

EVALUATION DU MODELE NUMERIQUE D'ELEVATION D'UN PETIT GLACIER DE MONTAGNE GENERE A PARTIR D'IMAGES STEREOSCOPIQUES PLEIADES : CAS DU GLACIER D'OSSOUE, PYRENEES FRANÇAISES.

Renaud Marti^{1,2}, Simon Gascoïn², Thomas Houet¹, Dominique Laffly¹, Pierre René³.

1 : Géographie de l'environnement (GEODE), Toulouse

2 : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Toulouse

3 : Association MORAINÉ, Luchon

Résumé

Les bilans de masse des glaciers de montagne constituent des indicateurs climatiques régionaux reconnus. Moyennant une hypothèse sur la densité de la surface glaciaire, on peut établir le bilan de masse d'un glacier par différence entre deux modèles numériques d'élévation (MNE) successifs. L'obtention de MNEs précis à haute résolution est donc un enjeu important en glaciologie. Un couple d'images stéréoscopiques Pléiades acquis en septembre 2013 a été traité afin de générer un MNE du glacier d'Ossoue (Hautes Pyrénées) à 2m de résolution en planimétrie et 1m en altimétrie. Un levé DGPS sur le glacier et sa périphérie à une date proche a permis d'estimer l'erreur altitudinale du MNE Pléiades à $\pm 1,8$ m. Ce résultat permet d'envisager une utilisation opérationnelle des images stéréoscopiques Pléiades pour déterminer des bilans de masses précis de glaciers de montagne, y compris dans les zones impraticables pour les mesures de terrain.

Mots-clés : glacier, bilan de masse, MNE, images stéréoscopiques, Pléiades.

Abstract

Glaciers mass balances are recognized as good regional climate proxies. A glacier mass balance can be obtained by calculating the difference between two consecutive digital elevation models assuming a surface glacier density. Hence accurate and high resolution DEMs are particularly valuable data in glaciology. A Pléiades stereo pair was acquired over Ossoue Glacier (French Pyrenees) in September 2013. We generated a 2m horizontal resolution DEM with a 1m vertical resolution. Shortly after, a DGPS survey on Ossoue glacier and its periphery allowed us to estimate the Pléiades DEM vertical error of $\pm 1,8$ m. We conclude that Pléiades stereoscopic images can be used for accurate mountain glaciers mass balances determination.

Keywords: glacier, mass balance, DEM, stereo pairs, Pléiades.

1. Introduction

Les glaciers de montagne constituent une source d'indicateurs climatiques reconnus pour l'observation du changement climatique (IPCC 2013). L'indicateur privilégié dans l'étude du lien glacier-climat est le bilan de masse (Zemp, Hoelzle, and Haeberli 2009). Il traduit la différence entre l'accumulation et l'ablation. Cet indicateur peut être établi sur un demi-cycle hydrologique ou sur plusieurs cycles, selon les données disponibles. Différentes approches complémentaires existent pour estimer un bilan de masse (Hubbard and Glasser 2005). La méthode glaciologique, dite traditionnelle, est évaluée en faisant la différence entre l'accumulation de neige et la fonte estivale en certains points du glacier, où sont introduites des balises d'ablation (Cogley 2011). L'ablation est obtenue en mesurant la hauteur des balises émergentes. L'accumulation est évaluée en fin d'hiver à l'aide de sondes à neige et de mesures de densité. La méthode glaciologique peut s'avérer fastidieuse, voire impossible à mettre en œuvre dans des zones éloignées et difficiles d'accès, limitant le nombre de mesures disponibles à l'échelle globale. Les réseaux d'observation montrent une sous-représentation de nombreux massifs montagneux pourtant à fort enjeux en termes de fluctuations climatiques et d'implications sociétales (WGMS 2008).

La méthode topographique consiste à quantifier les variations de volume du glacier étudié entre deux dates. La différence entre deux modèles numériques d'élévation

(MNEs) établis pour chaque date permet de calculer un bilan volumétrique. Une hypothèse de densité sur le névé ou la glace accumulés ou fondus permet la conversion en bilan de masse. La génération de MNEs à partir de mesures in situ (levés topographiques, relevés Lidar terrestres...) reste cependant limitée pour des raisons logistiques.

