logiciel de photogrammétrie en libre-service et gratuit créé par l'IGN (Institut Géographique National).

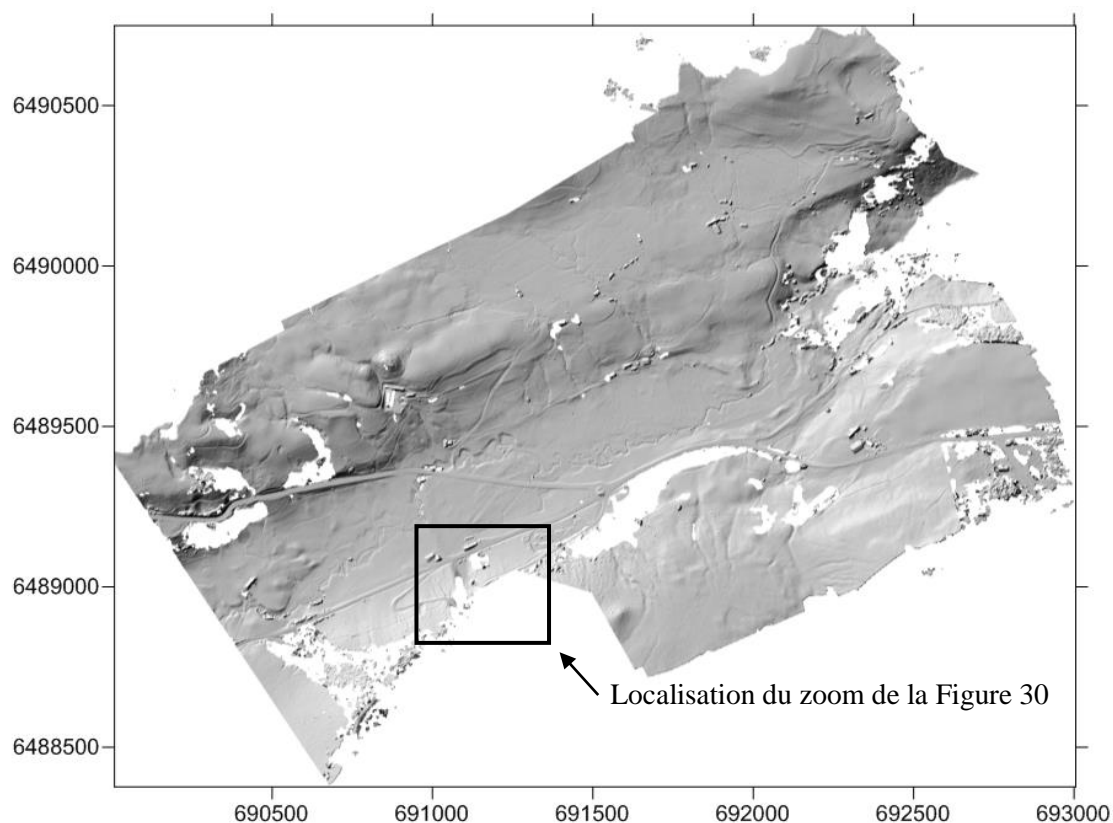


Figure 29 - MNT photogrammétrique final à 25 cm de résolution de la plaine du Gelat (MicMac) (Annexe 2)

Le MNT réalisé à l'aide du logiciel MicMac (Figure 29) a été généré par la fusion de 4 blocs (voir Figure 31), contrairement au MNT produit sous Agisoft qui a été fait en un seul bloc. Ce choix de traitement en plusieurs blocs a été imposé par des limitations de la station de calcul utilisé par Altran: problèmes de temps de calcul trop importants et crashes mémoires récurrents ne permettant pas le calcul de toute la zone en un seul bloc.

## 4.1.1.2. Comparaison des résultats

La comparaison des deux modèles numériques peut être réalisée selon plusieurs critères et approches :

- Qualité des modèles (zoom sur une zone particulière afin de comparer visuellement la qualité des résultats)
- Résidus entre GCP et modèles
- Écarts en Z des deux modèles

## 4.1.1.2.1. Qualité des modèles

La comparaison de la qualité des modèles est effectuée visuellement, dans un premier temps. Une zone spécifique a été choisie, présentant différents types d'environnements (végétation, habitations, chaussées, relief). Cette zone se trouve en face de l'exutoire du lac Pavin.

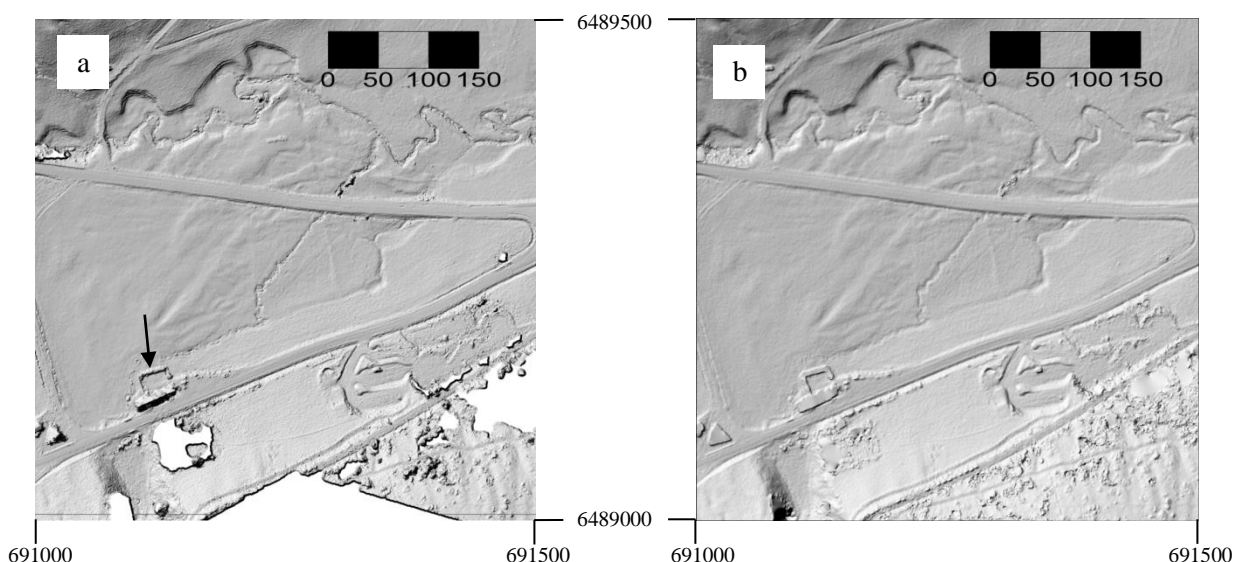


Figure 30 - Zoom sur le MNT produit sous MicMac (a) et sur le MNT produit sous Agisoft Photoscan (b)

Des différences flagrantes sont qualitativement mises en évidence entre les deux modèles numériques (Figure 30).

D'une part, le MNT généré sous MicMac présente plus de détail sur les éléments fins du terrain : il fournit ainsi une meilleure représentation de la déformation de la chaussée, une meilleure définition des fossés bordant la chaussée, et présente une plus grande netteté sur les secteurs montrant rochers et du relief.

D'autre part, le MNT produit par MicMac présente des incohérences liées à des problèmes de classification des nuages de points. En effet, seule une partie de la végétation a été classée comme étant du sursol et retirée du modèle numérique de surface. Certaines zones de végétation sont encore toujours présentes sur le MNT, comme la haie se trouvant au nord de l'habitation (voir flèche sur la Figure 30 (a)). De plus, les habitations, partie intégrante du sursol, ne devraient donc pas apparaître sur un MNT. Enfin, sur le modèle MicMac, des éléments du sursol ont été supprimés laissant un trou à la place, tandis que dans le cas du le modèle Agisoft, ces vides ont été comblés par un maillage grossier.

Dans les deux cas, de légères surélévations sont clairement visibles en bordure des éléments classés comme étant du sursol, ce qui donne une impression de relief qui ne correspond pas au terrain naturel.

Conclusion : d'un point de vue qualitatif, le modèle produit sous MicMac présente une texture de surface et des détails d'une finesse remarquable, le modèle élaboré avec Agisoft Photoscan étant d'apparence plus lisse. Par contre, certains défauts sont identifiés au niveau des éléments du sursol et de la classification réalisée sous MicMac, indépendante de la chaîne de traitement utilisée pour le calcul du MNT. Afin d'améliorer le modèle MicMac, il est indispensable de revoir le processus et les paramètres de classification.

#### 4.1.1.2.2. Résidus entre GCP et modèles

Lors de la fusion des blocs pour la création du MNT produit sous MicMac, des écarts sur la composante verticale dans les zones de recouvrement ont été observés. Ces écarts sont pluridécimétriques, compris entre -0.3 et 0.3 cm (Figure 31). Pour rappel, les calculs du MNT sous MicMac ont été effectués en plusieurs blocs par la société Altran, puis fusionnés. Cet artefact majeur de fusion entre l'ensemble des 2 blocs Ouest (en vert sur la Figure 31) et des 2 blocs Est (liseré rouge) est lié à un problème de calage des nuages de points à la bordure. Ce défaut de fusion a fait l'objet d'un rapport d'expertise remis par nos soins à la société Altran, afin de corriger ce défaut majeur ; le travail est en cours.

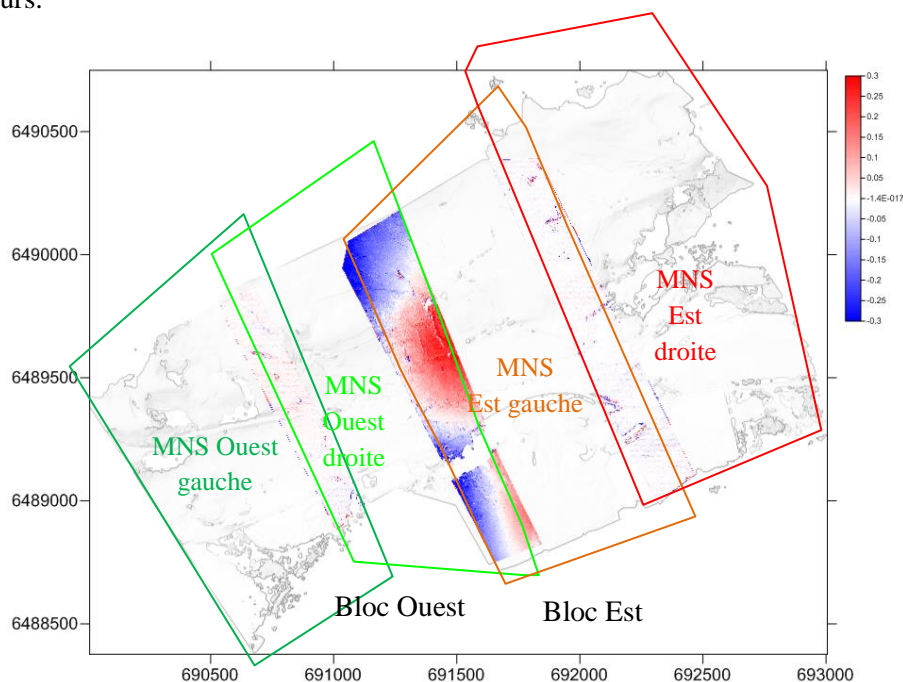


Figure 31 – Ecarts verticaux (en mètres) observés dans les zones de recouvrement des 4 MNS transversaux calculés

Afin de contrôler quantitativement la précision des 2 MNT (MicMac et Agisoft), une comparaison a été réalisée avec les 52 GCP ayant été utilisé pour générer les MNT drones mesurés au sol (Figure 32 et 33).

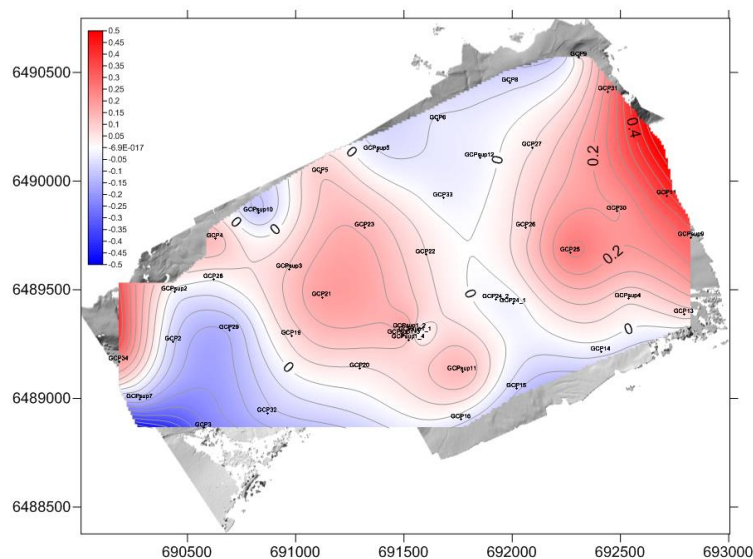


Figure 32 - Cartographie des écarts observés (en mètres) entre les altitudes mesurées sur les points d'appui au sol et celles restituées par photogrammétrie avec le logiciel MicMac. L'échelle des valeurs varie entre -0.5 et 0.5 m.

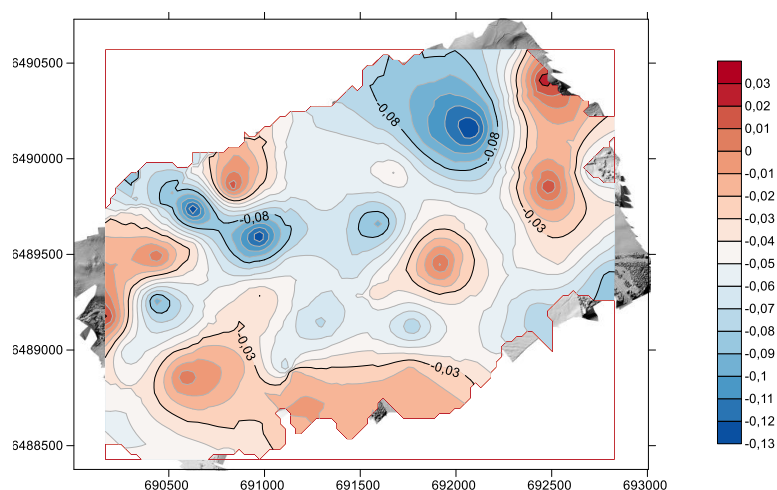


Figure 33 - Cartographie des écarts observés (en mètres) entre les altitudes mesurées sur les points d'appui au sol et celles restituées par photogrammétrie (Agisoft Photoscan). L'échelle des valeurs varie entre -0.13 et 0.03 m.

Les Figure 32 et 33 montrent les résidus entre les GCP et les 2 modèles numériques. Au premier ordre, la répartition des résidus est relativement comparable, mais il est plus intéressant de s'appuyer sur le Tableau 9, tableau récapitulatif des résultats pour cette analyse comparative. Dans ce tableau, les GCP servent de référence. Les valeurs négatives indiquent que le modèle présente une altitude inférieure par rapport au point d'appui de contrôle correspondant.

Les points en jaune, dans le Tableau 9 sont des points non pris en compte dans le calcul du modèle, il n'y a donc pas de projection possible sur le modèle pour une comparaison avec la position des points d'appui. Les points en rouge correspondent à des valeurs aberrantes de projection sur le modèle MicMac, car ils sont situés en périphérie de celui-ci (points GCP1 et GCP17). Les points représentés en grisé dans le Tableau 10 correspondent à des écarts supérieurs à  $\pm 10$  cm.

On constate que les écarts sur le modèle issu du logiciel MicMac sont plus importants (18 GCP sont à  $\pm 10$  cm contre 4 pour le modèle issu d'Agisoft Photoscan).

Nom	Résidu	
	MicMac (cm)	Agisoft (cm)
GCP36		4.82
GCPsup6		3.75
GCP35		3.51
GCPsup7	-12.72	5.95
GCP34	11.17	-2.23
GCPsup8		
GCP3	-17.44	-0.69
GCP2	-8.60	9.67
GCP1	-1971.23	1.42
GCP32	-11.54	1.54
GCPsup2	-1.35	-0.98
GCP18_1		6.87
GCP18_2		1.33
GCP29	-14.03	5.19
GCP28	0.77	3.18
GCP19	6.73	2.93
GCP4	12.71	13.33
GCP17	-2609.29	1.68
GCP20	4.46	7.29
GCP21	18.24	5.5
GCPsup3	10.83	13.18
GCPsup10	-10.01	-1.95
GCP16	-2.85	1.70
GCPsup11	13.62	8.04
GCPsup1_1	2.63	2.59
GCPsup1_2	15.15	6.39

Nom	Résidu	
	MicMac (cm)	Agisoft (cm)
GCPsup1_3	11.66	4.26
GCPsup1_4	9.45	5.75
GCP23	13.69	5.36
GCP5	9.17	5.25
GCP15	-8.70	4.48
GCP22	4.81	9.43
GCPsup5	-4.77	6.01
GCP24_1	-2.15	1.74
GCP24_2	-1.98	1.48
GCP33	-2.46	3.80
GCP14	-3.51	7.48
GCP25	25.39	5.69
GCP26	8.36	5.48
GCPsup12	-2.37	9.76
GCP6	-4.46	8.47
GCPsup4	6.37	3.74
GCP27	4.93	13.22
GCP8	-6.03	8.85
GCP13	6.81	8.40
GCP30	19.84	-2.24
GCPsup9	24.42	3.66
GCP11	39.02	6.32
GCP10		46.99
GCP31	23.81	-2.60
GCP9	6.17	5.22

Tableau 9 - Résidus entre les modèles et les points d'appui (MicMac à gauche, et Agisoft Photoscan à droite)



Figure 34 - Position des GCP avec le même code couleur que le Tableau 9 pour les résidus entre les points d'appui et le modèle MicMac

Sur la Figure 34, les points non utilisés dans MicMac (figurés jaunes) pour générer le modèle se trouvent en bordure latérale, vraisemblablement responsables d'erreurs importantes, d'où leur non prise en compte. Enfin, on soulignera que la majorité des points ayant des résidus supérieurs à  $\pm 10$  cm se trouvent soit en bordure latérale soit au niveau de la bande de recouvrement.

Le Tableau 10 donne, entre autres, les principales valeurs de l'histogramme concernant les écarts entre les GCP et les deux modèles.

	MNT / Agisoft (m)	MNT / MicMac (m)
Écart maximum GCP	0.026	0.174
Écart minimum GCP	-0.133	-0.390
Étendue	0.159	0.565
Premier quartile (25%)	-0.070	-0.117
Troisième quartile (75%)	-0.017	0.035
Écart-type	0.039	0.120
Moyenne des écarts	-0.047	-0.047

Tableau 10 - Principales caractéristiques de l'histogramme concernant les écarts entre les GCP et les modèles

La moyenne des écarts en Z des deux modèles est la même, environ -5cm, ce qui est tout à fait convenable. Cependant, la moyenne ne garantit pas la qualité et la précision des MNT, information fournie par l'écart-type. Ce dernier estime la dispersion, ou étalement, des différences en Z autour de la moyenne. Plus il est faible, plus la population est homogène, donc plus les valeurs sont proches de la moyenne. C'est donc ce critère qui est intéressant pour estimer la précision des MNT, à partir de la comparaison avec les positions des GCP. L'écart-type calculé sur les données produit sous Agisoft est trois fois plus petit que celui calculé par MicMac (0.04m contre 0.12m, respectivement). De plus, 50% des écarts entre les GCP et le MNT Agisoft se trouvent dans un intervalle d'environ 5cm autour de la moyenne tandis que pour le MNT MicMac, 50% des valeurs se trouvent dans un intervalle d'environ 15cm autour de la moyenne, soit trois fois plus.

Conclusion : Le logiciel MicMac n'a pas pris en compte tous les GCP pour la création du modèle. De plus, comme le modèle a été traité en plusieurs blocs, des décalages apparaissent aux bordures de ces derniers (des écarts  $>$  à 20cm pour les points en bordure est). Étant donné que 9 GCP n'ont pas été pris en compte pour le calcul du MNT MicMac, le modèle généré par Agisoft Photoscan paraît plus pertinent. A partir des statistiques présentées dans le Tableau 10, il est établi que le modèle Agisoft converge de façon beaucoup satisfaisante au niveau des GCP, par rapport au modèle MicMac. Certes, cela ne garantit pas que les formes soient mieux rendues à petite échelle, mais cela indique que le MNT Agisoft est globalement plus juste.

#### 4.1.1.2.3. Écarts entre les deux modèles

La comparaison directe entre les deux modèles est intéressante, grâce au calcul des écarts altimétriques. Pour ce calcul, le modèle numérique issu de MicMac a été pris comme référence.



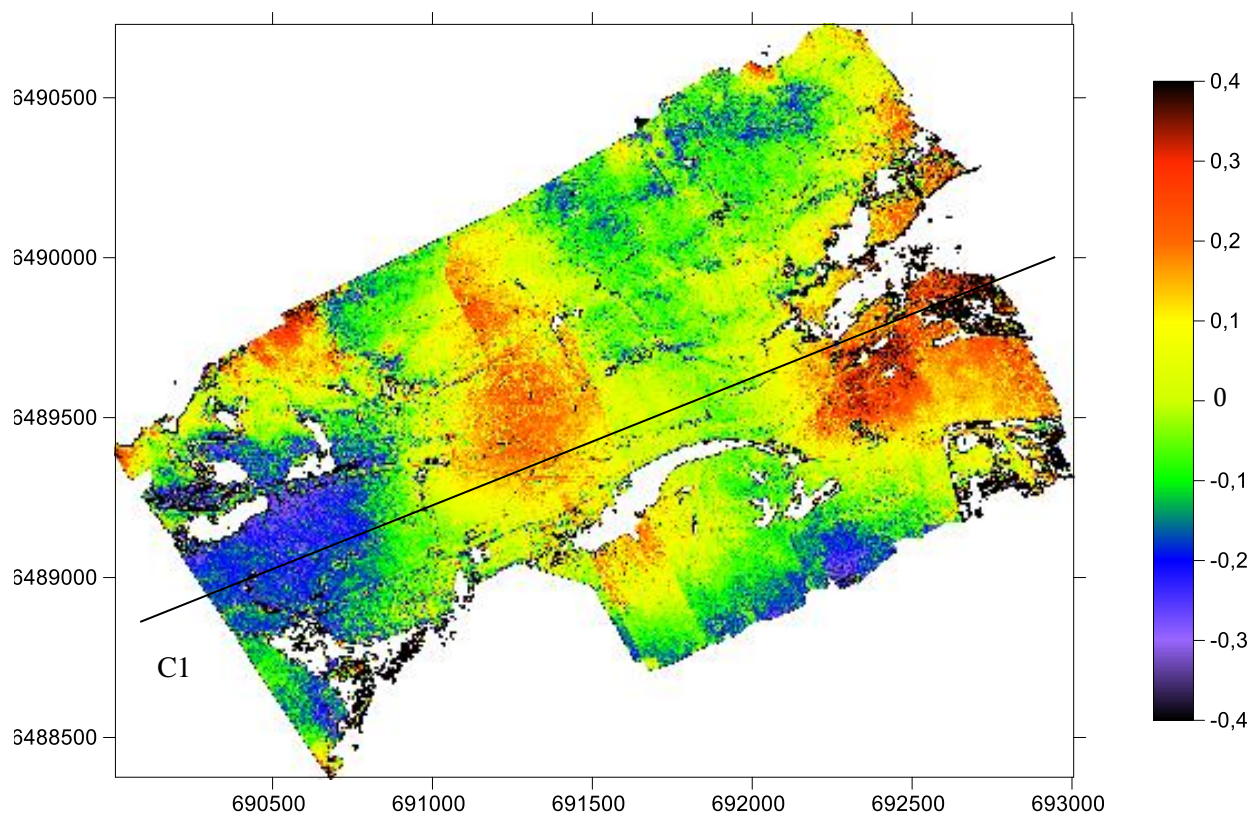


Figure 35 - Comparaison des deux modèles sur une échelle comprise entre -0,4 à 0,4 m (Annexe 4)

Sur la Figure 35, la grande majorité des écarts varient entre  $\pm 20$  cm. A partir de cette carte de résidus deux phénomènes peuvent être clairement identifiés :

(1) la tendance générale du MNT de MicMac à être incliné par rapport au MNT d'Agisoft. En effet les couleurs froides, qui indiquent que le MNT d'Agisoft se trouve sous celui de MicMac (i.e. altitudes calculées inférieures pour le modèle Agisoft), se trouvent majoritairement à l'ouest du modèle. À l'est, l'effet inverse est observé, il y a une majorité de couleurs chaudes, indiquant cette fois que le modèle d'Agisoft se trouve au-dessus (i.e. altitudes calculées supérieures pour le modèle Agisoft). Ceci est confirmé par l'analyse du Tableau 9 : les écarts sur les GCP avec Micmac à l'Ouest (premières valeurs du Tableau 9: GCPsup7, GCP3, GCP32, GCP29) sont négatifs et plutôt positifs pour le modèle Agisoft. Au contraire les écarts aux GCP avec MicMac à l'est (dernières valeurs du Tableau 9: GCP13, GCP30, GCPsup9, GCP11, GCP23) sont fortement positifs (supérieurs à 20cm, sauf pour le GCP13). La Figure 32, qui présente la répartition des écarts entre les valeurs mesurées au sol et le MNT issu de MicMac présente de fortes similitudes avec la carte comparative des 2 modèles (Figure 35).

(2) la bande qui passe au milieu de la carte est un autre élément remarquable. En effet, nous avons vu sur la Figure 31 qu'il y avait des écarts dans ce secteur lors de la fusion des blocs pour la création du MNT via MicMac. Le MNT issu d'Agisoft a été traité d'un seul bloc, il n'y a donc pas d'erreurs générées dans ce secteur. Ce qui explique pourquoi la bande sur la Figure 31 est si facilement visible, et est clairement identifiée, également sur le graphique de la Figure 36 .

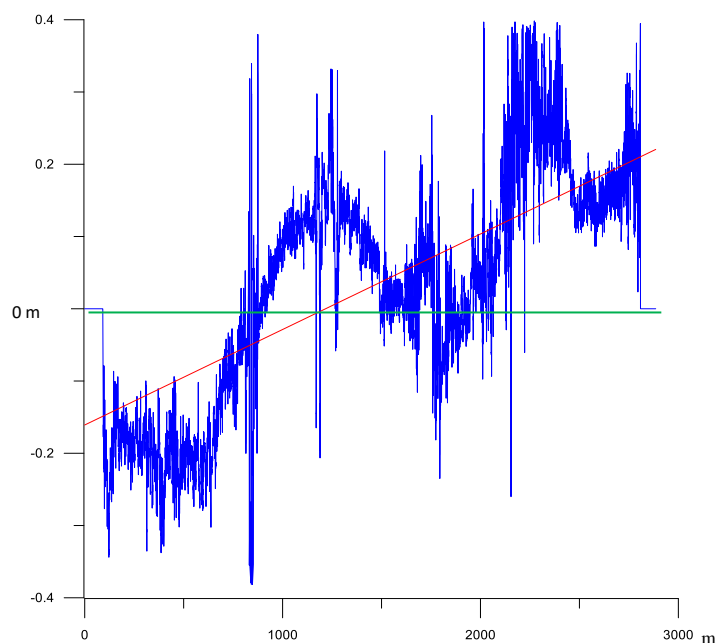


Figure 36 - Profil des écarts d'Ouest en Est entre le MNT de référence MicMac (en vert) et MNT Agisoft (en bleu), la trace du profil est matérialisé par la droite C1, sur la Figure 35

Sur ce graphique la ligne rouge correspond à la droite de régression, qui donne la tendance générale de la courbe, tendance qui confirme l'analyse faite à partir de la carte des résidus (Figure 35). Au centre du graphique (entre 1000 et 1500 mètres), un pic est nettement visible, d'amplitude environ 0.2m au-dessus de la droite de régression, correspondant à la zone de recouvrement des blocs.

