



Mémoire de Master 2 – Sciences de la Terre
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre / Université de Strasbourg

Potentialités de l'imagerie optique Pléiades pour la surveillance de glissements de terrain.

Application aux glissements de Super-Sauze et La Valette dans
(Bassin de Barcelonnette, Alpes du Sud, France)

Myriam JORY

Encadrants : Jean-Philippe MALET & André STUMPF

Etude réalisée dans le cadre du
Programme de Validation Pléiades



Résumé

Cette étude a pour objectif de tester les potentialités des images optiques à très haute résolution spatiale acquises par le satellite Pléiades en orbite depuis décembre 2011. Le but est de valider l'utilisation de ces images pour le suivi des déformations de surface. Notre étude s'applique à l'observation et la mesure du déplacement des glissements de terrain de La Valette et Super-Sauze dans le bassin de Barcelonnette dans le Sud des Alpes françaises. Pour réaliser cette étude nous avons à notre disposition une image monoscopique et un couple stéréoscopique acquis en août et octobre 2012, respectivement. Avec la stéréophotogrammétrie, l'orthorectification, puis la corrélation sub-pixel des images, il est possible de quantifier le déplacement en surface entre août et octobre 2012. Différents programmes, libres et commerciales, ont été testés et la précision de la mesure du taux de déplacement obtenue a été comparée avec celles résultant de LiDAR terrestre et de GPS différentiel.

Mots clés : Photogrammétrie, Satellite Pléiades, Corrélation sub-pixel d'images, Champs de déplacement, Glissements de terrain.

Abstract

This study is part of a program of the CNES (Centre National pour l'Etude Spatiale), aiming at the development of enhanced image analysis techniques for the exploitation of very-high resolution (VHR) optical images recorded with the Pléiades satellite constellation. The aim is to validate the utilization of those images for the observation of objects on the surface of the Earth. Our study targeted the observation and measurement of the displacement of the La Valette and Super-Sauze landslides in the basin of Barcelonnette in the South of the french Alps. In order to realize this study we had at our disposition a monoscopic image and a stereoscopic pair recorded in August and October 2012, respectively. Combining stereo-photogrammetry, orthorectification and sub-pixel image correlation it was possible to quantify the surface displacement between August and October 2012. Different Open Source and commercial software environments were tested and the accuracy of measured displacement rates was assessed through comparison with measurement resulting from differential GPS and LiDAR.

Keywords: Photogrammetry, Pléiades satellite, Sub-pixel image correlation, Displacement field, Landslides.

Sommaire

Introduction.....	p4
I. État de l'art : photogrammétrie et corrélation pour caractériser les déplacements de surface.....	p6
II. Méthodologie.....	p8
A. L'imagerie par télédétection spatiale	p8
1. Principe et caractéristiques.....	p8
2. La chaîne de traitement.....	p9
B. Le LiDAR terrestre	p10
1. Principe et caractéristiques.....	p10
2. La chaîne de traitement.....	p12
III. Présentation des sites d'étude	p14
A. Contexte des sites	p14
B. Caractéristiques des données	p16
IV. Résultats et discussions	p19
A. Résultats du traitement des images Pléiades.....	p19
1. Avec l'Orfeo ToolBox.....	p20
2. Avec ENVI.....	p25
3. Avec Erdas Imagine.....	p32
B. Résultats de la corrélation.....	p36
1. Avec les images Pléiades.....	p36
2. Avec le LiDAR terrestre.....	p41
3. Comparaison avec les données du GPS différentiel.....	p48
C. Discussions.....	p51
Conclusion.....	p54
Bibliographie	p55
Remerciements.....	p57

ANNEXES

Introduction

Cette étude se place au sein d'un programme du CNES (Centre National d'Étude Spatiale) qui a pour objectif la recherche dans le domaine du traitement des images spatiales et leur analyse appliquée à la définition des projets d'Observation de la Terre. Elle est dans la continuité du programme ORFEO avec le lancement réussi des satellites Pléiades 1A le 17 décembre 2011 et Pléiades 1B le 2 décembre 2012. Elle correspond à la première année de vie de la constellation et a pour objectifs principaux : de tester les données et les capacités du système Pléiades (résolution, agilité, stéréoscopie, tri-stéréoscopie), de valider les produits et services définis et testés dans le cadre des études thématiques ORFEO (phase précédente du programme), d'évaluer les algorithmes et outils développés via le volet méthodologique. Dans cette présente étude nous avons appliqué ces objectifs à l'observation de glissements de terrain.