La télédétection constitue un outil privilégié pour établir des bilans de masse de glaciers dans des contextes géographiques variés (Etienne Berthier, Rémy, and Arnaud 2007; Gardelle 2012). De nombreux MNEs de glaciers ont pu être générés localement à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes acquises au cours du 20^{ème} siècle (Soruco et al. 2009; Emmanuel Thibert, Faure, and Vincent 2005; Vincent et al. 2009) avec une résolution et une précision en planimétrie et en altimétrie d'ordre métrique (E. Thibert et al. 2008). L'imagerie spatiale apporte une capacité de couverture et de répétitivité supplémentaire, nécessaires en glaciologie. L'exploitation d'images d'archives, de licences mutualisées et spécifiques recherche permettent de diminuer les coûts d'acquisition. La précision associée aux MNEs de glaciers générés à partir de l'imagerie spatiale reste cependant peu documentée, en dépit du fait que cette information constitue un préalable indispensable à leur exploitation en glaciologie (Racoviteanu et al. 2010).

Dans le domaine radar, la mission SRTM a permis de générer des MNEs à 90m couvrant l'étendue 56°S - 60°N. Les MNEs SRTM sont exploités sur de grands glaciers

(Aizen et al. 2006; Larsen et al. 2007). La pénétration de la bande C dans la neige (Nuth and Kääb 2011) peut être source d'incertitudes et des biais altitudinaux pouvant atteindre (-10m) ont été identifiés (E. Berthier et al. 2006).

Dans le domaine optique, les satellites à capacité stéréoscopiques permettent de générer des MNEs. Les images acquises sur des glaciers de montagne présentent certaines contraintes. Le rapport base sur hauteur (B/H) doit être compatible avec le relief. A cause de la présence de neige, les images peuvent présenter peu de texture et de fortes valeurs de luminance peuvent saturer les comptes numériques. Les images stéréoscopiques issues du satellite Corona (1962-1972) sont probablement la plus ancienne archive satellite exploitée dans la reconstruction de bilans de masse (e.g. Himalaya (Bolch, Pieczonka, and Benn 2011)). Les MNEs générés à partir des images de l'instrument ASTER constituent une source gratuite et globale largement exploitée en glaciologie notamment au travers du projet GLIMS (<http://www.glims.org/>) (Bishop et al. 2004). Les incertitudes sur le contrôle de l'orbite du satellite TERRA altère cependant la qualité des MNEs générés (Gardelle 2012) et la précision apparaît inégale selon la zone d'étude (Kääb 2002; Racoviteanu et al. 2007). Le satellite SPOT 5 porte plusieurs instruments compatibles avec des acquisitions stéréoscopiques. L'instrument HRS est dédié à des acquisitions stéréoscopiques le long de la trace avec un B/H relativement élevé et constant de 0,8 tandis que les instruments HRG permettent d'atteindre des B/H plus faibles mais à partir d'orbites distinctes. Dans les régions polaires, le projet SPIRIT a permis de générer une archive de MNEs à 40m de résolution planimétrique à partir de l'instrument HRS. Une première estimation a montré un écart de $\pm 6m$ par rapport aux données ICESat pour 90% des altitudes (Korona et al. 2009) tandis qu'aux Spitsberg un écart moyen de 5,8m vs. GPS bi-fréquence a été constaté (Friedt et al. 2011).

La récente mise en orbite de systèmes optiques de résolutions métrique à submétrique, associées à des capacités stéréoscopiques (Ikonos 1999, Quickbird 2001, WorldView 2007 et 2009, Pléiades 2011 et 2012), permet d'atteindre des résolutions spatiales comparables à l'imagerie aérienne. Leur utilisation reste jusqu'à présent limitée en glaciologie, en partie à cause de leur faible fauchée (11 km pour IKONOS, 16 km pour Quickbird) et de leur coût de programmation élevé.

L'étude de glaciers de montagne de très faible étendue (surface < 1km²) nécessite cependant une imagerie de résolution submétrique. Si leur contribution à l'élévation du niveau moyen de la mer est faible, ils peuvent s'avérer être de bons indicateurs climatiques dans des régions peu instrumentées et potentiellement vulnérables aux fluctuations climatiques projetées (IPCC 2013). Le suivi d'un glacier qui intègre précipitation et température dans son bilan de masse permet de compléter des séries météorologiques lacunaires à hautes altitudes.

