

# ACQUISITION ET TRAITEMENTS DE NUAGES DE POINTS 3D PAR DES TECHNIQUES LÉGÈRES ET À FAIBLES COÛTS POUR L'ÉLABORATION DE MNT À HAUTE RÉOLUTION

## *HIGH RESOLUTION DEM CONSTRUCTION*

### *BY LOW-COST, SIMPLE TECHNIQUES AND FREE APPLICATIONS*

ESTELLE PLOYON<sup>1</sup>, STÉPHANE JAILLET<sup>1</sup>, OLIVIER BARGE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France.

<sup>2</sup> Archéorient, Université Lumière Lyon 2, Commanderie de Jalès, 07460 Berrias et Casteljau, France.

Contact : Estelle.Ployon@univ-savoie.fr

## RÉSUMÉ

Dans le domaine des géosciences, les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sont des données essentielles et souvent de base pour de nombreuses recherches. Or, il s'avère que ces modèles font souvent défaut sur le marché pour travailler à certaines échelles, notamment les plus fines. Des acquisitions spécifiques sont alors nécessaires.

Cette contribution a pour objectif de présenter un retour d'expérience dans l'exploration de méthodes et outils de modélisation 3D à partir de photographies pour réaliser des modèles numériques de terrain à haute résolution, par des techniques légères et à faibles coûts. Elle vise avant tout un public non initié aux techniques pointues de la photogrammétrie et de la corrélation multi-images. Elle présente un protocole allant de l'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant à la restitution de MNT sous SIG en montrant les différentes étapes de traitements et d'analyses ainsi que les outils utilisés. Une attention particulière est donnée à l'évaluation des erreurs dans la chaîne de traitement pour valider la restitution finale.

**MOTS-CLÉS :** MNT HAUTE RÉOLUTION, MULTI-CORRÉLATION D'IMAGE, NUAGE DE POINTS 3D, LOGICIEL LIBRE, LOGICIEL GRATUIT.

## ABSTRACT

In geosciences, Digital Elevation Models (DEM) are very common and are used as base data in many studies. But DEM are not always available on market. This paper explores the use of new technologies based on 3D reconstruction model for acquiring high-resolution DEMs. These technologies use automatic matching of image features to reconstruct information in 3D and use uncalibrated images. This paper presents a protocol to evaluate these cost-effective new tools. It explains the way aerial photographs are taken by kite (KAP) and how images can be treated by automatic 3D reconstruction tools to be used in GIS. It analyses also each step of the proposed protocol in order to evaluate the accuracy of the final DEM.

**KEYWORDS:** HIGH RESOLUTION DEM, 3D IMAGE RECONSTRUCTION, 3D POINT CLOUD, OPEN SOURCE APPLICATION, FREE SOFTWARE.

## INTRODUCTION

L'imagerie et la topométrie sont des modes d'investigation qui produisent des données extrêmement utiles dans l'étude des milieux naturels et notamment en géomorphologie. En effet, l'imagerie, entendue ici principalement par photographies aériennes permet, par son interprétation, d'identifier des morphologies et d'analyser les caractéristiques géométriques des terrains investis. La richesse de la photo-interprétation est très largement liée à la résolution spatiale des images mais aussi à la vision stéréoscopique permettant d'appréhender ces images en relief. Cette vision en 3D des images est rendue possible par un protocole de prises de vue aériennes très calibré dont les caractéristiques permettent une restitution photogramétrique. De celle-ci sont tirées de nombreuses données constituant des bases de données géographiques particulièrement riches et notamment des données topographiques telles que les modèles numériques de terrain. En ce point, l'imagerie (méthode passive) se rapproche de la topométrie qui s'attache à mesurer précisément les formes du relief et à les représenter avec des méthodes plus actives (théodolites, GPS, scanner laser terrestre ou aérien). Elle permet également la production de modèles numériques de terrain à plusieurs échelles selon les techniques utilisées. Bien que l'utilisation de ces modèles soit extrêmement courante dans les disciplines telles que la géologie, la géographie et notamment la géomorphologie, à certaines échelles il n'existe pas toujours de données topographiques sur le marché répondant aux besoins et aux questionnements scientifiques. De fait, dès lors que l'on s'intéresse à des micro-formes, il est courant qu'il faille produire spécifiquement ces MNT, dits à haute résolution. Les coûts de telles acquisitions peuvent très vite être importants selon les méthodes employées, les résolutions et précisions voulues.

Bien que les avancées technologiques récentes et le développement des levés par balayage laser notamment (Grussenmeyer et Landes, 2011) rendent l'acquisition de MNT à haute résolution de plus en plus systématique, il n'en demeure pas moins que ces

données restent onéreuses et pas toujours accessibles et facilement utilisables. Quant à la photogrammétrie « classique » plusieurs points la rendent difficilement envisageable pour une production de MNT de sites d'étude d'emprise spatiale restreinte. En effet, elle nécessite un protocole d'acquisition de photographies très rigide et est donc réservé à des structures maîtrisant ces techniques (cabinets de photogrammétrie, IGN). Mais comme cela a déjà été souligné, la résolution spatiale des images est un critère encore plus contraignant puisque les formes à interpréter doivent être facilement identifiables. Le rapport d'échelle entre clichés aériens et formes à photo-interpréter est très discriminant. Dès lors, quelle alternative reste-t-il pour acquérir des Modèles Numériques de Terrain à des échelles correspondant aux questionnements scientifiques mais restant néanmoins abordables ?

La révolution à laquelle on assiste ces dernières années dans le domaine de la modélisation 3D et plus particulièrement la reconstitution 3D d'objets à partir de photographies semble une solution envisageable, sous certaines conditions (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). Cette contribution a pour objectif de présenter un retour d'expérience dans l'exploration de cette voie pour la production de MNT à haute résolution, par des techniques légères et à faibles coûts, pour une utilisation finale dans les outils classiques de la géographie que sont les SIG et autres applications cartographiques. Il s'agira plus exactement de présenter un protocole allant de l'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant à la restitution de MNT sous SIG en montrant les étapes de traitements et d'analyses en utilisant des applications libres ou gratuites de préférence. Une attention particulière sera portée aux difficultés rencontrées mais aussi aux processus de validation des résultats obtenus. Les limites et les perspectives qu'offrent une telle approche seront enfin présentées avec les évolutions envisagées et/ou envisageables. Nous nous plaçons volontairement dans la position du thématique-utilisateur pour qui les méthodes très pointues de photogrammétrie ne seront pas abordées.

## I - PRODUCTION DE NUAGES DE POINTS 3D À PARTIR DE PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES NON CALIBRÉES

## 1 - Reconstruction 3D d'objets à partir de photographies : une méthode en plein essor

Depuis quelques années nous assistons à un essor spectaculaire des technologies 3D et la modélisation 3D d'objets est devenue courante dans de nombreux domaines. Dans le champ des géosciences, elle permet notamment la reconstitution d'objets naturels sur lesquels il est ensuite possible de travailler et d'extraire des informations très riches. Cela était difficilement

envisageable il y a encore quelques années. Les modélisations en milieux naturels ont notamment été permises par le développement et la mise sur le marché de scanners laser (lidars aéroportés et scanners laser terrestres) autorisant l'acquisition rapide de données topographiques 3D haute résolution. Ces techniques se diffusent très largement aujourd'hui mais les investissements demeurent lourds et parfois disproportionnés par rapport aux réels besoins. Si les modélisations 3D d'objets naturels sont actuellement intimement liées à

la lasergrammétrie, ayant suivi probablement les évolutions industrielles proposées par la rétro-ingénierie et la mesure de précision, il n'en est pas forcément de même dans d'autres domaines. En effet, des avancées marquantes, probablement initiées par le domaine de la robotique et la vision artificielle permettent la reconstruction 3D d'objet à partir de photographies et que l'on retrouve aussi bien en architecture, dans l'étude des patrimoines culturels que dans le domaine de la réalité virtuelle (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011). D'ailleurs, des outils très accessibles permettent à partir de simples photographies prises d'un objet de le reconstituer en 3D. Souvent réalisées sur des objets de petites tailles, très symboliques, ces reconstitutions 3D sont très visuelles et très parlantes mais surtout semblent quasi-automatiques. On assiste ainsi à l'essor d'applications presque « ludiques ». On peut citer comme exemple, parmi bien d'autres sans doute, les outils Photosynth (Microsoft), Photofly (Autodesk), Bundler-PMVS ou encore Arc3D webservice. Plusieurs de ces applications sont basées sur du webservice. Dans ce cas, après envoi des photos sur des serveurs distants, il ne reste plus qu'à récupérer le résultat de la reconstitution 3D sous forme de nuage de points ou de modèles maillés. Bien évidemment derrière ces outils, d'utilisation très simple, des méthodes pointues de corrélation multi-images existent, basées sur des techniques photogrammétriques puissantes (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011), mais pour l'utilisateur tout reste transparent.