Les glissements de terrain sont les risques naturels les plus répandus que ce soit à l'échelle temporelle ou spatiale. Bien que moins médiatique que les autres catastrophes naturelles tels que les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques, les glissements de terrains sont un risque bien présent et non négligeable comme le montre le glissement du plateau d'Assy en 1970 qui fit 71 morts en Haute-Savoie, ou encore celui de la Salle-en-Beaumont en Isère de 1994 qui fit quatre victimes. Mais bien d'autres glissements meurtriers sont recensés chaque année de par le monde d'où l'importance de l'évaluation et de la surveillance du risque (aléa de l'événement et vulnérabilité du site) lié aux glissements de terrain, également appelé risque gravitaire. De plus ils peuvent avoir plusieurs facteurs de déclenchement, tels que la fonte de glaciers, de fortes pluies ou encore un tremblement de terre et donc être associés à d'autres phénomènes (avalanches, inondations, séismes...).

Il existe plusieurs types de glissements, avec notamment les glissements-coulée très fréquents sur les zones montagneuses en terrain peu consolidé et faiblement végétalisé (Delacourt et al., 2004, Traveletti 2011 et Traveletti et al., 2012). Ils ont lieu là où les fortes pentes sont associées à du ruissellement causé par la fonte des neiges et glaciers et/ou aux pluies torrentielles. L'association de ces facteurs crée ainsi un aléa gravitaire très important. Le terrain avec ses gros blocs, arbres,... est emporté par le ruissellement et forme une coulée ou même une coulée boueuse. Les glissements ont également des cinématiques différentes. Dans le cas de glissements qui menacent des infrastructures et lotissements, un contrôle continu du glissement pour surveiller l'évolution de l'aléa est mis en place. De plus lorsque ce glissement est lent cela permet d'avoir des données sur de longues périodes et constitue donc un sujet idéal pour la recherche.

L'évaluation des risques, associée à la compréhension scientifique des processus géomorphologiques, requiert des observations précises de la réponse du versant aux forçages (taux de déplacement, changements des caractéristiques de surface et sub-surface, morphologie, état de surface) et des variables de contrôle d'origine hydro-météorologique et

sismique notamment. Les changements du taux de déplacement et des caractéristiques de surface en particulier, sont souvent des indicateurs précédant des ruptures catastrophiques et fournissent un précieux aperçu du comportement mécanique du glissement de terrain. Cependant les observations correspondantes comprennent un travail sur le terrain intensif qui peuvent ne pas être effectuées avec la fréquence temporelle souhaitée et/ou avec les installations de mesure in-situ éloignées des zones montagneuses.

C'est pour cela que, ces dernières années, des techniques de mesure des déplacements par télédétection (spatiale, aéroportée et terrestre) ont été progressivement adaptées aux caractéristiques des glissements de terrain (Delacourt et al., 2007). Parmi ces dernières, la photogrammétrie et plus particulièrement l'utilisation d'images stéréoscopiques, permettent de caractériser de manière fine des champs de déplacement distribués. Cette méthode est relativement peu coûteuse et a l'avantage de pouvoir couvrir une large zone, ainsi que d'obtenir une information continue de la déformation et non localisée en quelques points. Cela est fort pratique pour avoir une vision d'ensemble de l'évolution de la déformation, et notamment pour avoir un champ de déplacement sur toute la zone. De plus avec l'augmentation de la résolution spatiale des systèmes de télédétection, il devient également possible de détecter de subtiles surfaces de rupture. Elles servent d'indicateurs mécaniques qui aident à localiser les zones à risques potentiels et à contrôler l'efficacité de la réduction des mesures.