Les images du satellite Pléiades peuvent comme pour SPOT être acquises dans le cadre du programme ISIS à un coût préférentiel pour la communauté scientifique. La recette thématique utilisateur (RTU) clôturée en avril 2014 par les « Pléiades Days » a permis d'effectuer quelques acquisitions et traitements en contexte glaciologique

(Benoît 2014; Berthier et al. 2014; Marti et al. 2014). Sur le glacier de Mera en Himalaya, Wagnon et al. ont exploité des images stéréoscopiques Pléiades pour générer un MNE à 4m de résolution planimétrique. Une comparaison avec des mesures relevées au GPS différentiel (DGPS) sur le glacier a permis d'estimer une précision d'ordre métrique pour le MNE généré (Wagnon et al. 2013).

Nous présentons dans cette étude l'évaluation d'un MNE du glacier d'Ossoue (Hautes Pyrénées) et de sa marge proglaciaire, généré à partir d'images stéréoscopiques Pléiades. La comparaison avec des mesures DGPS effectuées sur et hors glacier doit permettre de confirmer l'usage des images stéréo Pléiades pour le suivi du bilan de masse du glacier d'Ossoue.

2. Site d'étude

Le glacier d'Ossoue se situe dans le massif du Vignemale dans les Hautes-Pyrénées (65). C'est le plus grand glacier des Pyrénées françaises, avec une superficie d'environ 45ha, orienté vers l'Est. La partie haute est en forme de plateau avec une pente moyenne autour des 10°. La partie basse, inclinée de 25° en moyenne, se termine par une langue glaciaire peu étendue. Les altitudes s'échelonnent entre 2755m et 3210 m en 2013 (Figure 1). Depuis 2001, l'Association Moraine mesure de manière saisonnière le bilan de masse glaciologique (Association Moraine 2001). Relativement bien documentée depuis plus d'un siècle, l'évolution du glacier d'Ossoue semble concorder avec les phases constatées par ailleurs (Alpes) dans les processus de déglaciation entamés depuis le milieu du 19^{ème} siècle.

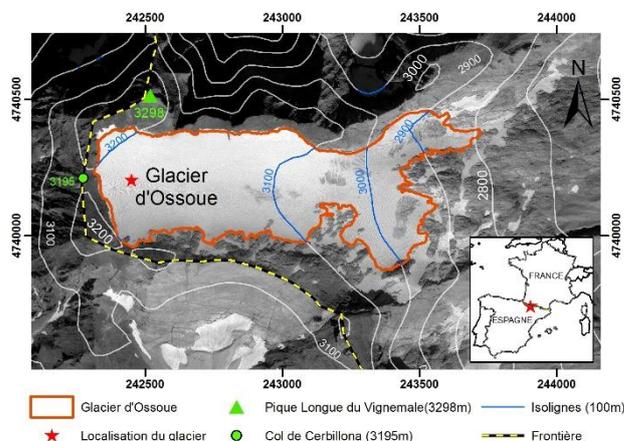


Figure 1 : Glacier d'Ossoue. Image panchromatique Pléiades (Projection Lambert 93). © CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image.

3. Données

3.1. Couple d'images stéréoscopiques

Un couple d'images stéréoscopiques Pléiades a été acquis le 23 septembre 2013 sur le glacier d'Ossoue. Cette date est proche du maximum de fonte estimé au début d'octobre pour l'année hydrologique 2012-2013. La nébulosité est quasi-nulle et aucune saturation dans l'image n'est constatée.

Le rapport stéréoscopique B/H est très proche de 0,4. Cette valeur permet d'obtenir une faible déformation des images et une résolution de l'image des parallaxes proche de 2 pixels, soit ~1m.

Les traitements suivants exploitent le couple formé par les deux produits images panchromatiques rééchantillonnés à 0,5m au niveau « capteur parfait » (tableau 1).

Scène	Valeurs angulaires : Incidence/roulis/tangage	Date d'acquisition
		23-09-2013
1	9,9° / 9,02° / 9,02°	11h04mn35s
2	-13,2° / 9,02° / -12,16°	11h05mn13s

Tableau 1 : Paramètres de prise de vue des scènes Pléiades.

3.2. Mesures in situ

Une campagne DGPS a été effectuée les 5 et 6 octobre 2013, soit 13 jours après la prise de vue Pléiades (DGPS Trimble GEO XH bi-fréquence). Le 6 octobre marque la fin de l'année hydrologique, soit la fonte maximale estimée pour le relevé par balises d'ablation (méthode glaciologique du bilan de masse). Les mesures DGPS ont été corrigées par post-traitement en s'appuyant sur une base du réseau géodésique permanent (RGP) située à moins de 40 km. 7229 points ont été levés sur le glacier avec une précision altitudinale submétrique où 93% des erreurs en z sont estimées à $\pm 0,1$ m. Sur le socle rocheux de la marge proglaciaire, 904 points ont été levés avec une erreur altitudinale estimée à $\pm 0,1$ m pour 91% des points. Les points d'acquisitions DGPS sont cartographiés en figure 2.

