

LA TERRE EN 4D : APPORT DES SERIES TEMPORELLES DE MODELES NUMERIQUES D'ELEVATION PAR PHOTOGRAMMETRIE SPATIALE POUR L'ETUDE DE LA SURFACE TERRESTRE

César Deschamps-Berger^a, Simon Gascoin^a, Etienne Berthier^b, Pascal Lacroix^c, Laurent Polidori^a.

^a CESBIO, Toulouse, ^b LEGOS, Toulouse, ^c ISTERRE, Grenoble.

Résumé

Cet article présente une revue des applications en géosciences des séries temporelles de modèles numériques d'élévation (MNE) calculés par photogrammétrie spatiale pour l'observation des changements géométriques à la surface terrestre. Les premières utilisations de MNE dans ce contexte émergent au début des années 2000, facilitées par la multiplication des satellites imageurs haute ou moyenne résolution. La disponibilité des images satellite stéréoscopiques est retracée depuis ses débuts militaires jusqu'à sa propagation dans le civil. Les différentes méthodes de traitements de MNE multi-temporels sont présentées ainsi que leur utilisation dans les travaux scientifiques en glaciologie, hydrologie, volcanologie, sismologie, et en géomorphologie. Grâce à l'amélioration constante de la qualité et résolution des images, le spectre des phénomènes observés devrait continuer de s'étendre.

Abstract

This article presents a review of the applications in geosciences of digital elevation model (DEM) time series from satellite stereoscopic imagery for the observation of geometric changes at the Earth's surface. This method dates back to the beginning of the 2000's as a consequence of the multiplication of imaging satellites. We present the evolution of the data availability from the birth of the method for military purpose to its propagation in the civilian sphere. The various methods used for analysing series of digital elevation models are presented, as well as their applications in glaciology, hydrology, volcanology, seismology and geomorphology. Given the constant improvement of the image quality and resolution, the range of applications should continue to grow.

1. Introduction

La surface terrestre est régulièrement soumise à des changements topographiques, qui résultent de multiples phénomènes naturels : failles tectoniques, glissements de terrain, écoulements glaciaires, érosion côtière, éruptions volcaniques... La compréhension de ces phénomènes passe notamment par une mesure précise du changement topographique qu'ils induisent. Cependant, les zones concernées peuvent être étendues et difficiles d'accès. Les satellites imageurs dotés de la capacité d'acquérir des couples d'images stéréoscopiques permettent le calcul de représentations en trois dimensions de la surface de la Terre (Figure 1). L'accumulation au cours du temps de séries de Modèles Numériques d'Élévation (MNE) offre la possibilité d'ajouter une dimension temporelle à ces observations, ouvrant ainsi la voie à de multiples applications dans le domaine des géosciences. Cependant, les missions stéréoscopiques sont très rarement conçues pour réaliser des observations systématiques multi-temporelles, à la différence de missions phares en observations de la Terre comme Landsat ou Sentinel-2. L'approche multi-temporelle

dans le domaine de la photogrammétrie spatiale relève donc plutôt d'une opportunité dont le savoir-faire s'est développé en fonction des applications.

Dans cet article, nous proposons une revue des utilisations en géosciences de séries temporelles de MNE calculés par photogrammétrie spatiale pour l'observation des changements topographiques à la surface terrestre. Les utilisations basées sur un MNE seul (analyse des propriétés de la surface, modélisation en hydrologie et météorologie) sont donc exclues, ainsi que les études des changements topographiques obtenues par radar. Dans une première partie, l'évolution de la disponibilité des couples d'images satellites stéréo est retracée depuis les débuts de leur utilisation à nos jours. Les différentes méthodes pour l'utilisation de séries de MNE sont présentées et illustrées par le cas du glacier pyrénéen d'Ossoue. Enfin, une revue des applications des séries de MNE dans l'étude de la cryosphère et de la terre solide est présentée.

2. Disponibilité des images stéréo satellite, un historique

2.1 Les débuts militaires, des données secret défense.

La naissance de la photogrammétrie satellite a bénéficié du transfert des connaissances et méthodes développées dans la photogrammétrie à partir d'images aériennes. Le développement des satellites et capteurs multispectraux a été motivé par les besoins de renseignements stratégiques américains et soviétiques. Soucieux d'estimer la capacité de frappe de leur ennemi respectif, ils s'engagent dans la voie des satellites espions imageurs dès la fin des années 1950. En février 1962, le premier satellite capable d'acquérir des couples d'images stéréo est lancé dans le cadre de la mission secrète américaine CORONA (Mc Donald, 1995.) deux ans après la première mise en orbite d'un satellite espion imageur monoscopique. D'une durée de vie de quelques jours, une centaine de satellites sont lancés jusqu'en 1972. Les films sont éjectés du satellite et captés dans leur descente en parachute par un avion affrété pour l'occasion. Une

moyenne de 18 millions de km² par an a été imagée à une résolution de 12 m au cours des dix ans de la mission CORONA (Tableau 1) dont une fraction indéterminée par des couples stéréo. Dans la lignée de ces succès, les missions GAMBIT (1963-1984) et HEXAGON (1971-1986) viennent compléter les capacités d'observation de la mission CORONA. GAMBIT permet l'acquisition d'images à une résolution inférieure à 0,5 m sur une empreinte plus réduite que CORONA (Oder ... Worthman, 2012a.). Les images HEXAGON disposent à la fois d'une couverture plus grande, supérieure à 10 000 km², dépassant les capacités de couvertures de CORONA (Tableau 1) et d'une résolution à 0,8 m meilleure que CORONA (Oder ... Worthman, 2012b.). Le secret n'étant pas levé sur l'utilisation précise de ces données, il est impossible de déterminer si des différences de MNE ont été calculées à l'époque. Le programme équivalent soviétique aurait rencontré ses premiers succès avec la mise en orbite du satellite imageur Zenit-2, deux ans après les débuts de CORONA. Beaucoup moins d'informations sur les propriétés des images produites par ce satellite sont cependant disponibles.