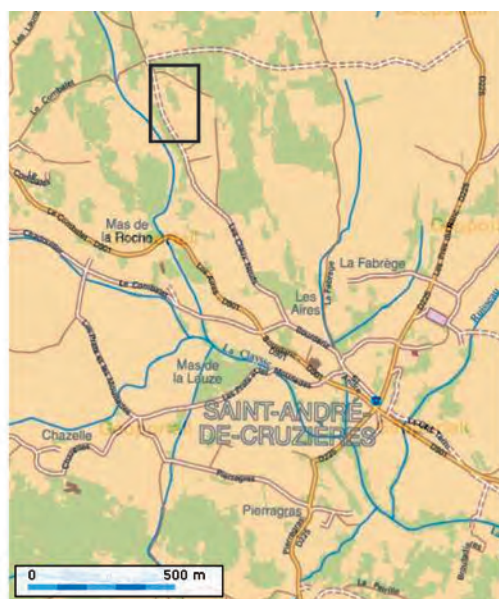
Il semblait donc fécond de tester ces méthodes dans le cadre d'un site test dont l'échelle est adapté à nos problématiques de recherches.

## 2 - De l'acquisition d'images à la production de nuages de points 3D : protocole méthodologique

Le site d'étude et d'acquisition des photographies aériennes se situe dans le sud Ardèche sur la commune de Saint-André de Cruzières (Figure 1). La campagne s'est déroulée dans le cadre d'une mission de prises de vue aériennes par moyens légers (stage CNRS organisé par Olivier Barge, Archéorient, basé à la commanderie de Jalès, Ardèche). Le site a été choisi pour ses caractéristiques morphologiques. Il est marqué par des micromorphologies très particulières, bien visibles et anthropiques. En effet, cette zone de garrigues fortement rocailleuse (clapas) a fait l'objet de construction de terrasses et pierriers pour une mise en culture ancienne. Le terrain investigué s'étend sur environ 50 m de large et 100 m de long avec des contraintes certaines (arbres, arbustes, herbacées et tas de pierre) dont il faudra tenir compte dans la suite des traitements (Figure 2).

### a - Préparation du terrain, cibles au sol et levés GPS

Dans le cadre de ce travail de test, des cibles de couleur (assiettes en plastique d'une vingtaine de centimètres de diamètre) ont été réparties sur l'ensemble du terrain à photographier avec une disposition couvrant les différentes morphologies présentes. Dans les zones relativement plates, les cibles ont été positionnées de manière régulière. Sur certaines zones présentant des



Données : Géoportail, France Raster et Orthophotos



Figure 1 - Localisation du site d'étude.



changements de relief, plusieurs cibles ont été placées de manière à obtenir par la suite des points de contrôle rendant compte au mieux de la morphologie du terrain (Figure 2 et 3). Les cibles ont ensuite été levées au GPS différentiel (Trimble) et post-traitées sur suite logicielle dédiée pour améliorer la précision des mesures.



Pierriers, herbacées, arbustes, arbres et cibles au sol



Disposition des cibles sur un pierrier.  
Noter l'importance de la végétation en certains endroits

Figure 2 - Présentation du site - pierriers, herbacées, arbustes, arbres et disposition de cibles.



Figure 3 - Vue générale d'une partie du site marqué par les cibles au sol (ici des assiettes colorées). Photo prise au cerf-volant.

#### **b - Acquisition de photographies aériennes basse altitude et haute résolution : mission par cerf-volant**

La mission de photographies aériennes a été réalisée avec un dispositif ultra léger. Il est constitué d'un cerf-volant de type delta et d'un ensemble permettant les prises de vue (Figure 4). La Figure 5 illustre le pro-

cédé utilisé. Un appareil photo Nikon CoolPix P6000 est monté sur une nacelle robotisée et contrôlée par une radio-commande, laquelle permet de manœuvrer l'appareil photo et surtout de déclencher les prises de vue. Ce compact expert à 13,5 millions de pixels effectifs est équipé d'un zoom NIKKOR grand-angle 6-24 mm (28 - 112 mm équiv. en format 24 x 36). Lors de cette mission le zoom a été bloqué sur 6mm (28 mm) pour conserver une focale fixe. Le dispositif de prise de vue est accroché non pas au cerf-volant mais au fil, par un système de pendule, lorsque le cerf-volant est stabilisé à environ 50 m du sol (longueur de fil de 50 m, pour éviter les chutes se produisant souvent au décollage). On laisse ensuite monter le cerf-volant, entraînant le dispositif de prise de vue jusqu'à l'altitude souhaitée. De manière à couvrir au maximum la zone investiguée, de nombreux clichés ont été pris à une altitude de 50 m puis à une altitude de 100 m. De ce fait la mission de photographies réalisée possède une échelle moyenne comprise entre 1/1700 et 1/3500 environ.



Figure 4 - Matériel utilisé : en haut, le cerf-volant utilisé, un delta mono-fil, stable pour ce type d'usage et piloté par un opérateur (à droite), équipé d'un baudrier et d'un enrouleur ; en bas, montage du dispositif de prise de vue aérienne, Appareil Nikon CoolPix P6000 installé sur une nacelle simple. Le déclenchement des prises de vues est assuré par une télécommande.

Cette échelle globale et approximative est évaluée selon la formule classique  $1/e=f/H$  (Boureau, 2008), avec :

- $f$  = distance focale de l'objectif de l'appareil photo
- $H$  = élévation par rapport au sol (élévation moyenne)
- $e$  = dénominateur de l'échelle

Cette acquisition permet d'obtenir des photographies haute résolution ( $3168 \times 4224$  pixels) et à grande échelle, chaque photo correspondant au sol à un rectangle projeté, donc déformé, allant de  $20 \times 26,6$  m à  $40 \times 53,2$  m selon l'altitude. Cela correspond à une résolution moyenne proche du pixel par cm. La qualité des clichés est fonction de la plus ou moins grande stabilité du vent qui peut se traduire par des bougés de prise de vue ; une vitesse d'obturation rapide doit être recherchée.

La technique de photographies à partir d'un ballon captif gonflé à l'hélium donne des résultats comparables : il est difficile de dépasser une altitude de prise de vue de plus d'une centaine mètres alors qu'un cerf-volant permet d'atteindre assez facilement 300 m. En revanche, on s'affranchit plus aisément des obstacles (végétation) et le dispositif de prise de vue est plus stable. Cette technique requiert l'absence de vent.

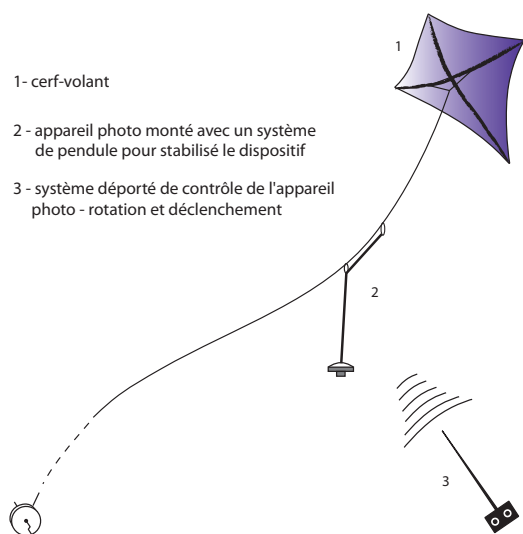


Figure 5 - Dispositif du cerf-volant.

### c - Corrélation multi-images : pourquoi le choix d'ARC3D web service ?

De nombreux outils de reconstruction 3D à partir de photographies existent et se développent très rapidement. Pour le moment, la plupart des solutions sont encore gratuites mais il est possible qu'elles deviennent payantes à court ou moyen terme. En effet, certains sont sous licence propriétaire (Microsoft, Autodesk) et d'autres ont fait l'objet de demande de brevet. Par exemple, l'application Photofly (Autodesk) stipule à son ouverture que le produit est gratuit jusqu'en août 2011.