L'utilisation de la photogrammétrie a déjà été appliquée avec succès pour la caractérisation de la déformation et du champ de déplacement sur les glissements de terrain (Bitteli et al. 2004, Cardenal et al., 2008, Casson 2004, Delacourt et al., 2004, Delacourt et al., 2007, Ligua et al., 2008, Traveletti 2011 et Traveletti et al., 2012). Le moteur de ce stage est donc de valider l'emploi de la photogrammétrie pour le contrôle de glissements de terrain lents, avec pour objectif d'acquérir un modèle numérique de surface pour caractériser la déformation et obtenir un champ de déplacements par corrélation d'images multi-temporelles. Pour ce faire des images de 2012 à très haute résolution du nouveau satellite Pléiades du CNES ont été utilisées. Les images Pléiades permettent-elles d'appliquer la photogrammétrie et la corrélation avec succès pour caractériser les déformations de surface sur un glissement lent ? Telle est la problématique de ce sujet : valider cette nouvelle source de données pour l'application au contrôle de glissement de terrain. Pour cela les résultats obtenus seront comparés avec ceux acquis à l'aide de données LiDAR (Light Detection and ranging) et GPS différentiel (dGPS), plus usuelles et validées maintes fois.

L'étude a été effectuée sur deux sites : les glissements de La Valette et Super-Sauze dans le bassin de Barcelonnette (Sud des Alpes françaises) pour lesquels des données de déplacements mesurées au sol (LiDAR terrestre, GPS permanent) sont disponibles.

Partie I : État de l'art : photogrammétrie et corrélation pour caractériser les déplacements de surface

La photogrammétrie (acquisition d'image optique) est une méthode ancienne, mais qui s'est énormément développée depuis quelques années, notamment grâce aux progrès techniques constants qui permettent d'obtenir des données de qualité et de précision accrue, multipliant ainsi les domaines d'application et notamment les glissements de terrain (Cardenal et al. 2008, Casson 2004, Fernandez et al. 2008, Ligua et al. 2008). L'important développement de la photogrammétrie est dû aussi à ses nombreux avantages, notamment son coût relativement peu élevé et sa couverture spatiale large et continue qui permet d'obtenir un bon modèle numérique de terrain. De plus ces dernières années ont vu le lancement de nouveaux satellites à très haute résolution (inférieure à 1 m), permettant l'étude à plus petite échelle. Et plus récemment encore, grâce au capteur agile du satellite optique très haute résolution (VHR) qui permet de changer rapidement l'angle de vue du capteur, des images stéréoscopiques voire tristéréoscopiques peuvent être acquises instantanément lors du même passage à orbite. Ces satellites, construits autour d'un télescope central, sont dotés de capacités de manœuvre exceptionnelles du fait de la position de leur centre de gravité C'est le cas des satellites tels que IKONOS (janvier 2000, résolution 0,8 m), QuickBird (octobre 2001, résolution 0,6 m) (Zhang et Fraser 2008), mais aussi WorldView-1 (septembre 2007, résolution 0,5 m), WorldView-2 (octobre 2009, résolution 0,5 m), Geoeye-1 (septembre 2008, résolution 0,4 m) et maintenant Pléiades (décembre 2011, résolution 0,7 à 0,5 m).

La photogrammétrie a également l'énorme avantage, lorsque des données multi-temporelles ont été acquises, de pouvoir faire de la corrélation entre les différentes images et donc de pouvoir étudier le déplacement. Généralement le contrôle des déplacements se fait par géodésie et mesure de l'extension sur des stations de référence, permettant ainsi d'avoir une information discrète (localisée en un point) sur le champ de déplacement. Or avec la photogrammétrie on peut avoir une information continue sur tout le champ de déplacement. Et avec la nouvelle génération de satellites à très haute résolution, l'augmentation de la qualité et de la précision des images de télédétection permet d'analyser des objets de plus en plus petits. Par ailleurs la corrélation détecte des taux de déplacement de plus en plus faibles. Cela est idéal pour le contrôle des objets qui ont un champ de déplacement hétérogène comme les glissements de terrain (Delacourt et al. 2004), mais également pour le déplacement cosmique, le flux glaciaire, la déformation en zones volcaniques, ou encore la migration des dunes.

