

# GENERATION, QUALIFICATION ET EXPLOITATION DE MODELES NUMERIQUES DE SURFACE DERIVES D'ACQUISITIONS TRI-STEREOSCOPIQUES PLEIADES

Arnaud Durand<sup>1</sup>, Julien Michel<sup>2</sup>, Mathilde Caspard<sup>1</sup>, Claire Huber<sup>1</sup>, Jérôme Maxant<sup>1</sup>, Henri Giraud<sup>1</sup>

1: SERTIT - Université de Strasbourg, Illkirch-Graffenstaden, arnaud.durand@sertit.u-strasbg.fr

2: CNES - DCT/SI/AP, Toulouse

## Résumé

La configuration d'acquisition tri-stéréoscopique des satellites Pléiades permet de fournir trois images acquises avec des points de vue différents, autorisant la reconstruction de la scène observée par des techniques classiques de stéréophotogrammétrie. Une comparaison d'un Modèle Numérique de Surface Pléiades avec un relevé LiDAR est menée sur la ville de Port-au-Prince en Haïti. Les défauts critiques pour l'interprétation et l'analyse du Modèle Numérique de Surface sont identifiés, et des pistes d'améliorations sont proposées. Puis les potentialités applicatives des modèles numériques de surface sont investiguées à travers l'analyse de produits destinés à alimenter des études en cours sur diverses thématiques : régénération d'un massif forestier à la Réunion suite à un incendie, simulation des futurs produits de la mission altimétrie radar SWOT, et modélisation de l'érosion des sols en Corse, dans un contexte post-incendie en zone méditerranéenne. Cette étude montre que malgré les défauts traditionnels de produits générés par corrélation optique, les Modèles Numériques de Surfaces issus d'images Pléiades sont pleinement opérationnels et adaptés à nombre d'applications concrètes.

**Mots-clés** : Pléiades, Modèle Numérique de Surface, stéréoscopie, qualité, précision, applications thématiques

## Abstract

*A tri-stereoscopic acquisition of the Pleiades satellites provides three images acquired along the same path from different view-points, allowing the reconstruction of the observed scene by standard stereo-photogrammetric processes. A comparison of a Digital Surface Model with a LiDAR dataset is treated over the city of Port-au-Prince, Haiti. Critical defaults for interpretation and analysis are identified, and ways for improvement are proposed. Then, the applicative potential of Digital Surface Models is investigated through product analysis in the framework of ongoing studies covering various themes: post-fire forest regeneration monitoring over La Reunion, France, simulation of future products acquired by the SWOT altimetric mission, and soil erosion in a post-fire context in Mediterranean area. Despite the well-known issues present in optical-correlation generated products, this study shows that the digital surface models produced using Pleiades imagery are fully operational and suit numerous concrete applications.*

**Keywords**: Pleiades, Digital Surface Model, stereoscopy, quality, accuracy, thematic applications

## 1. Introduction

La mise en orbite du système Pléiades, composé de deux satellites d'observation de la terre à très haute résolution spatiale, est un événement marquant dans le paysage spatial mondial. En effet, il permet à la France de disposer d'un système civil dual capable d'acquisitions submétriques avec une répétitivité quotidienne en tout point du globe (Kubik et al., 2012). Le lanceur Soyouz, opérant depuis le Centre Spatial Guyanais, a mis en orbite le satellite Pléiades 1A le 17 décembre 2011, et le satellite Pléiades 1B le 10 décembre 2012 (produit image rééchantillonné à 0.5 mètres en mode panchromatique).

L'agilité des satellites Pléiades permet des acquisitions multiples le long de la trace, en particulier l'acquisition de trois images lors d'un seul passage, dont une quasi-nadirale. Cette configuration "tri-stéréoscopique" permet donc de fournir trois images acquises avec des

points de vue différents, autorisant la reconstruction de la scène observée par des techniques classiques de stéréophotogrammétrie.

Plusieurs projets et études ont reçu le soutien du programme d'accompagnement ORFEO via la fourniture de données acquises en conditions tri-stéréoscopiques durant la Recette Thématique Utilisateurs, permettant d'étudier le potentiel des données sur une vaste palette de territoires et de thématiques.