Afin de mieux comprendre ce qui a motivé le choix de l'outil, utilisé ici pour la reconstruction de nuages de points 3D, nous proposons un bref descriptif des principaux logiciels disponibles actuellement. Ce point permettra également d'orienter les utilisateurs potentiels.

#### - Bundler :

Bundler est sans doute l'application la plus connue et sert d'ailleurs de base à d'autres programmes comme nous le verrons. Bundler (Snavely *et al.*, 2006 ; 2007) a été conçu pour travailler avec des collections d'images non organisées et non calibrées et provenant même d'internet. Il est basé sur des recherches dans le domaine des systèmes automatiques de structure à partir du mouvement (*Structure from Motion*, SfM) et est dérivé de travaux similaires (Lourakis et Argyros, 2004, 2009). Il fonctionne sur le principe de prendre une collection d'images, de chercher des caractéristiques dans les images et de les mettre en correspondance entre elles. Il produit avant tout une reconstruction 3D des positions de prise de vue des images (caméras) et un nuage de point très peu dense et donc très partiel. De fait, Bundler est avant tout un programme de mise en correspondance d'images et non un outil de reconstruction 3D de nuages de points. Par conséquent, il doit être utilisé avec d'autres applications notamment PMVS (Patch-based Multi-view Stereo Software), et maintenant CMVS (Clustering Views for Multi-view Stereo) distribué en GNU General Public Licence et enrichi par une communauté autour de Y. Furukawa et J. Ponce (Furukawa et Ponce, 2009, 2010 ; Furukawa *et al.*, 2010). La distribution de ces applications est proposée en fichiers binaires ou en code source et n'est pas très simple à mettre en œuvre. Il faut ajouter plusieurs librairies et autres utilitaires. Ce choix bien qu'intéressant n'a pas été retenu ici.

#### - Photosynth :

Photosynth est une application Microsoft dérivée des travaux de recherche émanant de l'Université de Washington et du pôle recherche de Microsoft (Snavely *et al.*, 2006, 2007) lesquels visaient, à partir de photographies de tourisme, à reconstruire des nuages de points 3D et proposer de nouvelles manières de parcourir et visualiser des photos. Photosynth a donc les mêmes origines que Bundler, et est basé sur les mêmes travaux de vision artificielle et de recherche de structure à partir d'images en mouvement (*Structure from Motion*, SfM). Cette application est maintenant un service internet qui permet à tout un chacun de transférer des images vers des applications distantes via une interface simple, et ainsi reconstruire des nuages de point 3D à partir des photographies prises selon différents points de vue. Cette application gratuite est donc avant tout ludique même si quelques travaux de recherche ont utilisé cet outil pour créer des modèles numériques de terrain à visée scientifique pour le suivi d'érosion (Dowling *et al.*, 2009). Le problème principal de cette

application est la récupération des nuages de points produits, pour les traiter et les utiliser ensuite mais surtout la mise sur internet des reconstructions et des images utilisées. Cela pose un problème de droits et de confidentialité des données tant utilisées que produites. Nous n'avons donc pas retenu cette solution de reconstruction 3D à partir de photos.

#### – Photofly :

Photofly est également un service internet permettant la reconstruction 3D à partir d'images. Cette application propriétaire (Autodesk) fonctionne un peu sur les mêmes principes que Photosynth mais propose en plus des modules d'inspection (mesures, mise à l'échelle, orientation horizontale et verticale des modèles produits). Cet outil est encore gratuit, car en développement, mais probablement voué à être intégré à des solutions logicielles existantes et détenues par Autodesk. En effet, les résultats obtenus sont récupérables mais déjà dans des formats propriétaires, appartenant à l'éditeur.

#### – Arc3D web service :

Ce dernier est né d'un réseau collaboratif dans le domaine de l'étude, de la protection et de la mise en valeur des patrimoines culturels. Ce réseau européen nommé EPOCH (European Network of Excellence), regroupant de nombreuses institutions, a initié un projet autour de l'acquisition et de la représentation 3D, précises et réalistes, d'objets architecturaux et patrimoniaux. Un des objectifs de recherche envisagés était notamment de concevoir des outils de reconstruction 3D abordables et flexibles (Pollefeys *et al.*, 2001 ; Vergauwen et Gool, 2006 ; Cignoni *et al.*, 2008) à partir d'images. Au delà d'une accessibilité d'ordre financier cela impliquait également une certaine robustesse du système envisagé, permettant une utilisation par une large communauté d'utilisateurs et des protocoles simples et notamment pour l'acquisition de prises de vue photographiques (Pollefeys *et al.*, 2001). Ce projet est clairement orienté vers la qualité de la représentation des reconstructions 3D et donc la réalité virtuelle et la communication (Vergauwen et Gool, 2006). Arc3D est un web service gratuit intégrant toute la chaîne de traitement. Il suffit de télécharger une petite application qui permet d'envoyer les images à traiter vers un serveur distant. Un enregistrement comme utilisateur du service est nécessaire mais contrairement à Photosynth, les données envoyées ne sont pas accessibles à d'autres utilisateurs. Comme les outils précédemment présentés, Arc3D est basé sur des principes de vision artificielle, d'automatisme (Structure from Motion) et de photogrammétrie. Cet outil de reconstruction 3D à partir d'images est utilisable avec MeshLab, logiciel de modélisation 3D libre, pour ce qui concerne l'exploitation des données (Cignoni *et al.*, 2008). La reconstruction 3D est transparente pour l'utilisateur, prévenu par mail de l'achèvement du processus et du téléchargement des résultats à effectuer.

Les différentes caractéristiques d'Arc3D ont été essentielles dans notre choix de solution de reconstruction de nuages de points 3D à partir de photographies non-calibrées. En effet, non seulement cette application semblait simple d'utilisation mais se voulait également robuste et souple en fonction des applications envisagées ce qui correspondait parfaitement à nos besoins. Mais ce qui a vraiment déterminé ce choix, c'est que l'utilisateur puisse avoir la main sur certains points du traitement. Les fonctionnalités de cet outil seront détaillées dans la partie suivante.

D'autres applications existent et/ou sont en cours de développement (Suite logicielle libre de l'IGN notamment) mais ces solutions sont plus destinées pour le moment à des utilisateurs avancés car elle demandent des pré-requis informatiques et théoriques importants (Pierrot Deseilligny et Clery, 2011).

### d - Protocole acquisition-traitement-évaluation : synthèse

Après avoir présenté les principales étapes d'acquisition d'images (préparation terrain, prises de vue par cerf-volant) et le choix réalisé (outil de reconstruction 3D) menant à la production de nuages de points 3D, il semble opportun de replacer ces étapes dans une démarche plus globale d'acquisition-traitement-évaluation permettant d'envisager la constitution d'un modèle numérique de terrain à haute résolution.

La Figure 6 présente les éléments essentiels du protocole envisagé ainsi que les outils utilisés. Dans un

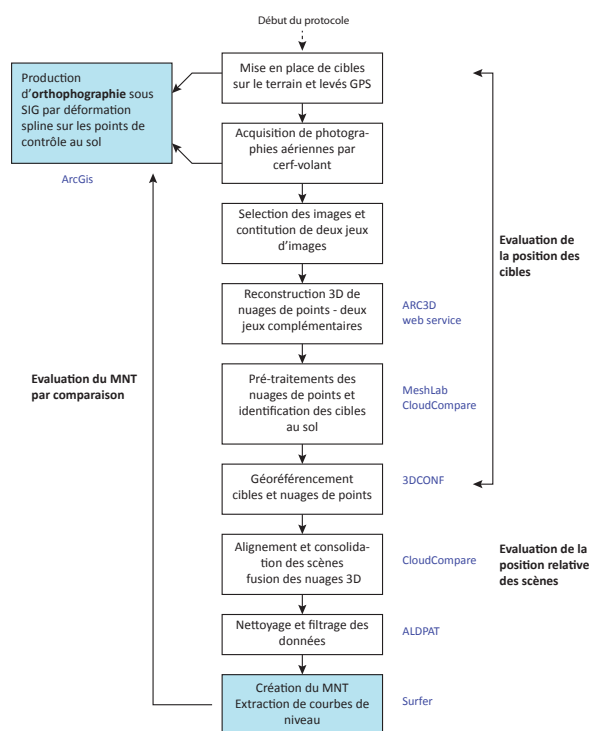


Figure 6 - Protocole.



premier temps, les photographies aériennes acquises permettent de réaliser des orthophotographies simples grâce aux levés GPS des cibles au sol et identifiables sur les photos. Ces orthophotographies sont réalisées sous logiciel SIG par déformations « *spline* » des images, déformations rendues possibles par le nombre important de point de contrôle au sol (74 points). Cette première étape du travail vise à avoir une bonne représentation du site et servira ultérieurement dans le rétro-contrôle final.

