

RÉALISATION D'UNE RÉFÉRENCE ALTIMÉTRIQUE NATIONALE EN ZONE DE MONTAGNE À PARTIR D'IMAGES PLÉIADES

Céline Puig¹

1: Service des bases de données vecteur, IGN, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé CEDEX, France

Résumé

La référence altimétrique nationale, nommée RGE Alti, est actuellement composée de données issues de traitements Radar sur les zones de montagne qui ne satisfont pas pleinement les spécifications. Dans le même temps, les caractéristiques d'acquisition des satellites imageurs se sont considérablement améliorées permettant aux satellites comme Pléiades de devenir une alternative intéressante à l'aérien dans les zones où les prises de vues sont coûteuses et complexes à organiser tels que les massifs montagneux.

Quatre acquisitions Pléiades réparties sur deux zones d'études, le col de Bavella en Corse et le massif du Mont-Blanc, ont servi à réaliser des Modèles Numériques de Surface (MNS) par corrélation. Des Modèles Numériques de Terrain (MNT) ont ensuite été calculés à l'aide d'une méthode développée à l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) qui se base sur une interpolation de points sols extraits des MNS. Ces MNT obtenus avec les acquisitions Pléiades possèdent une précision altimétrique de 3m à 4m et des résultats homogènes quel que soit le type de terrain, ce qui est indispensable pour la réalisation d'une référence nationale. L'étude montre aussi une forte corrélation entre la qualité du MNT final et les caractéristiques de prise de vue, ce qui entraîne des contraintes d'acquisition particulières et la mise en place d'étapes supplémentaires dans le calcul du MNT. Moyennant ces adaptations, l'utilisation d'images Pléiades pour compléter le RGE Alti dans les zones de montagne est envisageable et les utilisateurs du RGE Alti ont d'ores et déjà montré leur intérêt pour ces MNT Pléiades.

Mots clés : RGE Alti, Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain, photogrammétrie, zone de montagne

Abstract

On mountainous areas, the French national altimetry reference, named RGE Alti, is currently built with Radar post-processed data that do not fully comply with all the requirements. Meanwhile, features of optical satellites were significantly enhanced thus authorizing Pléiades acquisitions to become a credible alternative to aerial imagery in mountainous areas which are complex and expensive to operate. For this study, four Pléiades acquisitions are used, divided in two test areas : the Col de Bavella in Corsica and the Mont-Blanc massif in French Alps. A digital Surface Model (DSM) is computed by correlation and a Digital Terrain Model (DTM) is derived from this DSM using a specific method developed at the French Mapping Agency (IGN). This method is based on the interpolation of a ground points cloud extracted from the DSM. The altimetric accuracy of these Pléiades DTM can reach up to 3m and the results are homogeneous whatever the terrain may be which is a prerequisite for the completion of a national reference. The study also evidences a strong dependency between the DTM accuracy and image acquisition features, then leading to specific acquisition constraints and implementation of additional steps in the DTM process. Once the whole chain is suitably adapted, the use of Pléiades images to complete the RGE Alti in mountainous areas will be possible. Users of the RGE Alti have already shown their interest in the Pléiades DTM.

Keywords : RGE Alti, Digital Surface Model, Digital Terrain Model, photogrammetry, mountainous areas

1. Introduction

L'IGN a pour mission de produire la couche altimétrique du Référentiel à Grande Échelle (IGN, (2014)). Cette couche, nommée RGE Alti et décrite dans (IGN, (2013)) est composée d'un MNT au pas de 1m. Elle a pour objectif de décrire le relief du terrain nu sur l'ensemble du territoire avec les spécifications suivantes :

- Une utilisation pour des applications allant du 1:1000 au 1:50 000.
- Une précision altimétrique de 70cm sur la totalité du territoire.

- Une précision altimétrique de 30cm en zone littorale ou inondable.
- Une amélioration nette par rapport à l'ancienne référence, la BD Alti, tout en ayant une précision altimétrique maximale de 7m en zone de haute montagne.