## 2. Comparaison qualitative d'approches de génération MNS

### 2.1 Objectifs

Devant la variété des outils et approches possibles pour générer des MNS Pléiades, la présente étude a été

menée dans le but de qualifier le produit MNS à intégrer dans la base de données du projet KAL-Haïti (Durand et al., 2013). Le projet KAL-Haïti a pour but de construire une base de données recherche pour la gestion des risques et la reconstruction durable en Haïti (Gasc et al., 2012; Fontannaz et al., 2013).

Les images utilisées ont été acquises le 19 juillet 2012 à 15h34 UTC sur la capitale Haïtienne, Port-au-Prince, durement touchée par un séisme majeur le 12 janvier 2010. Quatre outils ont été utilisés pour générer un MNS, et les résultats ont été comparés à un relevé LiDAR. Notons que cette analyse n'a pas pour but de classer ou de comparer les différentes approches, mais plutôt de déterminer la qualité qui peut être attendue d'un MNS généré à partir d'images Pléiades avec les outils existants.

## 2.2 Chaines de traitement

Les solutions utilisées pour générer le MNS sur Port-au-Prince sont les suivantes :

- MicMac, un corrélateur multi-résolution sous licence libre développé au laboratoire MATIS de l'IGN (Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006).
- ORFEO ToolBox, un ensemble de composants algorithmiques dédiés au traitement d'image et qui comprend une chaîne complète de traitement stéréoscopique. L'OTB est développée par le CNES dans le contexte du programme d'accompagnement ORFEO, et distribuée sous licence libre.
- S2P, une chaîne de traitement libre développée par le CMLA (ENS Cachan), et dédiée à la génération de MNS à partir d'images Pléiades (De Franchis et al., 2014). La chaîne peut être opérée en ligne : [http://dev.ipol.im/~carlo/ipol\\_demo/workshop\\_s2p/](http://dev.ipol.im/~carlo/ipol_demo/workshop_s2p/)
- OrthoEngine, un composant de la suite logicielle Geomatica, développée par la société PCI Geomatics.

## 2.3 Référence terrain

Les MNS sont comparés à un relevé LiDAR acquis sur Port-au-Prince quelques jours après le séisme de 2010 (entre le 21 et le 23 janvier). Les points ont été mesurés avec une densité de 3 points/m<sup>2</sup> par un instrument Leica ALS-60 embarqué sur un avion Piper Navajo. L'écart quadratique moyen (EMQ) planimétrique est estimé à 0.47m et l'EMQ vertical est estimé à 0.039m (Hangerud, 2010). Le positionnement planimétrique est en dessous des standards habituellement atteints par le LiDAR, mais cela peut s'expliquer le contexte d'urgence des post-traitements (Hangerud, 2010). La mesure de premier écho est rastérisée à une taille de pixel de 1m, et est disponible au téléchargement sur le site IPLER du Rochester Institute of Technology.

## 2.4 Méthodologie

Pour les comparaisons, tous les MNS ont été considérés en tant que semis de points 3D. Pour les méthodes produisant des MNS rasters, ainsi que pour la référence LiDAR, une conversion a été réalisée. Afin d'assurer la cohérence planimétrique, les semis de

points ont ensuite été déplacés manuellement en estimant le biais moyen à partir de plusieurs points de contrôle. Pour les 4 méthodes, les comparaisons ont été réalisées avec le même code ad-hoc basé sur PCL (Point Cloud Library) et OTB.

## 2.5 Comparaison des altitudes de toits

L'objectif de cette expérimentation a pour but de déterminer la précision avec laquelle on peut estimer la hauteur d'un bâtiment. Dans ce but, 21 zones carrées de 5 par 5 mètres ont été délimitées sur le relevé LiDAR, en considérant des toits plats, en béton, invariants entre les deux acquisitions (voir figure 1). Pour chaque MNS, l'écart-moyen vertical au LiDAR et l'écart-type ont été calculés sur l'ensemble des points à l'intérieur de chaque zone considérée.