Deux jeux de photographies ont ensuite été réalisés à partir des différentes images acquises par cerf-volant. L'objectif est ici d'analyser la robustesse et la justesse de l'outil de reconstitution 3D, Arc3D. En effet, les deux jeux de photographies produiront deux reconstitutions différentes qui seront évaluées lors de leur assemblage et après géoréférencement, lequel sera également évalué par comparaison avec les points de contrôle au sol levés par GPS. La procédure proposée s'attache à contrôler les différentes étapes et les différents outils utilisés pour la production de MNT haute résolution.

## II - TRAITEMENTS DES NUAGES DE POINTS 3D

### 1 - Arc3D web service : envoi des données

L'envoi des données vers Arc3D web service est extrêmement simple, il suffit via une interface de charger toutes les images devant servir à la reconstitution de la scène, de faire analyser la validité des données (contrôle de flou notamment) et ensuite envoyer les images sur le serveur d'Epoch (<http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3D/webservice/v2/>) (Figure 7). Il a été procédé à deux envois de séries d'images non identiques mais complémentaires en termes d'emprise spatiale et d'orientation des images. La première composition d'images (scène) comporte 60 images et la seconde 32 images. Le système va recalculer automatiquement les paramètres de calibration internes des images, retrouver les positions relatives des caméras et calculer des mises en correspondance denses.

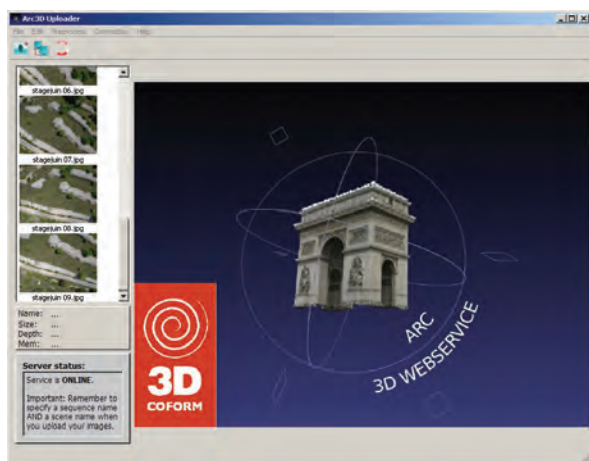


Figure 7 - Interface de chargement des images sur Arc3D.

### 2 - Paramètres de reconstruction et traitements

Une fois la reconstitution réalisée, un message électronique invite à télécharger les résultats des reconstructions 3D établies à partir des images envoyées. Les dernières modifications apportées au service permettent de récupérer deux types d'information, un répertoire

zippé contenant un modèle maillé et texturé (voir exemple sur planche hors-texte) et un second répertoire zippé contenant les résultats de la reconstruction 3D avec toute une série d'informations relatives aux calculs effectués sur les données de départ. Ces dernières données sont exploitables sous forme de projet avec une application proposée par Arc3D web service ou avec MeshLab (<http://meshlab.sourceforge.net/>) au format v3d. Dans le cas présent, MeshLab a été préféré car il permet de nombreux traitements sur les modèles. A ce stade il s'agit d'une pseudo-reconstitution car il n'est pas encore question de nuage de points 3D mais de cartes de profondeur issues des multi-corrélations d'images qui seront transcrites en mesure 3D à l'étape suivante dans Meshlab.

La Figure 8 montre l'interface d'ouverture du projet de reconstitution 3D dans MeshLab. C'est à ce niveau que l'utilisateur peut faire des choix et orienter la reconstruction en fonction des objectifs et des données de départ. Cette étape est très importante car les réglages effectués ici induiront des reconstitutions 3D plus ou moins denses et précises. Il est donc conseillé de faire plusieurs tentatives et essais. C'est une inspection des résultats de reconstitution qui est finalement proposé. Il convient tout d'abord d'observer les cartes de profondeur dans la partie droite de l'interface. Pour chaque image traitée, il est présenté une composition colorée permettant d'évaluer la qualité des cartes de profondeurs estimées. Plus les couleurs vont vers le vert-bleu meilleure sera la précision de reconstitution des points 3D. Il est donc important de choisir les meilleures images pour la suite et de définir un seuil minimum en-dessous duquel les données ne seront pas considérées. Dans le cas présent, pour les deux scènes traitées, le seuil de qualité a été fixé à 4 (l'estimation de la projection 3D se fait sur 4 images minimum) comme valeur minimale de précision et seulement 4 images ont été choisies, celles couvrant au mieux la surface terrain. Prendre toutes les images du projet (respectivement 60 et 32) est totalement inutile car ne fait qu'ajouter de la redondance voire du bruit dans le modèle final. Il faut également procéder à un échantillonnage des photos car leur résolution importante de départ, utilisée et

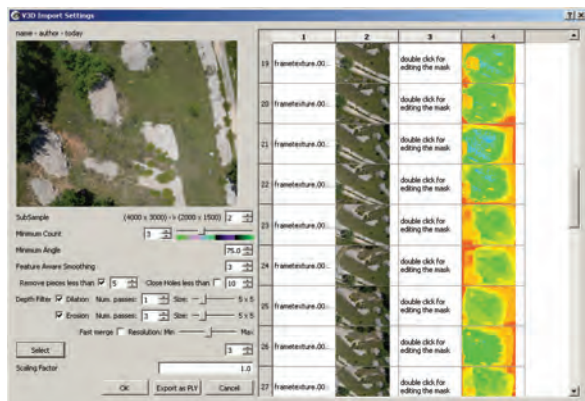


Figure 8 - Import des résultats de la reconstitution avec Arc3D web service.

nécessaire dans les calculs de multi-corrélation, n'est plus indispensable pour la suite de ce test. La lourdeur des fichiers devient trop importante et les données bien trop résolues pour l'application finale envisagée. Le choix d'un seuil d'échantillonnage de 10 s'est même imposé pour obtenir des fichiers ne comportant pas trop de points et pouvant être raisonnablement utilisés ensuite et surtout présentant une précision équivalente dans les dimensions X, Y et Z (Cignoni *et al.*, 2008). Il convient également de traiter dès à présent un minimum le bruit des nuages de points, souvent présent dans ce type de reconstitution automatique, avec les filtres de dilatation et d'érosion proposés. Cette approche combinée érosion-dilatation nettoie les erreurs pouvant se produire aux limites de chaque zone présentant des variations importantes de profondeurs par élimination de bandes de pixels et donc de points. De plus, dans les zones extrêmement plates où il n'existe pas de caractéristiques morphologiques marquées, permettant une très bonne mise en correspondance, la reconstruction est toujours un peu « bruitée », ces filtres permettent d'atténuer ces phénomènes un peu à la manière d'un lissage.

Une fois ces choix d'images et de paramètres effectués, la reconstitution 3D peut-être faite et enregistrée en fichier « PLY » (Stanford Triangle Format, format très utilisé dans le domaine du 3D en version binaire ou ascii et donc lisible par beaucoup d'applications).

Le résultat est consultable notamment dans MeshLab pour analyse et nettoyage. Les deux reconstitutions 3D réalisées dans le cadre de ce test sont des modèles maillés comportant respectivement 271 784 et 208 665 sommets (pour des scènes représentant au sol 2 060 m<sup>2</sup> et 1 625 m<sup>2</sup>, soit environ 130 pts/m<sup>2</sup>, valeurs déterminées après géoréférencement) (Figure 9)

A ce stade les résultats sont des modèles 3D mais en coordonnées purement relatives au processus de reconstitution. La métrique est juste, à un facteur d'échelle, de rotation et de translation près. Il s'agit dès lors de retrouver ces différents paramètres de transformation permettant le géoréférencement et c'est probablement l'étape la plus difficile du processus de restitution de MNT par ces méthodes automatiques à partir d'images.