Conclusion : il est difficile de conclure sur ce genre de résultats, car cette comparaison ne permet pas d'expliquer l'inclinaison du MNT de MicMac par rapport au MNT issu d'Agisoft. Toutefois, en prenant en compte les différentes comparaisons des deux modèles numériques (comparaison entre modèles et comparaison avec les GCP), il est clairement établi que le modèle issu d'Agisoft présente une meilleure corrélation avec les GCP par rapport au MNT issu de MicMac.

#### 4.1.1.2.4. Conclusion générale

	MNT / Agisoft	MNT / MicMac
Résolution (cm)	27	25
Calcul en bloc	1 bloc	4 blocs
Nombre de GCP non pris en compte	1	7
Valeurs extrêmes supprimées	1	2
Écart maximum GCP (m)	0.026	0.174
Écart minimum GCP (m)	-0.133	-0.390
Écart-type (m)	0.039	0.120
Moyenne des écarts (m)	-0.047	-0.047
Passage du MNT sur GCP	+++	+
Qualité du maillage	+	+++
Classification du sursol	+++	+

Tableau 11- Tableau récapitulatif

MicMac est un très bon logiciel pour la modélisation des surfaces 3D, la qualité des détails de son maillage apparaît bien meilleure que celui généré par Agisoft Photoscan, pour un même jeu de

données (Tableau 12). Toutefois, il présente le désavantage de ne pas passer par les GCP et de ne pas faire une bonne classification du sol. Au final, C'est donc le modèle généré par Agisoft qui présente le meilleur compromis entre qualité, finesse du rendu de la topographie et précision.

#### 4.1.2. Comparaison du MNT drone et du MNT Avion

Tout comme la comparaison entre le MNT fait par MicMac et celui fait sous Agisoft Photoscan, une étude entre les deux MNS produits (avion et drone) a été réalisée en fonction des mêmes critères : qualité des modèles, résidus entre GCP et modèles, écarts en Z des deux modèles.

##### 4.1.2.1. Qualité des modèles

La comparaison des modèles s'est fait sur une zone bien caractéristique où il y a de la végétation, dense et peu dense, du relief, des habitations et des routes. Afin de pouvoir mieux identifier les différents éléments de la zone et donc mieux comprendre les comparaisons, la Figure 37 présente le maillage texturé de la zone choisie.

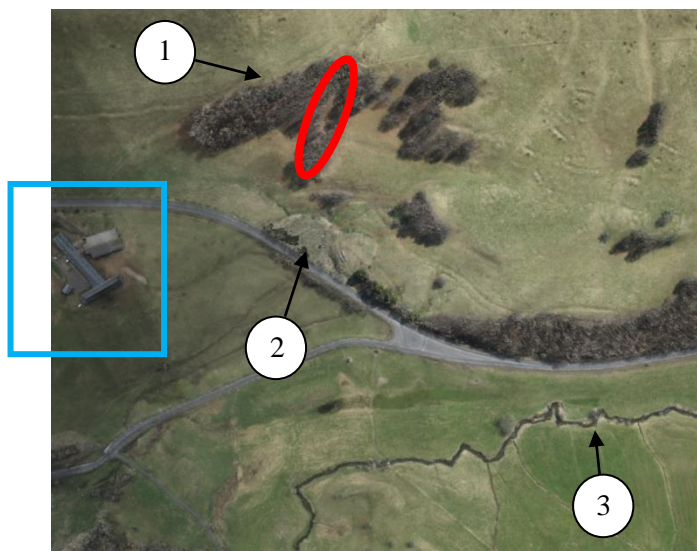


Figure 37 - Modèle texturé de la zone choisie pour la comparaison des modèles Avion et Drone.

Avant de commencer l'analyse, il est important de rappeler que les deux modèles ont été réalisés de manière identique : même logiciel (Agisoft Photoscan) et mêmes paramètres (Annexe 6). Pourtant, il y a une différence logique entre un MNS faite par avion (résolution 0.88m dans ce cas) et un MNS fait par drone (0.27m de résolution) puisque les deux capteurs n'étaient pas à la même hauteur. Pour cela, un zoom sur le centre équestre (le cadre bleu de la Figure 37) a été choisi pour mettre en évidence cette différence.

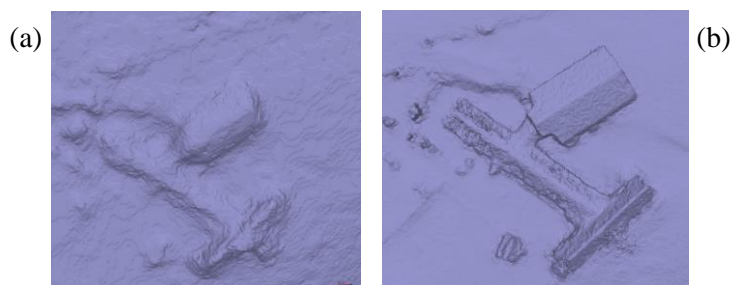


Figure 38 - Maillage avion (a) et drone (b) du centre équestre

Sur la Figure 38 (a), on devine qu'il y a du relief contrairement à la Figure 38 (b) où plusieurs bâtiments sont clairement distincts. Outre les bâtiments, il y a des vagues sur le terrain, il n'est pas aussi lisse que le maillage drone. Avant de comprendre pourquoi, il est bien de rappeler quelques caractéristiques essentielles du MNS et de son acquisition :

	Avion	Drone
Nombre de clichés	42	908
Surface totale du MNT (km <sup>2</sup> )	132.3	4.2
Hauteur de vol moyenne (m)	4604	210
Résolution (m/pixel)	0.88	0.27

Tableau 12 - Rappel sur les caractéristiques des MNT avion et drone

La surface que couvre le MNS avion est 31 fois plus grande que la surface drone pour 22 fois moins de clichés. De plus, la hauteur de vol du drone est 22 fois plus basse que celle de l'avion. Plus les photographies du sol sont prises à basse altitude, plus il y aura de pixels par mètre carré, ce qui a pour effet une meilleure résolution. Le drone volant à plus basse altitude que l'avion, les triangles qui constituent son maillage, seront bien plus petits que les triangles du maillage avion. Ce qui explique pourquoi le MNT drone est beaucoup plus fin et que les détails ainsi que les bordures d'éléments du sursol y sont bien mieux représentés. (Figure 39)

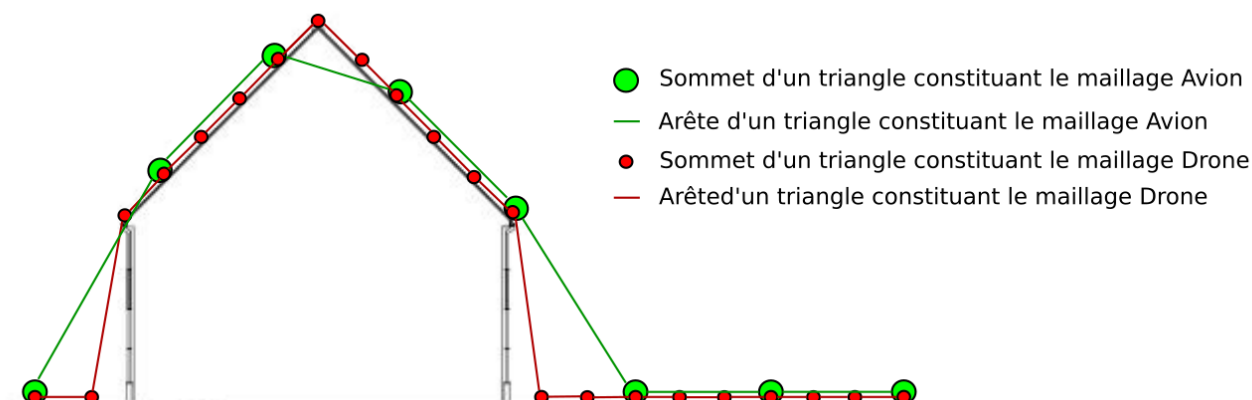


Figure 39 - Représentation schématique de la différence entre le maillage drone et avion

Les points du nuage de points de l'avion sont plus espacés que ceux du drone. Par conséquent, le maillage n'épouse pas parfaitement les formes de la maison, d'où la mauvaise représentation des habitations sur la Figure 38 (a).

Afin d'illustrer ce phénomène, une comparaison sur les différents tronçons de route choisis pour le levé scanner a été réalisée

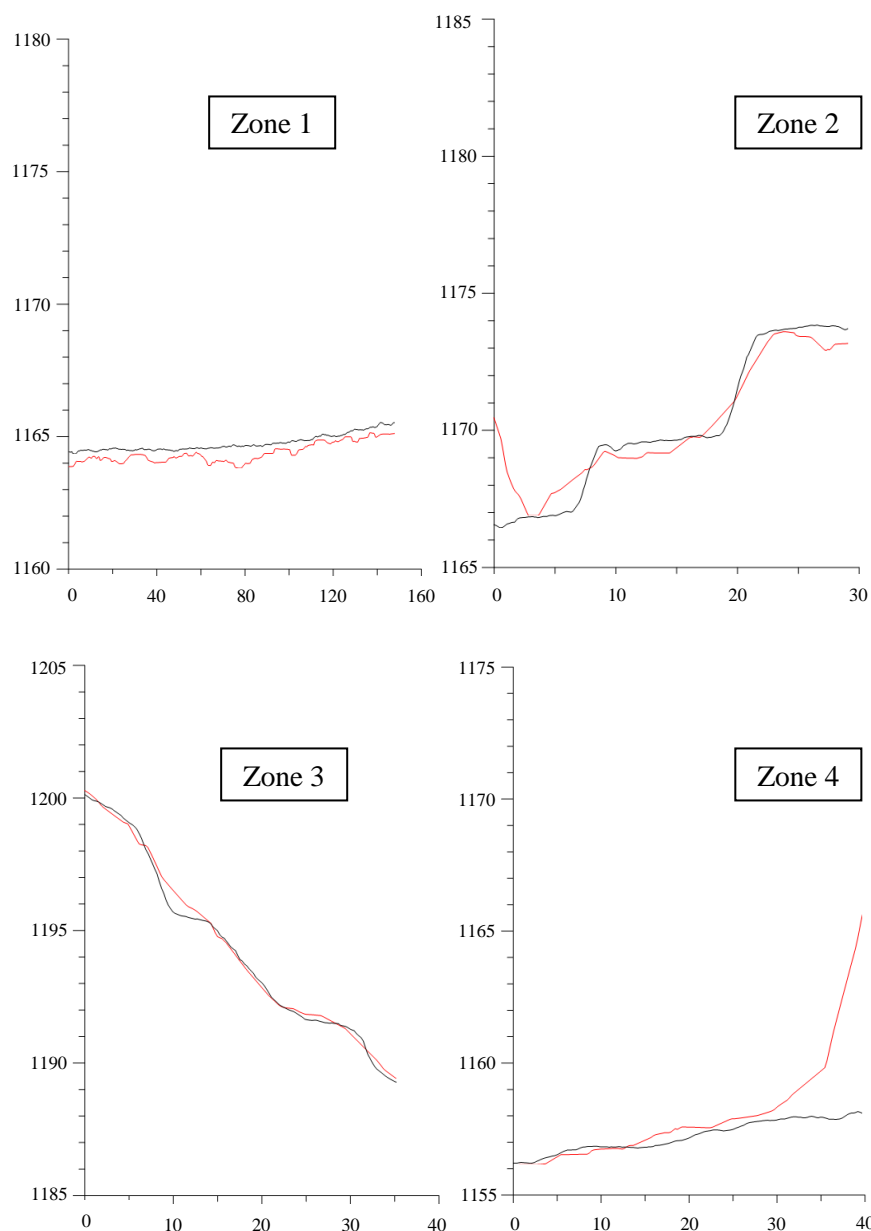


Figure 40 - Coupes des MNT IGN (en rouge) et drone (en noir) des tronçons levés par drone.

La Figure 40 montre la différence d'altitude entre les deux modèles au niveau des tronçons de route levé par scanner 3D. Comme expliqué dans le paragraphe 3.5.3, p.38, ces tronçons ont été choisis pour leurs caractéristiques.

- La zone 1 représente une route dans le fond de la vallée, le modèle drone est pratiquement plat, il suit la topographie de la chaussée tandis que le modèle IGN est beaucoup plus irrégulier.
- La zone 2 se situe au niveau des parkings en escalier séparé par un talus. Il est possible de deviner les différents lieux de stationnement sur le modèle drone, ce qui n'est pas le cas du modèle IGN où l'on peut imaginer qu'il s'agit d'une pente constante sans palier.
- La zone 3 représente une pente sur le flan du versant entrecoupé par une route. Sur cette coupe, les deux modèles suivent la même pente et sont très proches (comparé aux autres coupes) à l'exception du passage de la route qui n'est visible que sur le modèle drone.

- La zone 4 illustre bien la Figure 39 puisqu'elle se situe à proximité d'une forêt, ce qui explique la divergence à droite du graphique.

Pour la suite de la comparaison, étant donné que les deux MNT ont été produits avec le même logiciel, il peut être judicieux de l'utiliser. En effet, le point de vue de la classification d'Agisoft Photoscan offre un bon moyen de juger la qualité d'un modèle produit.

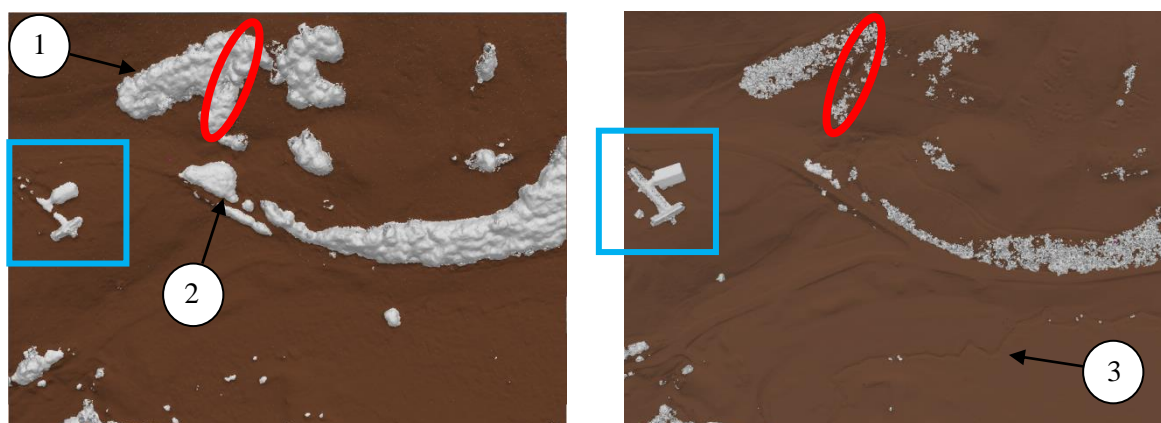


Figure 41 - Classification du modèle Avion (a) et du modèle Drone (b)

Ici, la classification dans les deux modèles ne donne pas le même résultat. Il y a, par exemple, une différence visible de la densité des forêts. Sur le modèle avion (a), les forêts sont plus denses que sur le modèle drone (b). Sur ce dernier, il y a beaucoup de points classés comme sol au beau milieu d'un secteur majoritairement classé sursol, cela forme des trous. Ces trous peuvent être effectivement de sol vu à travers la végétation, mais cela peut aussi être un défaut de classement. Cela va dépendre de la situation, par exemple, à l'intérieur du morceau de forêt (1), il y a une bande sans arbre au milieu de celle-ci (entouré en rouge sur la Figure 37) qui est présente sur le modèle scan, mais pas sur le modèle avion. Par contre, le bosquet qui est contiguë à cette portion de forêt n'est presque pas classé en tant que sursol sur la Figure 41 (b) alors que la présence d'arbres est évidente (cf. Figure 37). Certains éléments du sursol sont donc classés en tant qu'éléments du sol, et inversement. C'est le cas d'une butte (2) qui a été classé dans la mauvaise catégorie sur le modèle avion, cette mauvaise classification est peut-être due à un talus trop abrupt en bord de chaussée. L'explication de cette erreur de classement est la même que pour les habitations (cf. Figure 39).

La dernière grosse différence entre ces deux MNT est la qualité des détails. Comme vu précédemment, le maillage du MNT avion est beaucoup moins fin, ce qui entraîne une grosse perte d'information, par exemple la non représentation de la Couze Pavin (3), ou alors la route dans la coupe de la zone 3 de la Figure 40.

#### 4.1.2.2. Comparaison des modèles avec les GCP.

Il est difficile d'établir une comparaison équitable des deux modèles avec les GCP. En effet, le nombre de projections d'un point d'appui qu'il peut y avoir sur les clichés du drone est nettement supérieur aux projections de GCP sur les clichés avion. En effet, pour le drone, un point d'appui est vu par 13 clichés en moyenne avec un maximum de 32 clichés alors que le maximum d'images où un GCP avion peut être identifié est de 6. De plus, pour générer le MNT avion, 15 GCP ont été utilisés, tandis que 52 GCP ont servi à créer le modèle drone. Le fait qu'il y en ait autant sur une petite zone rend le modèle plus précis, les résidus seront par conséquent moins élevés.

Néanmoins, cette comparaison a tout de même été réalisée avec des GCP qui sont indépendants du calcul des deux modèles, puisque ce sont ceux qui ont servi à géoréférencer les nuages de points du scanner 3D. Même si les cibles ont été placées sur des piquets d'environ 1 mètre, la position exacte des GCP n'a pas d'importance, ce qui importe, c'est la différence des résidus avec les deux modèles.

Nom	Résidu		Nom	Résidu	
	Drone (m)	Avion (m)		Drone (m)	Avion (m)
GCP_Park1_1	0,038	0,016	GCP_Poub_4	-0,323	0,103
GCP_Park1_2	0,210	1,053	GCP_Tri_1	0,710	0,969
GCP_Park1_3	0,189	0,566	GCP_Tri_2	-0,135	-0,018
GCP_Park1_4	-0,013	-0,130	GCP_Tri_3	-0,368	-5,215
GCP_Park2_1	-0,054	0,074	GCP_Tri_4	-0,229	-3,293
GCP_Park2_2	-0,211	-0,455	GCP_Vir_1	-0,429	0,827
GCP_Park2_3	-0,055	0,220	GCP_Vir_2	-0,048	-0,038
GCP_Park2_4	0,176	-1,148	GCP_Vir_3	-0,111	-0,389
GCP_Poub_1	0,037	0,493	GCP_Vir_4	-0,057	-0,136
GCP_Poub_2	-0,026	-0,099	moyenne	-0,040	-0,391
GCP_Poub_3	-0,099	-1,222	écart-type	0,247	1,479

Tableau 13 - Résidus entre les GCP Scanner avec les modèles avion et drone

Dans ce tableau, les points en gris représentent les écarts supérieurs à  $\pm 1$  m et les points rouges, des aberrations. Ces écarts élevés ne sont présents que sur les résidus avec le modèle avion. Dans le paragraphe précédent (§ 4.1.2.1), l'analyse de la Figure 39 explique comment se comporte le maillage avion au niveau de la végétation ou des habitations. Les points GPS, dont les résidus sont soit en gris, soit en rouge, ont été mesurés à proximité d'arbres (par exemple, les GCP 3 et 4 de la Figure 42) ce qui explique ces valeurs négatives.



Figure 42 - Position des GCP servant au géoréférencement du nuage de point "Virage" du scanner 3D (maillage 4 de la Figure 25)

Si les écarts trop importants avec les GCP ne sont pas pris en compte dans le calcul de la moyenne des résidus avion, la moyenne obtenue est de 0,0381 mètre. Même si les moyennes des deux modèles sont devenues plus proches, les résidus ont quand même tendance à être meilleurs dans la comparaison des GCP avec le modèle drone.

## 4.1.2.3. Écart en Z des deux modèles.

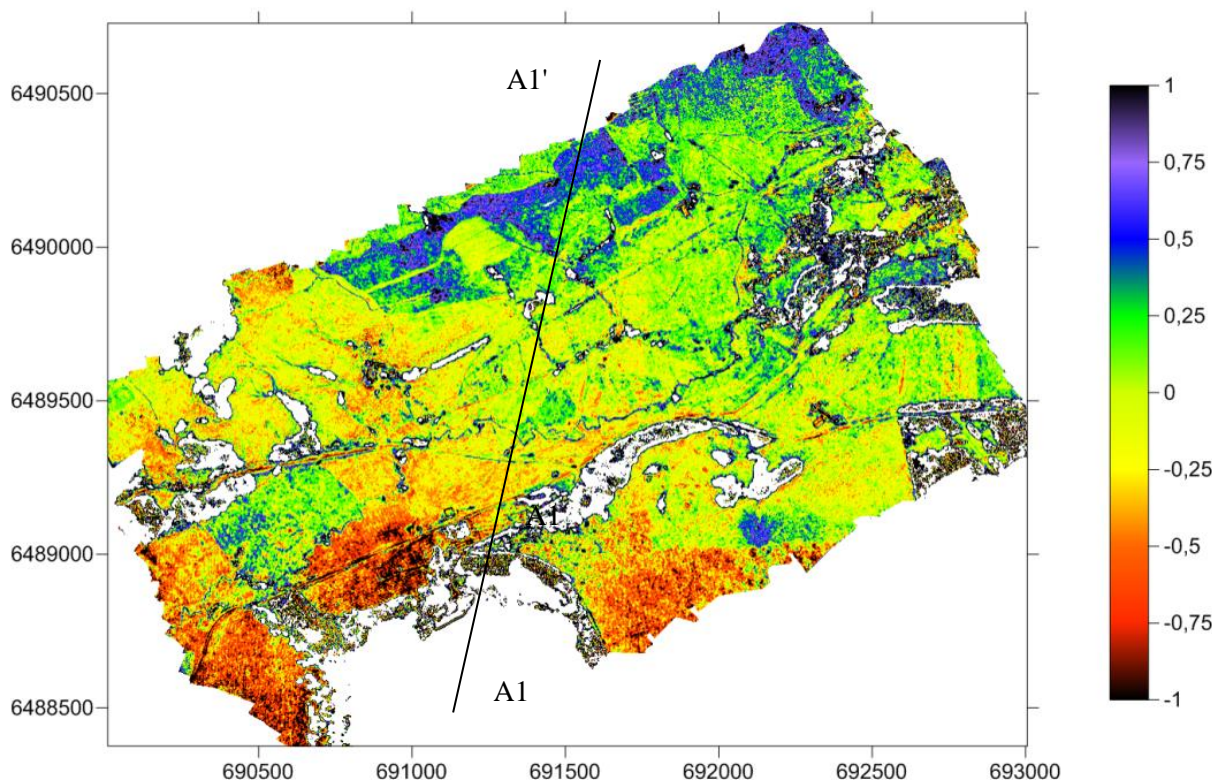


Figure 43 - Comparaison en élévation des deux modèles (en mètres) (Annexe 5)

Pour réaliser cette comparaison, il a été décidé d'utiliser les MNS plutôt que les MNT, en prenant le MNS drone comme référence. En effet, comme vu dans le paragraphe 4.1.2.1, le résultat de la classification n'est pas le même et certains éléments du sol ont été supprimés, et d'autres éléments du sursol ont été conservés. Pour éviter d'avoir des zones qui ne reflètent pas la réalité, le choix des MNS paraît plus propice. Néanmoins des écarts largement supérieurs à 1 mètre ont été constatés au niveau des forêts et du lac. Pour ne pas être perturbés par ces valeurs, ils ont été représentés en blanc. Quelques écarts moins significatifs sur les forêts restent visibles, comme des résidus au centre des zones blanches à l'est de la carte.

Une tendance générale de la répartition des écarts se fait ressentir. Au nord, le MNS avion semble se trouver au-dessus du MNS drone, tandis qu'au sud, c'est l'inverse. Le MNS avion a été réalisé sur une plus grande zone que le MNS drone, il est donc probable que cette tendance des écarts soit influencée par le relief avoisinant la zone. Sur la Figure 44, aux alentours du point A1', il y a un creux suivi d'une colline. Il est possible que ce soit ce relief qui ait influencé le MNS avion à se retrouver au-dessus du MNS drone. Un raisonnement similaire peut être fait pour la zone A1, au niveau du lac Pavin. Le MNS avion est moins bien modélisé sur les contours du cratère, puisque pour la génération du MNS avion, la surface du lac a été utilisée contrairement au modèle drone (cf. les Figure 21 et Figure 23, les images des MNS produits). La surface du lac n'est pas présente sur le produit drone, un trou se trouve à la place. De plus, plusieurs GCP ont été placés proche du cratère, modélisant plus précisément ce dernier, ce qui peut expliquer pourquoi le MNS drone se trouve au-dessus du MNS Avion.



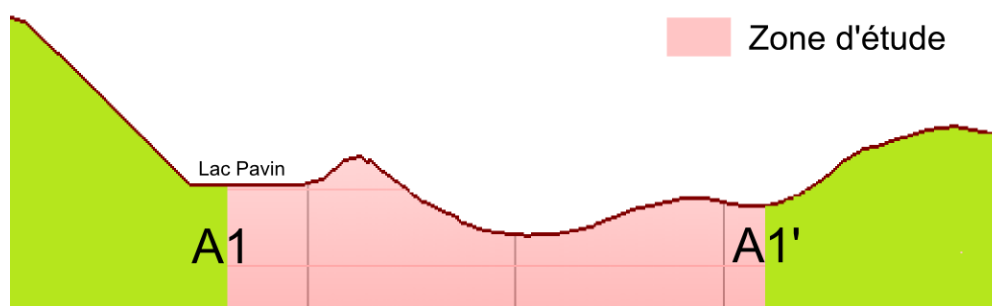


Figure 44 - Coupe grossière de la topographie de la zone d'étude et de son voisinage selon l'axe A1 (Figure 43)

Pour les mêmes raisons, la couze<sup>1</sup> Pavin ainsi que les routes apparaissent en bleu sur la Figure 43. Sur la Figure 41 (a), la couze Pavin n'est pas modélisée tandis que sur le modèle drone (b) elle est représentée, il y a donc forcément un écart dans cette zone-là entre les deux modèles.

Malgré ces différences, la grande majorité des écarts se trouvent entre -0.25 et 0.25 mètre (couleur jaune et verte dans la Figure 43).