Les acquisitions utilisées sont majoritairement photogrammétriques ou lasergrammétriques (Lidar aéroporté). Cependant, en zone de montagne, en raison de la complexité et des coûts de ces acquisitions, le RGE Alti est pour le moment constitué d'un MNT Radar sur étagère acheté à la société Intermap TechnologiesTM. Les contrôles effectués sur ces données montrent néanmoins qu'elles

ne satisfont pas complètement les spécifications décrites plus haut.

Parallèlement, les acquisitions satellites deviennent de plus en plus compatibles avec nos applications grâce à des images de haute résolution, une agilité d'acquisition permettant de la multi-stéréoscopie, une disponibilité rapide des données et un coût maîtrisé. En particulier, les images Pléiades remplissent l'ensemble de ces critères (CNES, (2014)) et apparaissent alors comme une alternative intéressante aux acquisitions aériennes.

La Recette Thématique Utilisateurs (RTU) des images Pléiades organisée par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) a permis à l'IGN d'exploiter quatre acquisitions situées dans des zones montagneuses pour tester l'utilisation de cette source de données pour la réalisation de MNT compatibles avec les besoins du RGE Alti. En appliquant la chaîne de calcul actuelle du processus de corrélation du RGE Alti à ces acquisitions, nous avons évalué les avantages et les limites de ces MNT.

2. Méthode de calcul de MNT à partir d'images Pléiades

2.1. Zone d'étude

Les calculs ont été réalisés sur deux zones distinctes : le centre sud de la Corse au niveau du Col de Bavella (300km²) (Figure 1) et le massif du Mont-Blanc dans les Alpes françaises (800km²) (Figure 2). Ces deux secteurs couvrent des zones de haute montagne.

Le relief de la zone située en Corse est accidenté, allant de 400m à 2000m, et certaines zones sont particulièrement chaotiques. La végétation est dense et de type maquis sur une majorité de l'emprise. Le relief du massif du Mont-Blanc s'étage, quant à lui, de 1000m en fond de vallée à plus de 4800m au sommet du Mont-Blanc. Il y a de nombreuses zones enneigées ainsi que des glaciers (Figure 2), et la présence de hauts sommets et de fortes dénivelées entraîne d'importantes parties cachées et de nombreuses zones d'ombres.

Pour chaque zone d'étude, deux acquisitions Pléiades panchromatiques de résolution 70cm et ré-échantillonnées à 50cm ont été utilisées (Table 1).

2.2. Principe de calcul du MNT

Pour chaque acquisition, un MNS et un MNT ont été calculés. Pour cela, les images sont dans un premier temps orientées. La modélisation donnée par le satellite est affinée grâce à l'utilisation de points de liaison calculés automatiquement et de points d'appui pour obtenir une spatiotriangulation d'une précision d'environ 2 pixels. Le MNS est ensuite calculé en géométrie faisceau grâce au corrélateur MicMac, développé à l'IGN et basé sur une approche multi-résolution (Pierrot-Deseilligny et al. (2006)). Enfin, le MNT est calculé en extrayant du MNS les points considérés comme étant au sol (échantillons) et en réalisant une interpolation par grille élastique (De Masson d'Autume, (1979)) entre ces échantillons pour construire la grille du MNT.

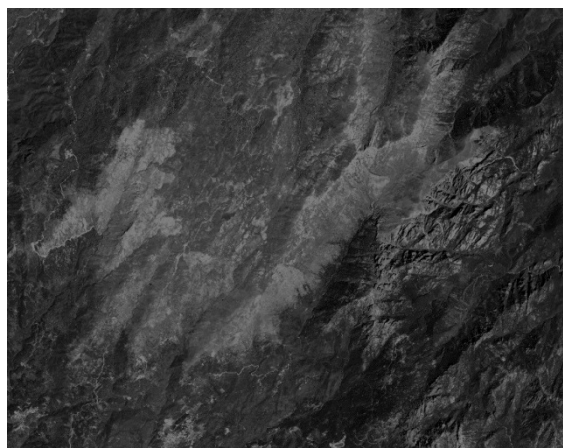


FIGURE 1: Acquisition 2012 sur la Corse.
© CNES (2012), distribution Airbus DS / Spot Image.