### 3 - Consolidation des nuages de points et géoréférencement

Dans le cas présenté ici, les cibles posées au sol et bien visibles dans les nuages de points colorés et également levées au GPS vont permettre cette détermination des paramètres de référencement. La technique la plus simple pour réaliser cela est d'identifier les coordonnées des cibles dans les nuages de points 3D et de procéder à une transformation de ces points sur la base des coordonnées terrain par une transformation conforme des points 3D, basée sur les moindres carrés.

Plusieurs outils permettent de faire cette transformation. Il a été choisi d'utiliser l'application Open Source 3DCONF (Dewitt, 1998) pour sa robustesse et sa facilité d'utilisation. Il a néanmoins été nécessaire de modifier légèrement le code source et de recompiler l'application de manière à augmenter le nombre de points pouvant être traités. Pour les deux scènes réalisées, les coordonnées des cibles ont été recherchées et enregistrées avec l'outil « Pick Point » dans MeshLab (Figure 10 a). Pour chaque scène, sept points cibles ont été utilisés pour le calcul des paramètres de transformation et les autres points cibles comme points inconnus à traiter. Cela a permis une évaluation des coordonnées calculées des cibles par comparaison avec les points GPS (Figure 10 b), avant de traiter l'ensemble

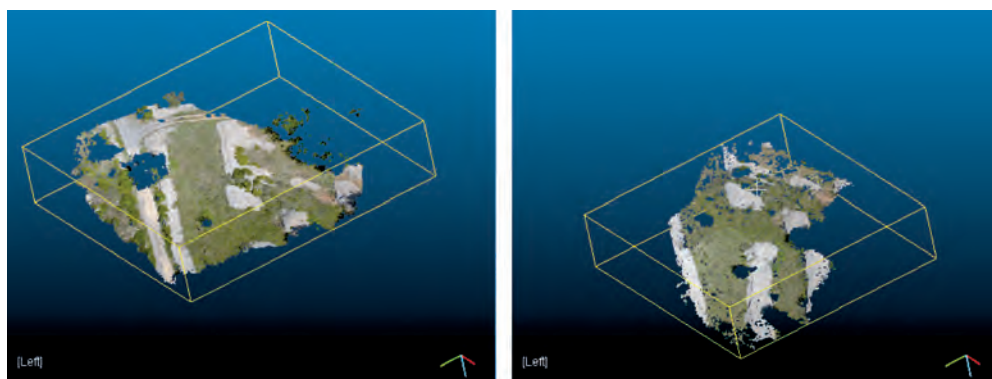
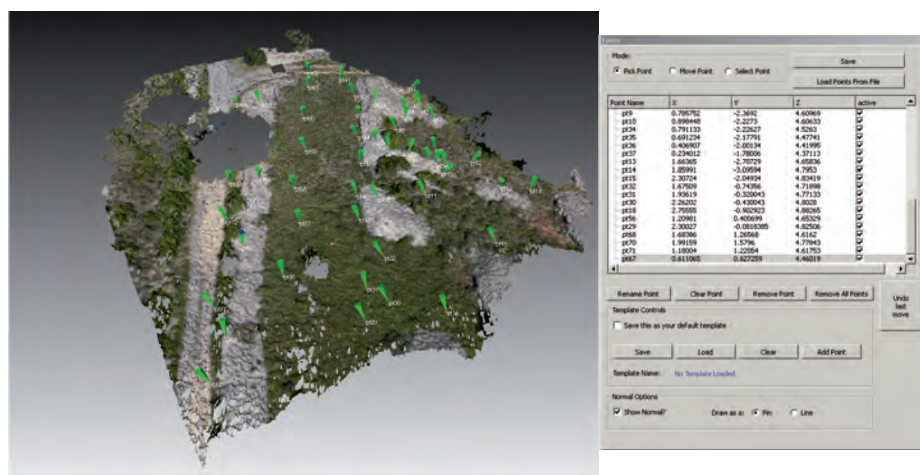


Figure 9 - Deux vues cavalières de restitution des modèles 3D à l'issue des traitements. Noter les nuages de points colorés et continus. Les trous visibles dans les nuages de points sont liés aux arbres bien visibles et masqués dès la reconstitution.

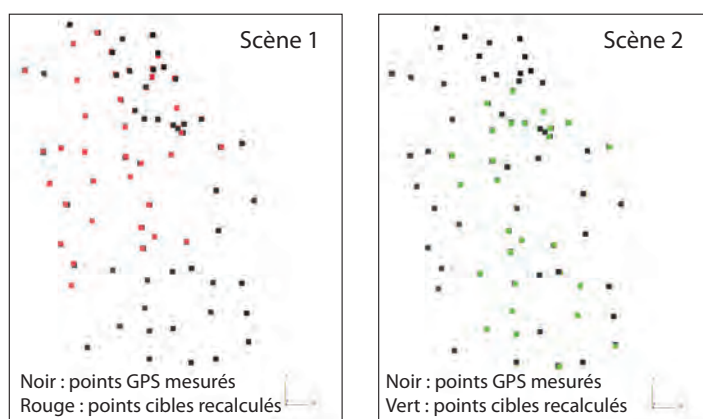


## a - Extraction des coordonnées des cibles



Identification des cibles dans les nuages de points et extraction des coordonnées associées dans le référentiel relatif à la reconstruction 3D (MeshLab)

## b - Géoréférencement et évaluation des transformations



Transformations conformes 3D sur les points cibles (3DCONF)

Comparaison avec les points GPS initiaux

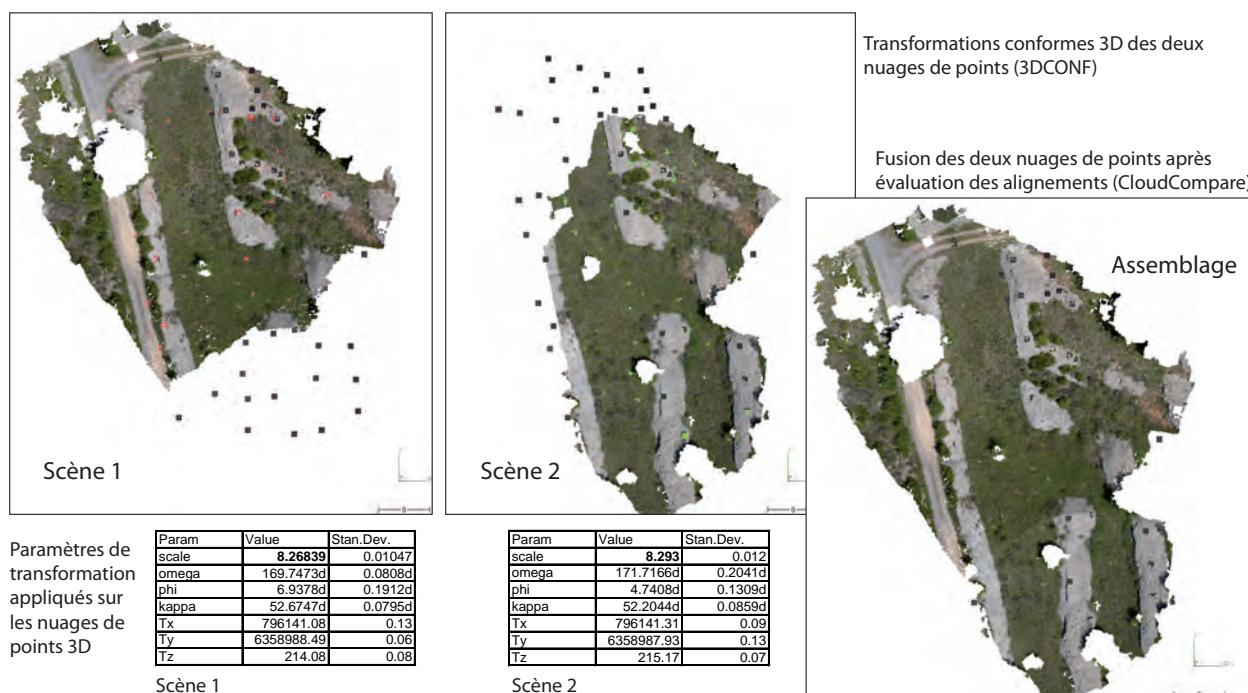
Scène 1 - 50 points de contrôle

	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
médiane	0.03	-0.04	-0.03
moyenne	0.05	-0.03	-0.03
écart-type	0.11	0.11	0.11
erreur min	0.00	0.00	0.00
erreur max	0.34	0.46	0.28