Tableau 1. Capacité de couverture de quelques missions satellites. Pour la mission CORONA (*), la couverture annuelle moyenne est calculée à partir de l'ensemble des acquisitions de la mission (Mc Donald, 1995.) incluant un nombre non-déterminable d'images mono-scopique. Idem pour la mission HEXAGON (**) pour laquelle seule la couverture des six premières années de missions, de 1971 à 1976 est disponible (Araki et Treat, 2012.).

Satellite	Résolution	Période d'exploitation	Capacité de couverture en millions de km ² par an par satellite	
			Par satellite	Par constellation
CORONA*	2-12 m	1962-1972	18	
HEXAGON **	0,8 m	1971-1986	>150	
Ikonos	1 m	1999-2015	88	
World-View1	0,5 m	2007-	475	1575
World-View 2	0,4 m	2009-	350	
World-View 3	0,3 m	2014-	250	
World-View 4	0,3 m	2016-2018	250	
Geo-Eye 1	0,4 m	2008-	250	255
Pléiades 1A	0,5 m	2011-	127	
Pléiades 1B	0,5 m	2012-	127	

2.2 Les débuts dans le civil et le foisonnement actuel d'images

Les débuts de la photogrammétrie spatiale civile seront plus lents avec les premières images

stéréo exploitables prises en 1974 par la Earth Terrain Camera à bord de la station Skylab. La NASA calculera les premiers modèles numériques d'élévation à partir de ces images l'année suivante. Les imperfections du capteur et la nouveauté du

traitement de ces images aboutissent à des produits d'élévation avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de plus de 100 m par rapport à l'élévation de points cartographiés par les méthodes conventionnelles de l'époque. Le potentiel pour les zones éloignées et difficiles d'accès est néanmoins déjà souligné (Mott, 1975.).

La série des satellites SPOT par le CNES, lancés depuis 1986, initie véritablement l'utilisation d'images stéréo dans le civil (Vincent ... Pleitner, 1987.). Les images d'une même paire stéréo sont acquises sur des orbites successives par dépointage du satellite, dit « agile », perpendiculairement à l'orbite (« *across-track* »). Des changements de l'état de surface (déplacement de la surface par exemple lié à un glacier, changement de végétation, d'éclairement) entre les deux acquisitions séparées parfois de plusieurs jours diminuent la ressemblance entre les images et limitent leur utilisation pour la production de MNE. Les images du satellite Ikonos en 1999 permettent une amélioration de la résolution du pixel à 1 m, contre 10 m précédemment pour la série SPOT. Capable de dépointer dans toutes les directions, Ikonos fournit des paires stéréo acquises le long de la même orbite (« *along-track* »), à quelques dizaines de secondes d'écart, conditions plus favorables pour le calcul de MNE. Depuis 2000, le capteur ASTER à bord de TERRA a construit une archive planétaire de couples stéréo avec une résolution de 15 m grâce à deux télescopes fixes qui pointent au nadir et vers l'arrière de la trajectoire avec un angle d'intersection de 28°. Il s'agit de la seule mission actuellement dont l'acquisition d'images ne se fait pas à la demande. Entre 2002 et 2015, SPOT5-HRS a également acquis une archive globale de couples stéréo avec une résolution meilleure qu'ASTER (pixel rectangulaire de 5 m x 10 m) et une fauchée de 120 km, deux fois plus large que celle d'ASTER. Malheureusement, l'archive SPOT5-HRS n'est pour le moment pas accessible librement. L'amélioration de la résolution amène aujourd'hui quelques satellites à une résolution sub-métrique (EROS, World-View, KOMPSAT, Geo-Eye, Pléiades, TripleSat). La résolution n'est cependant pas le seul critère optimisé puisque les missions SPOT6-7, lancées en 2012 et 2014, font le choix d'une résolution moindre, 1,5 m, au bénéfice d'une fauchée assez large de 60 km contre 10-20 km pour les satellites à résolution sub-métriques. La capacité d'acquisition des satellites agiles a aussi augmenté, passant de 88 millions de km² par an pour le satellite IKONOS en 1999 à 450 millions de km² par an pour World-View 1 en 2007 (Tableau 1). L'assemblage de satellites en constellations démultiplie la capacité d'acquisition par opérateur (DigitalGlobe, Airbus). A l'écriture de cet article plus de 25 satellites imageurs à capacité stéréo sont en activité, dont 16 civils, 9 partagés entre militaires et civils (type Pléiades) et

un nombre inconnu de satellites purement militaires (Figure 2). L'acquisition le long de la même orbite est désormais systématiquement privilégiée.

3. Calcul de modèle numérique d'élévation et traitement des séries

3.1 Calcul de modèle numérique d'élévation

Un n-uplet d'images stéréo, souvent une paire ou un triplet, est constituée de n images de la même portion de terrain prises depuis des angles de vue différents. Le relief, la position du satellite, les angles de prises de vue différents, la courbure de la terre, les mouvements de la caméra génèrent une distorsion entre les images. Cette distorsion, ou parallaxe, dépend au premier ordre de l'élévation et de l'angle d'intersection des images. La parallaxe est mesurée par la mise en correspondance de sous portions des images. Ce traitement est effectué par des logiciels de traitement d'images stéréo commerciaux (PCI Geomatica, ERDAS, SOCET SET) ou libres développés par des institutions publiques parmi lesquels Ames Stereo Pipeline de la NASA, MicMac de l'IGN, SETSM de l'Ohio State University ou S2P de l'ENS Cachan et du CNES. Le calcul des MNE peut être adapté aux spécificités du terrain (contraste, pente, rugosité) lors du choix des traitements radiométriques des images, de la détermination de leur position, du processus de corrélation et du filtrage des produits intermédiaires. Pour plus de détails sur le processus de restitution du relief, le lecteur pourra consulter le chapitre consacré dans Delvit et Michel (2016).