#### 4.1.3. Comparaison des modèles avec le scanner

Afin de compléter l'analyse, le MNT fait au scanner va être utilisé comme référence, puisque celui-ci est beaucoup plus précis que les modèles drone et avion. Le résultat sur la précision des méthodes sera plus concret. Pour faire cette comparaison, le logiciel 3DReshaper a été utilisé. Ce logiciel permet de faire des reconstructions de surfaces à partir de données 3D, de maillage, etc. Ce logiciel est utilisé dans plusieurs domaines : la modélisation d'objet architectural, le contrôle qualité des pièces d'industrie, l'application médicale et la topographie. C'est, bien entendu, dans ce dernier domaine que 3DReshaper va être utilisé. Plusieurs applications sont disponibles, mais c'est celle sur la comparaison entre plusieurs modèles qui va nous intéresser.

Une fois la comparaison faite (voir la méthode de traitement du logiciel 3DReshaper en Annexe 13), un nuage de points en couleur est obtenu aux endroits où il y avait une superposition des maillages, c'est-à-dire au niveau des zones levées au scanner. La couleur d'un point indique à peu près dans quelle tranche d'écart il se trouve (cf. Figure 45). Les points en gris, tout autour, sont les points qui appartiennent au modèle (avion ou drone), mais qui n'ont pas servi à la comparaison.

Sur la Figure 45, il apparaît que la comparaison du scanner avec le modèle drone est bien meilleure que la comparaison avec le modèle avion. En effet, la comparaison de gauche (drone) a non seulement une échelle des écarts plus petite que pour la comparaison avion (allant de -2 à +1.48m pour le drone et de -4.17 à +1.26m pour l'avion), mais en plus, la variation des couleurs dans la comparaison drone est très faible. La couleur qui domine est indéniablement le vert, contrairement aux images de droite où presque toutes les couleurs de l'échelle sont représentées.

<sup>1</sup> Couze : Nom générique des cours d'eau dans le Puy-de-Dôme

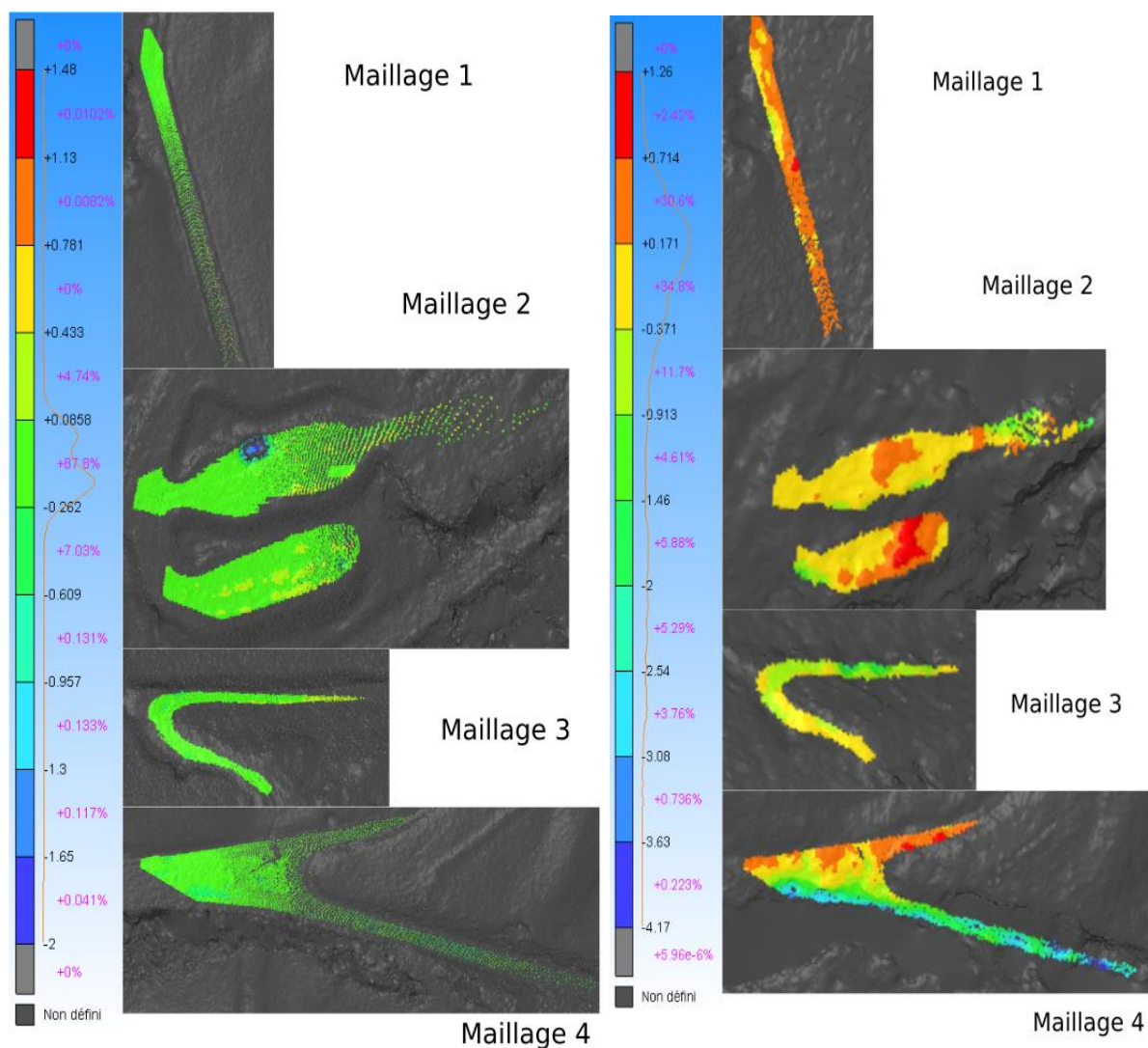


Figure 45 - Résultat de la comparaison du scanner avec le drone à gauche et avec l'avion à droite (valeurs en mètre)

En effet, la grande majorité des écarts drone, 87.8% des points, se situent dans un même intervalle  $[-0.262; 0.0858]$ , alors que seulement deux intervalles dépassent les 1%, et ce sont ceux qui sont contigus à celui qui contient 87.8% des écarts. Sur la comparaison du scanner avec l'avion, il n'y a pas d'intervalle aussi dominant que l'intervalle précédemment cité. Il y a les intervalles  $[-0.571; 0.171]$  et  $[0.171; 0.714]$  qui comptabilisent respectivement 34.8% et 30.6%, qui regroupent la plus grande majorité des écarts. Toutefois, ils sont beaucoup plus répartis dans l'échelle que les écarts de la comparaison drone. Pour mieux s'en rendre compte, les diagrammes en bâton ci-dessous représentent la répartition des écarts sur les mêmes intervalles :

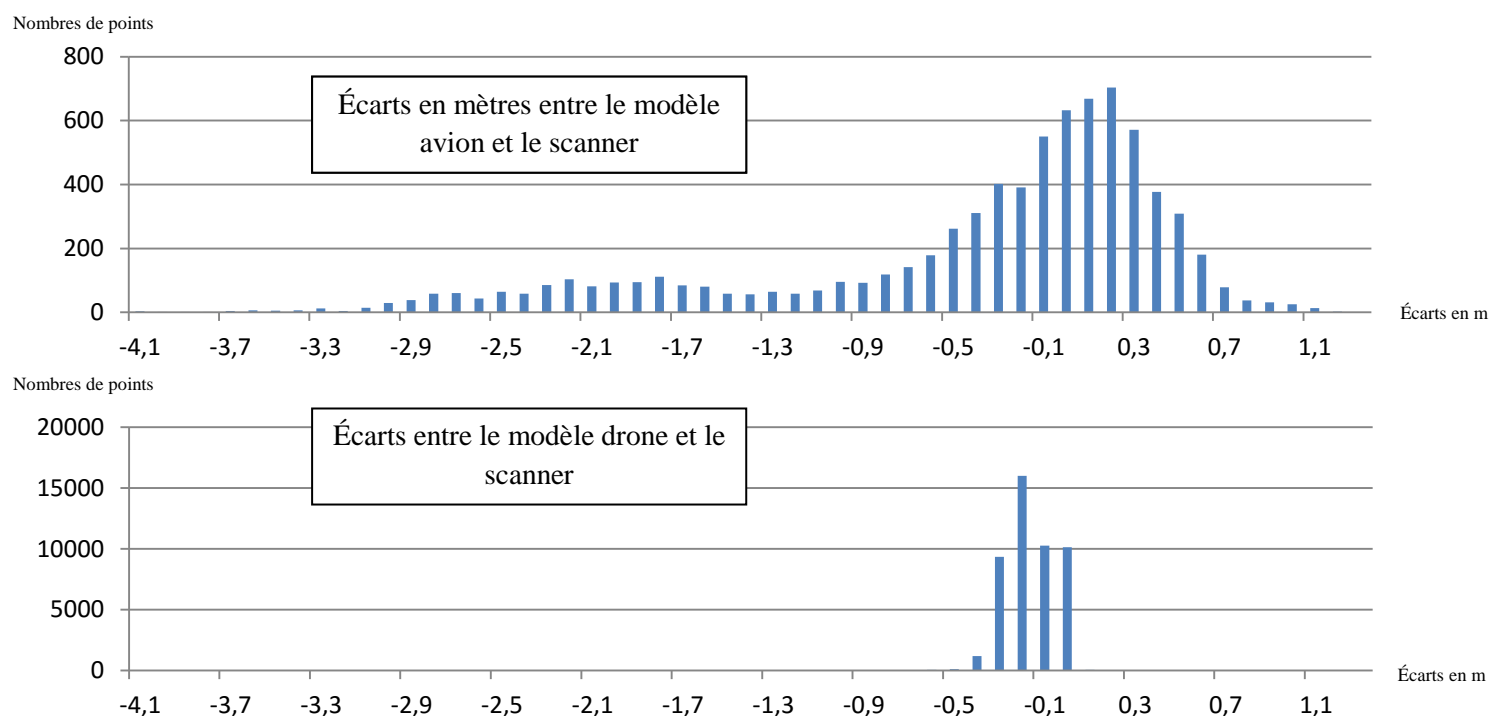


Figure 46 - Diagramme représentant la répartition des écarts

	Avion	Drone
Moyenne (m)	-0,342	-0,107
Écart-type (m)	0,909	0,132

Tableau 14 - Moyenne et écart-type des écarts entre le modèle scanner et les modèles aériens

La différence de répartition sur le graphique précédent est plus visible, les écarts drone (graphique du bas) sont vraiment très concentrés sur une zone contrairement aux écarts avec le maillage avion qui sont plus épars, ce qui explique cette conséquente différence entre les deux écarts-types. L'écart-type de la comparaison scanner/drone est environ 7 fois plus petit que l'écart-type scanner/avion. Il est intéressant de noter que le nombre de points qui ont été comparés est très différent dans les deux cas alors que les paramètres qui ont servi à faire les comparaisons sont les mêmes. Au total, la comparaison scanner/avion compte 7613 écarts tandis que la comparaison scanner/drone compte 47367 écarts soit un peu plus de 6 fois plus. L'écart moyen entre le modèle drone et le Scanner 3D est d'environ -10 cm.

## 4.2. Comparaison des facteurs temps et financier

Avant de conclure sur la qualité des modèles, il est primordial de comparer deux autres paramètres, le facteur temps et le facteur coût. Ces deux facteurs font partie des paramètres utilisés par les professionnels pour le choix de la méthode de levé la plus appropriée pour les travaux envisagés.

### 4.2.1. Facteur temps

Le facteur temps n'est pas négligeable dans la procédure de réalisation d'un MNT à partir de photographies aériennes. En effet, le temps d'acquisition et le temps de traitement sont différents selon la méthode utilisée (Tableau 15).

	Drone	Avion	Pléiades
Préparation mission	4 jours	2 jours	-
Acquisition de données	3 jours	5 heures	-
Traitement des photos	4 heures	-	-
Création du MNT	4 jours	1 jour	-

Tableau 15 - Temps passé pour chaque mission

- **Drone**

La préparation de la mission a duré 4 jours. Pendant cette période, il a fallu :

- Contacter le prestataire de service, la société Technivue, en charge des vols du drone ;
- Faire un premier schéma prévisionnel des vols et estimer le nombre de GCP nécessaire en fonction de l'emprise au sol des photographies ;
- Valider le nombre de GCP et leur position.
- Repérer sur les photos aériennes d'éventuels points remarquables, pour limiter au maximum l'utilisation de cibles à placer au sol.

La phase d'acquisition des données a nécessité 3 jours, le temps de placer les cibles au sol pour le géoréférencement des données. Ensuite, il faut compter le temps d'acquisition des points GPS, puis le temps de vol du drone. Heureusement, pour cette mission il y avait 5 personnes en comptant les pilotes du drone, les tâches ont pu être réparties de façon à être les plus efficaces possible.

Le traitement des photos, pour rappel, implique une étape longue et fastidieuse de sélection des photos à supprimer (redondance, altitude de vol ou attitude de la plateforme inadaptées), car le volume de photos était beaucoup trop important (voir le chapitre 3.3.5.).

Enfin, la création du MNT drone a nécessité un long temps de calcul, lié au volume conséquent du jeu de données (traitement de 908 photos). De plus, il a fallu placer un ensemble de GCP, afin d'assurer une couverture satisfaisante sur toutes les photos. Même si Agisoft Photoscan identifie sur les autres clichés les points précédemment placés, leur position reste approximative, il faut donc la réajuster sur les nouveaux clichés (voir Annexe 6)

- **Avion**

Pour la préparation de la mission, les photos aériennes de l'IGN étant disponibles dans la base de données du CRAIG. La phase préparatoire, relativement courte, a simplement consisté à identifier des éléments remarquables sur les photographies, contrairement au drone où la visibilité ou l'existence de certains points remarquables n'était pas assurée dans le travail préparatoire.

L'acquisition des données a elle aussi été rapide, les points étant préalablement choisis et les photos déjà acquises, seulement une demi-journée a été nécessaire.

Et enfin la création du MNT avion a elle aussi été beaucoup plus rapide que la génération du MNT drone, car il n'y avait que 42 clichés (campagne IGN 2013) contre près de 900 pour une extension comparable.

#### 4.2.2. Facteur financier

L'aspect financier est aussi à prendre en considération. Hormis le fait que la mission drone ait duré plus longtemps, donc a mobilisé plus longtemps l'effectif du laboratoire, cette acquisition a coûté relativement cher comparée à la mission avion. En effet, la prestation de l'entreprise Technivue, société pilotant le drone, a été facturée pour un montant de 6000 € pour 3 jours d'acquisition. De plus, il a fallu payer les frais de déplacement des 3 employés du Laboratoire Magmas et Volcans à raison d'un forfait de 60€ par personne et par jour, soit un total de 540€ à ajouter au budget drone.

La mission avion n'a, quant à elle, rien coûté (si l'on ne compte que l'acquisition et non les honoraires). Le CRAIG fournit les données en open data aux organismes publics (structures de recherche, collectivités territoriales, ...), données qui peuvent être commandées et téléchargées via le site internet. De plus, des WMS et WFS sont également disponibles sur internet.

Bien que les données Pléiades n'aient pas été livrées à temps, le prix des images satellite est de 2300 €. La zone qui intéresse le LMV, et les autres organismes du projet TELEPATH, a une superficie d'environ 600km<sup>2</sup>.

#### 4.3. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, nous avons tout d'abord apporté des réponses à un des volets de la problématique scientifique initialement posée, dans le cadre du projet TELEPATH, à savoir quelle méthode d'acquisition est susceptible d'atteindre ou approcher la précision du LiDAR. L'analyse de la comparaison des MNT montre clairement que le modèle drone est nettement plus précis que le modèle avion. La qualité du MNT drone, pour ce genre de travail, est vraiment très proche de la densité que peut fournir un levé par LiDAR terrestre, sachant que la précision du LiDAR aéroporté est moins bonne que la lasergrammétrie au sol. Toutefois, lorsqu'il est fait appel à un prestataire, le choix du drone est fortement dépendant de la surface à couvrir. Dans notre cas d'étude, la mission s'acquisition par drone a coûté 6000 € hors taxes, pour une superficie de 4 km<sup>2</sup>. Un montant comparable avait été déboursé sur une précédente mission faisant appel à la technique LiDAR aéroporté, pour une acquisition sur une superficie de 6 km<sup>2</sup>. Il est donc clair que l'acquisition des images par drone implique obligatoirement une maîtrise complète de la chaîne stéréophotogrammétrique, depuis la phase d'acquisition des photographies jusqu'à la phase de production des MNT.

Les images de l'IGN ne présentent pas une résolution spatiale suffisante pour remplacer le LiDAR dans le cas d'études impliquant l'acquisition de modèles numériques de haute précision. Pour le projet sur le secteur de la Plaine du Gelat, du projet TELEPATH, le MNT issu de la stéréophotogrammétrie aérienne par avions offre une qualité bien moins bonne (1.4 point/m<sup>2</sup> seulement). Néanmoins, il présente quelques avantages par rapport au modèle drone : la superficie totale du modèle avion est beaucoup plus importante et offre une meilleure classification de la haute végétation et présente un bruit très réduit, possiblement lié à la plus faible résolution spatiale. De plus, l'acquisition des images est gratuite et le temps de traitement des données est rapide. Il ne faut donc pas écarter ce mode d'acquisition, il doit simplement être adapté à des besoins spécifiques (i.e. étude globale des structures morphologiques à grande échelle), alors que le MNT drone fournira des données de haute résolution adaptées aux problématiques en géoarchéologie par exemple. Le tableau 16 donne un aperçu du type de MNT qu'il faut privilégier en fonction des études à réaliser.

Types d'objets à analyser	Largeur du site	Type de MNT pour une détection possible
Province volcanique	10-100 km ou plus	Photo satellite moyenne à haute résolution
Edifice volcanique	100 m à quelques km	Photo aérienne, LiDAR Aéroporté, photo satellite haute résolution
Cours d'eau	1 m à quelques m	Photo drone, LiDAR terrestre et aéroporté
Rigole	10 cm à quelques dm	Photo drone, LiDAR terrestre
Griffures	< 10 cm	LiDAR terrestre

Tableau 16 - Types de données nécessaire pour différents travaux

Le drone est donc une excellente plateforme pour l'acquisition de données en vue de la création de modèles numériques de terrain à haute résolution, qui peut être une alternative au LiDAR aéroporté, si certaines conditions sont respectées : extension restreinte de la zone d'étude (quelques km<sup>2</sup>) et absence ou peu de végétation. Toutefois, comme nous l'avons montré, le coût et le temps d'acquisition et de traitement sont relativement proches des solutions LiDAR (Tableau 17).

	Avion	Drone	Pléiades	LiDAR
Résolution (m/pixel)	0.88	0.27	0.5	0.5
Densité de points (pts/m <sup>2</sup> )	1.28	13.4	-	Entre 10 et 20
Temps (jours)	4 jours	12 jours	-	-
Coût d'acquisition au km <sup>2</sup>	0 €	1500 €	6.67 €	1 416 €

Tableau 17 - Tableau comparatif des résultats pour les différentes méthodes d'acquisition

Afin de diminuer les coûts d'acquisition par drone et d'éviter de passer par une prestation de service, le Laboratoire Magmas et Volcans vient d'acquérir un drone dédié à la photogrammétrie, qui sera opéré par un personnel formé. L'acquisition d'un tel appareil sera amorti en peu de temps, et fournira une solution complémentaire aux solutions LiDAR, notamment dans le cas de zones de faible extension. Il est toutefois indispensable de prendre en compte, dans le coût global d'acquisition photogrammétrique, le temps de préparation des vols et trajectoires de vols, de placement et mesure des GCP, en plus du temps de traitement de jeux de données conséquents de photographies pour la génération des MNT.

L'étape suivante de cette étude, non réalisée dans le cadre de ce TFE, consistera à effectuer une analyse comparative entre les MNT acquis par stéréophotogrammétrie aérienne (drone et avion) et les MNT issus du traitement tri-stéréoscopie de l'imagerie Pléiades. La comparaison précise de ces MNT à haute résolution impliquerait, en théorie, que les données soient acquises dans un laps de temps très court, afin d'éviter toute modification du couvert végétal (champs, bois, ...). Enfin, une station de calcul très puissante est indispensable, afin de pouvoir traiter les images plus rapidement et avec une qualité supérieure (cas du choix de génération de la densité du nuage de points sous Agisoft, par exemple).

## Bibliographie

- **Ouvrages, Revues, Cours, Mémoire et Thèses :**

BAKKOUCH Leila, 2013. "Étude des processus d'acquisition et de traitement de données acquises par aéronef léger pour les travaux d'inspection de la SNCF, application aux ouvrages rocheux." Mémoire d'ingénieur ESGT du Mans, Spécialité topographie. (p.14-17/p.40)

BUDIN Simon. 2011. "analyse qualité du modèle numérique de terrain du Grand Lyon. Réalisation de tests et propositions de mise en œuvre." Mémoire d'ingénieur ESGT du Mans, Spécialité topographie. (p.8-10/p.13-15/p.17-19)

CECCHI Emmanuelle. 2003. "Reconstruction 3D pour la volcanologie: apports d'une méthode multi-vues par photogrammétrie numérique" Thèse de l'UFR de Recherche Scientifique et Technique de Clermont-Ferrand. (p.11-12)

CHANDELIER Laure. 2012. "Photogrammétrie analytique." Cours ENSG première année. (p.7)

CHANDELIER Laure. 2012. "Aérotriangulation : mesures terrain." Cours ENSG première année. (diapo. 11-12/ diapo 16-18/ diapo 27-33)

CHANDELIER Laure et al. 2011. "La prise de vues photogrammétriques" Département Imagerie Aérienne et Spatiale. Cours ENSG première année. (p.9-10/p.15-18)

CNIG. 2002. "Fiche technique N°58 : Modèles numériques de terrain - Aspects techniques" (p.1/p.4)

DELPRAT Pierre et al. 2008. "Représentation de la Terre en cartographie" Cours de l'ENSG. (p.7)

DURAND Marc. 2012. "Étude du géoréférencement direct de prises de vues aériennes stéréoscopiques." Mémoire d'ingénieur ESGT du Mans, Spécialité topographie. (p.8)

GUÉRIN Cyrielle. 2014. "Génération de modèles numériques de surface et détection de changements 3D à partir d'imagerie satellite stéréoscopique très haute résolution". Thèse de doctorat de l'Université Paris Descartes, (p.27)

GREUGNY Valentin. 2014. "Utilisation d'images Pléiades tri-stéréoscopiques pour la production d'un modèle numérique de surface" Mémoire d'ingénieur de l'Université Montpellier 2 sciences et techniques. Mention IGT (Ingénierie et Gestion Territoriales) spécialité géomatique. (p.3 et annexe4)

GROB Marie. 2014. "Protocole de qualification d'un système de lever par drone pour les géomètres, application au drone Aibot X6." Mémoire d'ingénieur ESGT du Mans, Spécialité topographie. (p.11-15/p.27)

LYAAKOBI Youness. 2013. "Comparaison entre les modèles rigoureux et approximatifs, dans la production des MNT." Mémoire d'ingénieur ESGT du Mans, Spécialité topographie. (p.7/p.18-19)

MOREL Laurent. 2014. "Méthodes GNSS en topographie" Forum AFT 2014. (p.21)

MOREL Laurent. 2014. "Système de référence - rattachement" cours ESGT de Géodésie partie 1, deuxième années. (p.26-28)

POINTET Abram. 2005. "Modèle numérique d'altitude MNA". Cours: d'analyse spatiale de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Laboratoire de Systèmes d'Information Géographique (LaSIG). (diapo 6-10)

TALIBART Chloë. 2014. "Étude microtopographique diachronique d'édifice volcaniques en phase pré-éruptive et éruptive; apports de la photogrammétrie terrestre." Mémoire de Master 2 Recherche au Laboratoire Magmas et Volcans de Clermont-Ferrand. (p.5-6)

THOMMERET Nathalie et al. 2009, "MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application" géomorphologie : relief, processus, environnement (p.141-152)

STURMANIS Ervins. 2006. "Comparison of raster and vector approaches in digital elevation models for hydrological calculations.", International Scientific Conference: information Technologies for rural development, Jelgava, Latvia University of Agriculture. (p.179-183)

VUILLE Ernest. 1950. "La photographie aérienne au service de la cartographie". Revue Geographica Helvetica, Volume 5. (p.276-287)

- **Sites internet :**

Site de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Article sur le LMV.  
<http://www.univ-bpclermont.fr/article122.html>

Site de l'université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand. Article sur GEOLAB.  
<http://www.univ-bpclermont.fr/article131.html>

Site de la Maison des Sciences de l'Homme de Clermont-Ferrand. Présentation.  
<http://www.msh-clermont.fr/>

Site des ressources naturelles Canada, article sur le principe de base des radars  
<https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9356>

Site de radartutorial, article présentant le principe du Radar à synthèse d'ouverture (RSO)  
<http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.fr.html>

Site Altoa, article définissant le MNT et le MNS  
<http://www.altoa.org/fr/produits-mns-et-mnt.html>

Site Géosud, article sur la disponibilité des images pléiades  
<http://geosud.teledetection.fr/web/guest/images-pleiades>

Site Legifrance.gouv.fr, Arrêté relatif à la conception des aéronefs civils  
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025834953&dateTexte=&categorieLien=id>

Site Prezi, article sur la photogrammétrie par satellite  
<https://prezi.com/k7155z3ir6bu/la-photogrammetrie-par-satellite>



