

# Comparaison de MNT à haute résolution issus de techniques laser et photogrammétriques

■ Michel KASSER - Nicolas DELLEY - Stéphane CRETEGNY

*Dans le cadre d'une étude génomique de plantes de haute altitude nécessitant des modèles de terrain extrêmement précis, une étude sur les comparaisons de modèles acquis par des outils différents a été menée, ceci dans des sites sans végétation haute. Diverses pistes sont présentées pour expliquer les différences observées.*

## MOTS-CLÉS

modèle numérique de terrain, photogrammétrie haute résolution, drones, lasergrammétrie.

## Introduction

Le projet Genescale a visé à étudier le génome d'une espèce végétale (*Arabis alpina*) qui pousse en altitude (1 800-2 200 m) dans les préalpes Vaudoises, et d'en corréliser les variantes avec la micro-topographie. Il est en effet important de pouvoir analyser, au niveau sub-décimétrique, quelle est pour chaque plant qui a été échantillonné : son exposition, l'ensoleillement reçu compte tenu des ombres portées (même par des éléments proches comme des rochers, ou par la topographie plus distante), la durée de son enfouissement sous la neige, les températures, la pluviométrie, l'humidité etc. et donc des capteurs météo ont aussi été installés sur une durée d'un an. Il a alors été recherché quelles solutions pouvaient être envisagées pour l'établissement de telles modélisations fines de la topographie à très haute résolution et à faible coût. Pour les drones, seule possibilité envisageable, ce type de site en altitude est en effet très défavorable, compte-tenu des vents souvent forts, et de la rapidité de changement de situation météorologique. Le choix s'est porté sur un drone à voilure fixe, capable de voler même avec des vents dépassant les 40 km/h et, peut-être la chance aidant, les vols programmés ont

Figure 1. Situation géographique des 4 sites ayant fait l'objet de l'étude. En orange, le site de La Pare



tous réussi du premier coup. Et puis en cours de route et indépendamment de cette étude, le Canton de Vaud a financé un vol lidar dense sur l'ensemble de son territoire, avec une densité allant de 8 à 12 points par m<sup>2</sup>, ce qui a permis de tenter une comparaison avec les modélisations photogrammétriques obtenues, ceci dans des zones rarement étudiées sous cet angle, avec peu de végétation et sans aucun artefact d'origine humaine (bâtiments, routes, etc.).

Donc de façon annexe au programme de recherche génomique, nous avons mené des comparaisons entre différents procédés d'acquisition de MNT. Nous avons disposé de prises de vues par drone, à pixel sol de petite taille (de l'ordre de 4 cm), sur quatre sites de haute montagne, qui ont été traités avec des paramétrages différents. Le point intéressant est que, compte tenu de la végétation très basse, c'est la même surface qui a été vue et traitée par photogrammétrie et par le lever laser. En effet, les leviers photogrammétriques ne peuvent mesurer qu'une

seule surface, celle qui est apparente en sommet de végétation, alors que le lever laser peut fournir également (dernier écho de chaque tir) la position du sol. Donc en présence de végétation haute, ces deux techniques n'auraient pas été comparables.

## Les leviers par drone et les traitements effectués

Pour que l'étude soit ensuite plus facile à généraliser, 4 sites différents des préalpes vaudoises ont été choisis, avec des situations topographiques similaires : La Pare, Col des Essets, Pierredar et Martinets, sensiblement dans les mêmes tranches d'altitudes (cf. Figure 1).

Ils ont fait l'objet de leviers aériens par drone, dans les conditions matérielles suivantes :

- Utilisation d'un drone à voilure fixe eBee de SenseFly, capable de voler de manière autonome, même avec des vents de 50 km/h. Le recouvrement