Il est possible de produire un MNE géo-localisé par spatio-triangulation de tous les couples d'images à l'aide de points de contrôle. Sans points de contrôle, le MNE sera localisé uniquement à partir des informations de position et d'orientation du capteur lors de l'acquisition des images, ce qui peut conduire à une précision de l'ordre de plusieurs mètres.

3.2 Traitement des séries de modèle numérique d'élévation

Les séries de MNE sont utilisées par simple différenciation (MNE différentiels) lorsque le jeu de données ne comporte que quelques MNE (e. g. Berthier et al. 2004) ou par analyse statistique de la tendance de chaque pixel lorsque la série est assez dense (Willis et al., 2012a, 2012b). Cette dernière méthode permet d'interpoler dans le temps les changements d'élévation et donc d'agrèger spatialement des cartes de changement d'élévation issues de MNE asynchrones. Ces méthodes peuvent être utilisées indépendamment de la résolution des images qui ne conditionne que la précision et la nature des phénomènes observés.

Les MNE sont imparfaitement localisés à la surface de la Terre à partir des informations de position et d'orientation du capteur lors de l'acquisition des images. Il est nécessaire de localiser de manière cohérente les MNE d'une série par une correction planimétrique avant de les différencier. La correction consiste en un recalage des MNE sur des données d'élévation de références, absolues ou relatives. La transformation utilisée est souvent une translation dans le plan horizontal suivie d'une translation verticale afin de réduire le biais résiduel. Le vecteur de recalage est déterminé sur les zones stables, c'est-à-dire où aucun changement d'élévation n'est attendu. Il peut être déterminé, entre autres, par minimisation de l'écart-type des différences d'élévation (Berthier ... Chevallier, 2007.) ou par analyse de la relation entre la différence d'élévation et l'aspect du terrain (Nuth et Kääb, 2011.). La translation est ensuite appliquée à l'ensemble du MNE à recalcer. Dans certaines régions, la faible disponibilité de terrain stable peut être un facteur limitant, comme en Antarctique où les surfaces non-englacées sont rares.

La correction d'erreur non-planimétrique due à des imperfections du capteur, de la connaissance de la géométrie de l'image ou de l'orbite du satellite, est parfois jugée nécessaire (Girod ... Galland, 2017.). Des erreurs corrélées à l'élévation (Berthier ... Chevallier, 2007. ; Nuth et Kääb, 2011.) ou des basculements (Belart ... Jarosch, 2017.) peuvent être corrigés si cela paraît pertinent.

3.3 Estimation des erreurs

Les erreurs qui entachent une carte de changement d'élévation sont souvent décomposées en une erreur systématique et une erreur aléatoire corrélée spatialement.

L'erreur aléatoire résiduelle est qualifiée par analyse statistique des différences d'élévations sur les zones stables. La distribution des erreurs ne suit pas une distribution normale et est marquée par l'existence de valeurs aberrantes (Höhle et Höhle, 2009.). Cela rend nécessaire d'utiliser des descripteurs robustes de la distribution (médiane pour le biais et Normalized Median Absolute Deviation (NMAD) pour la dispersion) et de filtrer les données par l'exclusion des valeurs, typiquement hors de deux ou trois écart-type autour de la moyenne ou la médiane. L'erreur aléatoire associée à chaque pixel est la plupart du temps déterminée comme égale à l'écart-type ou la NMAD des différences d'élévation sur zone stable après un possible filtrage (Nuth et Kääb, 2011. ; Willis ... Bell, 2015. ; Lacroix, 2016. ; Melkonian ... Stewart, 2016. ; Brun ... Wagnon, 2017.). Le Tableau 2 montre les erreurs aléatoires déterminées par les auteurs des études recensées. Une erreur aléatoire typique pour le changement d'élévation d'un pixel est de ~ 0.50 m pour les satellites à

résolution sub-métrique à ~ 2 m pour les satellites à résolution pluri-métriques. L'écart-type de 0.06 m dans l'étude de Martha et al. 2010 avec des images Cartosat-1 à 2,5 m paraît étonnamment faible. La décorrélation spatiale de l'erreur aléatoire diminue son impact lors du calcul du changement de volume sur une aire donnée (glacier, coulée de lave...). L'aire caractéristique de corrélation peut être déterminée à l'aide d'un variogramme (Rolstad ... Denby, 2009. ; Trüssel ... Larsen, 2013. ; Willis ... Bell, 2015. ; Melkonian ... Stewart, 2016.). L'erreur aléatoire peut également être réduite par l'analyse d'une série temporelle plus fournie. Des tendances statistiques sont alors calculées à partir de l'évolution de l'élévation par pixel au cours du temps. La carte de changement d'élévation et l'erreur associée sont alors présentées comme une vitesse en $m a^{-1}$ (Tableau 2).