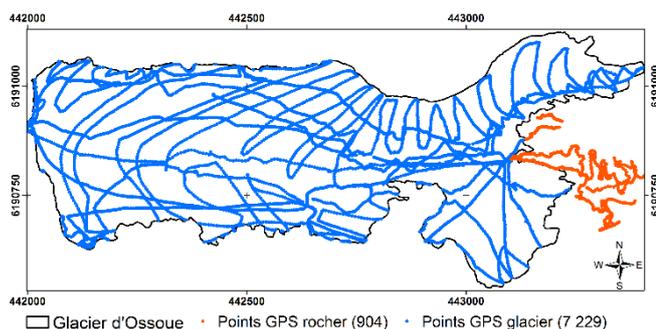


Figure 2 : Acquisition GPS (05-10-2013), glacier d'Ossoue. Projection Lambert 93.

4. Méthode et traitements

4.1. Vue d'ensemble

Il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus dans la communauté des glaciologues pour définir la meilleure solution algorithmique et logicielle associée pour générer un MNE à partir d'images stéréos (Racoviteanu et al. 2010)

Dans notre étude, le MNE couvrant la surface du glacier d'Ossoue et ses marges proglaciaires a été généré à l'aide du logiciel GeoView® version 6.6, employé dans les chaînes de production de l'« Institut national de l'information géographique et forestière » (IGN).

La localisation native des images Pléiades est modélisée sous la forme de fonctions rationnelles (RPCs). Ces modèles de localisation sont améliorés en affinant d'abord la co-localisation des images. Les images sont alors considérées comme un bloc rigide dont la localisation absolue est affinée en intégrant des points d'appuis (GCPs) issus de sources annexes de précisions connues.

Les images sont ensuite projetées en géométrie épipolaire (étape 3) à une altitude donnée (altitude du plan épipolaire). La géométrie épipolaire permet de diminuer d'une dimension la recherche de corrélation en annulant toute parallaxe transversale.

Le processus de corrélation (étape 4) s'appuie sur le corrélateur DAUPHIN (IGN 1994) pour rechercher et calculer les valeurs de parallaxe, soit la distance en pixels (ou en mètres) entre deux points jugés identiques (selon un critère radiométrique) sur les deux images. Le passage des valeurs de parallaxes (V) aux altitudes (Z) (étape 5) se fait par la formule suivante :

$$Z = \frac{V}{B} + a$$

où a est l'altitude du plan épipolaire.

Le MNE final est projeté avec une résolution de 2m en planimétrie et 1m en altimétrie dans le système Lambert-93 (étape 5) pour une analyse ultérieure en environnement SIG (ArcGIS 10.2). L'image des coefficients de confiance code sur 8 bits la valeur du coefficient de corrélation, soit la « qualité d'appariement » entre pixels homologues (Figure 4).

4.2. Localisation des images

La géolocalisation native des images Pléiades (RPCs) fixée à $\pm 6,5$ m est jugée insuffisante pour générer un MNE précis (Gleyzes, Perret, and Cazala-Houcade 2013). Une dizaine de points de liaison sont générés manuellement en associant des pixels de l'image 1 à leurs homologues sur l'image 2. Une première transformation ou affinage permet de minimiser les résidus des écarts (distance) entre ces points. Une recherche automatique de points homologues (4096 points générés), suivi d'un nouvel affinage permet d'atteindre des valeurs de résidus inférieurs à 0,4 pixel (figure 3). Cette valeur seuil est celle généralement attendue d'un opérateur manuel expérimenté.

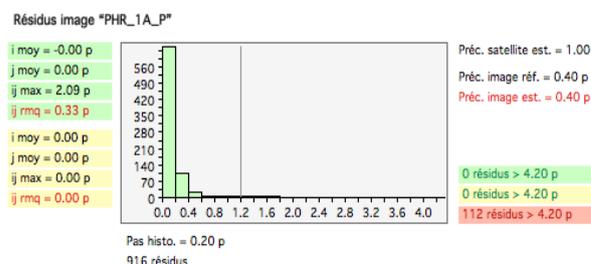


Figure 3 : Résidus associés à la localisation relative des images.