Scène 2 - 42 points de contrôle

	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
médiane	-0.03	0.01	-0.02
moyenne	-0.02	0.02	-0.02
écart-type	0.10	0.09	0.06
erreur min	0	0	0
erreur max	0.25	0.228	0.157

## c - Géoréférencement et consolidation des nuages de points



Transformations conformes 3D des deux nuages de points (3DCONF)

Fusion des deux nuages de points après évaluation des alignements (CloudCompare)

Paramètres de transformation appliqués sur les nuages de points 3D

Param	Value	Stan.Dev.
scale	8.26839	0.01047
omega	169.7473d	0.0808d
phi	6.9378d	0.1912d
kappa	52.6747d	0.0795d
Tx	796141.08	0.13
Ty	6358988.49	0.06
Tz	214.08	0.08

Scène 1

Param	Value	Stan.Dev.
scale	8.293	0.012
omega	171.7166d	0.2041d
phi	4.7408d	0.1309d
kappa	52.2044d	0.0859d
Tx	796141.31	0.09
Ty	6358987.93	0.13
Tz	215.17	0.07

Scène 2

Figure 10 - Procédure de consolidation et géoréférencement des nuages de points 3D.

des nuages de points (Figure 10c). La Figure 10 synthétise l'ensemble de la procédure de transformation et de géoréférencement associés. Les erreurs apparaissant dans les transformations sur les points de contrôle sont relativement faibles, de l'ordre de quelques centimètres (du même ordre de grandeur que les mesures GPS elles-mêmes). Il existe certes quelques points avec des erreurs plus importantes lesquelles sont très probablement induites par une erreur de mesure terrain des cibles car pour les deux scènes, ce sont les mêmes cibles qui possèdent les plus grandes erreurs.

L'outil de transformation 3D des coordonnées utilisé ici permet de rassembler deux étapes importantes, celle du géoréférencement des nuages de points en coordonnées Lambert 93 et du même coup la consolidation efficace des deux nuages (alignement). Les paramètres appliqués aux deux nuages sont quelque peu différents. En effet, chaque nuage possède son propre référentiel, lié au processus de reconstruction. Les deux nuages de points produits à partir des deux reconstitutions différentes peuvent être fusionnés à l'issue de cette transformation de coordonnées. Cela

montre également que la reconstitution 3D à partir de l'outil Arc3D web service est robuste et fiable puisque des nuages issus de reconstructions différentes peuvent parfaitement être assemblés après correction des paramètres de transformation (échelle, rotation, translation). Cette étape a également été validée en utilisant CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2007), application spécifiquement conçue pour comparer des nuages de points (développés à EDF R&D et Telecom ParisTech et maintenue depuis). Il a notamment été possible de calculer les distances locales entre les deux nuages denses et de valider ainsi la consolidation. Notons également que CloudCompare est très complémentaire de MeshLab, notamment pour la conversion de format de maillage en nuage de points. En effet, les formats de maillage 3D ne sont pas utilisables dans les applications SIG classiques ni dans 3DCONF qui travaillent avec des nuages de points uniquement.

A l'issue de ces différentes étapes, la restitution d'un modèle numérique de terrain haute résolution peut maintenant être envisagée à partir du nuage de points 3D géoréférencé.

### III - ELABORATION DU MNT

#### 1 - Filtrage des données : MNE vers MNT

Le géoréférencement réalisé a induit une grande transformation des coordonnées. Or de nombreux logiciels orientés 3D gèrent très mal les coordonnées avec de grands chiffres, ce qui est le cas par exemple des coordonnées Lambert en mètre. Il convient donc de revenir vers des applications plus adaptées, à savoir les SIG et autres applications utilisant des données en coordonnées terrestres. Une dernière étape est encore nécessaire avant la production et le traitement de MNT. Il s'agit de nettoyer le nuage de points qui comporte du bruit, des artefacts ou des données inutiles. En effet, le terrain étudié et photographié comporte de la végétation herbacée, des arbustes et des arbres (Figures 2 et 3). Le nuage de points comporte donc de nombreux points du « sur-sol » qu'il convient d'éliminer pour bien restituer un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et non un MNE (Modèle Numérique d'Elevation).

Pour se faire, et toujours en gardant à l'esprit la logique initiale d'utilisation d'outils libres ou gratuits, il a été choisi de filtrer les données avec l'application ALDPAT (Zhang et Cui, 2007) développée et utilisée en lasergrammétrie aérienne pour filtrer les acquisitions à retours d'ondes complètes (ROC). Après un nettoyage manuel des arbres les plus visibles, plusieurs filtres spécifiques automatiques ont été utilisés, notamment ceux basés sur des seuils d'élévation par rapport à des minimums locaux avec une fenêtre variable et ceux basés sur des composantes morphologiques du terrain.

Les étapes ne sont pas ici très détaillées car dépendent beaucoup des données et du type de terrain investis. La Figure 11 illustre néanmoins cette procédure de filtrage. Au départ le nuage de points comporte 480 500 points pour une surface de 2800 m<sup>2</sup> (170 pts/m<sup>2</sup>) avec une redondance sur les zones de recouvrement des deux scènes. A la fin du processus, le nuage compte 99 400 points pour 2800 m<sup>2</sup>, soit une moyenne de 35 pts/m<sup>2</sup>. On constate que la végétation reste difficile à éliminer complètement et nécessitera encore un nettoyage manuel.

#### 2 - Maillage et visualisation dans les outils classiques de cartographie

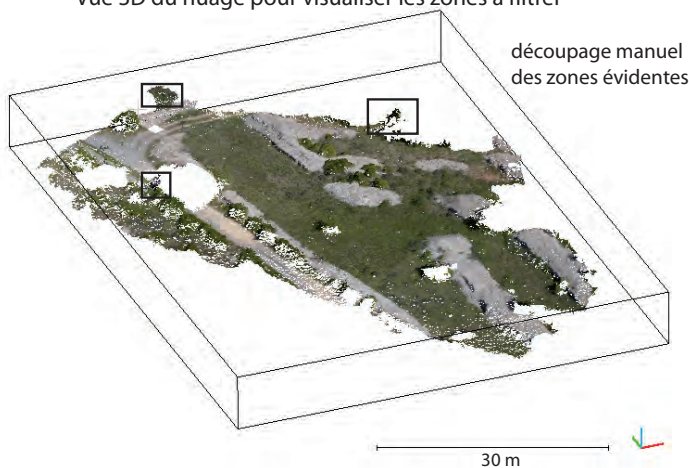
Le nuage de points 3D issu de la reconstruction automatique à partir d'images non calibrées est maintenant à même d'être utilisé. Il a été procédé au maillage des données en utilisant une triangulation Delaunay 2.5D au pas de 10 cm. Les données sont ensuite traitées classiquement et peuvent servir de base pour des recherches particulières à des échelles très fines. La Figure 12 propose un aperçu du résultat de ce protocole de restitution de MNT haute résolution par relief ombré et courbes de niveaux tous les 10 cm. Elle permet aussi de replacer les résultats obtenus sur une orthophotographie produite indépendamment et selon une autre méthode (cf protocole Figure 6). Ce dernier point permet *in fine* de valider l'ensemble de la procédure même si ce n'est que par comparaison visuelle, donc naturaliste.

## Nuage de points 3D colorisé et géoréférencé



- 1 - Zones de marge. Artefacts liés aux arbres et manques de données
- 2 - Arbustes et petits arbres à filtrer
- 3 - Artefacts de reconstruction d'arbres à filtrer
- 4 - Herbacées et petits arbustes
- 5 - Les trous sont de grands arbres éliminés pendant la reconstruction

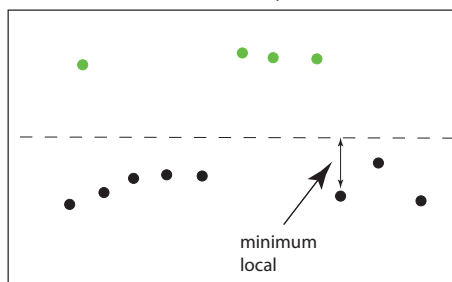
## Vue 3D du nuage pour visualiser les zones à filtrer



découpage manuel  
des zones évidentes

## Filtrage du nuage de points 3D - séparation des points du sol et du sur-sol par filtres automatiques

Filtre : Elevation Threshold with Expend Window (ETEW)

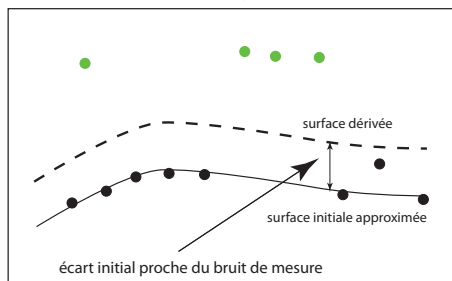


(d'après ZHANG et CUI, 2007)

## Principes :

Dans une zone donnée, les variations d'élévation peuvent permettre de séparer les données du sol et du sur-sol. La zone est subdivisée en une grille régulière à cellule carrée et tous les points autres que les minimums sont supprimés. La taille des cellules est augmentée à l'itération suivante et les points ayant une élévation supérieure à un seuil donné sont supprimés.