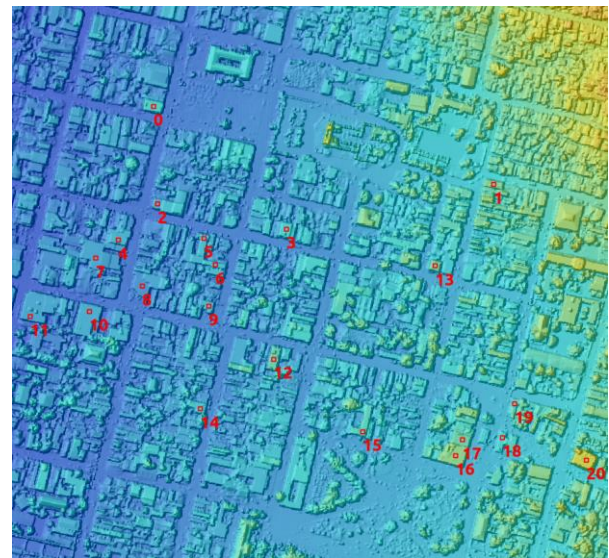


Figure 1 : 21 zones de 5mx5m sur des toits plats, identifiées sur le relevé LiDAR.

La figure 2 donne un aperçu des résultats. Pour chaque source d'altitude autre que le LiDAR, chaque point représente l'écart entre la moyenne des altitudes de la zone et la moyenne des altitudes du LiDAR. L'écart-type est aussi représenté. On peut noter que mis à part quelques cas aberrants, tous les écarts sont inférieurs à 2 mètres avec un écart-type inférieur à 1 mètre.

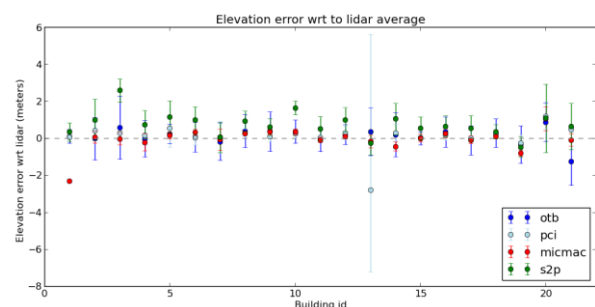


Figure 2 : Différence entre l'altitude estimée moyenne des 4 méthodes et les moyennes du relevé LiDAR.

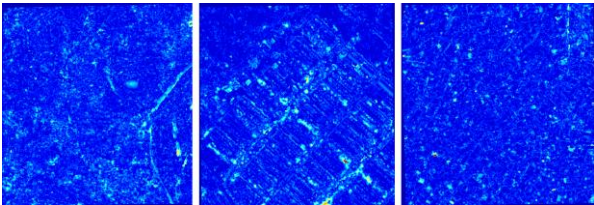
## 2.6 Estimation de la qualité des semis de points

Pour cette expérimentation, 3 zones d'intérêt de 1000 par 1000 pixels ont été choisies sur l'image Pléiades, chacune d'un type de paysage particulier : une zone rurale et montagneuse (zone 1), une zone plate couverte de bâtiments industriels (zone 2), une zone urbaine et vallonnée (zone 3).



**Figure 3 :** De gauche à droite : images Pléiades fusionnées pour les zone 1, 2 et 3.

Cette expérimentation a pour but de déterminer pour chaque zone les écarts entre les MNS et le relevé LiDAR. Pour chaque cellule de 1m x 1m, l'EMQ est calculée comme la distance quadratique moyenne depuis le point le plus proche de tous les points dans la cellule considérée.



**Figure 4 :** Résidus pour les zones générées avec MicMac, colorés de bleu (0 m) à rouge (10 m).

D'une manière générale, toutes les méthodes corréleront de manière satisfaisante, mais sont moins performantes sur l'une ou l'autre zone :

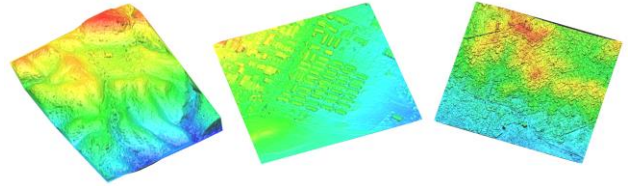
- OTB est moins performante sur la zone 1 ;
- les erreurs de MicMac et PCI semblent être localisées sur les contours ;
- S2P est moins performante sur la zone 2.