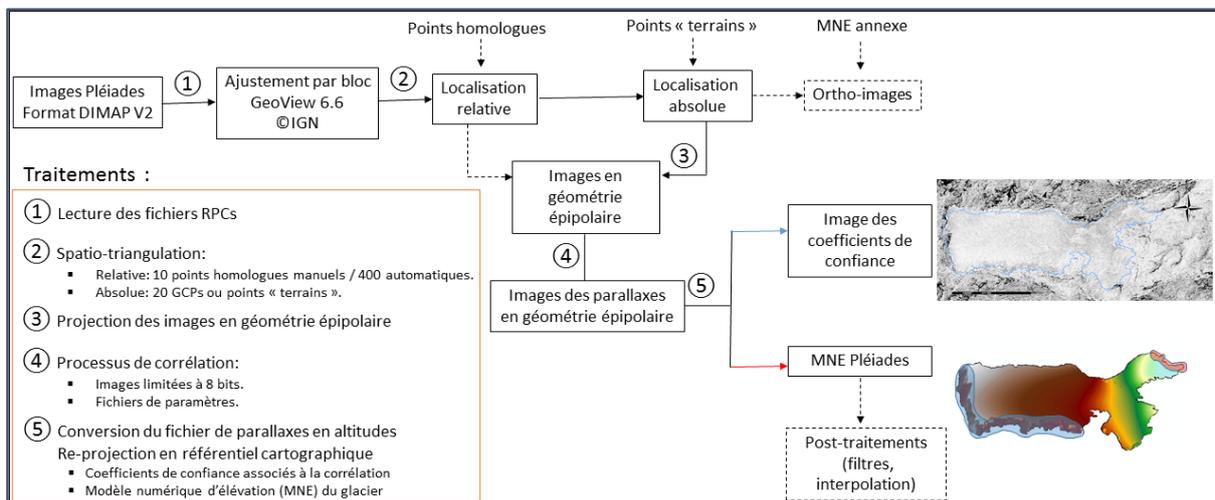


Figure 4 : Schéma de principe de production d'une MNE avec le logiciel GeoView@ 6.6

La localisation précise des images en coordonnées « terrains », ou localisation absolue, nécessite des points d'appuis au sol (GCPs). Un vingtaine de points sont extraits manuellement par photo-interprétation de la BD Ortho IGN®, de précision estimée à 2m, et complétée en z par la BD Alti® dont la précision est estimée à 3m. La précision associée à la localisation terrain est la somme des résidus et de la précision de la source utilisée : $0,95\text{ m} + 2\text{ m} = 2,95\text{ m}$ en planimétrie et : $2,58\text{ m} + 3\text{ m} = 5,58\text{ m}$ en altimétrie.

4.3. Corrélation des images

Le fonctionnement du corrélateur repose sur des hypothèses de continuité du terrain : la corrélation est calculée sur des fenêtres, appelées aussi vignettes, de taille variable mais de forme fixe, symétrique par rapport au point examiné. La validation des appariements est effectuée par contrôle de la cohérence du terrain sur un critère de pente maximale (IGN 1994). Les paramètres fournis par l'utilisateur sont nombreux, notamment : nombre de passes de corrélation, paramétrage du plan épipolaire, tailles minimales et maximales des vignettes, pente maximale acceptable, valeur seuil de rejet de corrélation et post-traitements éventuels.

4.4. Evaluation du MNE-Pléiades

La comparaison sur une zone non-englacée stable à proximité du glacier est exploitée pour évaluer et corriger les valeurs d'altitudes de sources différentes (Bolch, Pieczonka, and Benn 2011; Nuth and Kääb 2011).

Les valeurs d'altitudes du MNE-Pléiades hors glacier sont comparées par différence avec les altitudes mesurées avec des points DGPS post traités sur la marge proglaciaire.

La comparaison sur glacier couvre toute sa surface et permet de valider les valeurs d'altitude du MNE-Pléiades dans l'optique d'un calcul du bilan de masse.

Les images Pléiades ont été acquises 13 jours avant la campagne de validation DGPS. Une interpolation linéaire basée sur les données des balises d'ablation a permis de calculer une estimation de fonte de 0,42 m entre le 23 septembre, date des acquisitions Pléiades, et le 6 octobre, date des relevés DGPS.

5. Résultats

Sur glacier, les écarts d'altitude moyen et médian entre les valeurs du MNE-Pléiades et les altitudes DGPS, sont de -1,18m, pour un écart-type de 0,94 m (figure 5).