L'erreur systématique est parfois associée à la différence d'élévation médiane ou moyenne sur les zones stables. A la suite du recalage, l'erreur systématique ainsi définie devient nulle sur les zones stables, ce qui peut permettre de considérer qu'elle est nulle sur l'ensemble du domaine (Martí ... Laffly, 2016. ; Dai et Howat, 2017.). Toutefois, le recalage est toujours entaché d'erreur et il est important de conserver une erreur systématique (Nuth et Kääb, 2011. ; Brun ... Wagnon, 2017.). Par exemple, deux métriques (moyenne et médiane) conduisent à des recalages différents (Gardelle et al., 2013) et il n'est pas trivial de choisir une des deux.

3.4 Etude du changement de géométrie du glacier d'Ossoue

Pour illustrer ces différentes méthodes, nous avons calculé des cartes de différences de MNE à partir d'images ASTER (15 m de résolution), Pléiades (0.5 m de résolution) du glacier d'Ossoue (10 km²) dans les Pyrénées (Figure 3). Les MNE ASTER sont traités soit par différenciation simple d'un couple de MNE soit par analyse de la tendance par pixel sur une série de MNE (Brun ... Wagnon, 2017.). La qualité des cartes est évaluée d'une part par l'observation du signal de perte d'élévation du glacier mesurée sur le terrain (Gascoin et René, 2018.) et d'autre part sur l'absence de signal sur le terrain stable environnant. Pour une taille si modeste et une perte d'élévation mesurée de l'ordre du mètre par an, la différenciation simple de MNE à moyenne résolution (ASTER) ne produit pas de résultats satisfaisants (Figure 3, a) : le glacier est indiscernable du terrain rocheux, stable, environnant. Le traitement de la tendance par pixel sur une série d'images ASTER (Brun ... Wagnon, 2017.) diminue le bruit (Figure 3, b) mais fournit des résultats moins précis qu'une différenciation simple de MNE haute résolution Pléiades (Figure 3, c). Le cas du glacier d'Ossoue illustre clairement l'apport des images de

bonne qualité et haute résolution alors que les séries de MNE ASTER ne sont pertinentes que pour l'étude de glaciers dépassant 1-2 km² (Brun et al., 2017). Quelle que soit la méthode, les zones à l'ombre de la face nord du Vignemale demeurent très bruitées voire sans données du fait du plus faible contraste dans les zones à l'ombre et à l'incapacité d'imager les zones trop convexes.

4. Utilisation de série de MNE en géosciences

4.1 Applications pour l'étude de la cryosphère

Les séries de MNE sont utilisées pour mesurer les changements de formes de glaciers, couvrant de quelques à plusieurs milliers de km², produits par leur écoulement ou leurs changements de masse. Le changement de volume est converti en changement de masse en supposant connue la densité du matériel (neige, névé ou glace) gagné ou perdu par le glacier (Bamber et Rivera, 2007. ; Huss, 2013.). Les précieuses images déclassifiées des missions CORONA et HEXAGON ont par exemple permis le calcul des changements d'épaisseurs des glaciers himalayens depuis les années 1960 (Bolch ... Author, 2008. ; Bolch ... Benn, 2011. ; Pieczonka ... Buchroithner, 2011. ; Pieczonka ... Shiyin, 2013. ; Shangguan ... Liu, 2015. ; Ragetti ... Pellicciotti, 2016. ; Lamsal ... Sakai, 2017.). Les séries de MNE permettent également l'observation de phénomènes transitoires de quelques km² d'empreinte seulement comme la vidange (Scambos ... Shuman, 2011. ; Flament ... Rémy, 2014.), la recharge des lacs sous-glaciaires (Howat ... Jeong, 2015. ; Willis ... Bell, 2015.), le phénomène de *surge*¹ (Sund ... Eiken, 2014. ; Lovell ... Stokes, 2018.) ou l'effondrement de deux glaciers de montagne (Kääb ... Chao, 2018.). La profondeur radiométrique accrue des capteurs récents (images codées sur 11 ou 12 bits contre 8 bits auparavant) et le contrôle du gain lors de l'acquisition des images compensent le fort albédo et le manque de contrastes des zones enneigées. Récemment, la précision verticale sub-métrique des MNE Pléiades a été utilisée pour mesurer l'épaisseur du manteau neigeux dans les Pyrénées (Marti ... Laffly, 2016.) et sur une calotte glaciaire en Islande (Belart ... Jarosch, 2017.). Il s'agit actuellement de la seule méthode qui permette de cartographier la hauteur de neige dans des contextes topographiques accidentés depuis l'espace.

Les premières études ont permis de déterminer la tendance de changement de volume des parties basses des glaciers sur des périodes de plusieurs années (Berthier ... Rémy, 2004.). Le foisonnement

de données permet maintenant de traiter des séries pluri-annuelles de MNE ce qui renforce la robustesse statistique des tendances observées (Willis ... Rivera, 2012b. ; Wang et Kääb, 2015. ; Brun ... Wagnon, 2017. ; Kääb ... Chao, 2018.). La forte répétitivité en région polaire, du fait de l'orbite héliosynchrone, assure des séries d'images denses dans les régions arctiques qui rassemblent 58 % des glaciers sur Terre (Pfeffer ... The Randolph Consortium, 2014.). Le projet ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>) a par exemple réussi à rassembler une bibliothèque de MNE multi-temporels calculés à partir des images des satellites Worldview (~0,5 m) couvrant l'ensemble des terres émergées au nord de 60° N. Le potentiel de ce jeu de données est immense pour mesurer et comprendre les évolutions des glaciers et environnements périglaciaires arctiques. Depuis septembre 2018, une série de MNE aux caractéristiques similaires est également disponible sur l'ensemble du continent Antarctique (<https://www.pgc.umn.edu/data/rema/>). Depuis l'été 2016, le CNES finance dans le cadre du Pléiades Glacier Observatory des campagnes d'acquisitions de couples stéréo Pléiades sur des glaciers références (~20 à 40 glaciers chaque année) avec l'objectif de répéter les acquisitions tous les six ans.