Le développement de la photogrammétrie a donc été suivi récemment de la mise en place de techniques d'analyses d'images semi-automatiques pour détecter de subtiles déformations de surface. Un certain nombre d'avancées ont été réalisées par l'amélioration des algorithmes pour la corrélation (Leprince et al. 2007), l'interpolation et la détermination de la localisation des points correspondants dans les deux images avec une précision sub-

pixel. La précision théorique des mesures peut donc être comprise entre 1/16 ou 1/20 d'un pixel, mais en pratique elle est plutôt de 1/5 à cause du bruit mesuré qui pollue la mesure du déplacement réel. Parmi plusieurs méthodes de cross-corrélation disponibles, l'orientation des images et l'expertise basée sur l'estimation du changement de phase dans le domaine de Fourier (Leprince et al., 2007) fonctionnent généralement mieux que les autres techniques. Cependant la précision actuelle des mesures dépend de beaucoup de facteurs tels que la résolution spatiale et temporelle de l'imagerie disponible, la magnitude et la cohérence du déplacement, la précision du modèle numérique d'élévation sous-jacent (MNT/DEM), et également nos propres co-enregistrements et images multi-temporelles.

Avec la mise en place des satellites à très haute résolution, des images avec une précision sub-métrique sont devenues plus nombreuses et accessibles. D'autre part le développement de techniques d'analyses semi-automatiques permet d'effectuer une évaluation de leurs capacités à créer un bon modèle numérique de surface (Aguiaro et al. 2012, Zhang et Fraser 2008), ainsi que leurs capacités à contrôler les déplacements horizontaux et verticaux. La validation se fait par la comparaison avec des données déjà éprouvées tel que le SAR (Synthétique Aperture Radar) (Squarzoni 2002), le LiDAR (Ligth Detection And Ranging) (Bitteli et al. 2004, Ligua et al. 2008) ou du GPS différentiel (Malet et al 2002).

A ce jour, la corrélation d'images par télédétection spatiale a été testée et validée pour le contrôle des flux glaciaires (Heid et Cääb 2012, Haug et al. 2010), la mesure du déplacement co-sismique, la déformation en zones volcaniques, la migration des dunes, la surveillance côtière et le déplacement des surfaces de glissements de terrain (Delacourt et al. 2004).

Partie II : Méthodologie

La corrélation d'images optiques multi-temporelles permet de mesurer des déformations sur l'intervalle de temps entre les deux images en calculant l'écart de chaque pixel de l'image finale par rapport à l'initiale. C'est une méthode rapide et précise, qui permet de mesurer des déplacements sub-pixelliques (Leprince et al. 2007), jusqu'à 1/5 de pixel avec les images spatiales. Concrètement avec la très haute résolution (inférieure ou égale à 1 m), la détection du déplacement entre deux images est de 0,1 m voire moins. Mais elle comporte aussi ses limites. En effet, si le déplacement entre les deux images est trop grand la corrélation n'est plus possible car on a une perte de cohérence entre les deux images qui sont devenues trop différentes. Inversement si le déplacement est plus petit que la résolution des images, le mouvement n'est pas détecté.

La corrélation d'images multi-temporelles est donc une très bonne méthode pour la détection de déplacements modérés mais elle nécessite préalablement un traitement des images brutes. Pour pouvoir corréler deux images il faut qu'elles soient exactement de même géométrie, (pas de distorsion entre les deux), qu'elles aient rigoureusement le même géoréférencement (pas de décalage entre deux mêmes points stables) et qu'elles délimitent exactement la même zone (mêmes coordonnées du coin supérieur gauche et inférieur droit entre les deux images). Elles doivent également avoir la même résolution. Il est aussi important que les conditions climatiques et la position du soleil soient les mêmes entre deux images optiques que l'on souhaite corréler. Sinon des objets stables peuvent avoir un déplacement apparent à cause du changement de la taille et de la direction des ombres. Le traitement initial des images est très important, la précision de la corrélation en dépend ! Il dépend aussi du type de données optiques utilisé.

A. L'imagerie par télédétection spatiale

1) Principe et caractéristiques

Les images par télédétection spatiale permettent d'obtenir facilement des images optiques couvrant de larges zones, et avec une revisite régulière, mettant ainsi à disposition plusieurs images multi-temporelles d'un site. De plus avec la nouvelle génération de satellites à capteur agile qui permet de changer l'angle de prise de vue de la caméra, il est possible d'obtenir des images stéréoscopiques voire tri-stéréoscopiques lors d'une même acquisition et avec le même instrument.