La figure 4 présente l'écart moyen et l'écart-type pour chaque zone et méthode. On peut voir que les résidus moyens pour chaque chaîne de traitement sont compris dans l'intervalle 0.9m-1.5m (excepté pour OTB sur la zone 1), ce qui est un très bon résultat. De plus, MicMac, OTB et S2P présentent des écarts-types sous 1.5m ; leur cohérence est satisfaisante. Cependant, avec des écarts-types supérieurs à 3.5m, les MNS générés avec OrthoEngine, qui apparaissent granuleux, semblent d'une qualité en deçà des MNS générés avec les autres chaînes.

## 2.7 Discussion des résultats

Comme un unique jeu de paramètre a été évalué pour chaque chaîne de traitement, une comparaison précise des performances de chaque méthode est en dehors du champ de cette étude. La nature de la sortie de chaque méthode peut aussi influencer les résultats, par

exemple, un semis de points 3D reconstruit à partir d'images multi-vues contient plus d'information que les données LiDAR (sur les façades d'immeuble par exemple), et peut donc présenter une erreur plus importante à certains endroits. Toutes les méthodes présentées ici donnent des résultats proches du LiDAR, chacune avec ses spécificités.



**Figure 5 :** MNS générés avec MicMac pour les 3 zones

D'autre part, les implémentations sont basées sur un sujet de recherche en constant développement, les chaînes de traitement sont donc susceptibles de produire des résultats plus robustes.

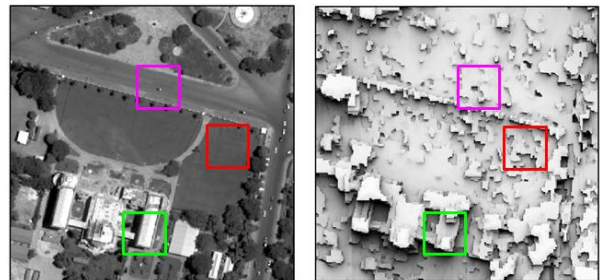
En raison des erreurs locales liées au processus de corrélation, des post-traitements avancés doivent être développés et appliqués pour obtenir un MNS parfaitement utilisable.

## 2.8 Pistes d'amélioration

Les problèmes affectant de manière visible le processus de corrélation sont principalement dus :

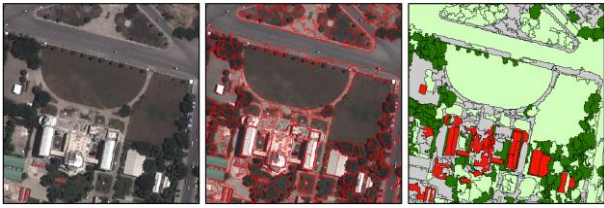
- Aux objets mouvants, tels que les véhicules ou la surface ondulée de l'eau. Entre deux acquisitions, le pixel homologue s'est déplacé, et donc la notion de parallaxe stéréoscopique n'a plus de sens.
- Aux textures homogènes où la recherche de l'homologue dans la fenêtre de corrélation est délicate : pelouses, ombres, eau calme.

Un autre problème bien connu est la dilatation des reliefs, due au phénomène d'adhérence où la recherche de l'homologue est fortement influencée par la présence de contours.



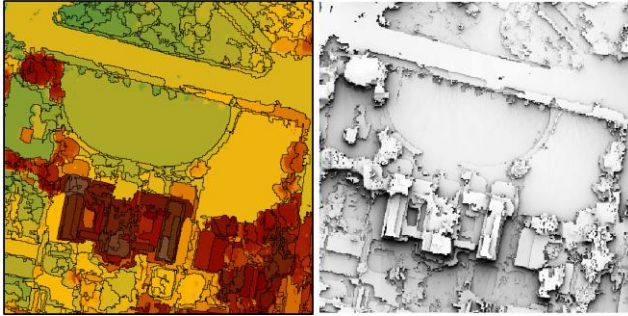
**Figure 6 :** Identification d'artefacts dans un MNS généré avec MicMac : en violet, objet mouvant; en rouge, texture homogène; En vert, dilatation d'un bâtiment.