4.2 Applications à l'étude de la Terre Solide

Les séries de MNE sont utilisées pour la caractérisation et le suivi temporel d'une large variété de phénomènes naturels : mouvements de terrain, failles tectoniques, volcans. Les mouvements de terrain surviennent lorsqu'une rupture mécanique au sein du sol et de son substrat provoque son écoulement qui peut être lent (quelques mètres par an) ou rapide (quelques mètres par seconde). La caractérisation de ces mouvements (volume, extension, vitesse, géologie, topographie) permet d'étudier les risques gravitaires, leurs facteurs de déclenchement ou bien encore leur contribution à la formation du relief. Les variations de topographie mesurées par MNE différentiels permettent de caractériser les volumes déplacés par des glissements de terrains rapides (Tsutsui ... Yang, 2007. ; Martha ... Vinod Kumar, 2010. ; Lacroix, 2016. ; Bessette-Kirton ... Zhou, 2018.). L'amélioration radiométrique et en résolution des images optiques a permis d'étudier des mouvements de terrain de plus en plus petits, de quelques centaines de milliers de m³ en utilisant des images SPOT5 (Tsutsui ... Yang, 2007.) à quelques centaines de m³ avec des images SPOT6/7 (Lacroix, 2016.). Les volumes des glissements de terrain lents peuvent également être estimés en combinant des mesures de variation 3D de la surface et des hypothèses sur les lois de conservation des masses dans l'écoulement. Ces

méthodes ont notamment été appliquées à partir de paires stéréo aériennes (Booth ... Delacourt, 2013.) mais seraient possibles avec des paires satellites étant donnée la résolution métrique des images utilisées dans cette étude.

Les MNE différentiels se sont également avérés très appropriés pour l'étude des édifices volcaniques, prompts à des changements rapides de forme de la surface que ce soit par écoulement de lave, dépôt de cendres ou effondrement de caldeira. La disponibilité des données très haute résolution des satellites Pléiades et WorldView semble relancer l'intérêt pour la photogrammétrie spatiale (Castro ... Feisel, 2016. ; Dai et Howat, 2017.) en complément de la méthode D-InSAR qui permet des calculs de déformation de la surface de l'ordre du centimètre. Les MNE différentiels ont permis de caractériser les volumes des écoulements de lave (Bagnardi ... Hooper, 2016.), des effondrements de caldeira (Kerle, 2002. ; Urai ... Staudacher, 2007.), ou d'étudier les relations entre éruptions volcaniques et intrusions du magma dans l'édifice volcanique (Castro ... Feisel, 2016.). Une série de 16 MNE sur trois années réalisés à partir d'images WorldView et Pléiades a permis de suivre l'érosion rapide d'une île volcanique temporaire (Garvin et Slayback, 2018.).

La très haute résolution permet par ailleurs d'obtenir des images de la rupture co-sismique en 3D grâce à la réalisation de MNE avant et après un séisme. La méthode a été validée par comparaison avec des MNE LIDAR plus précis (Zhou ... Walker, 2015.) et utilisée ensuite pour l'étude d'un séisme de 1978 par comparaison avec un MNE aérien (Zhou ... Parsons, 2016.).

5. L'avenir de la stéréo satellite en France

L'intérêt pour les satellites à capacité stéréoscopique semble s'accroître en France. La Défense française renouvelle actuellement ses capacités d'observations satellites avec le lancement de CSO-1 en décembre 2018 suivi dans les années à venir des satellites CSO-2 et 3. Placés à différentes orbites, les satellites de cette constellation devraient acquérir des images dans l'optique et infrarouge à « extrêmement haute résolution » (Dossier de presse « Lancement du satellite CSO-1 », 2018). Dans le civil, Airbus va compléter sa flotte avec le lancement en 2020 de quatre satellites nommés Pléiades-Neo avec une résolution de 30 cm. Le CNES se devrait se lancer lui dans la réalisation d'une cartographie globale et à haute résolution avec le lancement d'une constellation de mini-satellites CO3D à vocation à la fois civile et militaire d'ici 2022. CO3D devrait aussi permettre des acquisitions stéréo régulières sur des sites à fort intérêt scientifique. L'augmentation et l'amélioration de l'offre d'images satellites stéréo devraient fournir dans un futur

proche des séries temporelles de MNE mieux résolues temporellement et spatialement pour l'étude des phénomènes naturels à la surface de la terre. Les fournisseurs d'images (CNES, Airbus) envisagent de s'appuyer sur des services de traitement de données automatisés pour tirer parti de cette profusion de données. Pour les applications scientifiques, l'accès libre et gratuit à la donnée brute (imagerie de niveau 1A ou capteur) est fondamental pour permettre de tirer parti des progrès constants dans les méthodes de traitement des données.