Mais les images par télédétection spatiale contiennent des distorsions géométriques et radiométriques plus ou moins importantes en fonction du satellite, son type de capteur, sa position lors de l'acquisition, de l'angle de prise de vue, ou encore du relief de la zone. En

effet l'espace de l'image et l'espace réel sont différents, c'est le modèle du capteur du satellite qui relie les deux. De plus dans le cas de capteur agile tel que Pléiades, le modèle du capteur (RPF « Rational Polynomial Fonction » défini par 80 RPC « Rational Polinomial Coefficients ») a besoin d'être affiné puisque des biais dans le géopositionnement ont été introduits à cause de l'éphéméride du satellite (erreurs dans le calcul de sa position) (Zhang et Fraser 2008).

2) Chaîne de traitements

A cause des distorsions de terrain dues à la topographie et aux paramètres de prise de vue, les images ne sont donc pas utilisables telles quelles. Il faut préalablement les corriger, notamment grâce à un modèle numérique de surface. La figure 1 ci-dessous résume les grandes étapes du traitement des images optiques par télédétection spatiale.



Figure 1 : Organigramme de synthèse des étapes du traitement des images par télédétection spatiale.

La correspondance entre les deux espaces (image et terrain réel) s'effectue généralement à l'aide de points homologues (ou « tie points ») et de modèles d'anamorphoses analytiques. La sélection de points homologues peut être faite automatiquement avec les logiciels de traitement d'images par télédétection. Elle se fait grâce à une recherche bidimensionnelle entre les images qui repère par petites fenêtres (dont on peut définir la taille et le pas) les points de même intensité (même gradient de couleur de l'objet) (Geurin et al. 2012). Lorsque la précision du modèle du capteur (RPF) n'est pas suffisante et qu'il a besoin d'être affiné, on ajoute des points de contrôle sur le terrain (GCPs, Ground Point Control) dont la stabilité et les coordonnées sont sûres. Typiquement des points GPS ou alors des points LiDAR ALS bien géoréférencés. Ils permettent de corriger le géoréférencement de l'image satellite. Cette étape est d'autant plus nécessaire sur des images prises avec un capteur très mobile dit flottant telles que les images Pléiades (augmentant les biais liés aux éphémérides du satellite) et à très haute résolution.

Une fois les GCPs et points homologues acquis, la correction des distorsions géométriques et radiométriques nécessite un bon modèle numérique de terrain, parfaitement référencé et d'une résolution pas trop éloignée de celle des images à rectifier. Si l'on dispose d'un couple stéréoscopique ce MNT peut être extrait directement à partir de ces deux images. La différence de l'angle de prise de vue entre les deux images permet de déduire le relief de la zone. C'est le même principe qui nous permet de voir un objet en trois dimensions grâce à la

différence d'angle de vue de nos yeux sur l'objet.

L'extraction d'un MNT à partir d'un couple stéréoscopique nécessite l'acquisition de points de contrôle localisés sur les deux images et l'extraction de points homologues qui permet la mise en correspondance par corrélation entre les deux images. Le principe est d'extraire le relief grâce aux déplacement apparent (parallaxe) entre les deux images stéréoscopiques (Casson 2004). Pour ce faire, une formule reliant la hauteur de l'objet à la parallaxe mesurée sur le couple stéréoscopique (écart de la position du point entre les deux images) est appliquée.

La plupart des logiciels de traitements (OTB, ENVI) déduisent la valeur Z en référence à l'ellipsoïde en ré-assemblant l'image en géométrie épi-polaire. C'est à dire en projetant l'image le long de la ligne de visée de la seconde image et inversement (voir figure 2). La mise en correspondance est très sensible aux erreurs de modélisation de la prise de vue. Ainsi, une erreur dans le modèle de l'une des images engendre un décalage des vignettes qui réduit la corrélation et donc le pouvoir discriminant de l'indice de similarité. D'où l'importance d'affiner le modèle capteur grâce aux GCPs.