Notre proposition pour corriger ces problèmes est de tirer parti de l'information sémantique présente dans l'image pour corriger le MNS, au moyen d'une approche orientée objet. Après une étape de segmentation et de classification, le MNS est ré-interpolé en considérant les pentes, grâce à la connaissance de la nature et de la forme des objets ; ceci à partir de l'information altimétrique extraite de manière globale sur le MNS pour chaque objet considéré.



**Figure 7 :** De gauche à droite : Image Pléiades fusionnée; Segmentation; Classification.

Les premiers tests encouragent à approfondir l'analyse et constituent un premier pas vers un processus orienté objet 3D de détection des changements.



**Figure 8 :** A gauche, MNS corrigé; A droite, ombrage du MNS corrigé.

### 3. Exemples d'applications thématiques

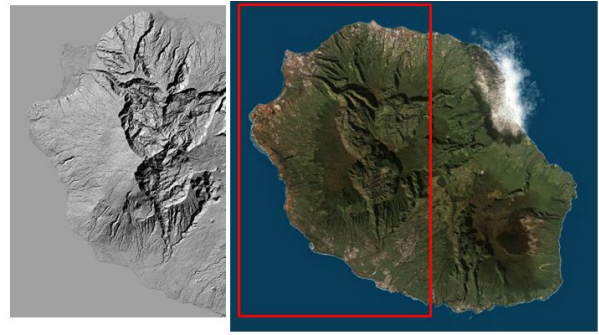
La très bonne qualité des MNS Pléiades ouvre le champ à de nombreuses applications thématiques. Quelques exemples d'utilisation dans des études en cours sont présentés ci-dessous.

#### 3.1 Suivi de la régénération du massif forestier du Maïdo

Dans le cadre des actions de cartographie rapide, le SERTIT a réalisé fin octobre 2011 le suivi de la progression des incendies pendant 6 jours, puis l'arrêt des feux de forêt qui se sont déclenchés sur les pentes du Piton du Maïdo au cœur du Parc National de la Réunion (PNR), inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO. Selon le bilan effectué par la préfecture, environ 2600 hectares de forêt ont été touchés par l'incendie. A l'issue de cette période de crise se pose la question de la résilience et du suivi de la régénération de la végétation.

Dans ce contexte, une étude est menée pour analyser la régénération de la forêt avec des séries d'images satellites multi-temporelles acquises entre 2005 et 2013. Ces séries sont composées d'images SPOT 4 et SPOT 5 issues de la base de données « KALIDEOS-Isle Réunion » et d'images Pléiades 1A et 1B acquises dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateur (RTU).

Un MNS très haute résolution (taille de pixel 0.5m) a été réalisé à partir de deux segments stéréoscopiques Pléiades, couvrant une superficie de 2000 km<sup>2</sup>.



**Figure 9 :** MNS Pléiades couvrant la partie ouest de l'île de la Réunion.

La finesse de ce MNS autorise des analyses approfondies sur la structure de la forêt en fournissant une information sur la hauteur et l'organisation de la canopée.



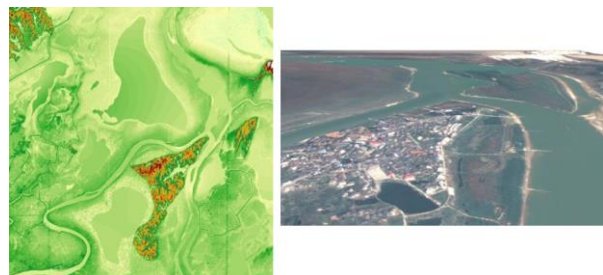
**Figure 10 :** De gauche à droite : Image Pléiades fusionnée; BD Alti (IGN); MNS Pléiades.

#### 3.2 Simulation des futurs produits SWOT

La mission franco-américaine SWOT (Surface Water Ocean Topographic), dont le lancement est prévu en 2019, a pour but la mesure des hauteurs d'eau, océaniques et continentales, par interférométrie radar. Avec une résolution spatiale comprise entre 50m et 100m et une revisite bi-mensuelle, la mission SWOT fournira une information topographique à la surface des océans et des eaux continentales d'une qualité jamais atteinte.