6. Conclusion

Les produits d'élévation issus de la photogrammétrie spatiale permettent de mesurer précisément l'impact des phénomènes modifiant la géométrie de la surface terrestre. Les principales disciplines des sciences de la Terre qui ont bénéficié de cette méthode sont la glaciologie, la volcanologie, la sismologie, et la géomorphologie. La méthode s'est révélée particulièrement pertinente pour l'étude des changements de masse des glaciers. L'amélioration de la précision et de la résolution des MNE et leur abondance rendent possible l'observation de phénomènes toujours plus localisés et d'amplitude toujours plus faible. Le choix du satellite utilisé est souvent un compromis entre la résolution des images et leur empreinte à la surface. Une des limitations de l'imagerie spatiale à très haute résolution (inférieur à 1 m) est l'empreinte limitée des acquisitions (typiquement ~500 km²). Cette couverture ne permet pas toujours d'imager en une fois une zone d'intérêt (massifs montagneux enneigés, glaciers himalayens) et limite les chances de disposer de terrain stable dans l'image. La création d'un jeu de données couvrant de larges zones (>1000 km²) se fait aujourd'hui au détriment de la cohérence temporelle, par l'agrégation d'images sur plusieurs années (e.g. ArcticDEM). De tels jeux de données sont pertinents pour l'étude de phénomènes à tendance pluri-annuelle (fonte de glacier, érosion, évolution du permafrost) mais ne permettent pas l'étude de phénomènes saisonniers comme l'enneigement. L'empreinte limitée des images est partiellement compensée par la profusion des satellites imageurs très haute résolution à capacité stéréo. L'acquisition rapide d'images haute résolution sur une large zone serait aujourd'hui possible au vu du nombre de satellites à capacité stéréo mais en réalité compliquée du fait de la complexité et du coût de la synchronisation de tous les acteurs les opérant. Hors rupture technologique significative, l'empreinte réduite des images à très haute résolution pourrait continuer de limiter leur application pour le suivi temporel de la surface terrestre en trois dimensions. Offrir à la fois la capacité de couvrir de vastes zones tout en conservant une haute résolution, donc des MNE

précis, est un défi que devront relever les futures missions de photogrammétrie spatiale pour élargir le spectre des applications et rendre opérationnelles celles qui ont déjà prouvé leur faisabilité.

Remerciements : Ce travail a été soutenu par le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS, <http://www.insu.cnrs.fr/pnts>), projet n° PNTS-2018-4. Nous souhaitons remercier R. Hugonnet pour le calcul de la tendance de changement d'élévation du glacier d'Ossoue avec la série de MNE ASTER.

Références

Araki, Sam et Treat, Steve, 2012. Hexagon — “ No Single Failure Shall Abort the Mission ” — Managing System Integration for the NRO ' s Wide-Area Search Satellite from the Lockheed Missile and Space Company ' s Perspective . National Reconnaissance Journal of the discipline and practice : 85- 102.

Bagnardi, Marco, González, Pablo J., et Hooper, Andrew, 2016. High-resolution digital elevation model from tri-stereo Pleiades-1 satellite imagery for lava flow volume estimates at Fogo Volcano . Geophysical Research Letters, vol. 43, n° 12 : 6267-6275.

Bamber, Jonathan L. et Rivera, Andres, 2007. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination . Global and Planetary Change, vol. 59, n° 1-4 : 138-148.

Belart, Joaquín M.C., Berthier, Etienne, Magnússon, Eyjólfur, Anderson, Leif S., Pálsson, Finnur, Thorsteinsson, Thorsteinn, Howat, Ian M., Aalgeirsdóttir, Guoafinna, Jóhannesson, Tómas, et Jarosch, Alexander H., 2017. Winter mass balance of Drangajökull ice cap (NW Iceland) derived from satellite sub-meter stereo images . Cryosphere, vol. 11, n° 3 : 1501-1517.

Berthier, E., Arnaud, Y., Baratoux, D., Vincent, C., et Rémy, F., 2004. Recent rapid thinning of the “Mer de Glace” glacier derived from satellite optical images . Geophysical Research Letters, vol. 31, n° 17 : 2-5.

Berthier, E., Vincent, C., Magnusson, E., Gunnlaugsson, P., Pitte, P., Le Meur, E., Masiokas, M., Ruiz, L., Pálsson, F., Belart, J. M C, et Wagnon, P., 2014. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images . Cryosphere, vol. 8, n° 6 : 2275-2291.

Berthier, E., Arnaud, Y., Kumar, R., Ahmad, S., Wagnon, P, et Chevallier, P, 2007. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India) . Remote Sensing of Environment, vol. 108, n° 3 : 327-338.

Bessette-Kirton, Erin K., Coe, Jeffrey A., et Zhou, Wendy, 2018. Using Stereo Satellite Imagery to Account for Ablation, Entrainment, and Compaction in Volume Calculations for Rock Avalanches on Glaciers: Application to the 2016 Lamplugh Rock

Avalanche in Glacier Bay National Park, Alaska . Journal of Geophysical Research: Earth Surface : 622-641.

Bolch, Tobias, Buchroithner, Manfred, Pieczonka, Tino, et Author, Corresponding, 2008. Planimetric and Volumetric Glacier Changes in the Khumbu Himalaya since 1962 Using Corona, Landsat TM and ASTER Data . Journal of Glaciology, vol. 4, n° 187 : 1-13.

Bolch, Tobias, Pieczonka, Tino, et Benn, Douglas I., 2011. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery . The Cryosphere, vol. c : 349-358.

Booth, Adam M., Lamb, Michael P., Avouac, Jean Philippe, et Delacourt, Christophe, 2013. Landslide velocity, thickness, and rheology from remote sensing: La Clapière landslide, France . Geophysical Research Letters, vol. 40, n° 16 : 4299-4304.

Brun, Fanny, Berthier, Etienne, et Wagnon, Patrick, 2017. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016 . Nature Geoscience, n° August.

Castro, Jonathan M, Cordonnier, Benoit, Schipper, C Ian, Tuffen, Hugh, Baumann, Tobias S, et Feisel, Yves, 2016. Rapid laccolith intrusion driven by explosive volcanic eruption . Nature Publishing Group, vol. 7 : 1-7.