Sur la marge proglaciaire, les écarts d'altitude entre le MNE-Pléiades et les altitudes DGPS sont de -1,37m en moyenne et -1,46m en valeur médiane avec un écart-type de 1,82m (figure 6).

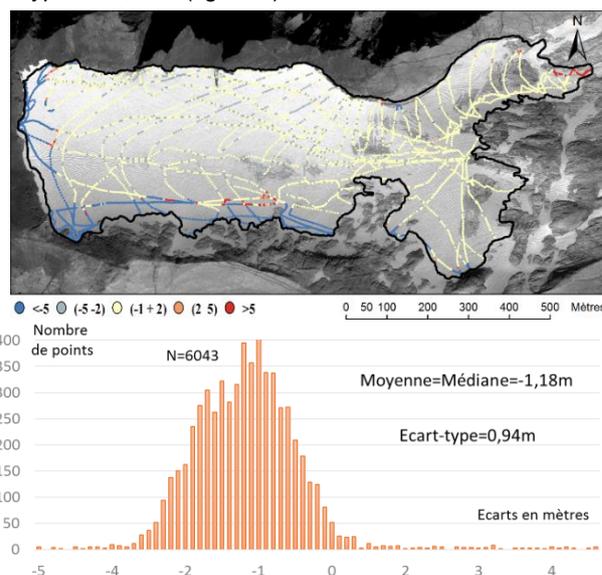


Figure 5 : Ecarts d'altitudes sur glacier entre MNE-Pléiades et DGPS.

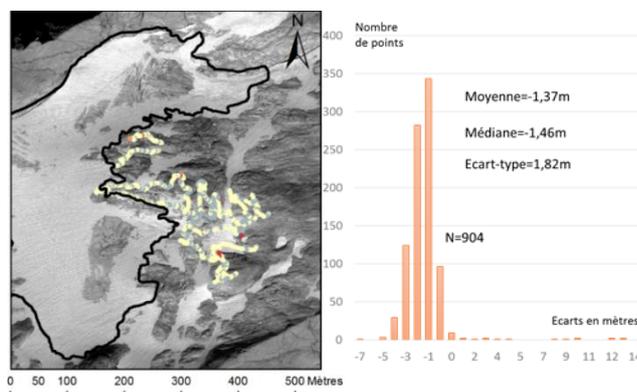


Figure 6 : Ecarts d'altitudes hors glacier entre MNE-Pléiades et DGPS. © CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image.

Dans les deux cas, les histogrammes présentent des distributions bien centrées, de type gaussien.

6. Discussion et conclusion

L'écart-type des écarts d'altitude hors glacier entre les valeurs du MNE-Pléiades et du DGPS post-traitées est de 1,82m. Nous proposons cette valeur comme majorant de l'erreur finale du MNE-Pléiades sur et hors glacier.

La valeur moyenne des écarts d'altitude hors glacier est de (-1,37m). Les histogrammes d'écarts d'altitudes présentant une distribution gaussienne, cette valeur moyenne peut être appliquée aux élévations obtenues sur glacier pour corriger une erreur systématique d'altitude due à la localisation des images (cf. §4.2). La moyenne des écarts d'altitude sur glacier devient : (-1,18m) + 1,37m = 0,19m. Si on applique la fonte moyenne de 0,42m estimée à partir des balises d'ablation entre les dates des deux jeux de données, l'écart final sur glacier devient : 0,23m ±1,82m. Les caractéristiques du MNE généré sont résumées dans le tableau 2.

MNE-Pléiades	Résolution	Précision
(x,y)	2m	2,95m
(z)	1m	1,82m

Tableau 2 : Résolutions et précisions du MNE-Pléiades généré.

Les valeurs présentées en tableau 2 sont cohérentes avec celles obtenues sur le glacier de Mera en Himalaya (Wagnon et al. 2013). Dans cette étude, la distribution sur le glacier des écarts d'altitudes entre MNE-Pléiades et DGPS, composée de 445 valeurs, présentaient des moyenne et médiane égales : (-0,93m), avec un écart-type de 1,02m.

Les performances radiométriques (codées sur 12bits) et la très haute résolution spatiale du satellite Pléiades ont permis au processus de corrélation d'aboutir. Les valeurs des coefficients de confiance associée à la corrélation sont élevées sur la partie glacier, moins accidentée (figure 4, étape 4). La fonte estivale avait cependant créée des motifs d'écoulement supra-glaciaires réguliers bien visibles sur les images Pléiades qui ont probablement favorisé le processus de corrélation automatique. L'issue de la corrélation sur un couple d'images présentant une surface moins contrastée et texturée reste à éprouver (e.g. neige fraîche).