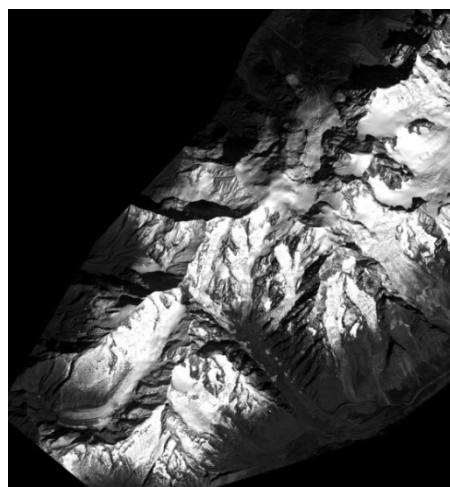


FIGURE 2: Acquisition 2013 sur le Mont-Blanc.
© CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image.

Des données complémentaires au MNS sont utilisées en entrée du calcul de MNT : la couche des réseaux routiers et ferrés, la couche végétation, la couche bâti et la couche hydrographie de la base de données topographique de l'IGN. Le calcul de ce MNT est lui aussi largement paramétrable ce qui permet de plus ou moins contraindre les tests d'acceptation d'un point en tant qu'échantillon. Ces échantillons peuvent être de différents types :

- Échantillon zone plane : une zone plane se définit comme une zone de relief peu mouvementé autour du plan moyen de la zone. On utilise pour ce test une fenêtre autour du point testé. Les points contenus dans cette fenêtre ne doivent pas s'écarter de plus d'une certaine valeur du plan moyen.
- Échantillon réseau : grâce à la planimétrie des réseaux routiers et ferrés donnés en entrée, on effectue une recherche de points sol spécifiquement sur les réseaux. Le test est identique à la recherche en zone plane avec un paramétrage plus lâche (fenêtre plus petite, seuil d'écart au plan moyen plus grand) car l'a priori du sol est plus fort.
- Échantillon point bas : un MNT triangulé temporaire est calculé avec les échantillons réseaux et zone plane.

Zone	Date d'acquisition	Nombre d'images	Angle de roulis	Angle de tangage
Corse	2/08/2012	2	-3°, +3°	-12°, +12°
Corse	30/04/2013	2	-27°, -21°	-18°, +6°
Mont-Blanc	19/08/2012	5	-15°, -7°, -2°, 4°, 12°	-10°, -7°, -7°, -5°, -2°
Mont-Blanc	20/09/2013	3	-5°, 0°, +5°	-21°, +3°, +16°

TABLE 1: Caractéristiques des acquisitions Pléiades utilisées.

	Bornes géodésiques (8 pts)	BD Uni (39626 pts)	Pointés PVA (539 pts)
Min/Max	-4.94 / 3.91 m	-17.18 / 26.04 m	-43.68 / 19.32 m
Moyenne	-1.44 m	1.51 m	0.28m
EMQ	2.90 m	3.69 m	4.76 m
EMQ (MNT roulis=25°)	3.00 m	3.95 m	5.34 m

TABLE 2: Statistiques de comparaison du MNT Pléiades calculé à partir d'une acquisition sans angle de roulis sur la Corse aux points de référence et EMQ du MNT calculé à partir d'une acquisition sur la Corse avec un angle de roulis de 25°.

La recherche des échantillons points bas repose sur la comparaison du MNS et de ce MNT triangulé. Les points où le MNS est plus bas que le MNT triangulé sont testés avec des paramètres très lâches.

Aucun point du MNS situé sous un vecteur de bâti, de végétation ou d'hydrographie surfacique n'est testé. Dans les zones de plus de 150m sans échantillon un MNT externe est recalé par moindres carrés. Dans le cas du RGE Alti, ce MNT externe est la BD Alti qui constitue l'ancienne version de la référence altimétrique nationale et possède une résolution de 25m.