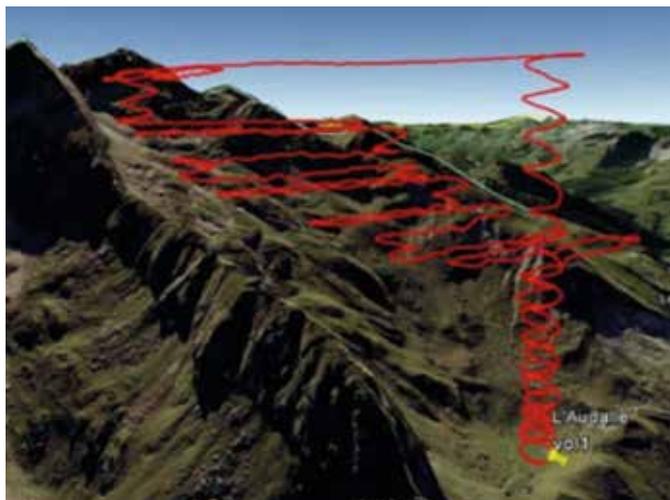


Figure 2. Plan de vol sur le site de La Pare



longitudinal prévu était de 75 %, le recouvrement latéral de 60 %, permettant une bonne stéréoscopie. À chaque fois deux vols ont été effectués, l'un avec une caméra couleur 4608 x 3456 pixels et l'autre avec une caméra disposant d'une bande dans l'infrarouge proche, de 4048 x 3048 pixels. La hauteur de vol souhaitée étant de 130 m, le plan de vol a été adapté aux importants reliefs (cf. Figure 2), et le pixel sol est ainsi voisin de 4 cm. Malgré la topographie très défavorable, l'atterrissage automatique du drone a permis un fonctionnement nominal pour chaque vol.

- Stéréopréparation par mesure de points d'appui (entre 10 et 25 selon le site), matérialisés par des points naturels, et localisés par GNSS précis en mode RTK, avec un écart-type allant, selon le site, de 2 à 6 cm.
- Calculs de MNT et d'orthophotographies (pour chacune des deux caméras) en utilisant le logiciel Pix4D. Les MNT ont été produits avec une maille de 5, 10, 20 et 50 cm, et les orthophotos au pixel de 10 et 20 cm.

## Les mesures laser aéroportées

Les comparaisons approfondies entre méthodes différentes pour l'obtention des MNT ont été menées sur le site de La Pare. Le lever laser a été effectué le 30 juin 2015 entre 8 h et 9 h. Le matériel utilisé était un Lidar Optech ALTM Gemini, de longueur d'onde 1064 nm. Le plan de vol a permis une altitude



Figure 3. Mesure d'une marque de peinture d'un sentier balisé en GNSS RTK

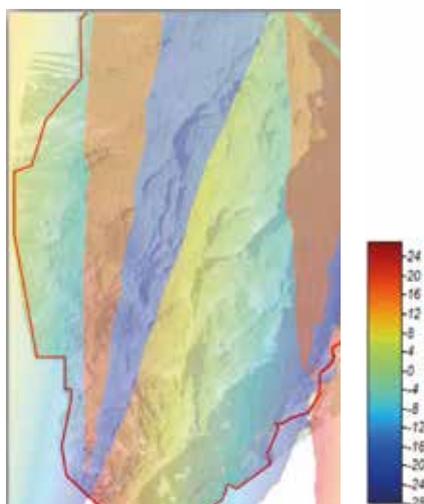


Figure 4. Valeurs d'angles de balayage en degrés

au-dessus du sol de 650 m environ, ce qui, compte-tenu de la divergence du laser, représente une tache au sol de 16 cm de diamètre. La densité de mesures varie entre 8 et 12 points

par mètre carré. Par ailleurs, le lidar utilise un angle de balayage de 20° environ de part et d'autre de la verticale. Dans la zone qui a fait l'objet des comparaisons, la carte (Figure 4) met en évidence les valeurs angulaires en degrés du faisceau lors des différentes mesures de distance : le faisceau laser a balayé cette zone à moins de 5° de la verticale.