Dai, Chunli et Howat, Ian M., 2017. Measuring Lava Flows with ArcticDEM: Application to the 2012-2013 Eruption of Tolbachik, Kamchatka . Geophysical Research Letters, n° 2014 : 1-8.

Delvit, Jean-marc et Michel, Julien, 2016. Modèles Numériques de Terrain à partir d'images optiques . Observation des Surfaces Continentales par Télédétection optique: Techniques et méthodes, : 366.

Flament, T., Berthier, E., et Rémy, F., 2014. Cascading water underneath Wilkes Land, East Antarctic ice sheet, observed using altimetry and digital elevation models . Cryosphere, vol. 8, n° 2 : 673-687.

Garvin, J B et Slayback, D A, 2018. Monitoring and Modeling the Rapid Evolution of Earth's Newest Volcanic Island: Hunga Tonga Hunga Ha'apai (Tonga) Using High Spatial Resolution Satellite Observations . Geophysical Research Letters : 3445-3452.

Gascoïn, Simon et René, Pierre, 2018. Évolution récente des glaciers du Vignemale (2013-2017) . Pirineos. Revista de Ecología de Montaña, vol. 173.

Girod, Luc, Nuth, Christopher, Kääb, Andreas, McNabb, Robert, et Galland, Olivier, 2017. MMASTER: Improved ASTER DEMs for Elevation Change Monitoring . Remote Sensing.

Höhle, Joachim et Höhle, Michael, 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods . ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64, n° 4 : 398-406.

Howat, I. M., Porter, C., Noh, M. J., Smith, B. E., et

- Jeong, S., 2015. Brief communication: Sudden drainage of a subglacial lake beneath the Greenland Ice Sheet . *Cryosphere*, vol. 9, n° 1 : 103-108.
- Huss, M., 2013. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change . *The Cryosphere*, vol. 7, n° 3 : 877-887.
- Kääb, Andreas, Leinss, Silvan, Gilbert, Adrien, Bühler, Yves, Gascoïn, Simon, Evans, Stephen G, Bartelt, Perry, Berthier, Etienne, Brun, Fanny, et Chao, Wei-an, 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability . *Nature Geoscience* : 1-10.
- Kerle, Norman, 2002. Volume estimation of the 1998 flank collapse at Casita volcano, Nicaragua: A comparison of photogrammetric and conventional techniques . *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 27, n° 7 : 759-772.
- Lacroix, Pascal, 2016. Landslides triggered by the Gorkha earthquake in the Langtang valley, volumes and initiation processes . *Earth, Planets and Space*, vol. 68, n° 1 : 46.
- Lamsal, Damodar, Fujita, Koji, et Sakai, Akiko, 2017. Surface lowering of the debris-covered area of Kanchenjunga Glacier in the eastern Nepal Himalaya since 1975 , as revealed by Hexagon KH-9 and ALOS satellite observations . *The Cryosphere*, n° 2013 : 2815-2827.
- Lovell, Arminel M, Carr, J Rachel, et Stokes, Chris R, 2018. Topographic controls on the surging behaviour of Sabche Glacier , Nepal (1967 to 2017) . *Remote Sensing of Environment*, vol. 210, n° September 2017 : 434-443.
- Martha, Tapas R., Kerle, Norman, Jetten, Victor, Van Westen, Cees J., et Vinod Kumar, K., 2010. Landslide volumetric analysis using cartosat-1-derived DEMs . *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, n° 3 : 582-586.
- Marti, R., Gascoïn, S., Berthier, E., De Pinel, M., Houet, T., et Laffly, D., 2016. Mapping snow depth in open alpine terrain from stereo satellite imagery . *Cryosphere*, vol. 10, n° 4 : 1361-1380.
- Mc Donald, Robert, 1995. CORONA: Success for Space Reconnaissance, A Look into the Cold War, and a Revolution for Intelligence . *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*.
- Melkonian, Andrew K., Willis, Michael J., Pritchard, Matthew E., et Stewart, Adam J., 2016. Recent changes in glacier velocities and thinning at Novaya Zemlya . *Remote Sensing of Environment*, vol. 174 : 244-257.
- Mott, P.G., 1975. Cartographic research in E.R.E.P program for small scale mapping.
- Noh, Myoung Jong et Howat, Ian M., 2015. Automated stereo-photogrammetric DEM generation at high latitudes: Surface Extraction with TIN-based Search-space Minimization (SETSM) validation and demonstration over glaciated regions . *GIScience and Remote Sensing*, vol. 52, n° 2 : 198-217.
- Nuth, C. et Kääb, 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change . *Cryosphere*, vol. 5, n° 1 : 271-290.
- Oder, F. C. E., Fitzpatrick, J., et Worthman, P. E., 2012a. The Gambit story. National Reconnaissance Office Center for the Study of National Reconnaissance.
- 2012b. The Hexagon story. Center for the study of national reconnaissance.
- Pfeffer, W . Tad, Arendt, Anthony A., Bliss, Andrew, Bolch, Tobias, Cogley, J. Graham, Gardner, Alex S., Hagen, Jon-ove, Hock, Regine, Kaser, Georg, Kienholz, Christian, Miles, Evan S., Moholdt, Geir, Rastner, Philipp, Raup, Bruce H., Paul, Frank, Radic, Valentina, Mölg, Nico, Rich, Justin, Sharp, Martin J., et The Randolph Consortium, THE Randolph, 2014. The Randolph Glacier Inventory : a globally complete inventory of glaciers. vol. 60, n° 221 : 537-552.
- Pieczonka, Tino, Bolch, Tobias, et Buchroithner, Manfred, 2011. Generation and evaluation of multitemporal digital terrain models of the Mt. Everest area from different optical sensors . *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, n° 6 : 927-940.
- Pieczonka, Tino, Bolch, Tobias, Junfeng, Wei, et Shiyin, Liu, 2013. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery . *Remote Sensing of Environment*, vol. 130 : 233-244.
- Pitte, Pierre, Berthier, Etienne, Masiokas, Mariano H., Cabot, Vincent, Ruiz, Lucas, Ferri Hidalgo, Lidia, Gargantini, Hernán, et Zalazar, Laura, 2016. Geometric evolution of the Horcones Inferior Glacier (Mount Aconcagua, Central Andes) during the 2002-2006 surge . *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, vol. 121, n° 1 : 111-127.
- Ragettli, Silvan, Bolch, Tobias, et Pellicciotti, Francesca, 2016. Heterogeneous glacier thinning patterns over the last 40 years in Langtang Himal, Nepal . *The Cryosphere* : 2075-2097.
- Rolstad, C., Haug, T., et Denby, B., 2009. Spatially integrated geodetic glacier mass balance and its uncertainty based on geostatistical analysis: Application to the western Svartisen ice cap, Norway . *Journal of Glaciology*, vol. 55, n° 192 : 666-680.
- Scambos, T A, Berthier, Etienne, Shuman, C A, 2011. The triggering of sub-glacial lake drainage during the rapid glacier drawdown : Crane Glacier , Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology* : 74-82.
- Schenk, Toni, Csatho, Beata, van der Veen, Cornelis, et McCormick, David, 2014. Fusion of multi-sensor surface elevation data for improved characterization of rapidly changing outlet glaciers in Greenland . *Remote Sensing of Environment*, vol. 149 : 239-251.
- Shangguan, D H, Bolch, T, Ding, Y J, Kröhnert, M, Piezonka, T, Wetzel, H U, et Liu, S Y, 2015. Mass changes of Southern and Northern Inylchek Glacier ,