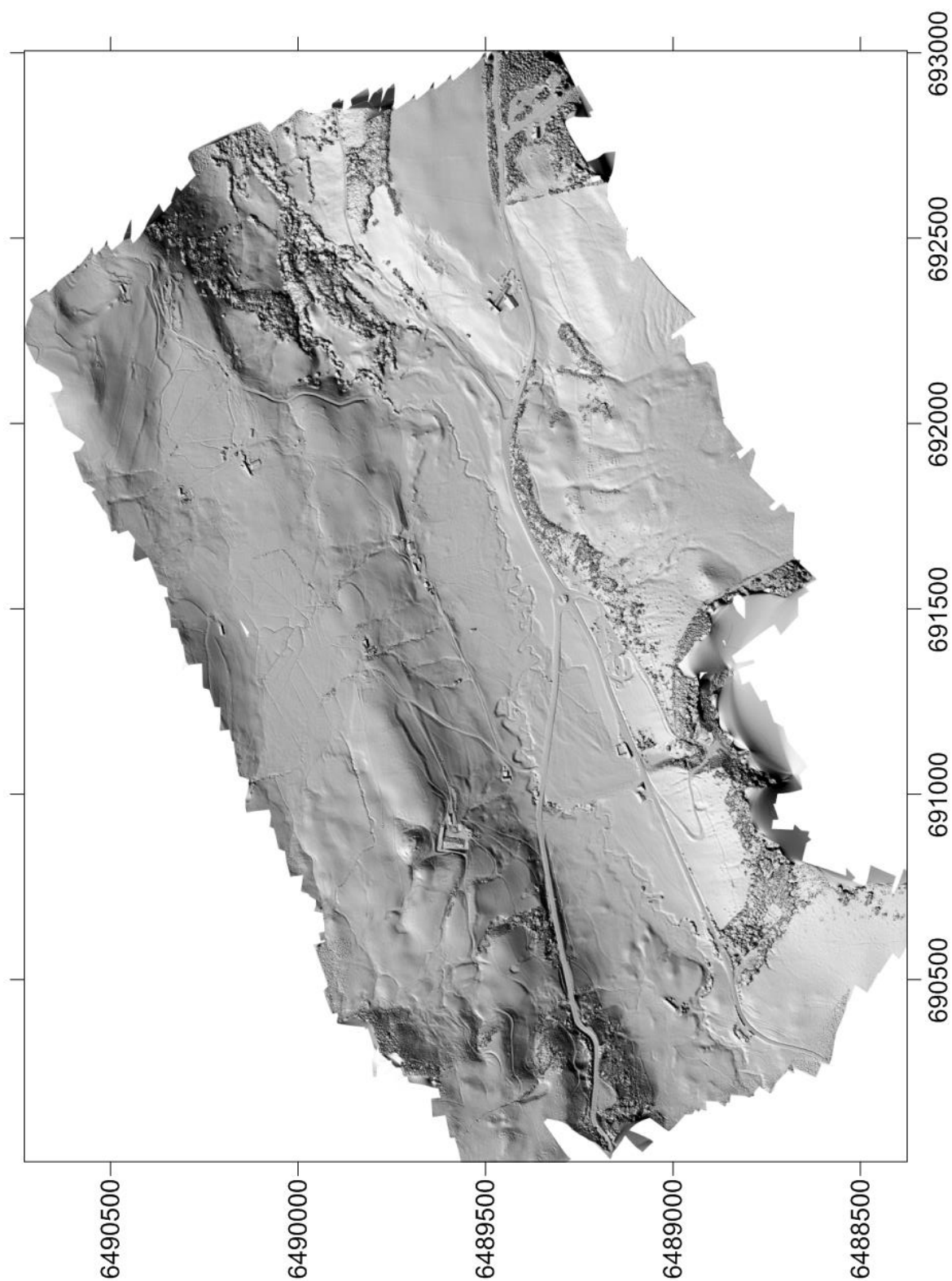
# **ANNEXE**

<b>Table des Annexes</b>
--------------------------

ANNEXE 1 .....	71
Utilisation d’Agisoft Photoscan pour faire un MNT .....	71
ANNEXE 2 .....	76
Extrait de l’article du 11 avril 2012 – relatif à la conception des aéronefs civils (tirés des annexes du rapport de Leïla BAKKOUCH).....	76
Activité particulière avec des aéronefs Télépilotes .....	77
ANNEXE 3 .....	83
Fiche technique des points GPS pour la mission drone.....	83
ANNEXE 4 .....	88
Rapport Agisoft sur la création du MNT drone.....	88
ANNEXE 5 .....	94
Fiche technique des points GPS pour la mission avion.....	94
ANNEXE 6 .....	98
Rapport Agisoft sur la création du MNT avion .....	98
ANNEXE 7 .....	103
Fiche technique des points GPS pour la mission scanner .....	103
ANNEXE 8 .....	107
Utilisation de 3DReshaper pour la comparaison des MNS/MNT .....	107

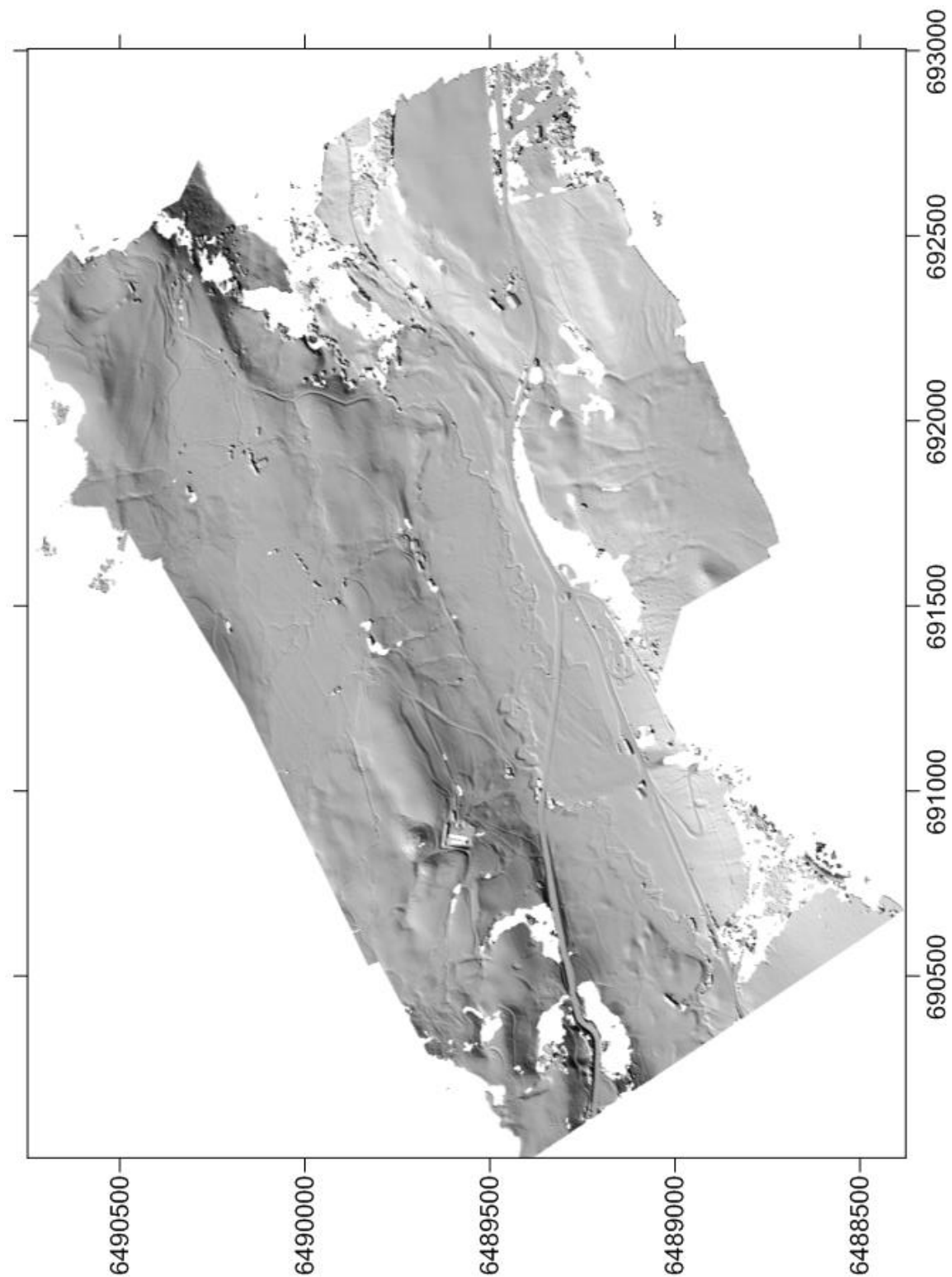
# ANNEXE 1

## MNS Drone



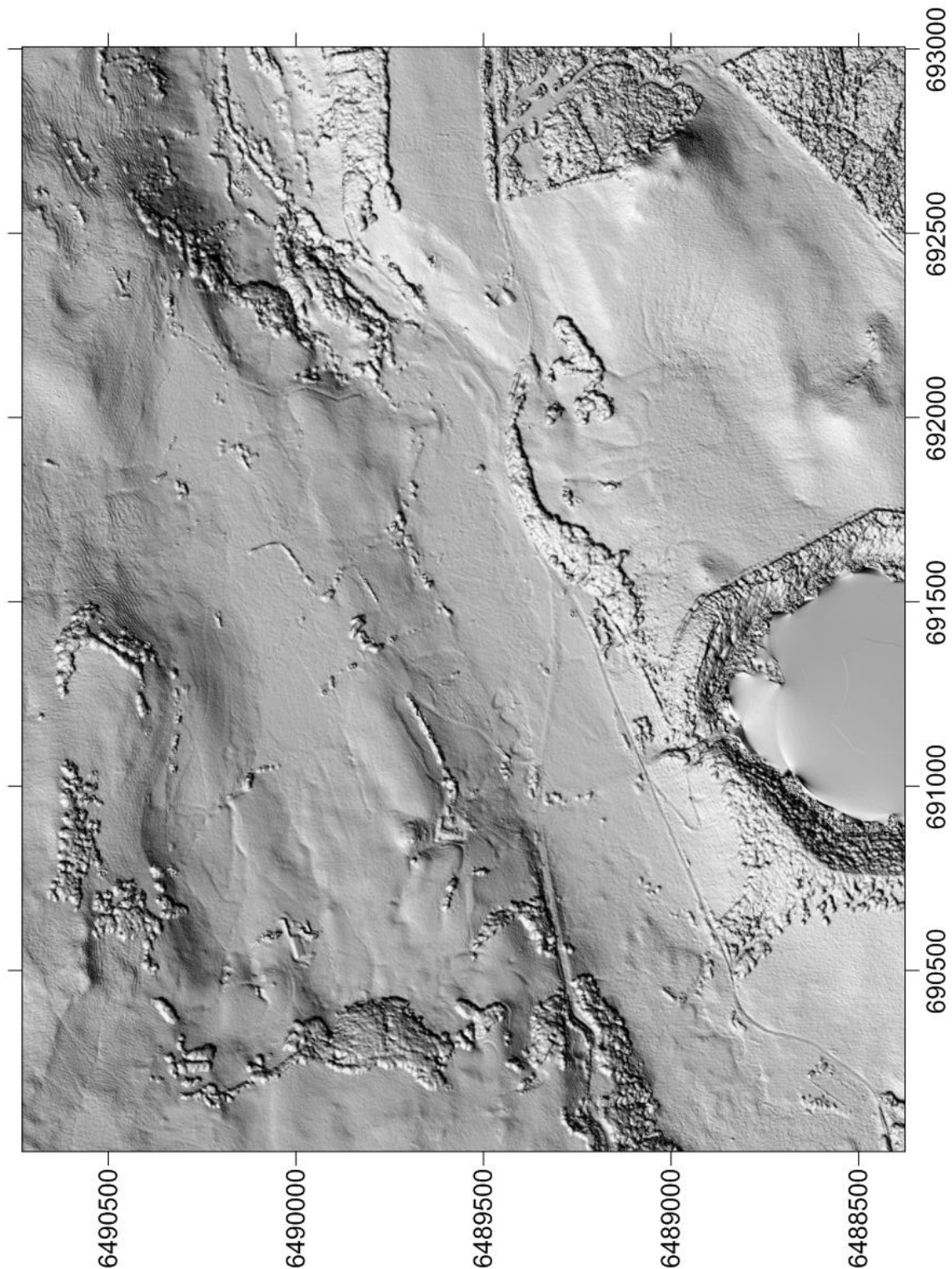
## ANNEXE 2

### MNT Drone produit par Altran (MicMac)



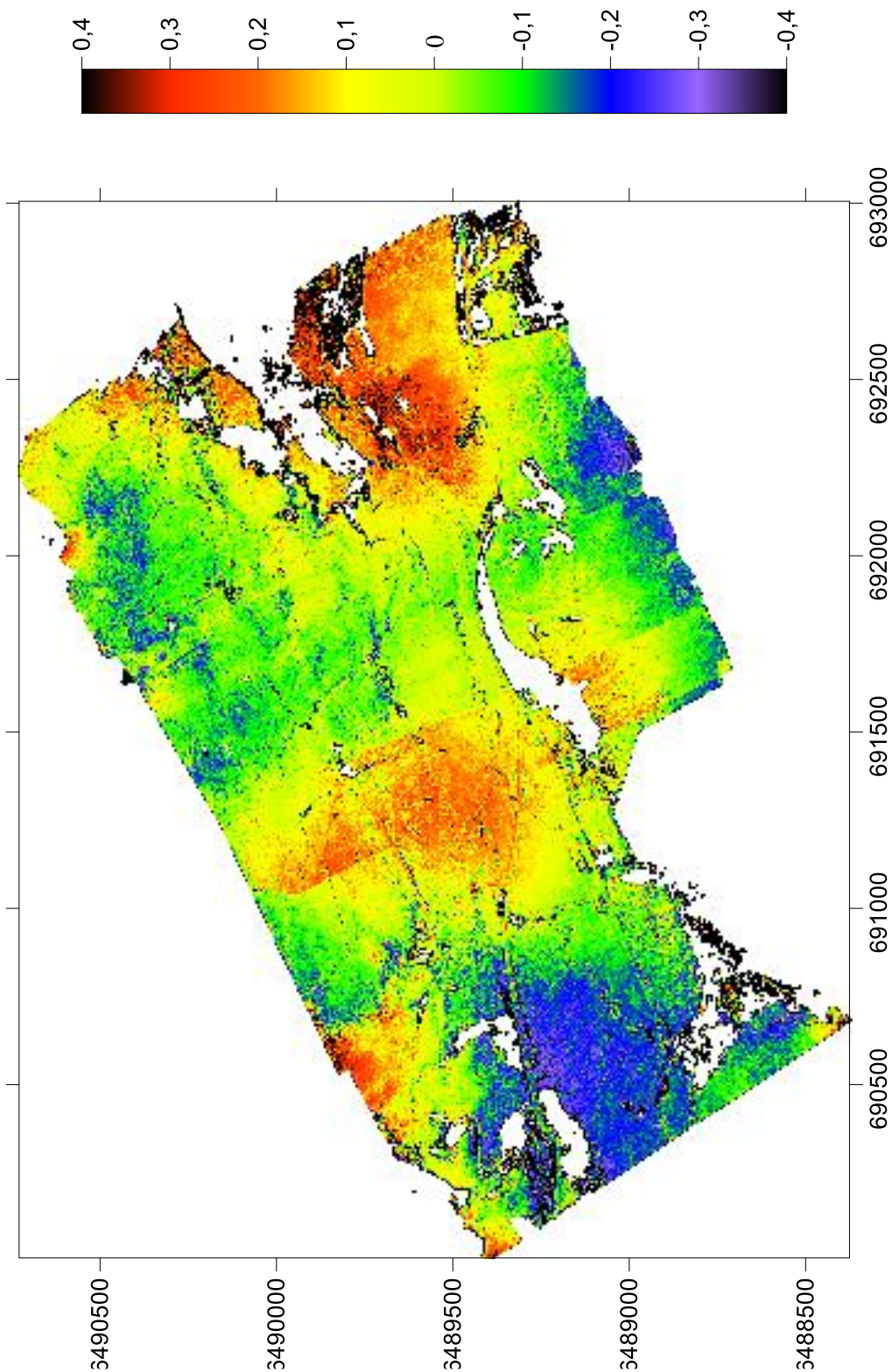
## ANNEXE 3

MNS IGN 2013



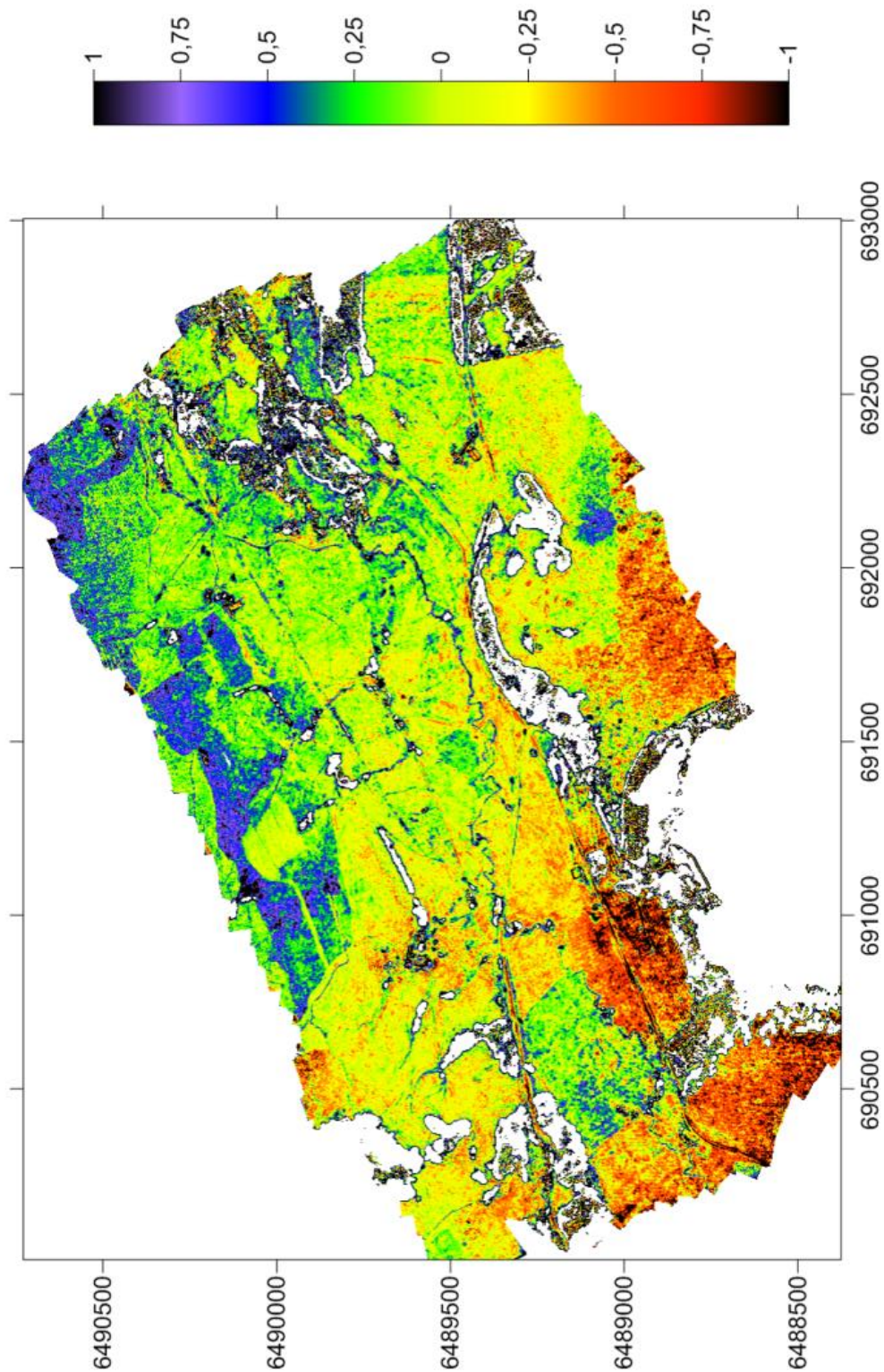
## ANNEXE 4

### ECARTS ENTRE LE MODELE AGISOFT PHOTOSCAN ET MICMAC



## ANNEXE 5

Ecart entre le modèle drone et le modèle IGN



## ANNEXE 6

### Utilisation d'Agisoft Photoscan pour faire un MNT

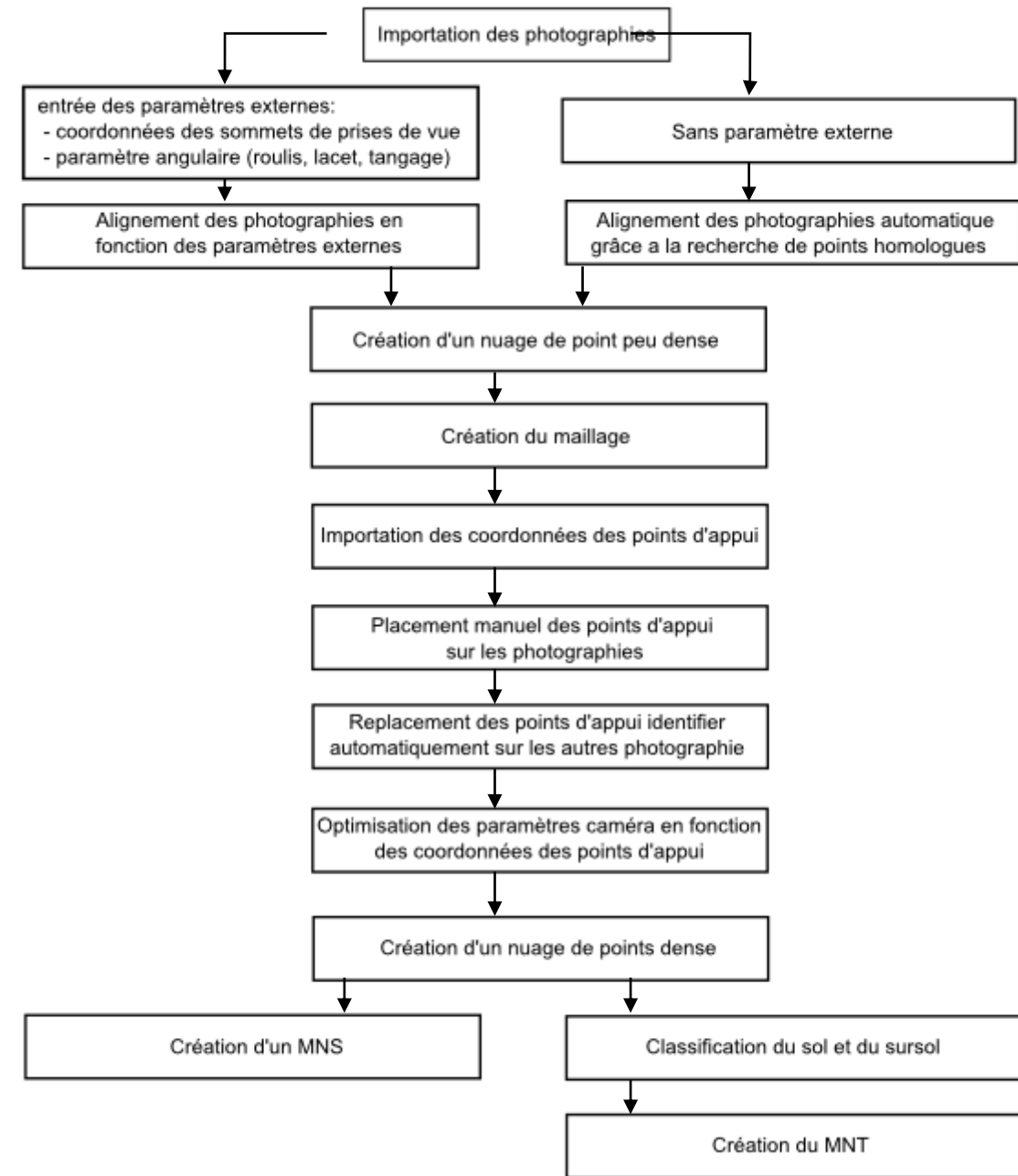


Figure 47A - Chaîne de traitement Agisoft pour la création d'un MNT / MNS

Afin de bien comprendre la méthode utilisée pour générer les MNT, une rapide présentation des étapes d'utilisation d'Agisoft Photoscan est nécessaire.



Tout d'abord, il faut importer les photos avec leurs coordonnées approximatives de sommet de prise de vue ainsi que les paramètres angulaires (tangage, roulis et lacet) au moment de la photographie. Ces valeurs sont obtenues à l'aide d'une centrale inertielle embarquée et d'une antenne GPS. Dans le cas où le véhicule aérien n'en possède pas, il est quand même possible d'aligner les photos et d'avoir des valeurs approchées des coordonnées des sommets de prise de vue et de la matrice de rotation. Cet alignement se fait grâce à la recherche de points homologues entre les images, appelés aussi points de liaison, c'est la compensation par faisceaux. Agisoft crée, de cet alignement, un nuage de point épars afin de pouvoir réaliser un « Mesh » ou maillage.

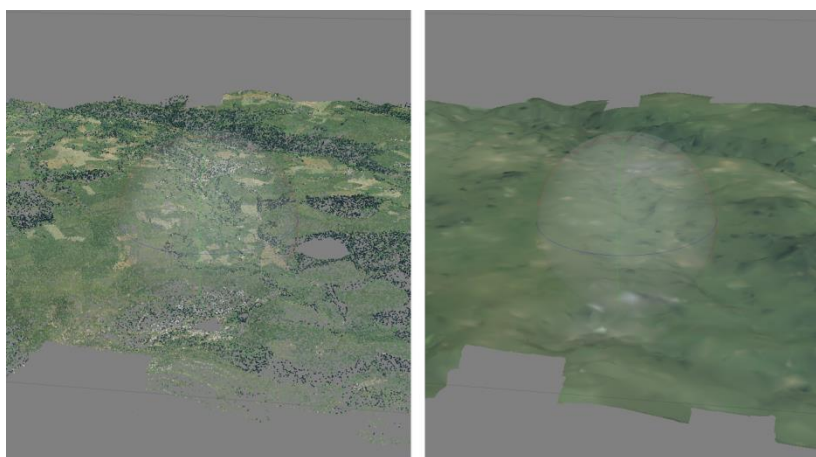


Figure 48A - nuage de points épars (à gauche) et le Mesh correspondant (à droite)

L'intérêt de construire cette grille en trois dimensions, c'est qu'à chaque repère, connu en coordonnées (X,Y,Z), que nous plaçons sur une photo, le logiciel va identifier le même point sur d'autres photos et placer un fanion bleu approximativement au même endroit (cf. Figure 49).



Figure 49A - marqueur bien placé (fanion vert) et marqueur généré par l'alignement des photos sur une autre photographie (fanion bleu)

Il suffit de déplacer manuellement le fanion bleu sur le point correspondant. Une fois que tous les points d'appui sont bien positionnés, il est important de bien calibrer les caméras en fonction de ces derniers. Si cette étape n'est pas faite, le logiciel va travailler avec l'alignement initial des photos, et cela peut entraîner de grosse imprécision, pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres.

Repères	X (m)	Y (m)	Z (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	691297.254000	6489137.218000	1170.573000	2.856320
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	691122.009000	6489464.786000	1166.717000	1.288966
<input checked="" type="checkbox"/> point 4	691500.855000	6489290.858000	1161.808000	0.757782
<input checked="" type="checkbox"/> point 5	691521.654000	6489268.952000	1162.143000	0.323233
<input checked="" type="checkbox"/> point 6	691527.020000	6489318.857000	1161.316000	0.977713
<input checked="" type="checkbox"/> point 7	691553.230000	6489304.154000	1161.490000	0.176198
<input checked="" type="checkbox"/> point 8	691601.403000	6489660.713000	1158.439000	3.843832

Figure 50A - Imprécision sur les GCP (Ground Control Points) avant l'optimisation des caméras

Repères	Easting	Northing	Altitude	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	691297.254000	6489137.218000	1170.573000	0.027107
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	691521.654000	6489268.952000	1162.143000	0.006966
<input checked="" type="checkbox"/> point 4	691500.855000	6489290.858000	1161.808000	0.036471
<input checked="" type="checkbox"/> point 5	691527.020000	6489318.857000	1161.316000	0.017535
<input checked="" type="checkbox"/> point 6	691553.230000	6489304.154000	1161.490000	0.040457
<input checked="" type="checkbox"/> point 7	691122.009000	6489464.786000	1166.717000	0.008722
<input checked="" type="checkbox"/> point 8	691601.403000	6489660.713000	1158.439000	0.046911

Figure 51A - Imprécision sur les GCP (Ground Control Points) après l'optimisation des caméras

Ensuite, maintenant que les points d'appui ont été placés et que les positions caméra ont été optimisées, le calcul d'un nuage dense de point peut être lancé. Nous pouvons choisir la qualité du nuage, plus la qualité est haute, plus le MNS sera précis, en contrepartie, le temps de traitement peut être plus ou moins long suivant la dimension de la zone, allant de 1 minute pour la qualité de nuage la plus faible jusqu'à 4 jours de calcul pour la plus haute.