## Les sites choisis pour les comparaisons

3 types de terrains ont été sélectionnés, sur le site de La Pare (Figure 5), pour mener des comparaisons de MNT : terrain à pente régulière en herbe, terrain avec des pentes fortes ou falaises, terrain rocheux. Ces types de terrain présentent en effet des problèmes de représentation du terrain par un MNT assez différents, et il est intéressant de les étudier en

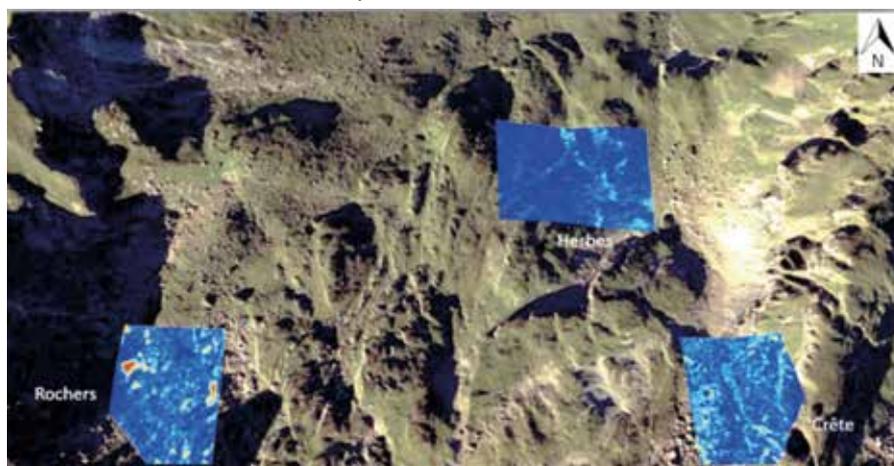
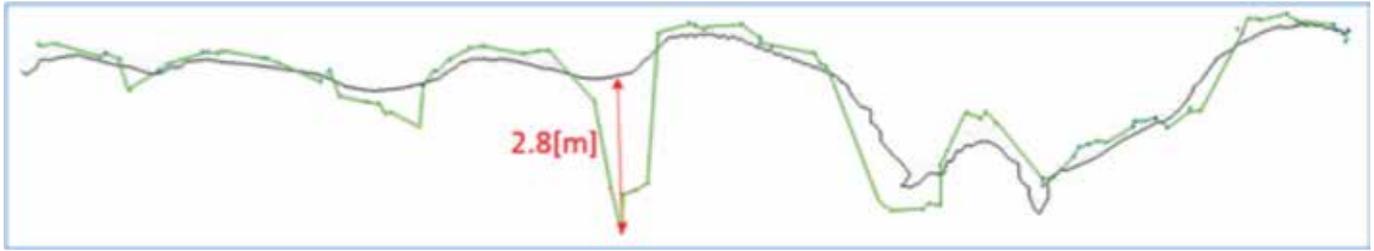


Figure 5. Le site de La Pare, avec les 3 zones retenues



**Figure 6.** En vert, section du MNT obtenu par Lidar, en noir, par photogrammétrie, dans la zone de rochers. On note de grandes différences : entre les blocs rocheux (le laser descend jusqu'au fond des anfractuosités rocheuses, où le corrélateur photogrammétrique est en échec), et sur les blocs (le Lidar effectue une moyenne et lisse la surface, décrite au contraire très finement par photogrammétrie).

disposant des mesures extrêmement détaillées qui ont été acquises.

## Analyse des écarts obtenus

### ■ Problème général de la comparaison de MNT

La comparaison de MNT est un problème géométrique complexe, qui peut se simplifier dans certains cas. Par exemple, lorsque deux modélisations d'un terrain sensiblement horizontal sont comparées, une statistique sur les écarts selon la composante verticale  $z$  est une solution simple mais suffisante. Par contre, lorsque la forme du terrain s'écarte significativement de l'horizontale, les incertitudes sur la localisation planimétrique  $x, y$  des points comparés interviennent d'autant plus que la pente est forte, de sorte qu'un défaut général de mise en référence planimétrique intervient directement dans le résultat, alors que ce n'est qu'un artefact. Pour des surfaces complexes, on peut utiliser la distance de Hausdorff. Dans tous les cas, il faut gérer la différence de densité de points de mesure entre les deux ensembles de points comparés. Ici les comparaisons entre MNT ont été effectuées en utilisant les outils disponibles dans le logiciel open source CloudCompare.