Central Tian Shan , Kyrgyzstan , during ~ 1975 and 2007 derived from remote sensing data . The Cryosphere, n° 2009 : 703-717.

Shuman, Christopher A, Berthier, Etienne, et Scambos, Ted A, 2011. 2001 – 2009 elevation and mass losses in the Larsen A and B embayments , Antarctic Peninsula . Journal of Glaciology, vol. 57, n° 204 : 737-754.

Sund, M., Lauknes, T. R., et Eiken, T., 2014. Surge dynamics in the nathorstbreen glacier system, Svalbard . Cryosphere, vol. 8, n° 2 : 623-638.

Trüssel, Barbara L., Motyka, Roman J., Truffer, Martin, et Larsen, Christopher F., 2013. Rapid thinning of lake-calving Yakutat Glacier and the collapse of the Yakutat Icefield, southeast Alaska, USA . Journal of Glaciology, vol. 59, n° 213 : 149-161.

Tsutsui, Ken, Rokugawa, Shuichi, Nakagawa, Hideaki, Miyazaki, Sanae, Cheng, Chin Tung, Shiraishi, Takashi, et Yang, Shiun Der, 2007. Detection and volume estimation of large-scale landslides based on elevation-change analysis using DEMs extracted from high-resolution satellite stereo imagery . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 45, n° 6 : 1681-1696.

Urai, Minoru, Geshi, Nobuo, et Staudacher, Thomas, 2007. Size and volume evaluation of the caldera collapse on Piton de la Fournaise volcano during the April 2007 eruption using ASTER stereo imagery . Geophysical Research Letters, vol. 34, n° April : 1-7.

Vincent, K. V., True, M. A., et Pleitner, P. K., 1987. Spot 1, image utilization, assessment, results. .

Wang, Di et Kääb, Andreas, 2015. Modeling Glacier Elevation Change from DEM Time Series . Remote Sensing, vol. 7, n° 8 : 10117-10142.

Willis, Michael J., Herried, Bradley G., Bevis, Michael G., et Bell, Robin E., 2015. Recharge of a subglacial lake by surface meltwater in northeast Greenland . Nature, vol. 518, n° 7538 : 223-227.

Willis, Michael J., Melkonian, Andrew K., Pritchard, Matthew E., et Ramage, Joan M., 2012a. Ice loss rates at the Northern Patagonian Icefield derived using a decade of satellite remote sensing . Remote Sensing of Environment, vol. 117 : 184-198.

Willis, Michael J., Melkonian, Andrew K., Pritchard, Matthew E., et Rivera, Andrés, 2012b. Ice loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012 . Geophysical Research Letters, vol. 39, n° 17 : 1-6.

Yamakoshi, Takao, Shimizu, Yoshikazu, et Osanai, Nobutomo, 2008. Erosion Processes of the Collapsed Mass of the Gigantic Landslide of Mt. Bawakaraeng, Sulawesi, Indonesia in 2004 revealed by Multi-Temporal Satellite Images . Fourth International Conference on Scour and Erosion.

Zhou, Yu, Parsons, Barry, Elliott, John R., Barisin, Ivana, et Walker, Richard T., 2015. Assessing the ability of Pleiades stereo imagery to determine height changes in earthquakes: A case study for the El Mayor-Cucapah epicentral area . Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 120, n° 12 : 8793-8808.

Zhou, Yu, Walker, Richard T., Hollingsworth, James, Talebian, Morteza, Song, Xiaogang, et Parsons, Barry, 2016. Coseismic and postseismic displacements from the 1978 Mw7.3 Tabas-e-Golshan earthquake in eastern Iran . Earth and Planetary Science Letters, vol. 452 : 185-196.