La préparation de la mission nécessite la simulation de produits altimétriques issus de données acquises par l'instrument KaRIN de la mission SWOT. La composante altimétrique en entrée du simulateur (CNES-JPL) est fournie par les MNS issus de traitement de paires interférométriques (TanDEM-X / TerraSAR-X) ou tri-stéréoscopiques Pléiades.

6 scènes Pléiades tri-stéréoscopiques ont été traitées par le SERTIT sur le bassin du Lac Poyang en Chine, l'un des sites test du projet TOSCA SWOT.



**Figure 11 :** MNS Pléiades sur le site de Wuchang

Les autres perspectives d'utilisation des MNS Pléiades en hydrologie sont :

- l'identification des chemins d'eau ;
- l'identification de barrières hydrauliques ;
- l'évaluation du volume de stockage de l'eau ;
- la modélisation d'évènements hydrologiques ;
- l'analyse du risque épidémiologie et des enjeux de la biodiversité.

### 3.4 Erosion des sols suite aux feux de forêt en zone méditerranéenne

La partie nord du bassin méditerranéen est particulièrement sensible aux feux de forêt, car la forêt représente plus de 30% de la superficie des pays concernés (France, Grèce Italie, Espagne, Portugal...). D'autre part, un climat tempéré avec parfois des périodes de fortes chaleurs encouragent l'apparition et la propagation de tels évènements.

Outres les dégâts sur la faune et la végétation parfois séculaire, l'érosion des sols dans la zone brûlée est un phénomène pouvant entraîner des conséquences catastrophiques : inondations, coulées de boues, glissements de terrain.

Le modèle RUSLE permet de modéliser la potentialité d'érosion d'un territoire à partir de données exogènes (précipitations, pédologie, relief, occupation du sol) (Foster & Wischmeier, 1974).

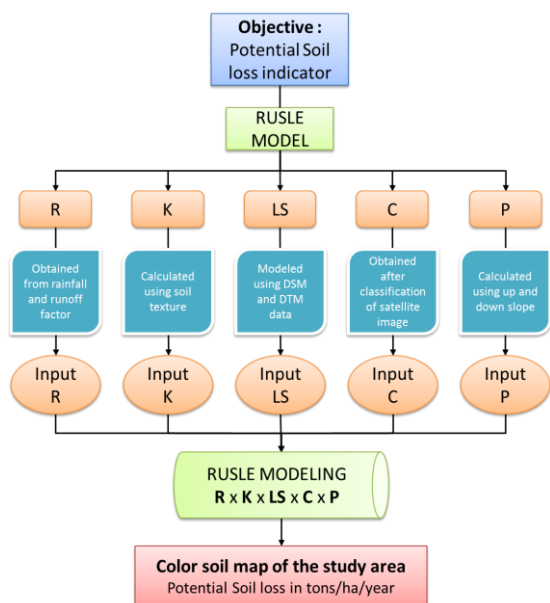


Figure 12 : Modèle d'érosion RUSLE.

Le modèle RUSLE est implémenté sur la zone Sartène - Figari dans le sud de la Corse. La composante L\*S du modèle est dérivée d'un MNS Pléiades réalisé à partir d'un couple d'images acquises par le satellite Pléiades 1B le 30 juin 2013. L\*S est dérivée d'un calcul d'accumulation de flux hydraulique provenant des pixels en amont, en combinaison avec un calcul de pente sur fenêtre glissante (Mitasova et al., 1996).

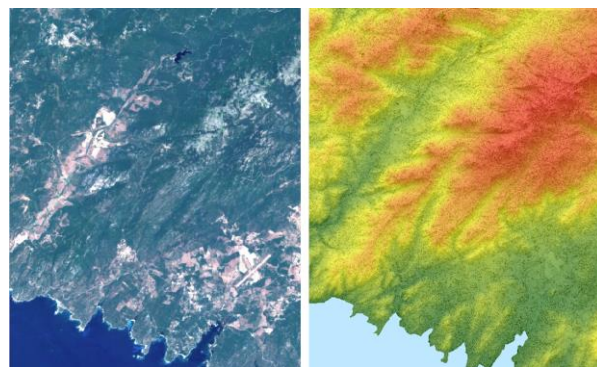


Figure 13 : Sur la zone Sartène - Figari, à gauche, image multispectrale Pléiades ; à droite, MNS Pléiades.