Filtre : Progressive Morphology (PM)

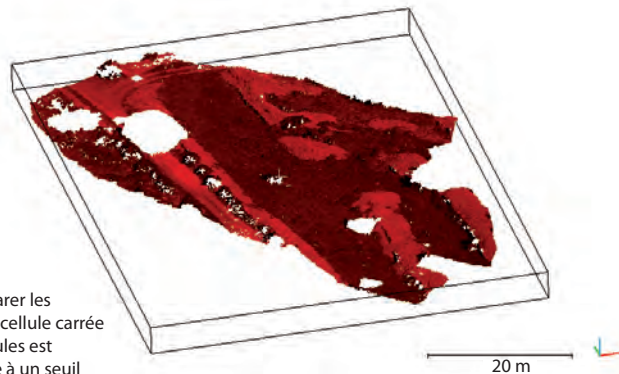


(d'après ZHANG et CUI, 2007)

## Principes :

Une grille avec une maille suffisamment fine pour qu'il y ait plusieurs points par cellule est superposée au nuage de points. Une première surface d'ajustement est créée à partir des minimums de chaque cellule. Selon le principe d'érosion-dilatation une seconde surface est dérivée et les écarts entre les deux surfaces comparés à un seuil prédéfini. Cela permet de déterminer si le point est un point au sol ou non. Etapes reconduites en augmentant la fenêtre du filtre progressivement.

## Filtrage par recherche des minimums locaux pour le bruit de mesure



## Filtrage par morphologie progressive pour la végétation

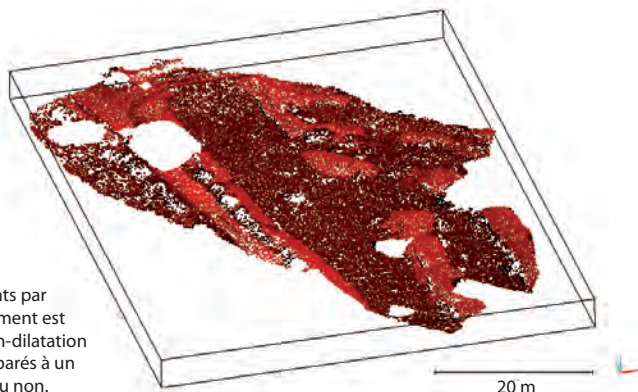


Figure 11 - Filtrage du nuage de points 3D.



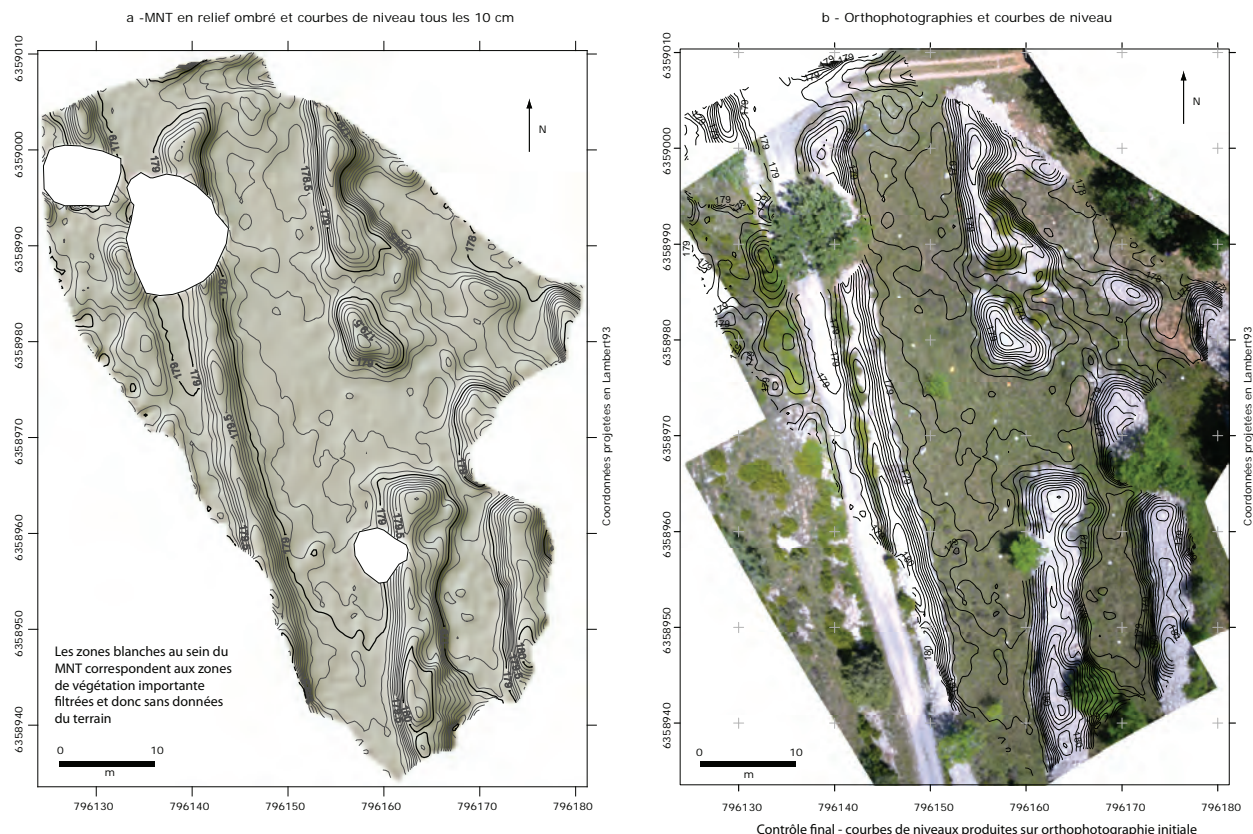


Figure 12 - MNT haute résolution en relief ombré et courbes de niveaux.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce protocole de production de MNT haute-définition par reconstruction 3D à partir de photographies, par des techniques légères et à faibles coûts (tant dans l'acquisition que dans le traitement), est très encourageant. Il montre non seulement les potentialités effectives de ces méthodes qui pourraient être très complémentaires des acquisitions par lidar mais aussi leur accessibilité à des non spécialistes.

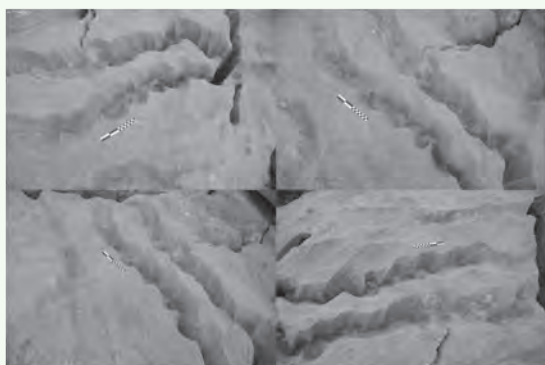
Cette contribution avant tout technique et méthodologique permet aussi d'envisager de nouvelles voies d'acquisition de données en milieux difficiles et parfois inaccessibles. Ces méthodes pourraient notamment être adaptées à des terrains où les levés au lidar sont très rasants et induisent des problèmes d'acquisition (Astrade *et al.*, 2011). De manière à obtenir des restitutions de meilleure qualité encore, il faudrait probablement s'orienter vers des outils de reconstruction permettant de travailler avec des images un minimum calibrées (Suite logiciel IGN orientée métrologie par exemple) et surtout plus homogènes. A ce titre, les évolutions techniques récentes en termes de modélisme et d'hélicoptères radiocommandés à 6-8 hélices, puissants et aussi très stables, pourraient permettre d'acquérir des photographies aériennes

basses altitudes selon un protocole mieux maîtrisé. Des essais sont d'ores et déjà prévus avec un hélicoptère équipé d'un GPS et d'un appareil reflex. Des solutions de préparation de mission aérienne, via des logiciels SIG et ensuite transmise au modèle réduit avant le vol, existent déjà. Elles permettent d'envisager des prises de vue optimales et surtout que l'on pourrait reconduire régulièrement dans le temps pour le suivi diachronique d'objets de recherche en géosciences (torrent, glissement de terrain, glaciers...). Ces méthodes d'acquisition sont elles aussi en pleine évolution et devraient connaître un essor certain tant les coûts deviennent abordables (1-2 K€). Il n'en demeure pas moins que ces méthodes ne sont pas utilisables dans certains contextes comme les terrains fortement végétalisés. La présente étude montre d'ailleurs que la végétation est un réel problème dont on ne peut pas toujours s'affranchir avec facilité.