Une erreur de géométrie peut donc induire des erreurs altimétriques importantes (Geurin et al. 2012). La coordonnée Z est ensuite calculée par triangulation à partir des paires de points homologues. Cette méthode est la plus répandue mais son gros inconvénient est qu'elle n'admet pas d'erreur dans le modèle affiné de prise de vue, or cette erreur peut être conséquente pour certains capteurs. Est-ce le cas pour le capteur Pléiades ? Nous répondrons à cette question dans la partie IV. Au final la précision altimétrique dépend de la résolution des images et du rapport B/H du couple stéréoscopique (B la distance entre les deux prises de vues et H l'altitude moyenne du satellite).

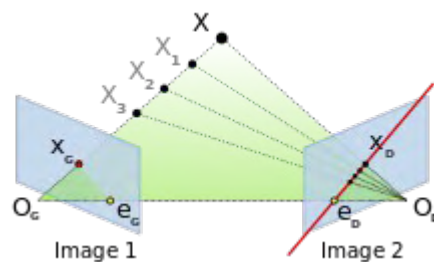


Figure 2 : Schéma de la projection en géométrie épi-polaire

Une fois le MNT parfaitement géoréférencé (plus de distorsion et d'erreur de géolocalisation) ainsi que les GCPs en notre possession, on peut commencer la correction de nos images que l'on appelle orthorectification. Comme son nom l'indique les effets d'angles de prises de vues sont rectifiés et l'image est redéfinie comme prise parfaitement à la verticale du site. Pour ce faire l'image est ré-interpolée dans la bonne géométrie en se basant sur le MNT, d'où l'importance d'acquérir un bon modèle numérique de terrain. Trois méthodes d'interpolation sont communément proposées par les logiciels de traitement d'images par

télédétection : par plus proche voisin, linéaire et bi-cubique. La méthode linéaire est utilisée par défaut.

Ce n'est qu'une fois nos images orthorectifiées donc parfaitement géoréférencées et corrigées des distorsions initiales de l'image, que la corrélation peut commencer. En effet les images orthorectifiées doivent parfaitement se superposer entre elles pour permettre la corrélation, ce qui n'est pas le cas des images avant traitement.

B. Le LiDAR

1) Principes et caractéristiques.

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est un outil qui grâce à un laser de longueur d'onde et vitesse connue (celle de la lumière dans l'air), mesure la distance entre la source et le point de réflexion sur la surface à une précision quasi millimétrique. On obtient donc une localisation en x, y, z pour chaque point de réflexion et donc un nuage de points. La localisation est relative à la source du laser mais un GPS intégré au LiDAR permet de connaître la position exacte de la source du laser et donc d'obtenir la localisation absolue des points. Lors de l'acquisition on définit une fenêtre de prise de mesures et un angle d'échantillonnage qui, en fonction de la distance à l'objet, détermine la densité de point sur sa surface. Il existe deux types d'imagerie LiDAR, le terrestre et l'aéroporté (voir figure 3).

Le LiDAR aérien (ALS Aerial Laser Scanner) s'effectue à bord d'un hélicoptère qui permet de rester en position géostationnaire. Il permet d'obtenir une densité de points entre 0,1 et 10 points par m² (d'après Travelletti 2011). L'inconvénient de l'aérien (hors coût de l'hélicoptère) est qu'à cause du retard du temps de parcours du signal en fonction des conditions atmosphériques (vapeur d'eau) des artefacts peuvent être observés. La précision des mesures dépend donc des conditions atmosphériques, mais aussi de la couverture satellitaire GPS lors de l'acquisition et de la précision de la centrale inertielle (voir figure 3). En tenant compte des sources d'erreurs la précision globale varie généralement entre 5 et 15 cm. Mais l'avantage de l'aérien c'est que plusieurs longueurs d'onde sont disponibles (de 800 à 1550 nm avec une fréquence de 2 à 300 kHz), on peut donc jouer sur la longueur d'onde du laser en fonction de l'objet que l'on veut détecter (sol, végétation, ...).