3. Résultats

3.1. Qualification géométrique des MNT obtenus

Afin de déterminer la qualité géométrique de nos résultats, nous avons tout d'abord comparé l'altitude des MNT issus des images Pléiades à des points de référence disponibles à l'IGN. Trois types de références ont été utilisées :

- des bornes géodésiques souvent situées sur des sommets : $\sigma_{xy} = 10cm, \sigma_z = 50cm$.
- des points BDUUni sur le réseau routier : $\sigma_{xy} = 2, 50m, \sigma_z = 1, 50m$.
- des pointés stéréoscopiques¹ : $\sigma_{xy} = \sigma_z = 50cm$.

La comparaison des différents MNT à ces références présente un EMQ de 4m sur la Corse (Table 2) comme pour le massif du Mont-Blanc. La bonne précision constatée au niveau des bornes géodésiques traduit une bonne localisation des sommets et laisse penser que le MNT Pléiades ne présente pas d'imprécision planimétrique majeure. La comparaison aux deux autres types de points de référence témoigne d'une précision satisfaisante et homogène sur l'ensemble des zones tests quel que soit le type de terrain considéré.

3.2. Résultats qualitatifs

Une étude visuelle poussée des MNT calculés avec les images Pléiades permet de souligner les apports de ces MNT.

1. Points restitués en 3D grâce aux acquisitions aériennes d'août 2012 ayant servi à réaliser l'orthophotographie.



FIGURE 3: Exemple du MNT obtenu avec Pléiades sur une route en corniche, en jaune la position du point de référence.
Source : IGN 2014.

Le premier avantage réside dans la résolution du MNT. En effet, le MNS est calculé à la résolution des images ré-échantillonnées soit 50cm. Le nuage de points sol extrait de ce MNS a donc une densité importante avoisinant le plus souvent 1 point/m². Un nœud de la grille du MNT est donc majoritairement calculé à partir d'une altitude issue du MNS plutôt qu'issue d'un calcul d'interpolation. Ceci évite de supprimer les détails du terrain de taille métrique. Ces détails peuvent être des talwegs de faibles dimensions, des talus ou corniches de route (Figure 3) ou encore des rochers importants. La présence de ces détails dans le MNT constitue un intérêt majeur car ils sont indispensables pour de nombreuses applications (calcul de bassin versant, ortho-rectification, modélisation de l'écoulement hydrographique,...).

Le deuxième avantage des MNT Pléiades réside dans la bonne restitution des zones enneigées et des glaciers. Alors qu'a priori le caractère radiométrique très homogène de ces zones laisse penser que la corrélation risque d'être mise en défaut, la visualisation des MNT du Mont-Blanc contredit cette intuition et montre l'adéquation complète qui existe entre l'image et le MNT obtenu (Figure 4). La focalisation des statistiques sur les points de ré-

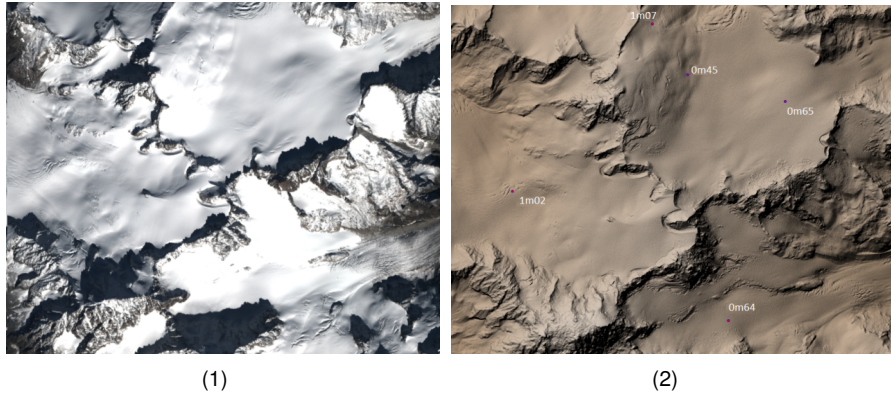
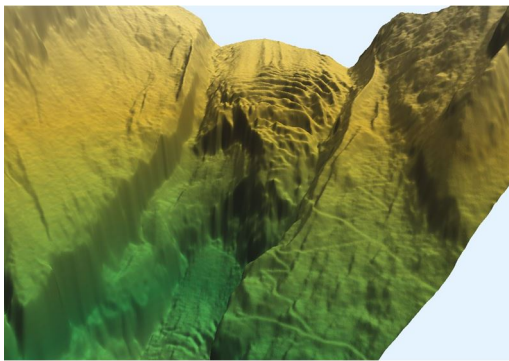
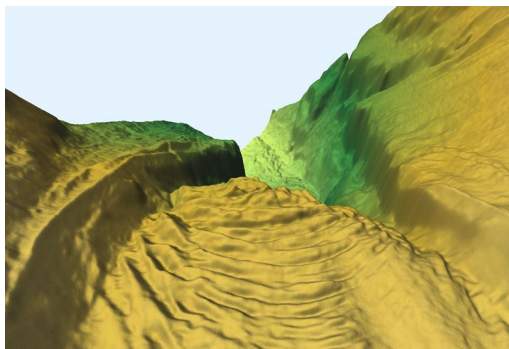