Des valeurs extrêmes (rouge et bleu sur la figure 5), en dehors de l'intervalle [-5 ; 5], ont été écartées sur la partie glacier. Une partie de ces valeurs peuvent être expliquée par un mauvais indice de corrélation. Un travail complémentaire doit permettre d'affiner la paramétrisation de GeoView® et de clarifier ce point.

L'évaluation d'un MNE du glacier d'Ossoue généré à partir des images Pléiades co-localisées sans points de contrôle pourrait apporter des informations sur ce cas de figure récurrent en glaciologie. Une étude préliminaire réalisée avec Geoview® nous a permis d'évaluer que le décalage planimétrique des images géoréférencées en utilisant seulement les RPCs est de l'ordre de 15m sur ce site.

La comparaison entre les altitudes du MNE-Pléiades et des points DGPS confirme bien le potentiel des images stéréoscopiques Pléiades en glaciologie, en particulier pour les glaciers de faibles étendues. Une exploitation systématique peut être envisagée sur le glacier d'Ossoue pour calculer un bilan de masse à partir de MNEs de résolutions et précisions métriques. La dynamique de récession de glacier étant rapide (perte moyenne de 17,3 m de hauteur en équivalent en eau depuis 2001), une acquisition d'images stéréo Pléiades en complément des mesures par balises (Association Moraine) pourrait être envisagée tous les 5 ans par exemple (Zemp et al., 2013).

Références

- Aizen, Vladimir B., Valeriy A. Kuzmichenok, Arzhan B. Surazakov, and Elena M. Aizen. 2006. "Glacier Changes in the Central and Northern Tien Shan during the Last 140 Years Based on Surface and Remote-Sensing Data." *Annals of Glaciology* 43 (1): 202–13.
- Association Moraine. 2001. "Association Moraine Siège Social: Mairie 23 Allée d'Etigny 31110 Luchon Asso.moraine@wanadoo.fr." <http://asso.moraine.free.fr/>.
- Benoît, L. 2014. "DEM Generation and Change Detection from Pléiades Images: Tests on the Glacier of Argentière - L. Benoît (IGN) Poster Session." In .
- Berthier, E., Y. Arnaud, C. Vincent, and F. Rémy. 2006. "Biases of SRTM in High-Mountain Areas: Implications for the Monitoring of Glacier Volume Changes." *Geophysical Research Letters* 33 (8): L08502.
- Berthier et al. 2014. "On the Use of Pléiades High Resolution Imagery in Glaciology: DEM Generation and Velocity Mapping." Pléiades Days 2014, Toulouse, France.
- Berthier, Etienne, Frédérique Rémy, and Yves Arnaud. 2007. *Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Himalaya): contribution de l'imagerie satellitaire*. Toulouse, France: Atelier national de reproduction des thèses.
- Bishop, Michael P., Jeffrey A. Olsenholler, John F. Shroder, Roger G. Barry, Bruce H. Raup, Andrew B. G. Bush, Luke Copland, et al. 2004. "Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS): Remote Sensing and GIS Investigations of the Earth's Cryosphere." *Geocarto International* 19 (2): 57–84.
- Bolch, T., T. Pieczonka, and D. I. Benn. 2011. "Multi-Decadal Mass Loss of Glaciers in the Everest Area (Nepal Himalaya) Derived from Stereo Imagery." *The Cryosphere* 5 (2): 349–58.
- Cogley. 2011. "Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms. Cogley, J.G.; Hock, R.; Rasmussen, L.A.; Arendt, A.A.; Bauder, A.; Jansson, P.; Braithwaite, R.J.; Kaser, G.; Möller, M.; Nicholson, L.; Zemp, M." UNESDOC.
- Friedt, J-M., F. Tolle, é. Bernard, M. Griselin, D. Laffly, and C. Marlin. 2011. "Assessing the Relevance of Digital Elevation Models to Evaluate Glacier Mass Balance: Application to Austre Lovénbreen (Spitsbergen, 79°N)." *Polar Record* 48 (01): 2–10.
- Gardelle, Julie. 2012. "Evolution Récente Des Glaciers Du Pamir-Karakoram-Himalaya: Apport de L'imagerie Satellite". Université de Grenoble. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00864042>.
- Gleyzes, A., L. Perret, and E. Cazala-Houcade. 2013. "Pleiades System Is Fully Operational in Orbit 33th EARSeL Symposium Towards Horizon 2020: Earth Observation and Social Perspectives."