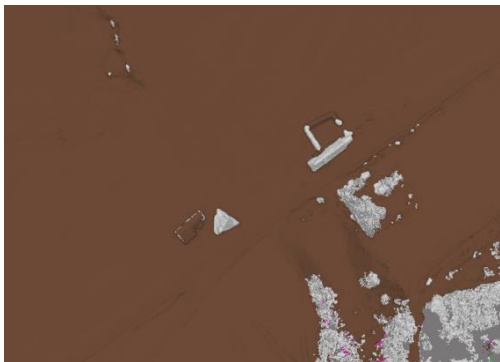
Figure 52A - Nuage dense de qualité faible (à gauche) et nuage dense de qualité haute (à droite)

Une fois le calcul fait, il faut extraire le MNT du MNS généré par le nuage dense. Pour cela, Agisoft Photoscan possède un algorithme de classification des points afin de classer ces derniers en deux catégories : le sol et le sursol. Le logiciel ne le fait pas tout seul, il faut lui renseigner trois paramètres qui lui permettront d'identifier les points que nous considérons faisant partie du sursol :

- Angle : désigne la pente maximale du terrain naturel toléré avant d'être considéré comme faisant partie du sursol.

- Distance : détermine la variation maximum de l'élévation du sol. Si à un endroit, il y a une variation suffisamment importante pour dépasser le seuil imposé par ce paramètre alors ce n'est pas considéré comme du relief, mais comme du sursol.
- Taille de la cellule : doit être réglé en fonction de la taille de la plus grande zone où nous considérons qu'il n'y a pas de point au sol, mais que des points du sursol, par exemple des forêts, de grandes infrastructures, etc. Plus la taille de la cellule est petite plus les éléments du sursol seront considéré comme petit.

Pour qu'un élément du MNS soit classifié comme étant du sursol, il faut qu'il accumule les trois conditions fixées par l'angle, la distance et la taille de la cellule.



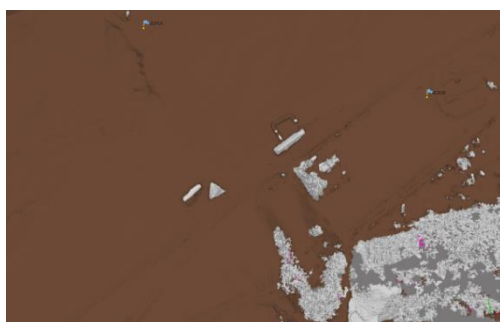
Angle : 30°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 50m

Avec un angle de 30°, la classification n'est pas idéale, car tous les bâtiments ainsi que la végétation ne sont pas classés comme étant en sursol.



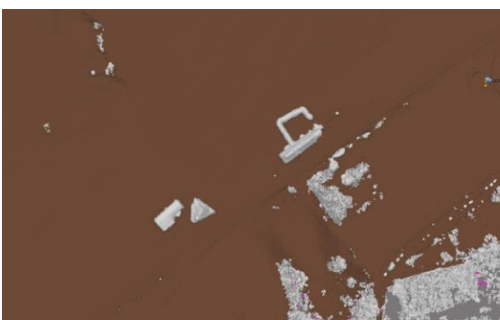
Angle : 15°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 50m

En baissant l'angle de moitié, la classification est meilleure, car tous les bâtiments sont classés sursol.



Angle : 15°  
Distance : 3 m  
Taille de la cellule : 50m

Si nous augmentons la distance, tous les bâtiments, notamment ceux qui font moins de 3 mètres, sont classés comme faisant partie du sol.



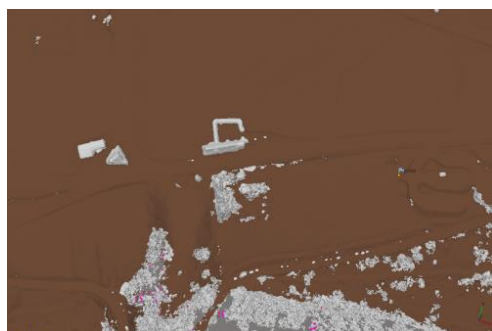
Angle : 15°  
Distance : 0.5 m  
Taille de la cellule : 50m

En réduisant la distance, certains éléments du sol, surtout là où il y a du fort relief, ont été classés comme étant du sursol, ce qui génère une perte d'information pour le MNT.



Angle : 15°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 1 m

En réduisant fortement la taille de la cellule, seuls les contours des bâtiments ont été classés sursol.



Angle : 15°  
Distance : 1 m  
Taille de la cellule : 250m

En augmentant la taille de la cellule, les zones boisées sont mieux classées. Pour les grandes forêts, le centre n'est plus considéré comme faisant partie du sol.

Pour la génération de MNT issu des images aériennes et drone, nous utiliserons le même angle, la même distance et la même taille de cellule afin de pouvoir comparer efficacement la qualité du MNT faite par les différentes méthodes d'acquisition. Les paramètres qui ont été choisis pour faire la classification sont :

- Angle : 15°
- Distance : 1m
- Taille de la cellule : 250 m

Maintenant que des explications sur la méthode de réalisation des MNT ont été données, les méthodes d'acquisitions aériennes peuvent être présentées.

## ANNEXE 7

### Extrait de l'article du 11 avril 2012 – relatif à la conception des aéronefs civils (tirés des annexes du rapport de Leïla BAKKOUCH)

#### Article 1 : Objet.

Cet arrêté fixe les dispositions qui s'appliquent aux aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord dans le cadre des activités d'aéromodélisme, des activités particulières, ou des vols expérimentaux.

Cet arrêté ne s'applique pas :

- aux ballons libres, notamment les ballons-sondes utilisés pour les relevés et études de l'atmosphère ;
- aux fusées ;
- aux cerfs-volants.

#### Article 2 : Définitions liées aux aéronefs qui circulent sans personne à bord

1. Aéronef télépilote : aéronef qui circule sans personne à bord.
2. Système d'aéronef télépilote : système constitué d'un aéronef télépilote et les éléments servant à sa commande et son contrôle depuis le sol
3. Télépilote : personne qui a le contrôle de la trajectoire de l'aéronef télépilote.
4. Captif : un aéronef télépilote est dit « captif » s'il est relié au sol, à un mobile ne pouvant être soulevé ou déplacé par réaction de l'accroche de l'aéronef captif, ou à son télépilote.
5. Automatique : un aéronef télépilote évolue de manière « automatique » si son évolution en vol a été programmée par quelque moyen que ce soit avant le début du vol ou pendant le vol et que tout ou partie du vol s'effectue sans intervention du télépilote sauf mode de commande de secours.
6. Vue directe : un vol d'un aéronef télépilote est effectué « en vue directe » de son télépilote si :
  - l'aéronef circule « en vue » selon les dispositions de l'arrêté du 11 avril 2012;
  - le vol s'effectue dans le champ visuel du télépilote,
  - la vision de l'aéronef par le télépilote s'effectue en ligne optique directe sans dispositif de transmission d'image de l'aéronef.

#### Article 3 : Nature des activités particulières concernées

1. Elles sont les suivantes :
  - Les traitements agricoles, phytosanitaires ou de protection sanitaire et les autres opérations d'épandage sur le sol ou de dispersion dans l'atmosphère ;
  - Le largage de charges de toutes natures ;
  - Le remorquage de banderoles ou toute forme de publicité ;
  - Les relevés, photographies, observations et surveillances aériennes, qui comprennent la participation aux activités de lutte contre l'incendie ;
  - Toute autre activité nécessitant une dérogation aux règles de l'air;

2. Est considérée comme exploitant d'un aéronef télépiloté toute personne morale ou physique responsable de l'organisation ou de la pratique de l'activité particulière avec cet aéronef télépiloté tel que décrit au paragraphe 1.

**Article 4** : Classification des aéronefs télépilotés

1. Catégorie C : les aéronefs télépilotés captifs qui ne sont pas des aéromodèles.
2. Catégorie D : les aéronefs télépilotés qui ne sont pas des aéromodèles, motorisés ou non, non captifs, de masse maximale au décollage < 2 kilogrammes, ou, pour les aéronefs à gaz inerte, de masse totale (masse structurale et charge emportée) < 2 kg.
3. Catégorie E : les aéronefs télépilotés qui ne sont pas des aéromodèles, qui ne sont pas de catégorie C ou D, motorisés ou non, de masse maximale au décollage < 25 kilogrammes ou pour les aéronefs télépilotés à gaz inerte de masse totale < 25 kg.
4. Catégorie F : les aéronefs télépilotés qui ne sont pas des aéromodèles, de masse maximale au décollage < 150 kg ne respectant pas les caractéristiques de la catégorie C, D ou E.
5. Catégorie G : les aéronefs télépilotés qui ne sont pas des aéromodèles, et qui ne correspondent pas aux critères des catégories C à F.

**Article 6** : Limitation d'opération pour le télépilote.

1. Le télépilote ne peut pas faire évoluer un aéronef s'il est à bord d'un véhicule en mouvement.
2. Le ministre chargé de l'aviation civile peut émettre une autorisation à de tels vols, avec des limitations, le cas échéant, sur demande et justifications acceptables.

**Article 7** : Vol hors vue d'un aéronef télépiloté de catégorie G.

Un aéronef télépiloté de catégorie G ne peut pas circuler hors vue directe de son télépilote, sauf s'il est certifié avec son système de commande et de contrôle.

**Article 11** : Contrôles

Le ministre chargé de l'aviation civile peut faire effectuer, par des personnes ou organismes habilités à cet effet, les vérifications et la surveillance qu'il juge nécessaires pour s'assurer qu'un aéronef télépiloté, que la personne qui le met en œuvre ou son exploitant répondent aux dispositions du présent arrêté.

**Article 12** : Interdiction d'opérations ne garantissant pas un niveau de sécurité suffisant.

Le ministre chargé de l'aviation civile peut interdire ou limiter l'utilisation d'un aéronef télépiloté, d'un type d'aéronef ou l'activité d'un exploitant, s'il a connaissance de problème de sécurité pour les tiers.

Après une telle mesure, l'activité ne peut reprendre que si des mesures correctives assurant la sécurité sont mises en œuvre et sont acceptables pour le ministre chargé de l'aviation civile.

**Article 14** : Le directeur général de l'aviation civile est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera Publié au Journal officiel de la République française.

## **Activité particulière avec des aéronefs Télépilotés.**

## 1. Les scénarios, les catégories et les conditions :

### 1.1. Les scénarios

Différents scénarios ont été créés pour le vol d'aéronef.

	Vue directe	Zone peuplée	Distance maximum du pilote
S1	Oui	Non	100 m
S2	Non	Non	1 000 m
S3	Oui	Oui	100 m
S4	Non	Non	Pas de contrainte

Tableau 18A - Caractéristique des scénarios

Dans le cas d'un scénario S-4 il faut une autorisation particulière pour un aéronef précis. Pour l'obtenir, l'exploitant doit faire une analyse de l'adéquation de la mise en œuvre de ce scénario. Elle comprend plusieurs volets (risques pour les tiers, vols expérimentaux, mesures de sécurité et responsabilité de chacun). Tous ces éléments sont répertoriés dans un dossier cosigne qui est soumis au ministère.

#### Scénario S4 et S2 :

Un délai de prévenance de 24h avant le vol doit être respecté. Le ministère doit être informé par mail ([dsac-operation-rpa-bf@aviation-civil.gouv.fr](mailto:dsac-operation-rpa-bf@aviation-civil.gouv.fr)) avec le formulaire suivant :

- le titre du courrier : "date du vol (AAAA-MM-JJ) / code postal de la commune du lieu de décollage / nom de l'exploitant".
- Le corps du courrier :
  - lieu dit du vol et coordonnées géographiques (si disponibles)
  - nom du télépilote et numéro de téléphone
  - hauteur de vol maximale
  - modèle de l'aéronef et caractéristiques principales
- Lors de l'envoi, l'exploitant demande une notification de distribution de son message.

Dans le cas d'une opération durant plusieurs jours, il faut mettre dans le titre du mail la date du premier jour de chantier et dans le corps du texte préciser la date de fin du chantier.

"Hors vue", la surveillance de l'aéronef se fait par le système de commande et de contrôle qui permet de connaître le positionnement de l'aéronef. Si l'aéronef survole les périmètres de sécurité ou sort, de l'espace de vol planifié, le télépilote doit prendre les actions nécessaires pour rétablir la sécurité du vol ou interrompre le vol avec un atterrissage d'urgence. Dans le scénario S-4, l'évolution se fait à l'aide d'un dispositif de vision orienté vers l'avant pour la sécurité des tiers et des biens.

#### Scénario S1 :

Il peut y avoir une phase ponctuelle de hors vue si l'obstacle a été identifié avant le vol. Cette phase de hors vue est autorisée si elle est sans danger, et si le télépilote a une vision globale de l'environnement afin de pouvoir anticiper la position du drone. Des tests préalables doivent également avoir été réalisés. Le manuel d'activités définit les conditions dans lesquelles ces plans de vol sont tolérés ou non.

#### Scénario S2 :

Il faut limiter le risque d'intrusion des personnes dans la zone d'opération et définir le périmètre maximum du vol. En fonction de la hauteur, du type d'aéronef et de sa vitesse, il faut également définir des zones de sécurité dans lesquelles le vol doit être interrompu lorsque le drone y pénètre.

## 1.2. Les catégories :

Certains aéronefs de la catégorie G naviguent sous la responsabilité de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne, cependant, en attendant la mise en œuvre de dispositions européennes spécifiques, les conditions d'opération sont traitées au cas par cas par le ministère, comme pour toutes les autres catégories.

Les types de scénarios envisageables dépendent de la catégorie de l'aéronef à disposition.

	S1	S2	S3	S4
<b>Catégorie C</b>	✓		- Masse décollage < 4kg - Masse totale < 25kg	
<b>Catégorie D</b>	✓	✓	Oui	✓
<b>Catégorie E</b>	✓	✓	- Masse décollage < 4kg	

Tableau 19A - Aéronefs volant dans les différents scénarii

Pour les aéronefs de catégorie C, il faut s'assurer que le moyen de retenue du drone est en bon état et adapte aux conditions d'emploi de la mission.

## 2. Les documents nécessaires et leur obtention :

### 2.1 Document de navigabilité :

Certaines catégories d'aéronefs doivent avoir un document de navigabilité pour effectuer un vol. Dans le tableau ci-dessous sont résumées les catégories ayant cette obligation :

Catégories	Document de navigabilité	
	Oui	Non
<b>C - Gaz inerte</b> Masse de décollage ou totale $\leq$ 25kg	✓	
<b>C - Gaz inerte</b> Masse de décollage ou totale > 25kg		✓
<b>D et E</b>	✓	
<b>F</b>		✓

Tableau 20A - Catégories ayant obligation ou non d'un document de navigabilité

Les catégories C (à gaz inerte de masse  $\leq$  25 kg), D et E peuvent faire l'objet d'une autorisation particulière et d'une vérification de l'aptitude de vol pour la catégorie C.

Des démonstrations peuvent être effectuées soit individuellement soit dans le cadre d'une attestation de conception type.

### 2.2 Autorisations particulières:

Ces autorisations sont délivrées par le ministère pour certains scénarii de vol sous plusieurs conditions :

Scénario S2 et S3	Scénario S4
- Définition de la configuration de l'aéronef	- Fournir un dossier technique



<ul style="list-style-type: none"> <li>- Essais et analyse pour la conformité</li> <li>- Attestation par le postulant de la conformité</li> <li>- Démonstration</li> <li>- Dispositif de protection des tiers limitant l'impact à 69 Joules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attestation par le postulant de la conformité</li> <li>- Démonstration</li> </ul>
--	--

Tableau 21A - Conditions pour obtenir une autorisation de vol

Toute modification d'un aéronef détenant un document de navigabilité ayant pour effet de le rendre non conforme à l'un des éléments du dossier technique doit être présentée au ministère pour restaurer sa validité.

### 2.3 Dossier d'utilisation :

Un dossier d'utilisation est requis pour tous les aéronefs hormis les aérostats de Catégorie C.

### 2.4 Condition de navigabilité :

Un aéronef peut effectuer un vol s'il répond à deux critères :

- Administratif
- Technique

#### 2.4.1 Administratif :

Chaque année civile, une déclaration au ministère doit être faite par l'exploitant pour continuer son activité. Il renseigne le nombre d'heures de vol réalisées par activité et joint une synthèse des incidents rencontrés. Les incidents doivent être notés pour établir un suivi qui permettrait d'améliorer la sécurité des opérations.

Lors de la préparation d'une opération, il faut utiliser des cartes aéronautiques et de l'information aéronautique pour connaître les règles applicables sur l'espace aérien.

#### 2.4.2 Technique :

L'aéronef ne doit pas subir de modification qui le rendrait non conforme au document de navigabilité. Il doit être maintenu apte au vol et aucun problème de service ne doit remettre en cause sa navigabilité. Son système de commande et de contrôle doit être conforme à sa définition initiale.

Les équipements et matériels liés à l'opération sont fixes de manière sûre et ne doivent pas compromettre la résistance de la structure, la qualité de vol, le dispositif de commande et de contrôle de l'aéronef.

Pour les aérostats, seul l'usage des gaz inertes est autorisé.

Le vol de nuit n'est autorisé qu'avec des aérostats captifs qui sont rendus visibles.

Un périmètre de sécurité doit être appliqué pour la protection des tiers :

- Pour l'atterrissage et le décollage.
- Maintien d'un volume de dégagement pour éviter un obstacle.
- Respect d'une distance de sécurité de 30m vis-à-vis des personnes sauf télépilote.
- Réduction de la distance si :
  - o Les personnes sont en lien avec l'activité.
  - o Une procédure et une information sont faites pour la sécurité des personnes.
  - o Les personnes fournissent une attestation signée.

Pour le vol en mode automatique, l'utilisation d'aéronef captif de catégories C doit avoir fait l'objet d'une approbation du ministère qui renseigne l'exploitant sur les conditions aéronautiques et la conformité de l'aéronef.

L'aéronef ne doit pas dépasser la hauteur de vol maximale de la réglementation.

### 2.5 Manuel d'activités particulières et déclaration de conformité : (M.A.P)

Toutes les activités particulières doivent faire l'objet d'un manuel, tenu à jour, où sont mentionnées les différentes exigences de l'activité.

Il contient :

- Les conditions de sécurité.
- La procédure d'exécution des activités particulières pour chaque type d'aéronef.
- Le rappel des règles de l'air.
- La responsabilité des télépilotes et leur niveau de formation.
- Les conditions pour un vol de nuit.

Une déclaration de conformité est envoyée au ministère indiquant que l'exploitant répond aux exigences de la réglementation et que les mesures nécessaires pour protéger les tiers et les biens sont mises en place.

Pour obtenir l'attestation de dépôt, le manuel d'activités ainsi que ses amendements sont déposés au ministre avec la déclaration de conformité. Le commencement de l'activité ne peut se faire qu'après réception de l'attestation.

Un archivage du manuel est fait pour servir de support en cas d'événements graves.

Pour une évolution de la réglementation qui modifierait le manuel ou une modification de l'activité, un amendement doit être fait dans un délai de 1 mois.

L'exploitant doit s'assurer que le manuel est connu et mis en application, et que le manuel de maintenance et de vol est respecté. Il doit également vérifier le niveau de compétence théorique et pratique des télépilotes.

Il informe le ministère pour toute poursuite ou cessation d'activité. Il peut interrompre son activité, si l'interruption est supérieure à 12 mois il doit en informer le ministère et il peut être nécessaire de refaire la procédure.

## 3. Le télépilote :

### 3.1 Niveau théorique et pratique :

Le télépilote d'aéronef doit avoir un certificat d'aptitude théorique adapté aux types d'activités qu'il exerce.

Ce télépilote reçoit une déclaration de niveau de compétence (DNC) par l'exploitant, suite à une formation, conformément au manuel d'activités particulières.

Selon le scénario le nombre d'heures de pratique et le type de certificat varient :

- S-4 : licence de pilote d'avion ou d'hélicoptère obligatoire et justification d'une expérience de 100h de vol en tant que commandant de bord.
- S-4 : dans les 6 mois, le télépilote doit avoir acquis une expérience de 20h dans des conditions de vol de vue avec l'aéronef.
- S-1, S-2 et S-3 : une aptitude théorique (brevet pilote d'avion, d'hélicoptère, de planeur ou d'ULM) est nécessaire.

La vérification du niveau de pratique des télépilotes pour les aéronefs de plus de 25 kg est réalisée au ministère à l'aide d'une démonstration pour obtenir l'attestation.

### 3.2 Responsabilité :

Le télépilote assure la sécurité des tiers et des biens.

#### 4. Exigences générales :

##### 4.1 Aéronefs :

Certains équipements sont obligatoires sur les aéronefs ou dans certains scénarios.

- Capteur barométrique (sauf aéronefs catégorie G et aérostats catégorie C)
- Système Fail-crash (sauf aéronefs catégorie G et aérostats catégorie C)
- Système de commande et de contrôle permettant de positionner l'aéronef : scénario S-2 et S4
- Vision orientée vers l'avant : scénario S-4
- Enregistrement des paramètres du vol : scénario S-4 et S-2
- Protection des tiers limitant l'impact à 69 Joules : scénario S-3 sauf ceux de masse inférieure à 2 kg

L'aéronef doit être visible de jour comme de nuit à l'aide d'un système de balisage pour la sécurité des tiers et des biens. De plus, une marque d'identification doit se trouver sur le document de navigabilité et sur l'aéronef si la masse au décollage est supérieure à 25 kg. Cette marque peut être obtenue avant l'achat et être directement apposée par le constructeur. Une plaque de 10 x 5 cm est mise en place sur l'aéronef sur laquelle est mentionné : " Cet aéronef est exploité par : ".

##### 4.2 Administratif :

L'aéronef peut survoler le territoire français si l'exploitant est domicilié en France. Pour d'autres États, il faut une autorisation spécifique.



L'exploitant doit déclarer au ministère tout événement qui aurait pu mettre la sécurité des tiers en jeu. Il doit également informer le titulaire de l'attestation de conception de tous les problèmes rencontrés. Pour le scénario S-4, il faut présenter au ministère les données enregistrées lors d'un vol ainsi que l'analyse des données réalisée par le titulaire de l'attestation.

Toutes les attestations (dépôt du manuel d'activités particulières, DNC, certificat de navigabilité de l'aéronef, attestation de démonstration des compétences du télépilote d'aéronef de masse > 25kg) sont fournies sans délai lors de toute demande d'une autorité.

## ANNEXE 8

### Fiche technique des points GPS pour la mission drone

#### Matériel utilisé :

Base  Topcon GB-1000 GPS		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 5mm + 1.5ppm Hauteur : 10mm + 1.5ppm
Mobile  Topcon HiPer Pro		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 3mm + 0.5ppm Hauteur : 5mm + 0.5ppm

#### Coordonnées des bases en RGF93 / Lambert-93

Nom	E	N	Altitude (IGN 69)
<b>PAVIN1</b>	691587.695 m	6489582.171 m	1155.216 m
<b>PAVIN2</b>	691587.695 m	6489582.171 m	1155.216 m
<b>PAVIN3</b>	691586.997 m	6489582.260m	1155.163 m

Calcul des coordonnées : méthode du pivot central

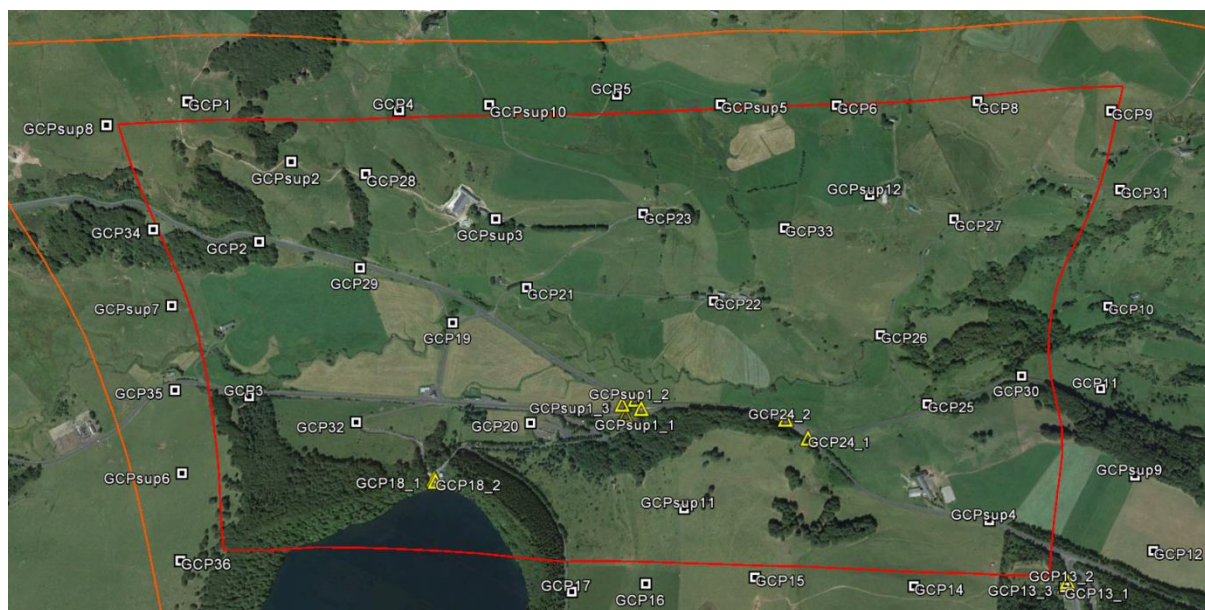
Stations du RGP utilisées :

- SJPL (Saint-Julien-Puy-Lavèze)
- STGN (Saint-Gesnès Champespe)
- PDOM (Puy de Dôme)
- OPME (Observatoire Physique du Globe de Clermont-Ferrand)

#### Dates et durées d'enregistrement :

Date	Nom	Début	Fin	Temps total
21/04/2015	PAVIN1	10 :21 :18	16 :07 :31	05 :46 :13
	PAVIN2	16 :08 :09	16 :31 :30	00 :23 :21
22/04/2015	PAVIN3	07 :09 :04	09 :11 :08	02 :02 :04

Points de contrôle (cibles et points remarquables) mesurés par session:



- PAVIN1 : (40 points)

GCP22	GCP15	GCP27	GCPsup1	GCP1	GCP18_1
GCPsup1	GCP14	GCP31	2	GCPsup2	GCP18_2
0	GCPsup4	GCP9	GCP21	GCP28	GCP32
GCP23	GCP13_1	GCP8	GCP19	GCP4	
GCP17	GCP13_2	GCP6	GCP29	GCPsup3	
GCP16	GCP30	GCPsup5	GCP2	GCP3	
GCPsup1	GCP25	GCP5	GCP34	GCP35	
1	GCP26	GCP33	GCPsup8	GCP20	

- PAVIN2 : (1 point)

GCP10

- PAVIN3 : (12 points)

GCP13_3	GCPsup1_4
GCP12	GCPsup6
GCPsup9	GCP36
GCP24_1	GCPsup
GCP24_2	
GCPsup1_1	
GCPsup1_2	
GCPsup1_3	

## Exemple de fiche signalétique des GCP drone

### **GCP23**

#### Coordonnées

- WGS84

Latitude : 45° 30 ' 38,61 '' N

Longitude : 2° 53 ' 22,34 '' E

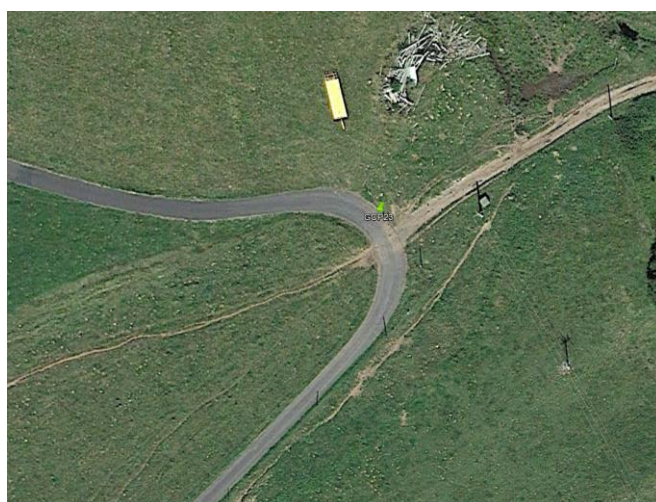
- RGF 93

E : 691319.433 m

N : 6489784.648 m

Le point se situe à l'entrée du chemin qui mène à Les Martelles. Il n'y a, à priori, pas d'élément identifiable à proximité.