Bien que la prise en main et l'utilisation de ces techniques requièrent un certain temps, nul doute que leur démocratisation est en marche. Gageons que ces développements, toujours plus rapides, trouveront applications et serviront au mieux les disciplines scientifiques qui sauront les utiliser, des géosciences à l'archéologie.

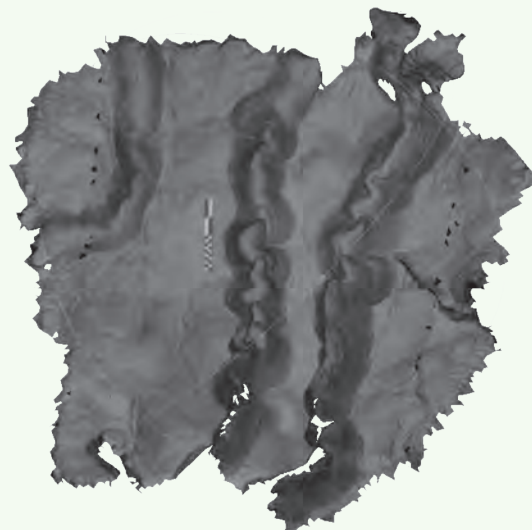
## Exemple de reconstruction automatique sous Arc3D web service de micro morphologies karstiques

Echantillon de photographies prises à la main en tournant autour de l'objet.

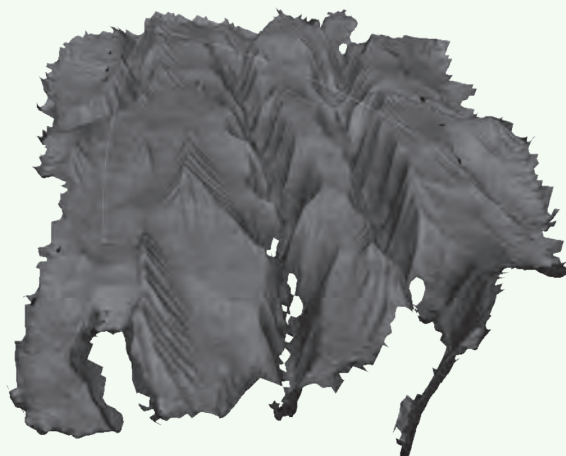


noter la taille de l'objet : échelle dans la scène = 20 cm

Reconstitution 3D et modèle maillé texturé



vue de dessus



vue 3D



autre vue 3d

Les images présentées ici sont directement des modèles 3D, maillés (.obj) et texturés (textures multi-images). L'utilisateur récupère dans ce cas un modèle sur lequel il n'intervient pas lors de l'étape de reconstruction. Tout est géré par la chaîne de traitement - sélection des images, nettoyage du bruit, carte de profondeurs, maillage du modèle. Dans ce cas le modèle peut servir à des travaux d'inspection intéressants après une mise à l'échelle et un référencement local ou global si nécessaire.

## Remerciements

Nous souhaitons remercier tous les membres du stage « techniques d'acquisition de photographies aériennes par cerf-volant » (stage « CNRS – Entreprises », organisé par O. Barge, Archéorient) qui ont contribué à l'acquisition des données terrain. Elisa Boche, Richard Kotarba, Emmanuelle Régagnon. Les auteurs ont trouvé un aide précieuse en William Castaings, lequel nous a grandement aidés dans la modification du code de 3DCONF.

## BIBLIOGRAPHIE

- ASTRADE L., PLOYON E., VEYRAT-CHARVILLON S., 2011. Les données laser terrestre à haute résolution pour le suivi de la charge de fond dans les tronçons torrentiels - Retours d'expériences. *Collection EDYTEM*, 12, 107-118.
- BOUREAU J.-G., 2008. Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges. Application aux milieux forestiers et naturels. Edition IFN. 267 p
- CIGNONI P., CORSINI M., DELLEPIANE M., RANZUGLIA G., VERGAUWEN M., GOOL L.V., 2008. MeshLab and Arc3D: Photo-Reconstruction and Processing 3D Meshes. David Arnold, Franco Niccolucci, Daniel Pletinckx, Luc Van Gool (Editors). EPOCH Conference on Open Digital Cultural Heritage Systems, 1-6.
- DOWLING T.I., READ A.M., GALLANT J.C., 2009. Very high resolution DEM acquisition at low cost using a digital camera and free software. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009. <http://mssanz.org.au/modsim09>
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., 2011. Lasergrammétrie terrestre. *Collection EDYTEM*, 12, 11-28.
- FURUKAWA Y., CURLESS B., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2010. Towards Internet-scale Multi-view Stereo (CVPR 2010).
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2009. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereo (PAMI 2009), 1-14.
- FURUKAWA Y., PONCE J., 2010. Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 2010.
- LOURAKIS M.I.A., ARGYROS A.A., 2004. The Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. ICS/FORTH Technical Report 340, Inst. Of Computer Science-FORTH, Heraklion, Crete, Greece. Available from <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba>
- LOURAKIS M.I.A., ARGYROS A.A., 2009. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment. *ACM Trans. Math. Softw.* 36, 1, Article 2 (March 2009), 30 p. DOI = 10.1145/1486525.1486527, <http://doi.acm.org/10.1145/1486525.1486527>.
- PIERROT DESEILLIGNY M., CLERY I., 2011. Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels. *Collection EDYTEM*, 12, 51-66.
- POLLEFEYS M., KOCH R., GOOL L.V., 1999. Self-Calibration and Metric Reconstruction In spite of Varying and Unknown Intrinsic Camera Parameters. *International Journal of Computer Vision*, 32, 1, 7-25.
- POLLEFEYS M., GOOL L.J.V., VERGAUWEN M., VERBIEST F., TOPS J., 2001. Image-based 3D acquisition of archeological heritage and applications, in D. ARNOLD, A. CHALMERS, D. FELLNER (eds.), VAST 2001 Conference Proceedings, Athens, ACM SIGGRAPH, 255-261.
- POLLEFEYS M., GOOL L.J.V., VERGAUWEN M., VERBIEST F., CORNELIS K., TOPS J., KOCH R., 2004. Visual Modelling with a Hand-Held Camera. *Int. J. Comput. Vision*, 59, 3, 207-232.
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2006. Photo Tourism: Exploring image collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics. SIGGRAPH Conference Proceedings*.
- SNAVELY N., SEITZ S.M., SZELISKI R., 2007. Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*.
- VERGAUWEN M., GOOL L.V., 2006. Web-based 3D reconstruction service. *Machine Vision and Applications*, 17, 411-426. Springer-Verlag. DOI 10.1007/s00138-006-0027-1
- ZHANG K., CUI Z., 2007. ALDPAT 1.0. Airborne LIDAR Data processing and Analysis Tools. National Center for Airborne Laser mapping. Florida International University.

## SITOGRAFIE

- ARC 3D Webservice, A Family of Web Tools for Remote 3D Reconstruction. <http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3D/websevice/v2/index.php>
- DEWITT B.A., 1998. 3DCONF. <http://sfrc.ifas.ufl.edu/geomatics/wolfdewitt/download.html>
- GIRADEAU-MONTAUT D., 2007. CloudCompare. <http://rd.edf.com>
- MESHLAB : <http://meshlab.sourceforge.net/> - application Open Source développée à partir de 2005, basée sur des travaux du Visual Computing Lab of ISTI - CNR, Italie et dans le cadre du projet européen 3D-CoForm.