- Hubbard, Bryn, and Neil F. Glasser. 2005. *Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology*. John Wiley & Sons.
- IGN. 1994. "Bulletin D'information de l'IGN N°64."
- IPCC. 2013. "Climate Change 2013 'The Physical Science Basis.'"
- Kääb, Andreas. 2002. "Monitoring High-Mountain Terrain Deformation from Repeated Air- and Spaceborne Optical Data: Examples Using Digital Aerial Imagery and ASTER Data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Geomatics in Mountainous Areas -- The International Year of the Mountains, 2002, 57 (1–2): 39–52.
- Korona, Jérôme, Etienne Berthier, Marc Bernard, Frédérique Rémy, and Eric Thouvenot. 2009. "SPIRIT. SPOT 5 Stereoscopic Survey of Polar Ice: Reference Images and Topographies during the Fourth International Polar Year (2007–2009)." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2): 204–12.
- Larsen, Christopher F., Roman J. Motyka, Anthony A. Arendt, Keith A. Echelmeyer, and Paul E. Geissler. 2007. "Glacier Changes in Southeast Alaska and Northwest British Columbia and Contribution to Sea Level Rise." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112 (F1): F01007.
- Marti, R., S. Gascoin, T. Houet, and D. Laffly. 2014. "Assessment of a Glacier Digital Elevation Model Generated from Pléiades Stereoscopic Images: Ossoue Glacier, Pyrenees, France." Pléiades Days 2014, Toulouse, France.
- Nuth, C., and A. Kääb. 2011. "Co-Registration and Bias Corrections of Satellite Elevation Data Sets for Quantifying Glacier Thickness Change." *The Cryosphere* 5 (1): 271–90.
- Racoviteanu, Adina E., William F. Manley, Yves Arnaud, and Mark W. Williams. 2007. "Evaluating Digital Elevation Models for Glaciologic Applications: An Example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes." *Global and Planetary Change, Mass Balance of Andean Glaciers*, 59 (1–4): 110–25.
- Racoviteanu, Adina E., Frank Paul, Bruce Raup, Siri Jodha Singh Khalsa, and Richard Armstrong. 2010. "Challenges and Recommendations in Mapping of Glacier Parameters from Space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Workshop, Boulder, Colorado, USA." *Annals of Glaciology* 50 (53): 53–69.
- Soruco, A., C. Vincent, B. Francou, P. Ribstein, T. Berger, J.E. Sicart, P. Wagnon, Y. Arnaud, V. Favier, and Y. Lejeune. 2009. "Mass Balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, Using Glaciological, Hydrological and Geodetic Methods." *Annals of Glaciology* 50 (50): 1–8.
- Thibert, E., R. Blanc, C. Vincent, and N. Eckert. 2008. "Instruments and Methods Glaciological and Volumetric Mass-Balance Measurements: Error Analysis over 51 Years for Glacier de Sarennes, French Alps." *Journal of Glaciology* 54 (186): 522–32.
- Thibert, Emmanuel, Joël Faure, and Christian Vincent. 2005. "Bilans de Masse Du Glacier Blanc Entre 1952, 1981 et 2002 Obtenus Par Modèles Numériques de Terrain." *La Houille Blanche*, no. 2 (March): 72–78.
- Vincent, C., A. Soruco, D. Six, and E. Le Meur. 2009. "Glacier Thickening and Decay Analysis from 50 Years of Glaciological Observations Performed on Glacier d'Argentière, Mont Blanc Area, France." *Annals of Glaciology* 50 (50): 73–79.
- Wagnon, P., C. Vincent, Y. Arnaud, E. Berthier, E. Vuillermoz, S. Gruber, M. Ménégoz, A. Gilbert, M. Dumont, and J. M. Shea. 2013. "Seasonal and Annual Mass Balances of Mera and Pokalde Glaciers (Nepal Himalaya) since 2007." *Cryosphere Discussions* 7 (4). WGMS. 2008. *Global Glacier Changes: Facts and Figures*.
- Zemp, M., M. Hoelzle, and W. Haeberli. 2009. "Six Decades of Glacier Mass-Balance Observations: A Review of the Worldwide Monitoring Network." *Annals of Glaciology* 50 (50): 101–11.