FIGURE 4: Exemple de résultats sur les parties sommitales des glaciers de l'Aiguille d'Argentière (1) Orthoimage Pléiades. (2) MNT Pléiades et écarts aux points de référence. *Source : IGN 2014.*



(1)



(2)

FIGURE 5: Vue en 3D du MNT sur la zone des séracs de Lognan du glacier d'Argentière. (1) Vue face séracs, vers montagne. (2) Vue arrière séracs, vers vallée. *Source : IGN 2014.*

férence situés sur ces "zones blanches" donne un EMQ des écarts de 1,20m. Cette grande précision combinée à la résolution métrique du modèle (Figure 5) rend alors les MNT Pléiades particulièrement adaptés à l'étude de la cryosphère et ouvre ainsi un nouveau champ d'application au RGE Alti.

3.3. Points limitants

Deux difficultés sont apparues lors du calcul de MNT à partir des images Pléiades. Tout d'abord, dans les images du massif du Mont-Blanc, une alternance d'ombres très sombres et de neige génère des zones à très fort contraste radiométrique. Ce contraste perturbe la compression des images à bord du satellite ce qui aboutit à des défauts

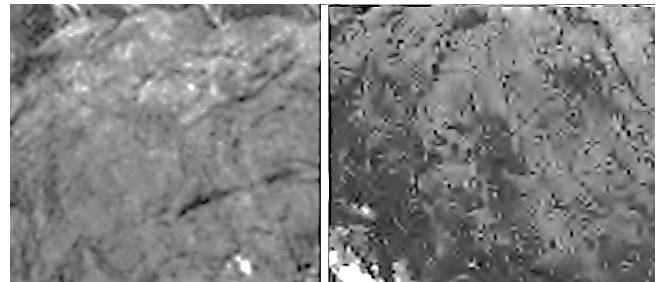
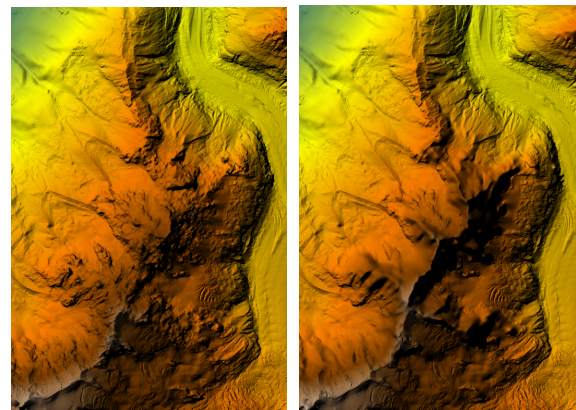


FIGURE 6: Exemple d'effets de "papillons" sur le Mont-Blanc. À gauche, zone sans défaut radiométrique. À droite, zone avec défaut. ©CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image.