La composante R est obtenue à partir de données issues de relevés de stations météorologiques Météo-France, et la composante K est une information de texture de sol, dérivée des bases de données EUROSOILS du JRC (<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>). La composante C est calculée en dérivant l'indice normalisé de végétation depuis l'image Pléiades multispectrale. La composante P traduit l'impact des pratiques agricoles sur les pertes de sol, elle n'a pas été prise en considération sur notre site d'étude.

Un des atouts du modèle est de pouvoir être implémenté de manière simple et efficace à travers un SIG (Système d'Informations Géographiques). Les premières exploitations montrent que les données Pléiades sont particulièrement appropriées pour ce type d'étude, en raison de leur très bonne qualité altimétrique sur de larges emprises.

## 4. Conclusion

Les modèles numériques de terrain à échelle régionale (SPOT-5 HRS ou ALOS PRISM par exemple) couvrent une large emprise à une résolution métrique ou décimétrique. Les relevés LiDAR, très denses et précis, sont de couverture relativement réduite mais nécessitent le déploiement d'une logistique ad-hoc (acheminement d'un avion) potentiellement lourde. L'écart entre ces données est effectivement comblé par les produits Pléiades tri-stéréoscopiques, associant précision et large emprise, ouvrant des perspectives nouvelles aux utilisateurs finaux.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement toute l'équipe CNES RTU pour les données Pléiades (© CNES (2011, 2012, 2013), Distribution Airbus DS / Spot Image) et le soutien délivré dans le cadre du programme d'accompagnement ORFEO.

Les études présentées dans cet article ont reçu le soutien des projets suivants :

- Projet KAL-Haïti, financé par l'Agence Nationale de la Recherche sous l'accord de subvention n°2010 HAIT 008 01. <http://kal-haiti.kalimsat.eu>
- Programme TOSCA SWOT financé par le CNES. <http://smc.cnes.fr/SWOT>

- Projet PREFER, financé par le 7<sup>ème</sup> programme-cadre de la Commission Européenne (FP7-SPACE-2012) conformément à l'accord de subvention n°312931.  
<http://www.prefer-copernicus.eu/>

## Références

De Franchis C., Facciolo G., Meinhardt E., Michel J., Morel J.M., 2014. Pleiades Days 2014, 1st-3rd of April 2014, Toulouse, France.

Durand A., Michel J., De Franchis C., Allenbach B., Giros A., 2013. *Qualitative assessment of four DSM generation approaches using Pleiades data*. Proceedings of the 33th EARSeL symposium, Matera, Italy, 499-510.

Fontannaz D., Giros A., Allenbach B., 2013. *Potential of PLEIADES VHR imagery for risks management and sustainable reconstruction in Haiti: the KAL-HAITI research database example*. Proceedings of the 33th EARSeL symposium, Matera, Italy, 477-484.

Foster G.R., Wischmeier W.H., 1974. *Evaluating irregular slopes for soil loss prediction*. Transactions of ASAE 17(1):305-309.

Gasc M., Treinsoutrot D., Giros A., De Boissezon H., 2011. *KAL-Haïti : une base de données recherche pour la gestion des risques et la reconstruction durable en Haïti*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 197:119-121.

Haugerud R., 2010. *Consistency analysis of World Bank - ImageCat - RIT/Kucera Haiti earthquake LiDAR data*. <http://earthweb.ess.washington.edu/rah/haitilidar/> (last access: 19th of March 2014).

Kubik P., De Boissezon H., Tinel C., Michel J., Grizonnet M., 2012. *The Pleiades system: High resolution capability suited to users needs*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 200:28-35.

Mitasova H., Hofierka, J., Zlocha M., Iverson, L., 1996. *Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS*. International Journal of GIS, 10(5):629-641.

Pierrot-Deseilligny M., Paparoditis N., 2006. *A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery*. IAPRS, Vol. 36 (1/W41).