#### **Cible nécessaire**



*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

Name	Repère	E (m)	N (m)	Altitude (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev u (m)	Std Dev Hz (m)
GCP36	Cible	690637.022	6488427.373	1245.539	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup6	Cible	690517.819	6488609.940	1206.862	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP35	Cible	690388.374	6488790.845	1187.621	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup7	Cible	690280.574	6488993.975	1186.644	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP34	Cible	690183.844	6489169.161	1240.880	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup8	Cible	690004.202	6489366.117	1299.434	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP3	Cible	690575.190	6488863.350	1177.788	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP2	Cible	690435.462	6489260.046	1216.061	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP1	Cible	690168.785	6489510.549	1304.214	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP32	Cible	690869.434	6488930.757	1182.699	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup2	Cible	690441.233	6489489.485	1255.179	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP18_1	Avaloir	691132.048	6488893.584	1197.326	0,004	0,003	0,01	0,005
GCP18_2	Plaques EDF	691137.307	6488889.677	1197.460	0,001	0,001	0,003	0,001
GCP29	Cible	690694.556	6489312.976	1187.398	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP28	Cible	690620.898	6489547.017	1245.938	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP19	Cible	690980.264	6489286.716	1164.397	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP4	Cible	690628.703	6489734.267	1247.713	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP17	Cible	691594.307	6488803.148	1234.631	0,002	0,002	0,005	0,003
GCP20	Cible	691297.254	6489137.218	1170.573	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP21	Cible	691122.009	6489464.786	1166.717	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup3	Cible	690971.249	6489594.150	1211.488	0,002	0,001	0,004	0,002
GCPsup10	Cible	690828.626	6489854.069	1235.897	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP16	Cible	691764.668	6488901.882	1220.069	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup11	Cible	691770.683	6489123.145	1210.245	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup1_1	centre grille	691553.230	6489304.154	1161.490	0,001	0,001	0,002	0,001

*ANALYSE MULTI-ECHELLES A HAUTE RESOLUTION DE LA TOPOGRAPHIE*

GCPsup1_2	rond blanc	691527.020	6489318.857	1161.316	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup1_3	marquage au sol	691500.855	6489290.858	1161.808	0,002	0,002	0,005	0,003
GCPsup1_4	rond blanc	691521.654	6489268.952	1162.143	0,002	0,001	0,003	0,002
GCP23	Cible	691319.433	6489784.648	1200.549	0,001	0,001	0,003	0,001
GCP5	Cible	691114.571	6490036.217	1207.400	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP15	Cible	692021.244	6489044.181	1215.157	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP22	Cible	691601.403	6489660.713	1158.439	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup5	Cible	691375.540	6490137.529	1204.100	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP24_1	marquage au sol	692005.157	6489434.875	1157.977	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP24_2	rond blanc	691925.669	6489454.123	1158.375	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP33	Cible	691682.389	6489922.182	1191.303	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP14	Cible	692410.246	6489212.771	1223.185	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP25	Cible	692269.175	6489669.866	1145.005	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP26	Cible	692064.108	6489784.500	1148.276	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup12	Cible	691850.699	6490105.657	1187.367	0,001	0,001	0,003	0,001
GCP6	Cible	691658.358	6490277.754	1200.037	0,002	0,002	0,006	0,003
GCPsup4	Cible	692536.451	6489457.683	1181.766	0,002	0,001	0,003	0,002
GCP27	Cible	692092.854	6490154.625	1175.383	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP8	Cible	691991.597	6490450.873	1205.683	0,002	0,001	0,003	0,002
GCP13	Cible	692794.303	6489386.631	1189.527	0,003	0,002	0,006	0,003
GCP30	Cible	692484.151	6489860.928	1128.422	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP12	Cible	692963.702	6489581.170	1198.933	0,001	0,001	0,002	0,001
GCPsup9	Cible	692827.312	6489740.593	1199.867	0,001	0,001	0,003	0,001
GCP11	Cible	692714.442	6489932.070	1098.317	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP10	Cible	692653.693	6490163.991	1078.117	0,002	0,001	0,006	0,003
GCP31	Cible	692443.975	6490411.520	1213.701	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP9	Cible	692308.985	6490569.798	1225.767	0,002	0,001	0,003	0,002



## ANNEXE 9

Rapport Agisoft sur la création du MNT drone

# Agisoft PhotoScan

Processing Report

06 July 2015



# Survey Data

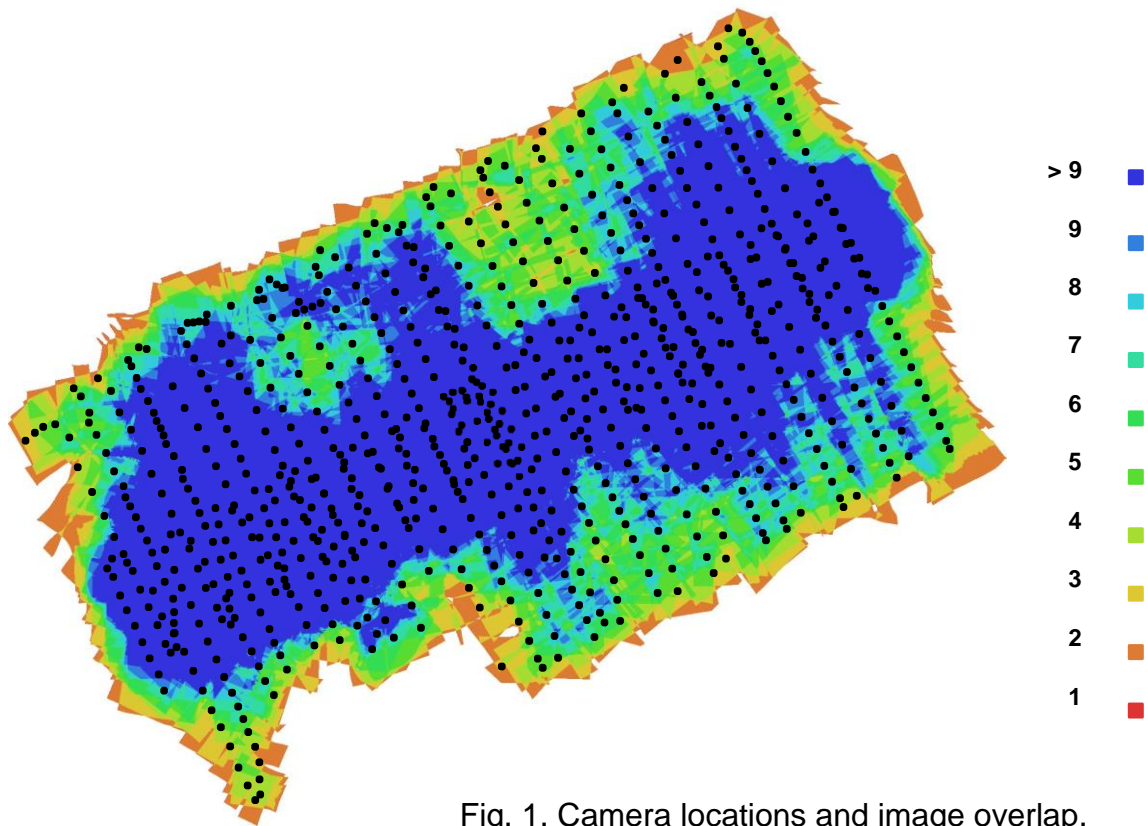


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	908	Camera stations:	865
Flying altitude:	210.974 m	Tie-points:	3320341
Ground resolution:	0.0682813 m/pix	Projections:	10867809
Coverage area:	4.16772 sq km	Error:	0.693402 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Canon PowerShot S110 (5.2 mm)	4000 x 3000	5.2 mm	1.86161 x 1.86161 um	No

Table 1. Cameras

# Camera Calibration

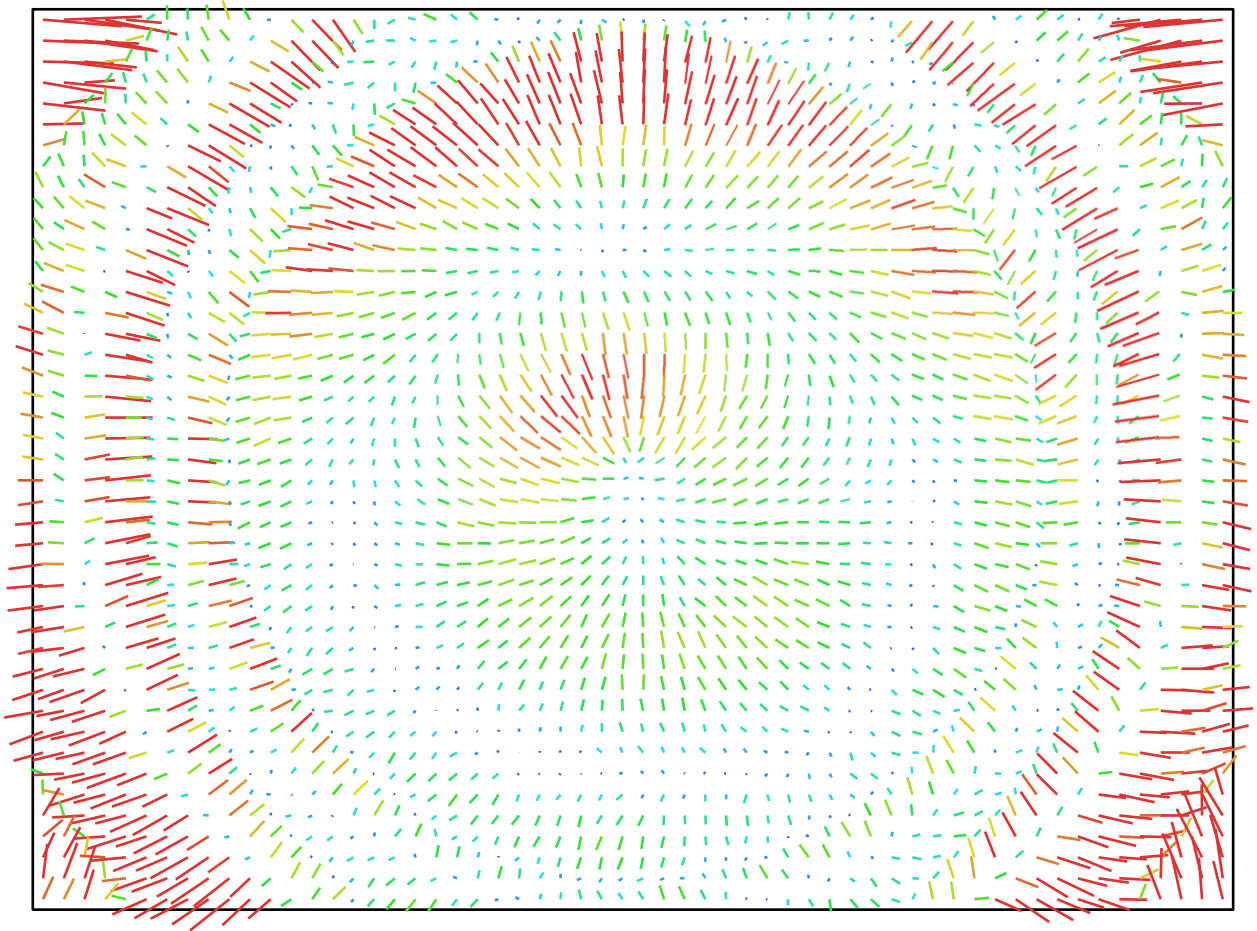


Fig. 2. Image residuals for Canon PowerShot S110 (5.2 mm).

## Canon PowerShot S110 (5.2 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.0411174
Fx:	2869.4	K2:	-0.00376859
Fy:	2869.4	K3:	5.85705e-005
Cx:	1986.56	K4:	0
Cy:	1461.53	P1:	-0.00285221
Skew:	0.326329	P2:	-0.000367701

## Ground Control Points

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
GCP1	-0.003876	0.000537	0.008921	0.009742	5	0.304662
GCP2	-0.001774	0.003161	-0.003072	0.004751	19	0.271029
GCP3	0.003480	-0.008460	-0.000478	0.009160	30	0.323418
GCP4	0.001314	-0.007577	-0.003760	0.008560	10	0.213770
GCP5	-0.002677	0.002627	0.005014	0.006262	7	0.224916
GCP6	0.000590	-0.002799	-0.001640	0.003297	4	0.079942
GCP8	-0.008203	-0.003818	-0.005345	0.010509	5	0.233684
GCP9	-0.002056	0.000402	0.000350	0.002124	6	0.230753
GCP10	0.002632	-0.002807	-0.003213	0.005013	18	0.218103
GCP11	0.003777	0.000847	0.003689	0.005347	13	0.220889
GCP13	0.001374	0.004194	0.000309	0.004424	10	0.124562
GCP14	0.003120	0.004036	-0.006067	0.007927	7	0.182335
GCP15	0.004669	-0.004081	0.002117	0.006553	7	0.281268
GCP16	0.001607	-0.000819	-0.006905	0.007137	8	0.289296
GCP17	-0.001045	-0.000603	0.002479	0.002757	7	0.156154
GCP18_1	-0.000209	0.001141	-0.000329	0.001206	11	0.067823
GCP19	-0.008627	0.001126	0.004621	0.009851	32	0.299530
GCP20	-0.005266	0.002383	0.003203	0.006609	18	0.292317
GCP21	0.010584	-0.003016	0.000230	0.011008	25	0.262431
GCP22	-0.000840	0.000846	0.005988	0.006105	19	0.298707
GCP23	0.003949	0.001982	-0.000580	0.004457	10	0.258412
GCP24_1	-0.016007	-0.036707	-0.004370	0.040283	17	0.361781
GCP24_2	0.003282	0.020420	0.006475	0.021672	14	0.390079
GCP25	0.004518	0.000803	-0.003610	0.005838	22	0.223835
GCP26	-0.002715	0.010392	0.002840	0.011110	30	0.283149
GCP27	0.010773	0.004495	0.003945	0.012322	10	0.326636
GCP28	0.000896	-0.012359	-0.002677	0.012678	14	0.318774
GCP29	0.003621	-0.002450	-0.005824	0.007282	22	0.327118
GCP30	-0.002875	-0.009080	-0.004190	0.010405	31	0.196014
GCP31	-0.006433	-0.005137	0.011669	0.014280	4	0.160460
GCP32	0.008613	0.011062	-0.002771	0.014290	21	0.279987
GCP33	-0.000108	-0.000807	-0.005641	0.005700	4	0.111063
GCP34	-0.017984	0.041628	0.140571	0.147704	2	0.223659
GCP35	-0.015440	-0.001963	0.001241	0.015614	18	0.308555
GCP36	0.001310	0.001055	0.004738	0.005028	2	0.021492
GCPsup1_1	-0.014649	0.000162	0.013314	0.019796	24	0.394968
GCPsup1_2	-0.020841	-0.008169	-0.027243	0.035260	22	0.467661
Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)

*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

GCPsup1_3	0.037630	-0.000834	0.012705	0.039726	26	0.435380
GCPsup1_4	0.006368	0.001846	-0.011553	0.013320	24	0.404163
GCPsup2	-0.000067	0.009058	-0.002322	0.009352	11	0.407324
GCPsup3	-0.011729	0.002916	0.005223	0.013166	8	0.427267
GCPsup4	-0.004706	-0.001387	0.001633	0.005171	9	0.252978
GCPsup5	-0.002166	-0.001987	-0.002151	0.003642	5	0.258563
GCPsup6	0.009921	0.006712	-0.002673	0.012272	7	0.298509
GCPsup7	0.008534	0.002165	-0.000510	0.008819	17	0.298329
GCPsup8	-0.002130	-0.001287	0.000460	0.002530	3	0.159114
GCPsup9	0.012044	0.005839	-0.016320	0.021106	4	0.185735
GCPsup10	0.007432	-0.001423	-0.009563	0.012195	9	0.285967
GCPsup11	0.000515	0.010237	0.001015	0.010300	6	0.314748
GCPsup12	-0.001444	0.008002	0.000460	0.008145	7	0.260086
<b>Total</b>	<b>0.008945</b>	<b>0.009503</b>	<b>0.020608</b>	<b>0.024393</b>	<b>664</b>	<b>0.304359</b>

Table 2. Control points

# Digital Elevation Model

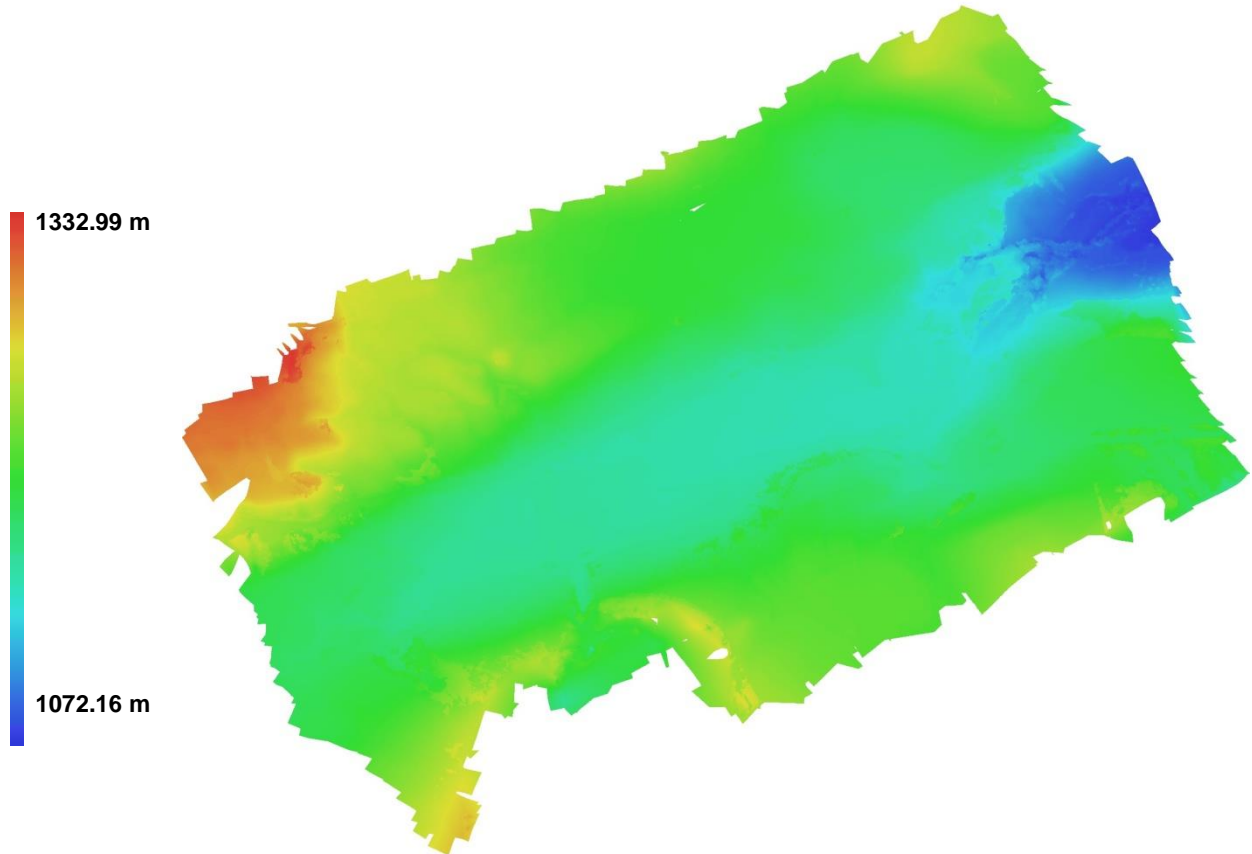




Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.273125 m/pix  
Point density: 13.4053 points per sq m

## ANNEXE 10

### Fiche technique des points GPS pour la mission avion

**Matériel utilisé :**

Base  <b>Topcon GB-1000 GPS</b>		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 5mm + 1.5ppm Hauteur : 10mm + 1.5ppm
Mobile  <b>Topcon HiPer Pro</b>		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 3mm + 0.5ppm Hauteur : 5mm + 0.5ppm

**Coordonnées des bases en RGF93 / Lambert-93**

Nom	E	N	Altitude (IGN 69)
<b>PAVIN1</b>	691609.307 m	6489604.338 m	1155.159 m

Calcul des coordonnées : méthode du pivot central

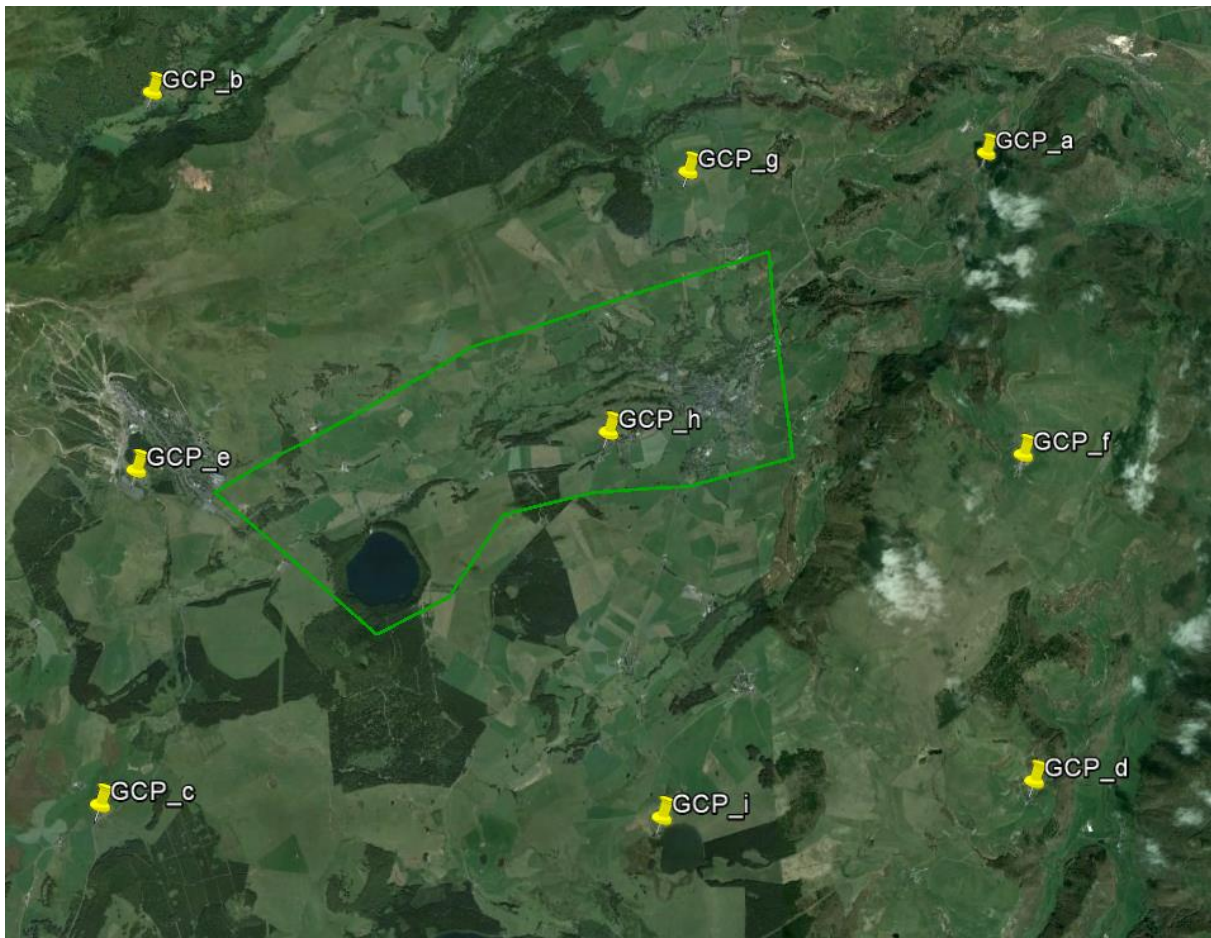
Stations du RGP utilisées :

- SJPL (Saint-Julien-Puy-Lavèze)
- SCDA (Saint Chely d'Apcher)
- EGLT (Egletons)

**Dates et durées d'enregistrement :**

Date	Nom	Début	Fin	Temps total
<b>04/06/2015</b>	PAVIN1	07 :33 :19	13 :15 :34	05 :42 :34

Points de contrôle (cibles et points remarquables) mesurés par session:



- PAVIN1 : (16 points)

GCP\_e1  
GCP\_e2  
GCP\_c1  
GCP\_c2  
GCP\_h1  
GCP\_h2  
GCP\_i1  
GCP\_i2

GCP\_d1  
GCP\_d2  
GCP\_f1  
GCP\_a1  
GCP\_a2  
GCP\_g1  
GCP\_b1  
GCP\_b2



Exemple de fiche signalétique des GCP avion

# POINT a

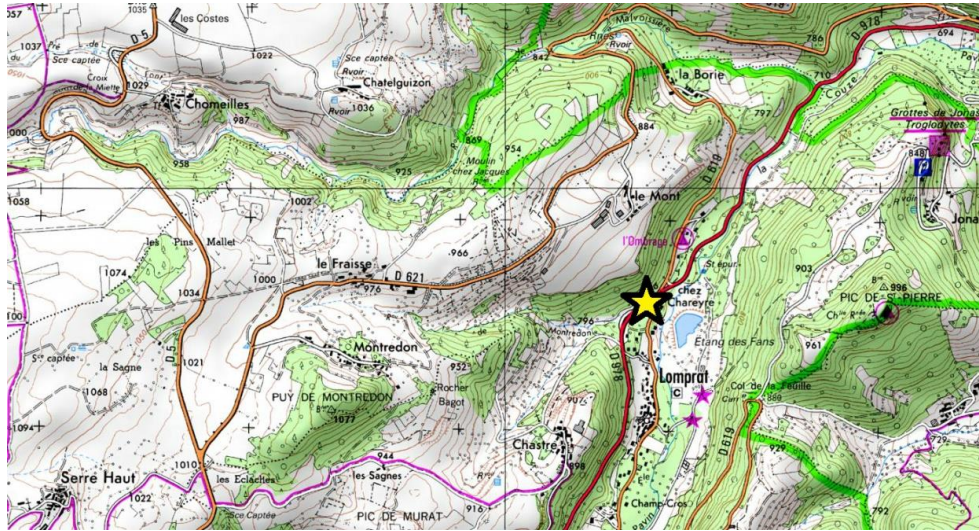


Photo 506\_0392



Coordonnées

- WGS84

nom	Latitude	Longitude
a1	45°32'05,66645" N	2°58'29,67276" E
a2	45°32'05,98999"N	2°58'30,04248"E