(1)

(2)

FIGURE 7: MNT sur l'Aiguille de Blaitière. (1)MNT issu directement du MNS. (2)MNT issu du MNS avec masque de zones interdites. *Source : IGN 2014.*

radiométriques de type "papillons" (Figure 6) dans les images finales.

Ces défauts radiométriques mettent en échec le calcul de corrélation et créent de fausses altitudes dans le MNS. Le principe de calcul du MNT ne permet pas alors à lui seul de discriminer ces erreurs et les fausses altitudes sont présentes sur le MNT final (Figure 7(1)) qui se retrouve erroné dans les zones impactées par le défaut radiométrique.

L'autre difficulté provient de la méthode de calcul utilisée et concerne les zones de végétation. En effet, ces zones sont masquées dans le calcul du MNT et aucun

point sol n'est donc extrait du MNS (Section 2.2). Le MNT final repose alors entièrement sur des données exogènes, de type BD Alti, qui sont de moindre qualité. Une perspective en cours d'étude à l'IGN consiste cependant à créer les masques de végétation par classification dans l'image servant au calcul du MNS plutôt qu'en utilisant des bases de données plus anciennes afin d'optimiser la détection des zones de forêt et d'exploiter au maximum l'information contenue dans les images.

4. Discussion

4.1. Apport des MNT Pléiades au RGE Alti

Les statistiques des MNT obtenus avec Pléiades montrent une amélioration notable de la précision altimétrique sur les points géodésiques par rapport au MNT Radar qui couvre actuellement les zones de montagne du RGE Alti. Ceci s'explique par la correction dans les MNT Pléiades de la principale faiblesse du MNT Radar qui est de raboter les sommets (Figure 8). La différence d'altitude au point de référence passe alors de quelques mètres à environ 1m.

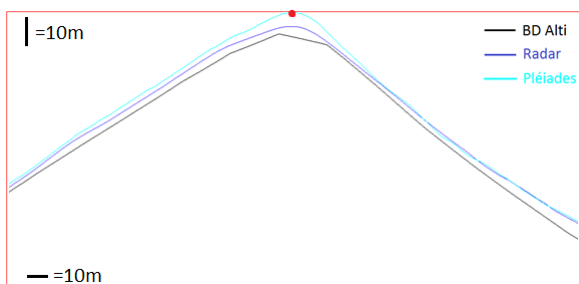


FIGURE 8: Profils des MNT obtenus pour un sommet simple, en rouge la position du point de référence.

De manière générale, quel que soit le type de terrain, le MNT Pléiades apporte une précision meilleure que le MNT Radar d'environ 1m et cette amélioration augmente significativement avec un relief important. D'autre part, le MNT Radar utilisé actuellement pour le RGE Alti est un MNT de résolution 5m ré-échantillonné à 1m. De nombreux détails du terrain qui doivent être visibles sur un MNT métrique ne sont alors pas présents alors qu'ils apparaissent sur le MNT Pléiades.

Tous ces résultats montrent que la corrélation d'images Pléiades peut-être utilisée pour améliorer le RGE Alti en zone de montagne moyennant des acquisitions d'images qui remplissent certains critères précisés ci-dessous.

4.2. Contrainte sur l'angle de roulis pour garantir la qualité du MNT final

La disponibilité d'acquisitions sur la même zone avec des caractéristiques de prise de vue différentes (Table 1) permet d'illustrer les effets de ces paramètres sur la qualité du MNT obtenu et d'établir une contrainte sur l'acquisition.

La comparaison des statistiques globales sur la Corse entre le MNT conçu à partir des prises de vues verticales (MNT vertical) et le MNT issu des prises de vue avec un angle de roulis de 25° (MNT roulis) montre une différence d'EMQ pouvant atteindre 25% de la précision altimétrique (Table 2). Cette perte de précision est liée à la quantité de valeurs manquantes sur le MNS, c'est-à-dire de pixels ne contenant pas de donnée d'altitude. Ainsi, le MNS roulis contient 1.76% de pixels sans valeur (Figure 9) tandis que le MNS vertical n'en contient que 0.16%.