### ■ Comparaisons de MNT

Le MNT, par définition, représente le sol, débarrassé du sur-sol : habituellement, végétation haute et constructions diverses. Ici pas de végétation haute ni de constructions, mais un problème supplémentaire, qui ne nous concerne que parce que nous cherchons une grande précision et parce que nous sommes en altitude : celui de la neige. Nos levés photo-

grammétriques ont logiquement été effectués lorsque plus aucune neige n'est présente. Mais les données laser, à leur date d'acquisition plus précoce, montrent la présence résiduelle de neige sur plusieurs parties du terrain. Cette neige est bien détectée lors de la comparaison des MNT laser et photogrammétrie, et ceci est validé lors de l'analyse des images acquises simultanément au lever laser. Et comme lors des acquisitions d'images par drone il n'y avait plus de neige, nous avons pu éliminer facilement cet effet sans intérêt lors de nos comparaisons ultérieures.

Une première classe de différences entre MNT laser et photogrammétrie est liée à la technologie laser. D'une part la mesure se fait, pour un écho donné, sur une zone unique couvrant environ deux décimètres carrés. Dans cette zone, la mesure de distance est effectuée comme la moyenne des distances des zones diffusantes élémentaires éclairées par le laser, moyenne pondérée par l'albedo de chacune de ces surfaces. Ce phénomène bien connu engendre des artefacts à la périphérie des zones de rochers. En effet, l'albedo des rochers est toujours différent de celui de la végétation rase qui les entoure. En outre, le faisceau laser n'est pas strictement vertical, et certains échos sont ainsi localisés sous d'autres points acquis sur un rocher par exemple. Donc la modélisation du terrain par lever laser ne peut pas être décrite par un vrai modèle en 3D, mais plutôt par du 2.5 D, soit une seule valeur de  $z$  pour une position horizontale  $x, y$  (cf. Figure 6).

Une seconde série de différences est liée au fonctionnement du corrélateur photogrammétrique. À l'intérieur d'une

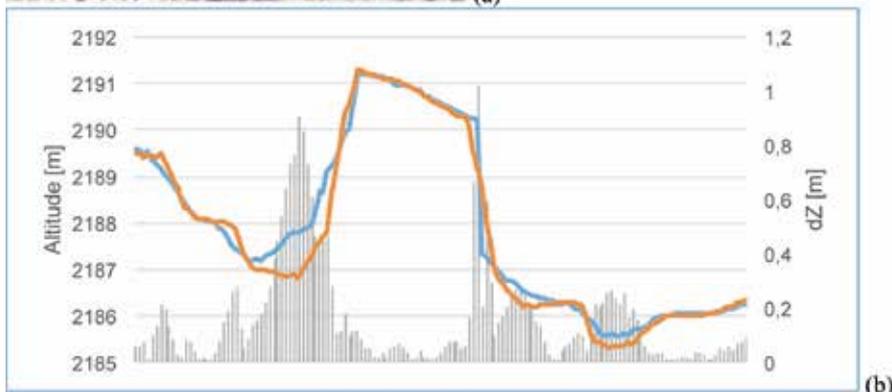
image aérienne, le contraste entre les zones exposées au soleil et les zones à l'ombre dépend principalement de deux facteurs, (i) la diffusion atmosphérique, et (ii) l'angle solide sous lequel est vu le ciel depuis la zone à l'ombre considérée.

- (i) La diffusion atmosphérique est composée de la diffusion Rayleigh (diffusion par les molécules de l'air, en  $\lambda^{-4}$ , visible surtout dans la partie bleue du spectre) et de la diffusion de Mie, due aux aérosols (poussières, gouttelettes d'eau de toutes tailles). Plus l'altitude est élevée, plus la diffusion de Mie est réduite. Dans les zones étudiées, vers 2 000 m d'altitude, elle est donc très faible. Il en résulte que les zones à l'ombre, qui ne sont éclairées que par la diffusion atmosphérique, sont très sombres par comparaison à ce qu'on observerait au niveau de la mer.
- (ii) Les zones d'image qui sont formées par l'ombre d'un rocher ne reçoivent qu'une partie de la diffusion renvoyée par le ciel, typiquement entre le quart et la moitié, compte tenu de la géométrie du terrain.