- RGF 93

nom	E (m)	N (m)
a1	698049,748	6492835,1
a2	698041,729	6492825,12



a1



a2

Position des points :

a1 : sur la pointe du zèbre du milieu

a2 : au bord de la route, au bout marquage au sol

*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

Name	repère	E (m)	N (m)	Altitude (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev u (m)	Std Dev Hz (m)
GCP_e1	marquage au sol, place de parking	688658,110	6489426,832	1276,285	0,004	0,004	0,01	0,006
GCP_e2	marquage au sol, place de parking / zèbre	688672,679	6489433,537	1274,579	0,005	0,005	0,012	0,006
GCP_c1	marquage au sol, triangle central	688201,666	6486003,247	1190,776	0,008	0,008	0,018	0,012
GCP_c2	marquage au sol, bande-stop	688197,705	6485976,296	1191,461	0,01	0,008	0,017	0,013
GCP_h1	marquage au sol, bande-stop	693603,751	6489692,573	1145,819	0,003	0,002	0,006	0,004
GCP_h2	marquage au sol, rond pour piquet à neige	693622,413	6489705,63	1143,577	0,001	0,001	0,003	0,002
GCP_i1	tanguant au dernier poteau sud ouest	693983,426	6485652,764	1169,967	0,008	0,006	0,016	0,01
GCP_i2	tanguant au dernier poteau sud est	694012,671	6485638,282	1168,123	0,008	0,007	0,016	0,01
GCP_d1	bord de la première marche	697927,761	6485899,058	1071,75	0,015	0,01	0,03	0,018
GCP_d2	bout du muret	697913,664	6485902,861	1073,549	0,014	0,009	0,029	0,017
GCP_f1	bout du muret	698028,477	6489316,799	1115,175	0,01	0,007	0,027	0,012
GCP_a1	marquage au sol, pointe du zèbre	698049,748	6492835,099	770,109	0,013	0,008	0,029	0,016
GCP_a2	marquage au sol	698041,729	6492825,121	770,398	0,011	0,011	0,03	0,015
GCP_g1	marquage au sol, repère borne kilométrique	694589,022	6492515,598	1134,291	0,007	0,005	0,013	0,009
GCP_b1	bout du pont	688801,753	6493562,459	1135,727	0,008	0,007	0,017	0,01
GCP_b2	angle d'une grille	689212,540	6493464,622	1138,994	0,006	0,005	0,017	0,008

## **ANNEXE 11**

**Rapport Agisoft sur la création du MNT avion**

# **Agisoft PhotoScan**

**Processing Report**

**03 July 2015**



# Survey Data

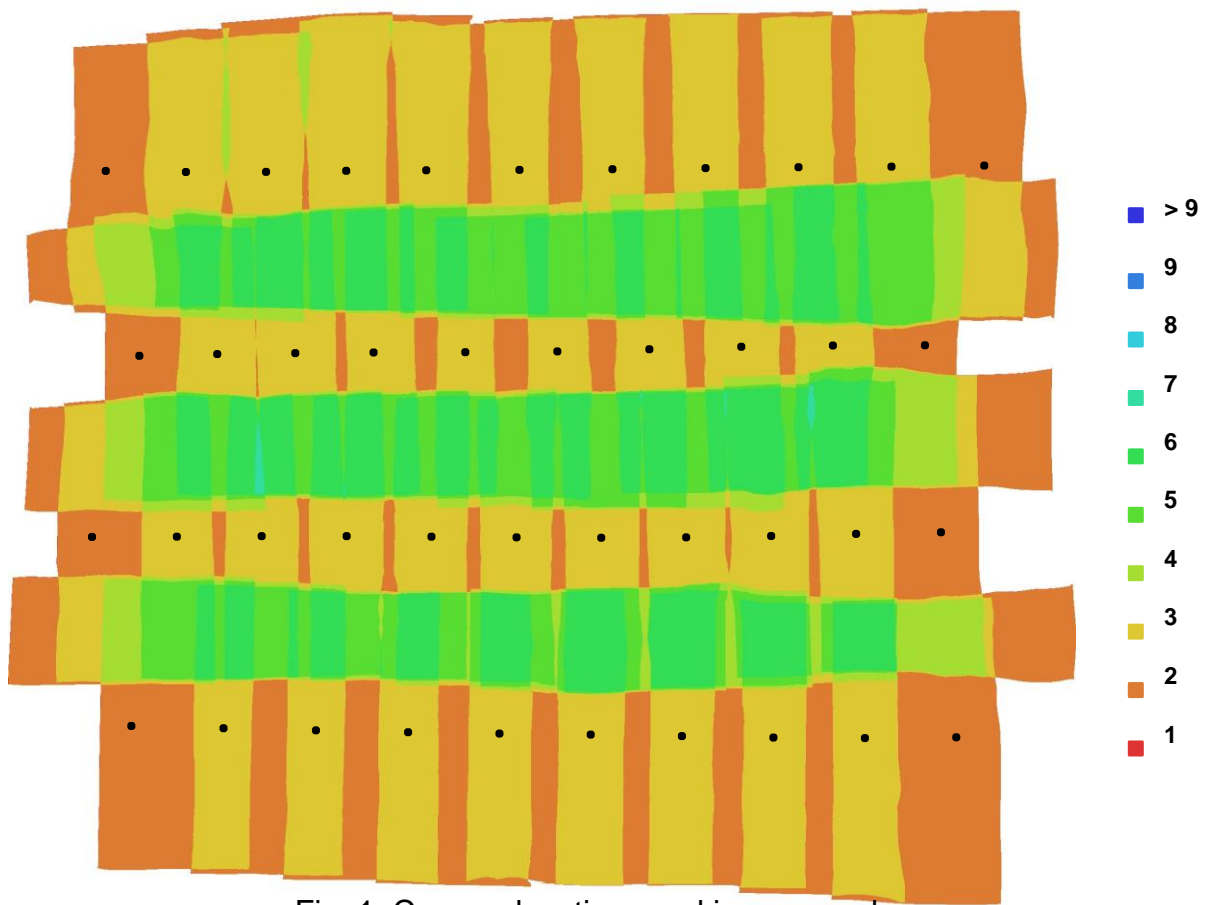


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	42	Camera stations:	42
Flying altitude:	4604.02 m	Tie-points:	285925
Ground resolution:	0.221085 m/pix	Projections:	710185
Coverage area:	132.329 sq km	Error:	1.39002 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
unknown	14016 x 16768	unknown	unknown	No

Table 1. Cameras

# Camera Calibration

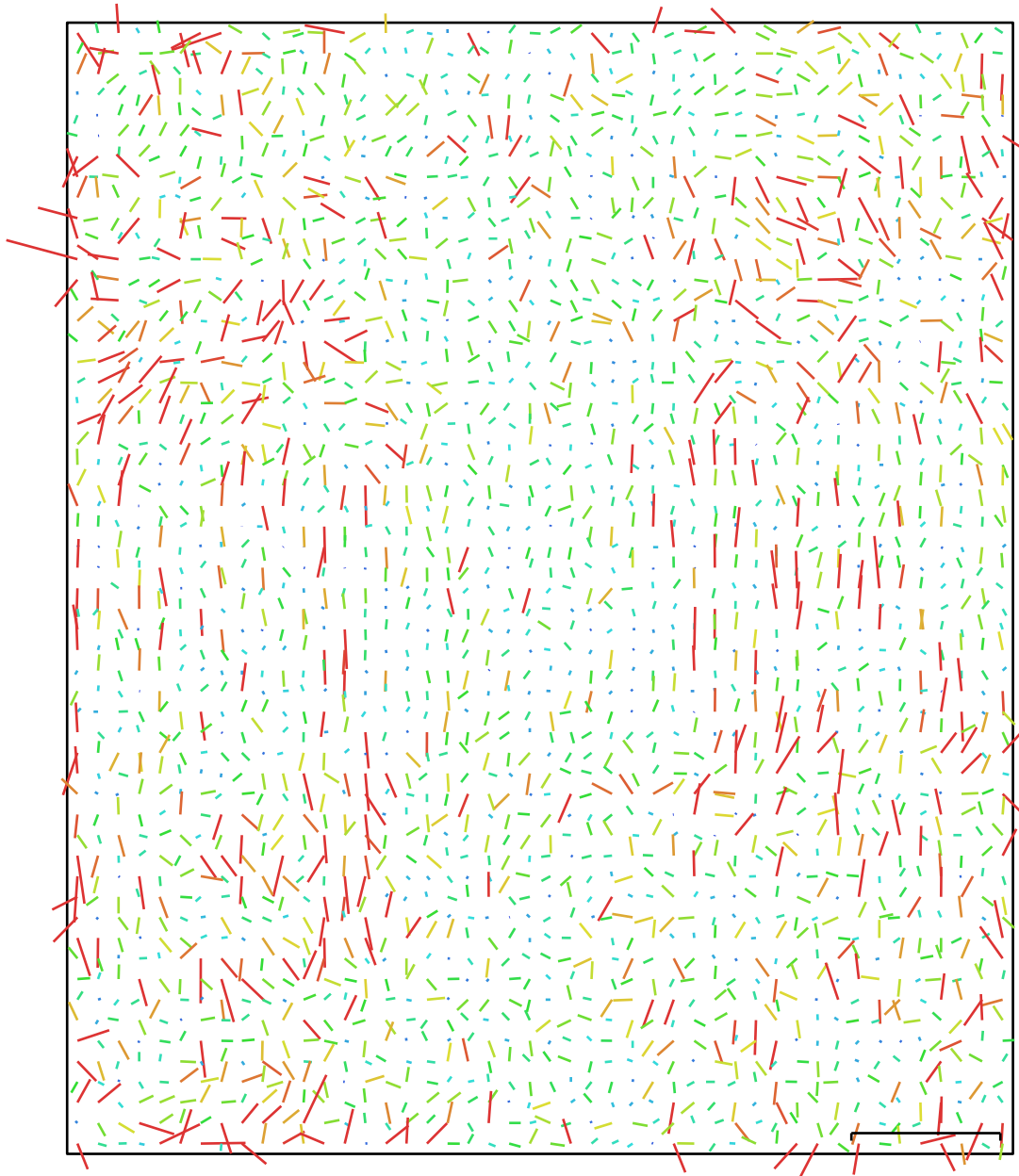


Fig. 2. Image residuals for unknown.

## unknown

Type:	Frame	K1:	-0.000875603
Fx:	20003.8	K2:	0.0039897
Fy:	20005.6	K3:	-0.00690012
Cx:	7014.77	K4:	0
Cy:	8388.97	P1:	-6.83761e-005
Skew:	1.17458	P2:	9.69822e-006

## Ground Control Points

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	0.100882	0.048344	0.084916	0.140446	4	0.332371
point 2	-0.036146	-0.137893	0.065356	0.156819	4	0.292263
point 3	0.135703	0.244540	-0.242990	0.370485	3	0.471036
point 4	-0.175270	-0.235752	-0.325710	0.438617	3	0.234439
point 5	0.385586	-0.112571	-0.058732	0.405954	2	0.070126
point 6	-0.304039	0.173912	-0.307594	0.466154	2	0.016890
point 7	0.120545	0.026222	-0.500315	0.515299	2	0.161928
point 8	-0.257115	-0.014651	-0.459501	0.526748	2	0.076155
point 9	-0.009480	0.043079	0.035152	0.056403	6	0.155123
point 10	-0.030017	-0.030501	0.022640	0.048414	6	0.185303
point 11	0.002676	0.148895	0.132734	0.199487	4	0.726076
point 12	-0.026485	-0.072916	0.075453	0.108219	5	0.209789
point 13	0.013492	0.080191	-0.105916	0.133532	6	0.423754
point 14	-0.006034	0.020127	0.018765	0.028172	6	0.251588
point 15	0.065892	-0.248309	0.012507	0.257207	3	0.347488
<b>Total</b>	<b>0.160962</b>	<b>0.136459</b>	<b>0.226998</b>	<b>0.309932</b>	<b>58</b>	<b>0.326611</b>

Table. 3. Control points

# Digital Elevation Model

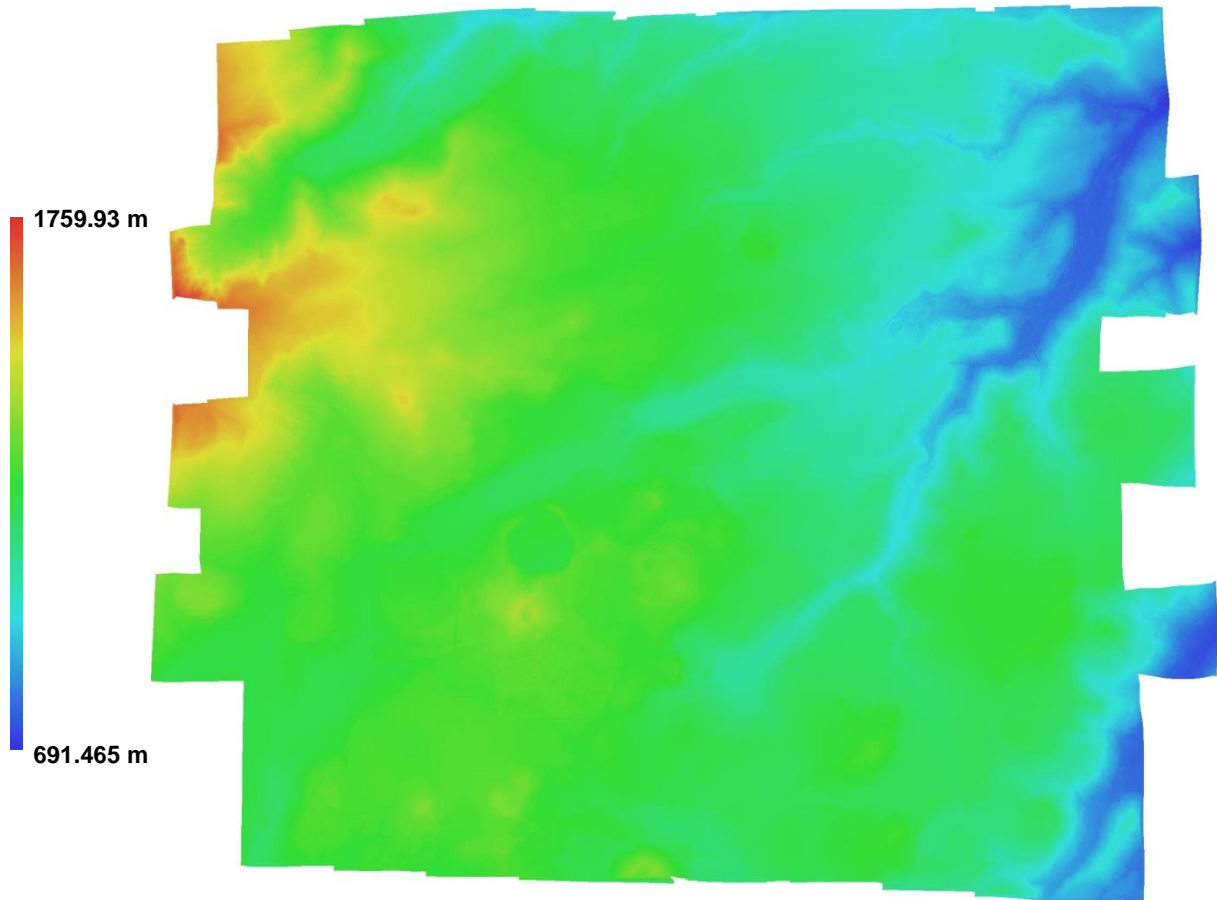




Fig. 5. Reconstructed digital elevation model

Resolution: 0.884339 m/pix  
Point density: 1.27868 points per sq m

## ANNEXE 12

### Fiche technique des points GPS pour la mission scanner

**Matériel utilisé :**

Base  <b>Topcon GB-1000 GPS</b>		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 5mm + 1.5ppm Hauteur : 10mm + 1.5ppm
Mobile  <b>Topcon HiPer Pro</b>		<u>Précision</u>  En statique Planimétrie : 3mm + 0.5ppm Hauteur : 5mm + 0.5ppm

**Coordonnées des bases en RGF93 / Lambert-93**

Nom	E	N	Altitude (IGN 69)
<b>PAVIN1</b>	691296.694 m	6489127.265 m	1171.949 m

Calcul des coordonnées : méthode du pivot central

Stations du RGP utilisées :

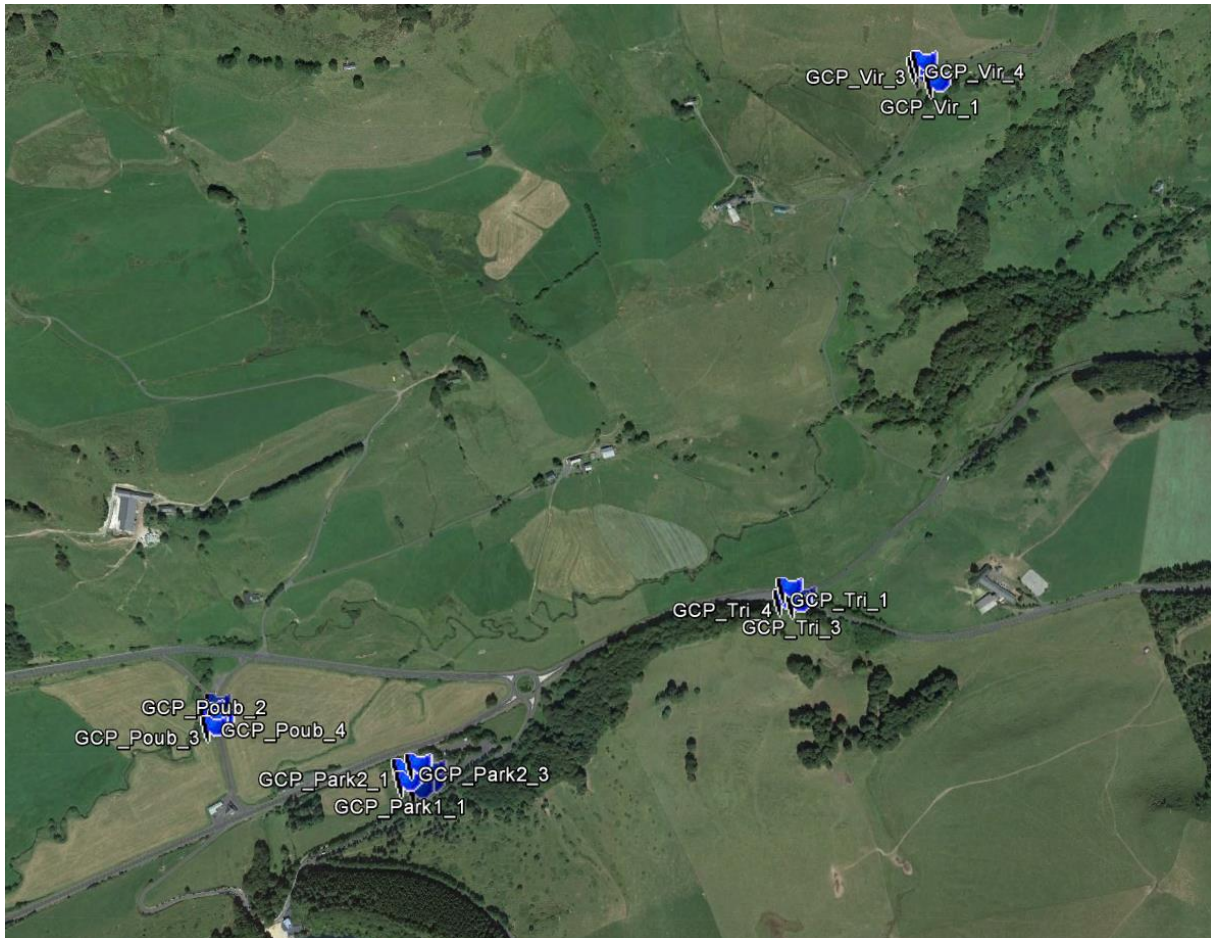
- SJPL (Saint-Julien-Puy-Lavèze)
- CLFD (Clermont-Ferrand)
- PDOM (Puy de Dôme)

**Dates et durées d'enregistrement :**

Date	Nom	Début	Fin	Temps total
<b>17/06/2015</b>	PAVIN1	07 :46 :30	13 :06 :00	05 :19 :30



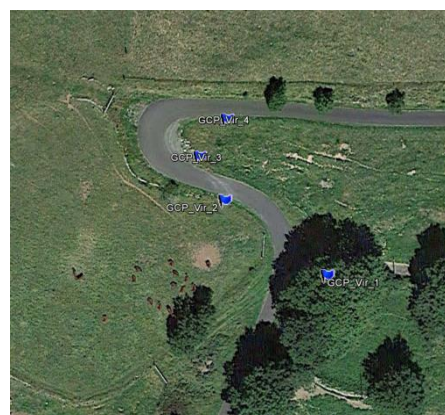
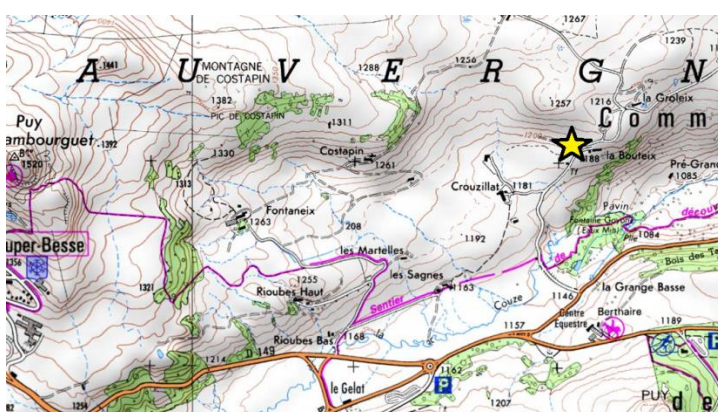
Points de contrôle (cibles et points remarquables) mesurés par session:



- PAVIN1 : (20 points)

GCP_Park1_1	GCP_Park2_1	GCP_Poub_1	GCP_Tri_1	GCP_Vir_1
GCP_Park1_2	GCP_Park2_2	GCP_Poub_2	GCP_Tri_2	GCP_Vir_2
GCP_Park1_3	GCP_Park2_3	GCP_Poub_3	GCP_Tri_3	GCP_Vir_3
GCP_Park1_4	GCP_Park2_4	GCP_Poub_4	GCP_Tri_4	GCP_Vir_4

**Exemple de fiche signalétique des GCP Scanner**



**Coordonnées des GCP du nuage « Virage » en Lambert 93**

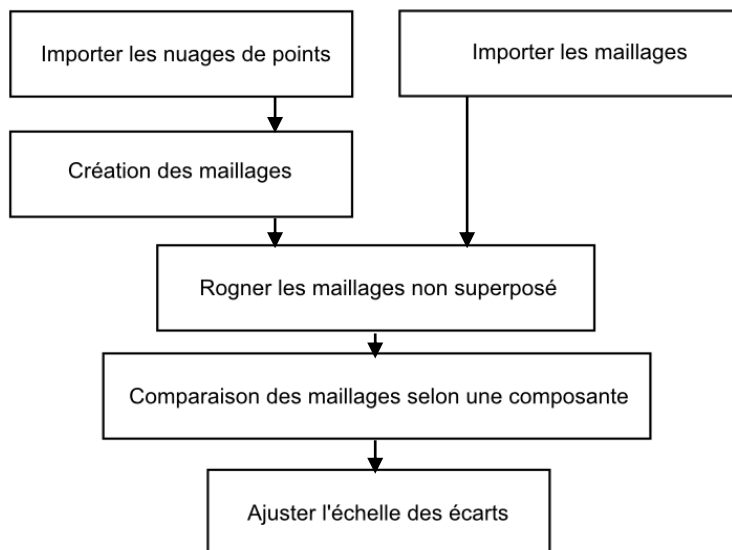
	<b>E (m)</b>	<b>N (m)</b>	<b>Alt (m)</b>
<b>GCP_Vir_1</b>	692251,956	6490336,477	1189,962
<b>GCP_Vir_2</b>	692227,559	6490352,087	1191,737
<b>GCP_Vir_3</b>	692221,161	6490361,91	1193,005
<b>GCP_Vir_4</b>	692227,280	6490369,968	1196,414

*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

Name	repère	E (m)	N (m)	Altitude (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev u (m)	Std Dev Hz (m)
GCP_Park1_1	cible	691329,705	6489124,966	1173,318	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP_Park1_2	cible	691346,119	6489129,921	1174,387	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP_Park1_3	cible	691370,441	6489122,995	1176,843	0,022	0,021	0,054	0,03
GCP_Park1_4	cible	691352,923	6489112,994	1175,434	0,006	0,004	0,012	0,007
GCP_Park2_1	cible	691322,146	6489145,259	1170,199	0,001	0,001	0,002	0,001
GCP_Park2_2	cible	691325,288	6489135,579	1170,744	0,008	0,005	0,019	0,01
GCP_Park2_3	cible	691344,489	6489153,602	1170,276	0,018	0,012	0,044	0,021
GCP_Park2_4	cible	691370,265	6489144,005	1171,556	0,032	0,021	0,075	0,038
GCP_Poub_1	cible	690989,971	6489255,807	1165,69	0,002	0,002	0,005	0,003
GCP_Poub_2	cible	690977,792	6489245,398	1165,345	0,003	0,002	0,007	0,004
GCP_Poub_3	cible	690985,500	6489216,949	1165,276	0,006	0,005	0,013	0,008
GCP_Poub_4	cible	690996,101	6489228,016	1165,099	0,009	0,006	0,019	0,011
GCP_Tri_1	cible	691988,438	6489453,321	1158,871	0,002	0,002	0,004	0,003
GCP_Tri_2	cible	692011,622	6489438,553	1158,571	0,002	0,001	0,003	0,002
GCP_Tri_3	cible	692003,754	6489427,198	1158,771	0,007	0,005	0,012	0,009
GCP_Tri_4	cible	691981,913	6489432,196	1158,543	0,016	0,008	0,021	0,018
GCP_Vir_1	cible	692251,956	6490336,477	1189,962	0,007	0,004	0,01	0,008
GCP_Vir_2	cible	692227,559	6490352,087	1191,737	0,003	0,002	0,006	0,004
GCP_Vir_3	cible	692221,161	6490361,91	1193,005	0,005	0,003	0,009	0,006
GCP_Vir_4	cible	692227,280	6490369,968	1196,414	0,002	0,001	0,003	0,002

## ANNEXE 13

### Utilisation de 3DReshaper pour la comparaison des MNS/MNT



#### Importer MNT

Les MNT ont été créés à l'aide d'Agisoft Photoscan, puis le nuage de points associé, a été exporté en fichier .ply, format pouvant être lu par 3DReshaper. Un logiciel de traitement qui permet entre autres de comparer deux nuages de points. Pour cela, nous avons donc importé les 2 nuages.