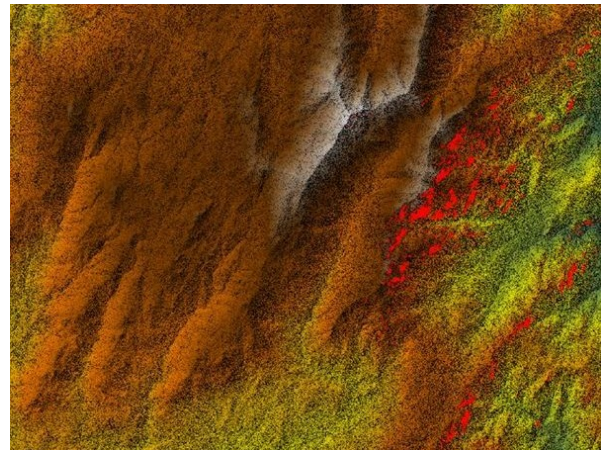


FIGURE 9: MNS Corse roulis, en rouge les pixels sans valeur. Source : IGN 2014.

Cette quantité de valeurs manquantes se répercute sur le MNT qui est calculé en interpolant un nuage de points sol extrait du MNS. Dans ces zones, comme aucune information d'altitude n'existe sur le MNS, le nuage de points sera vide. Le calcul du MNT se fera donc soit par un recalage du MNT externe soit par une interpolation sur de grandes distances, ce qui entraîne dans tous les cas une imprécision sur le MNT final. Ces zones sans valeur sont principalement dues aux parties cachées d'une image. Pour limiter le nombre de valeurs manquantes il faut donc minimiser ces parties cachées en définissant une contrainte sur l'angle de roulis maximal.

La pente maximale du terrain visible peut être déterminée en fonction de l'angle de roulis du satellite et, pour une zone donnée, il est donc possible de calculer le pourcentage de pixels sans valeurs. Les résultats, regroupés dans la Figure 10, montrent un fort accroissement de cette quantité de valeurs manquantes entre 10° et 12° de roulis. Une valeur de 10° sur l'angle de roulis des acquisitions semble donc tout à fait adaptée pour garantir la précision du RGE Alti.

4.3. Perspective d'amélioration : correction des effets des ombres

Dans les zones de haute montagne, comme au cœur du massif du Mont-Blanc, le calendrier d'acquisition ne suffit pas à éviter totalement les problèmes liés à l'alternance d'ombre et de neige (Section 3.3). Une solution de correction des MNT est donc proposée ci-dessous et devra faire l'objet d'une étude approfondie.

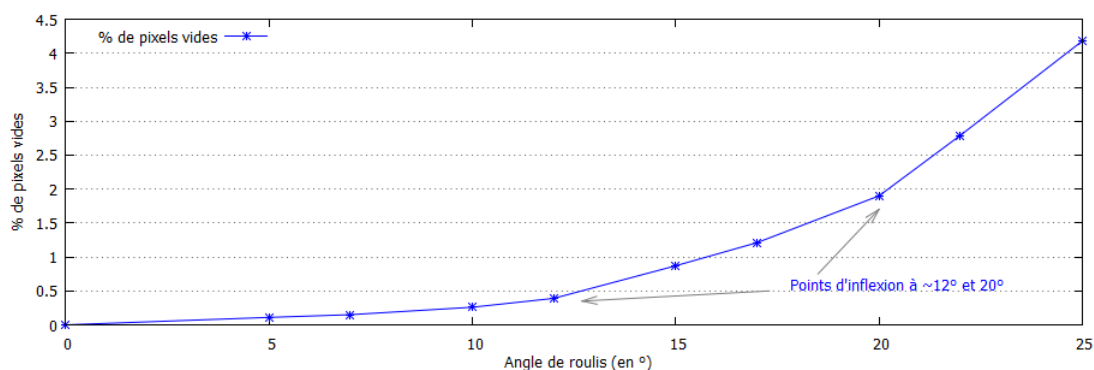


FIGURE 10: Pourcentage de pixels vides sur la zone du Mont-Blanc en fonction de l'angle de roulis de l'acquisition.