Le résultat est que les images ont un contraste particulièrement élevé, bien davantage que lors d'acquisitions sur des terrains à basse altitude. Dans les zones sombres, la dynamique de l'image est ainsi très réduite, et donc le rapport signal/bruit est mauvais. Ce sont donc des zones où le corrélateur va fréquemment converger sur des maxima faux. Ces fautes locales sont ensuite lissées par calcul. On observe alors des erreurs qui seront différentes selon la taille du pixel final retenu pour le calcul du MNT, et selon la version du logiciel (dont les options de lissage des résultats de la corrélation sont diffé-



**Figure 7.** Exemple de la coupe A-A' effectuée dans un secteur rocheux. (a) image du terrain, (b) différence des MNT à pas de 5 cm (bleu) et 20 cm (brun) pour des versions différentes de Pix4D, (c) avec la même version. On note que les principales erreurs entre versions différentes du corrélateur photogrammétrique sont dans des zones à l'ombre.



rentes). Ici les comparaisons ont porté sur les MNT à 5 cm et 20 cm, et on peut noter (cf. Figure 7) :

- Les écarts peuvent devenir importants dans des zones à l'ombre (où le corrélateur fonctionne mal compte tenu du bruit élevé).
- Les écarts sont souvent bien plus importants si des versions différentes (et donc des paramètres différents) du logiciel photogrammétrique sont employées.

## Conclusions et aspects pratiques

Il est actuellement extrêmement intéressant d'utiliser un drone pour acquérir des prises de vues aériennes à taille de pixel très réduit. Le coût des images est très faible, et pour des pixels de quelques cm, c'est en outre

la seule solution disponible. Et on peut en obtenir un MNT à pas extrêmement fin (maillage 5 cm dans notre cas, avec une précision de même valeur) en utilisant un logiciel commercial peu onéreux. Pour des acquisitions sur des sites de ce type, en altitude, nous avons pu montrer que des drones rapides à voilure fixe permettaient d'atteindre tous les résultats attendus malgré des conditions d'environnement difficiles, et sont pleinement satisfaisants pour ces types d'études géométriques corrélées avec la micro-topographie.

Par contre, il faut être conscient de l'aspect peu intuitif de la qualité pouvant être obtenue dans un paysage naturel en montagne. En effet, les résultats optimaux ne seront pas obtenus par beau temps avec un Soleil haut dans le ciel (proche de son passage au méridien). Dans ces périodes, le contraste dans les

images sera très élevé, et les zones à l'ombre ont alors toutes raisons d'être mal traitées par le corrélateur photogrammétrique. Les situations les plus adaptées impliquent un éclairage diffus bien plus important, par exemple sous un couvert nuageux ou avec le Soleil bas sur l'horizon. Dans ces conditions, les seules zones dans lesquelles le MNT ultrafin obtenu pourra présenter des fautes, parfois importantes, sera dans des zones réduites encaissées entre des blocs. Par comparaison, un lever laser aéroporté implique actuellement l'emploi d'un avion, donc sa hauteur de vol est nécessairement élevée ainsi que sa vitesse, ce qui implique une tâche éclairée de taille au moins décimétrique. Le MNT obtenu ne peut donc pas être de résolution ou de précision (au moins un décimètre) aussi intéressantes qu'avec le drone photogrammétrique. Par contre, aucune zone vue depuis l'avion ne lui sera invisible, y compris des zones très encaissées entre des blocs rocheux. Et bien évidemment, le coût en est considérablement plus élevé. Ceci pourra évoluer lorsque des Lidars légers seront davantage disponibles, pouvant voler sur drone. ●

## Remerciements

Cette recherche a été financée par le Fonds National pour la Recherche Scientifique Suisse (GeneScale; CR3213\_149741/1).

## Contacts

Michel KASSER, Nicolas DELLEY, Stéphane CRETEGNY  
HEIG-VD, Institut Insit, consortium GENESCALE (<https://www.wsl.ch/en/projects/genescale.html>)  
michel.kasser@gmail.com

## ABSTRACT

*As part of a genomic study of high altitude plants requiring extremely accurate terrain models, a study on comparisons of models acquired by different tools was conducted, in sites without high vegetation. Various possibilities are presented to explain the observed differences.*