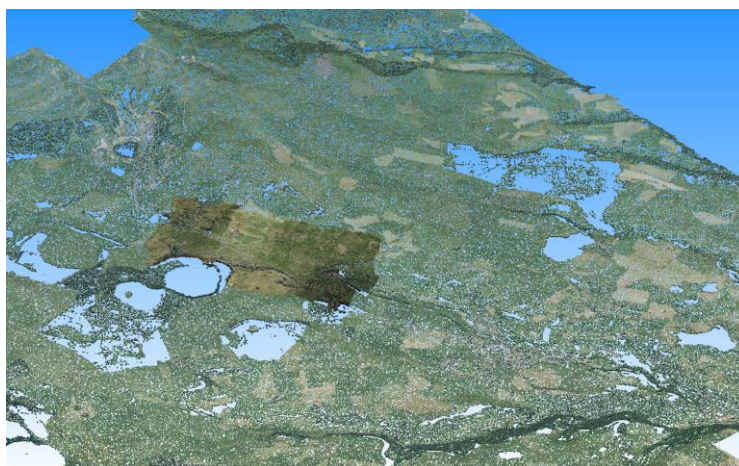


Figure 53A - Nuages de points correspondant au MNT avion et au MNT drone importés dans 3DReshaper

Une fois les deux nuages importés, pour pouvoir les comparer, il faut créer un maillage.

## Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol

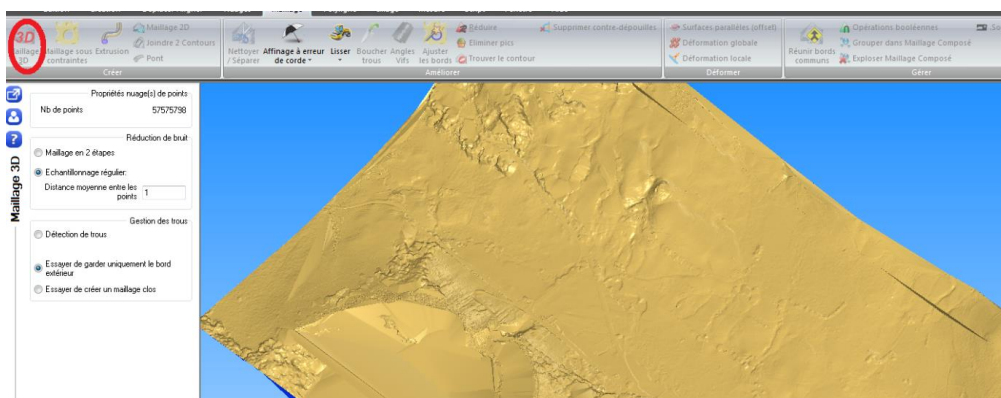


Figure 54A - maillage du MNT drone

Pour cela, il faut cliquer sur l'onglet **Maillage** puis sur le bouton **Maillage 3D** entouré en rouge sur la Figure 54A. Pour optimiser la comparaison des deux maillages, il faut mettre les mêmes paramètres à chacun pour qu'ils soient faits de manière identique. Pour que le résultat soit précis, nous pouvons mettre **un échantillonnage régulier avec un pas de 0.25m**. Le calcul est assez long, mais le résultat est meilleur. Si nous avons mis le pas par défaut (environ 10 mètres) le maillage serait très grossier et beaucoup de détails n'auraient pas été pris en compte. Mais si nous avons mis un pas plus petit, il y aurait eu beaucoup trop de bruit. Pour la gestion des trous, l'option la plus intéressante pour les MNT est de garder **le bord extérieur** et de remplir les trous se trouvant dans ce périmètre. De là, nous aurons les 2 maillages que nous pourrons comparer. Cela étant, le maillage généré par 3Dresaper est de moins bonne qualité que le maillage réalisé avec Agisoft, donc pour la suite, nous avons importé directement le maillage du MNS produit sous Photoscan. L'étape précédente sera réalisée pour les nuages de points pris au scanner 3D.

### Comparaison de maillage

Une fois que nous avons les 2 maillages, nous allons pouvoir les comparer.

Mais avant toute chose, pour que le calcul soit plus rapide, il est conseillé de découper le maillage du MNS avion pour que les deux zones soit à peu près égale. Pour cela, il faut cliquer sur **Nettoyer/ séparer** qui se trouve dans l'onglet **Maillage**.

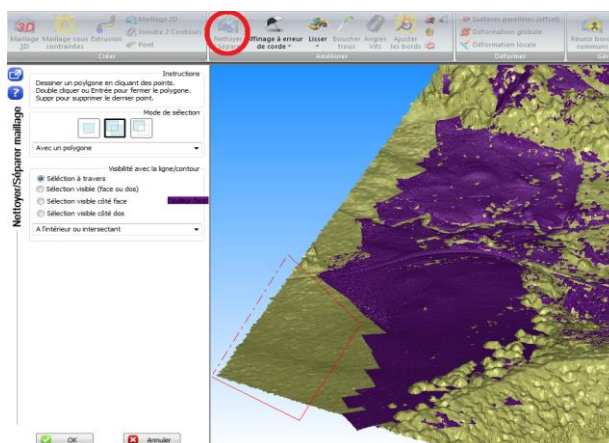


Figure 55A - découpe du maillage

## *Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

Une fois la zone délimitée, nous appuyons sur OK et une fenêtre s'ouvre pour que nous puissions informer 3DReshaper si nous voulons garder le maillage dans la polygone et supprimer le reste. Ou à l'inverse, supprimer ce qui se trouve dans la polygone et garder le reste.



Figure 56A - choix de la découpe

Pour comparer les MNS, il faut sélectionner les deux maillages dans l'arborescence à gauche en faisant bien attention à l'ordre de sélection. En effet, le premier maillage sélectionné sera considéré directement comme la référence de la comparaison. Ensuite, il faut aller dans l'onglet **Mesure** et cliquer sur le bouton **Comparer/Inspecter**.

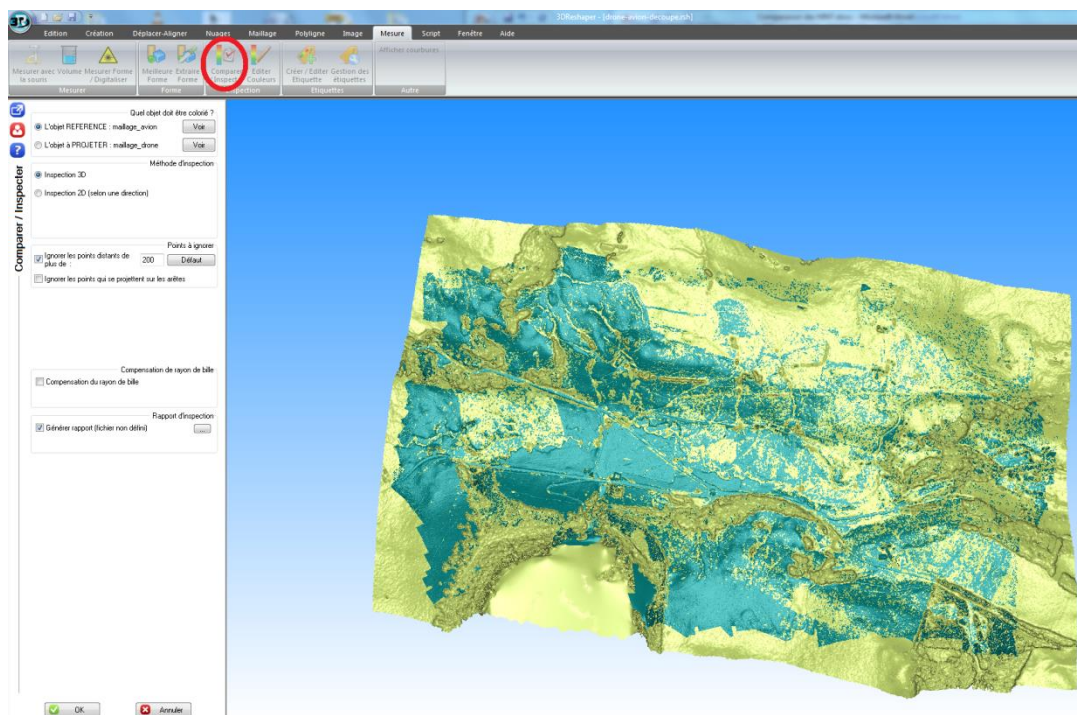


Figure 57A - Les deux maillages superposés et réduits à une emprise similaire

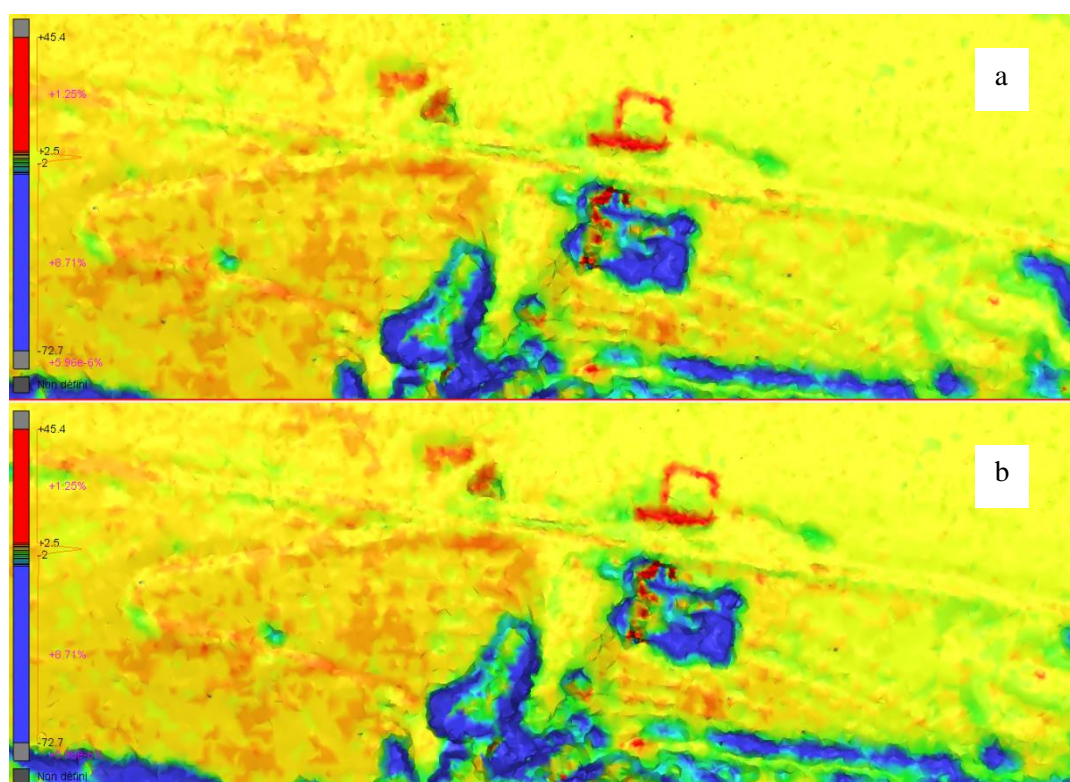
Ensuite, le logiciel demande sur quelle composante la comparaison doit être faite. Dans un premier temps, la comparaison a été faite sur une petite portion, afin de mieux se rendre compte des écarts selon les composantes :

*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

N°	Réf. X	Réf. Y	Réf. Z	Mes. X	Mes. Y	Mes. Z	Dev. X	Dev. Y	Dev. Z	Dev.
354	690979,29	6489250,37	1164,23	690979,2852	6489250,375	1164,498075	-0,004819	0,00519	0,268075	0,268169
355	690979,29	6489257,35	1164,24	690979,2862	6489257,35	1164,449701	-0,003769	0	0,209701	0,209735
356	690979,3	6489251,31	1164,24	690979,2852	6489251,309	1164,498338	-0,014845	-0,000715	0,258338	0,258765
357	690979,3	6489251,82	1164,25	690979,2926	6489251,816	1164,493665	-0,007415	-0,004213	0,243665	0,243814
358	690979,3	6489254,11	1164,23	690979,3043	6489254,11	1164,470369	0,00432	0,000166	0,240369	0,240408
359	690979,3	6489257,88	1164,24	690979,2856	6489257,876	1164,43769	-0,014388	-0,003837	0,19769	0,19825
360	690979,3	6489259,13	1164,26	690979,2915	6489259,129	1164,421438	-0,008493	-0,001117	0,161438	0,161665
362	690979,31	6489253,09	1164,24	690979,3092	6489253,09	1164,486041	-0,00085	0,00034	0,246041	0,246043
364	690979,31	6489255,08	1164,23	690979,3085	6489255,078	1164,505092	-0,001521	-0,001521	0,275092	0,2751
365	690979,31	6489255,62	1164,23	690979,3054	6489255,62	1164,477988	-0,004629	0	0,247988	0,248031
366	690979,31	6489256,12	1164,23	690979,3022	6489256,116	1164,466086	-0,007838	-0,003592	0,236086	0,236243
367	690979,31	6489257,11	1164,24	690979,3054	6489257,11	1164,470534	-0,004622	-0,000478	0,230534	0,230581
368	690979,31	6489257,64	1164,24	690979,2984	6489257,639	1164,452837	-0,01164	-0,001179	0,212837	0,213159

**Tableau 22A - Rapport de comparaison entre le maillage scanner et le maillage drone (en mètres)**

Les déviations en X et en Y sont millimétriques comparées aux déviations en Z qui sont décimétriques. Par ailleurs, les valeurs de la déviation générale (dernière colonne) sont presque égales aux valeurs de la déviation en Z à quelques dixièmes de millimètres. Pour alléger le temps de calcul, la comparaison va être faite uniquement selon la composante verticale. La Figure 58A illustre la faible différence entre le choix de la comparaison 2D suivant l'axe Z (a) et la comparaison 3D (b)



**Figure 58A - En haut l'inspection 2D suivant l'axe Z et en dessous l'inspection 3D**

Le choix des options pour la comparaison n'est pas déterminant. Le calcul est très lent, pouvant atteindre 3 jours de calcul (ce fut le cas pour la comparaison maillage drone avec le maillage scanner). Une fois terminé nous obtenons un maillage composé de plusieurs couleurs (Figure 59A). Nous pouvons choisir jusqu'à 19 couleurs différentes et choisir les bornes de l'échelle de couleur. J'ai choisi pour cette démonstration de garder de grandes bornes, pour garder les forêts et les habitations en couleur, mais j'ai réduit la palette de couleur à un intervalle plus court afin de mieux visualiser les écarts des éléments du sol.

*Analyse multi-échelles à haute résolution de la topographie restituée par  
photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol*

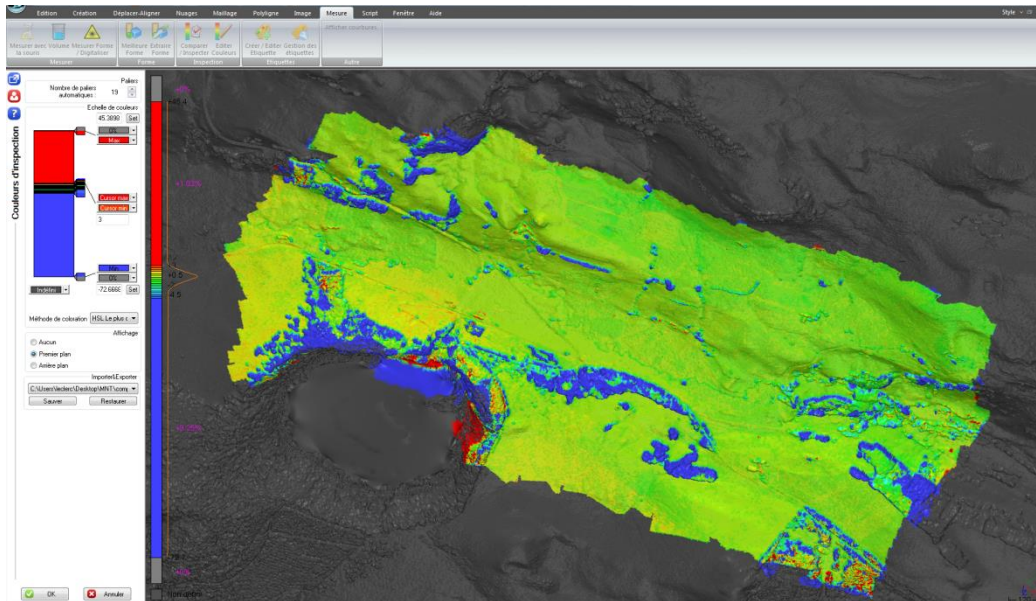


Figure 59A - Résultat de la comparaison sur 3DReshaper



## Table des illustrations

Figure 1 - Localisation de la zone d'étude .....	11
Figure 2 - Présentation de la zone d'étude et des différentes acquisitions .....	13
Figure 3 - Organigramme du projet TELEPATH.....	13
Figure 4 - Schéma montrant la différence entre MNT et MNS.....	16
Figure 5 - Répartition des points GPS.....	17
Figure 6 - Principe de la prise de vue aérienne (source: <a href="http://www.photographeprofessionnel.ovh">http://www.photographeprofessionnel.ovh</a> )..	18
Figure 7 - principe de la stéréoscopie.....	19
Figure 8 - Balayage du satellite (source: Centre canadien de la télédétection) .....	19
Figure 9 - Principe du LiDAR (source : USDA Forest Service) .....	20
Figure 10 - Principe d'acquisition RADAR (source: Centre Canadien de Télédétection) .....	21
Figure 11 - Distorsion du champ oblique (Source: <a href="http://www.radartutorial.eu">www.radartutorial.eu</a> ) .....	21
Figure 12 - Exemple d'un MNT Raster .....	23
Figure 13 – MNT vecteur de type TIN (source: <a href="http://vrlab.whu.edu.cn">http://vrlab.whu.edu.cn</a> ) .....	23
Figure 14 - Principe de la tri-stéréo.....	25
Figure 15 - Organigramme des tâches réalisé lors de la mission drone .....	27
Figure 16 – Zone d'étude Gelat-Pavin – Localisation des zones de vol et des points de contrôle.....	29
Figure 17 - Positionnement des GCP pour l'acquisition de données drone.....	30
Figure 18 - Cible placée sur le terrain .....	30
Figure 19 - Rattachement du pivot central (source: cours de géodésie 2ème année partie 1 de Monsieur Laurent MOREL) .....	31
Figure 20 - sélection des clichés à supprimer.....	32
Figure 21 - MNS issu des photographies prises par drone (LA 300) – représentation ombrée.....	33
Figure 22 - localisation des GCP dans le bloc.....	35
Figure 23 - MNS calculé à partir des photographies prises par avion (campagne IGN, 2013).....	36
Figure 24 - Organigramme des tâches réalisé lors de la mission scanner 3D .....	38
Figure 25 - Positionnement des tronçons choisis pour le levé scanner 3D (en violet) .....	39
Figure 26 - Acquisition d'un tronçon avec le scanner 3D .....	40
Figure 27 - Nuage de point nettoyé.....	40
Figure 28 - Maillage de toutes les zones générées à partir des nuages de points nettoyés (voir Figure 25 pour leur localité) .....	41
Figure 29 - MNT photogrammétrique final à 25 cm de résolution de la plaine du Gelat (MicMac) ....	42
Figure 30 - Zoom sur le MNT produit sous MicMac (a) et sur le MNT produit sous Agisoft Photoscan (b).....	43
Figure 31 – Ecart vertical (en mètres) observés dans les zones de recouvrement des 4 MNS transversaux calculés.....	44
Figure 32 - Cartographie des écarts observés (en mètres) entre les altitudes mesurées sur les points d'appui au sol et celles restituées par photogrammétrie avec le logiciel MicMac. L'échelle des valeurs varie entre -0.5 et 0.5 m.....	45
Figure 33 - Cartographie des écarts observés (en mètres) entre les altitudes mesurées sur les points d'appui au sol et celles restituées par photogrammétrie (Agisoft Photoscan). L'échelle des valeurs varie entre -0.13 et 0.03 m.....	45
Figure 34 - Position des GCP avec le même code couleur que le Tableau 10 pour les résidus entre les points d'appui et le modèle MicMac.....	46
Figure 35 - Comparaison des deux modèles sur une échelle comprise entre -0,4 à 0.4 m.....	48

Figure 36 - Profil des écarts d'Ouest en Est entre le MNT de référence MicMac (en vert) et MNT Agisoft (en bleu), la trace du profil est matérialisé par la droite C1, sur la Figure 35 .....	49
Figure 37 - Modèle texturé de la zone choisie pour la comparaison des modèles Avion et Drone.....	50
Figure 38 - Maillage avion (a) et drone (b) du centre équestre .....	50
Figure 39 - Représentation schématique de la différence entre le maillage drone et avion .....	51
Figure 40 - Coupes des MNT IGN (en rouge) et drone (en noir) des tronçons levés par drone. ....	52
Figure 41 - Classification du modèle Avion (a) et du modèle Drone (b) .....	53
Figure 42 - Position des GCP servant au géoréférencement du nuage de point "Virage" du scanner 3D (maillage 4 de la Figure 25) .....	54
Figure 43 - Comparaison en élévation des deux modèles (en mètres) .....	55
Figure 44 - Coupe grossière de la topographie de la zone d'étude et de son voisinage selon l'axe A1 (Figure 43).....	56
Figure 45 - Résultat de la comparaison du scanner avec le drone à gauche et avec l'avion à droite (valeurs en mètre).....	57
Figure 46 - Diagramme représentant la répartition des écarts.....	58
Figure 47A - Chaîne de traitement Agisoft pour la création d'un MNT / MNS.....	71
Figure 48A - nuage de points épars (à gauche) et le Mesh correspondant (à droite) .....	72
Figure 49A - marqueur bien placé (fanion vert) et marqueur généré par l'alignement des photos sur une autre photographie (fanion bleu) .....	72
Figure 50A - Imprécision sur les GCP (Ground Control Points) avant l'optimisation des caméras .....	73
Figure 51A - Imprécision sur les GCP (Ground Control Points) après l'optimisation des caméras.....	73
Figure 52A - Nuage dense de qualité faible (à gauche) et nuage dense de qualité haute (à droite).....	73
Figure 53A - Nuages de points correspondant au MNT avion et au MNT drone importé dans 3DReshaper .....	107
Figure 54A - maillage du MNT drone.....	108
Figure 55A - découpe du maillage .....	108
Figure 56A - choix de la découpe .....	109
Figure 57A - Les deux maillages superposés et réduits à une emprise similaire .....	109
Figure 58A - En haut l'inspection 2D suivant l'axe Z et en dessous l'inspection 3D.....	110
Figure 59A - Résultat de la comparaison sur 3DReshaper.....	111

**Liste des tableaux**

Tableau 1 - Secteurs d'études, méthodes, livrables et thématiques de recherche. ....	12
Tableau 2 - Caractéristiques des différentes méthodes d'acquisition de données avec pour objectif de créer un MNT .....	22
Tableau 3 - présentation du matériel utilisé pour la mission drone .....	27
Tableau 4 - Statistique sur les vols du drone .....	32
Tableau 5 - Caractéristiques du MNT drone obtenu par Agisoft Photoscan .....	33
Tableau 6 - caractéristiques du vol avion .....	34
Tableau 7 - Caractéristiques du MNT avion obtenu par Agisoft Photoscan .....	37
Tableau 8 - Présentation du scanner utilisé .....	37
Tableau 9 - Résidus entre les modèles et les points d'appui (MicMac à gauche, et Agisoft Photoscan à droite) .....	46
Tableau 10 - Principales caractéristiques de l'histogramme concernant les écarts entre les GCP et les modèles.....	47
Tableau 11- Tableau récapitulatif.....	49
Tableau 12 - Rappel sur les caractéristiques des MNT avion et drone .....	51
Tableau 13 - Résidus entre les GCP Scanner avec les modèles avion et drone .....	54
Tableau 14 - Moyenne et écart-type des écarts entre le modèle scanner et les modèles aériens.....	58
Tableau 15 - Temps passé pour chaque mission .....	59
Tableau 16 - Types de données nécessaire pour différents travaux .....	61
Tableau 17 - Tableau comparatif des résultats pour les différentes méthodes d'acquisition.....	61
Tableau 18A - Caractéristique des scénarios.....	78
Tableau 19A - Aéronefs volant dans les différents scénarii.....	79
Tableau 20A - Catégories ayant obligation ou non d'un document de navigabilité .....	79
Tableau 21A - Conditions pour obtenir une autorisation de vol .....	80

## Synthèse

L'actuelle évolution des méthodes de relevé topographiques (Radar, LiDAR, photogrammétrie aérienne ou spatiale, scanner 3D, etc.) voit l'apparition de nouvelles données toujours plus précises, notamment avec les LiDAR, les drones et les satellites produisant des images à haute résolution, comme les images Pléiades. Ces données sont nécessaires aux laboratoires de recherche en science de la Terre qui ont besoin, pour leurs travaux, d'avoir une reconstitution en trois dimensions de la terre la plus précise possible. Ces modèles numériques de terrain (MNT) leur servent à retracer l'histoire de notre planète, et surtout de savoir comment fonctionnent certaines catastrophes naturelles, telles que les volcans ou les séismes, pour pouvoir prévenir d'éventuels risques liés à ces phénomènes et ainsi protéger la population. Dans l'optique d'avoir des MNT précis, le Laboratoire Magmas et Volcans (LMV), basé à Clermont-Ferrand, souhaite connaître une méthode de réalisation de MNT relativement peu coûteuse, mais suffisamment précise pour effectuer leurs travaux de recherche. Pour cela, nous allons comparer plusieurs méthodes d'acquisitions de données (photogrammétrie spatiale, aérienne et mesures au sol) dans le cadre d'un projet de gestion des risques.

**Mots clé:** MNT, précision, comparaison, photogrammétrie aérienne, drone, Pléiades.

## Abstract

The current surveying techniques (RADAR, LiDAR, airborne and satellite photogrammetry, 3D scanners to name a few) are constantly upgraded and bring forth cutting-edge data processing devices with increasingly accurate output such as the high-resolution images of the Pleiades captured and generated by LIDAR, drones and satellites. Earth Sciences laboratories require such fine data to produce utmost 3D earth models. These Digital Terrain Models (*DTMs*) also prove most valuable for tracing our planet's history and apprehending natural disasters such as volcano eruptions and earthquakes, with a view to improving risk assessment and prevention for the sake of the local populations. In order to obtain accurate DTMs, the *Laboratoire Magmas et Volcans* (LMV), based in Clermont-Ferrand, wishes to find the appropriate gear which will prove both affordable and efficient to conduct such research and produce reliable DTMs. Bearing these requirements in mind, we shall compare several data acquisition methods (spatial photogrammetry, aerial and ground measurements) as part of a risk management project.

**Keywords:** DTM, accuracy, comparison, aerial photogrammetry, drone, Pléiades.