Les zones de défauts radiométriques posent problème à la corrélation. Le résultat de cette dernière est donc moins fiable dans les zones à problèmes que sur le reste du chantier. Or, cette fiabilité peut se mesurer via ce que l'on appelle le score de corrélation qui est une donnée en sortie du calcul de corrélation avec MicMac. Il est donc possible, à partir de ce score, de créer un masque de qualification qui sera considéré comme un masque de zones interdites dans le MNT. Aucun point ne sera alors testé comme échantillon possible à l'intérieur de ces masques, de la même manière que pour les zones de végétation.

Des premiers tests réalisés avec un masque issu d'un simple seuillage du score de corrélation sont encourageants (Figure 7(2)). Une perspective d'amélioration serait de nettoyer le masque des surfaces trop petites qui n'entraînent qu'une interpolation et non un recalage du MNT externe. En effet, la suppression des échantillons dans les zones sans recalage entraîne une interpolation sur des surfaces importantes qui, dans des zones à fort relief, a pour effet de diminuer la qualité du MNT. D'autres améliorations de ce masque sont possibles en combinant la valeur de score de corrélation au type de relief ou à la radiométrie de l'image présentant des défauts.

5. Conclusion

Les images fournies par la constellation de satellites Pléiades ont de nombreux avantages : une résolution fine, une agilité d'acquisition permettant la multi-stéréoscopie, une disponibilité rapide des données et un coût de mise à disposition maîtrisé. Ces améliorations conséquentes par rapport aux précédents satellites imageurs permettent d'envisager l'utilisation de ces images pour des applications qui requièrent une précision assez importante.

Une méthode de calcul de MNT développée pour des images aériennes peut alors s'appliquer sans problème aux images satellites Pléiades. Le MNT qui en résulte est de résolution métrique apportant une description fine du terrain. Sa précision altimétrique globale est d'environ 4m et atteint 1 ou 2m sur les terrains favorables comme les zones enneigées ou les terrains à découvert et de faible dénivelée. Toutes ces caractéristiques permettent la création d'un MNS de qualité et la dérivation d'un MNT

répondant aux exigences d'un grand nombre d'applications comme la cartographie, l'ortho-rectification ou l'étude hydrographique d'une zone. La création de ces MNT est d'autant plus intéressante dans les zones de haute montagne où les techniques actuelles ne sont pas optimales en raison de leur coût, de leur complexité d'organisation ou de la qualité de leur résultat. Les MNT Pléiades pourraient finalement améliorer le RGE Alti, référence altimétrique nationale, moyennant certaines contraintes sur les acquisitions Pléiades et quelques adaptations du processus actuel comme la gestion d'un volume de données important ou le calcul du MNS en géométrie image.

Des améliorations de la méthode sont encore à prévoir et permettraient de contourner efficacement certains défauts radiométriques des images ou les inconvénients de l'utilisation de la corrélation d'images pour la création de MNT. Ces différentes pistes font d'ores et déjà l'objet d'études à l'IGN et devraient permettre d'améliorer les résultats obtenus lors de ces tests et d'ouvrir de nouveaux champs d'application pour les MNT en zone de montagne.

Références

- De Masson D'Autume, G., 1979. Surface modelling by means of an elastic grid. In *Photogrammetria*, Vol. 35, Issue 2, p.65-75, March 1979.
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). RGE ALTI, Descriptif de contenu, V.1. In : IGN. Site du RGE ALTI sur le portail de l'IGN [en ligne]. Disponible sur : http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_RGEALTI.pdf. Page consultée le 22 avril 2014.
- Site de l'IGN. <http://www.ign.fr/institut/activites/referentiel-a-grande-echelle>. Page consultée le 19 août 2014.
- Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In *IAPRS vol XXXVI-1/W41 in ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turquie, 02-2006.
- Site des missions scientifiques du CNES. *Pléiades*. <http://smc.cnes.fr/PLEIADES/Fr/>. Page consultée le 11 août 2014.