Pour le LiDAR terrestre (ou TLS terrestrial laser scanning) comme la distance à parcourir par le laser est relativement courte, il n'y a pas besoin d'appliquer de correction due au retard du temps de parcours, on est juste contraint par la météo comme pour l'aérien (pas d'acquisition lorsqu'il pleut ou que le taux d'humidité est trop élevé). De plus malgré que la couverture soit moins homogène (effet des prises de vue obliques qui crée une différence de densité sur la surface entre la partie la plus proche de la source et celle la plus éloigné) sa précision est meilleure. Elle est de 1 à 3 cm et la densité peut atteindre de 200 points par m²

(d'après Travelletti 2011). En revanche le défaut du TLS est que seule une longueur d'onde est utilisée par tous les appareils et elle ne permet pas de passer à travers la végétation. Il faudra donc par la suite nettoyer les nuages de points des points des réflexions dus à la végétation mais aussi de tout autre objet qui n'est pas le sol.

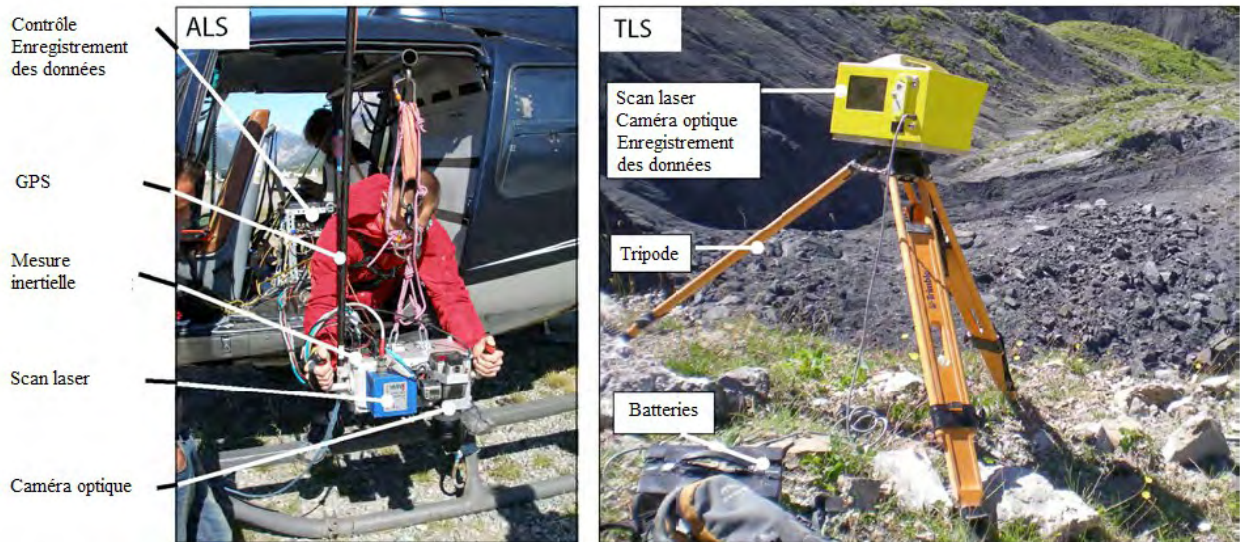


Figure 3 : Photos des appareils d'acquisition LiDAR (d'après Travelletti 2011).

ALS : aéroporté (Aerial Laser Scan).

TLS : terrestre (Terrestrial Laser Scan) (d'après Travelletti 2011).

Il est également important de noter pour la précision et la qualité du LiDAR, la réflectivité du matériau qui affecte aussi la portée maximum du laser en influant sur l'intensité du signal de retour (Travelletti 2011). Par exemple pour les surfaces d'ombres une majeure partie de l'énergie est absorbée par le matériau, par conséquent le rapport signal sur bruit est faible. Au contraire si la réflectivité de la surface est trop importante (cas des flaques d'eau et plaques de neige par exemple), l'énergie réfléchiée peut dépasser la capacité maximale du capteur. Cette saturation se traduit par une traînée de points devant ou derrière la surface de l'objet scanné et la taille de l'objet peut également paraître plus importante (« blooming effect »).

2) Chaîne de traitements.

Les nuages de points bruts acquis ont besoin d'être traités pour obtenir des surfaces aptes à être corrélées. La figure 4 ci-dessous résume les principales étapes du traitement.



Figure 4 : Organigramme de synthèse des étapes du traitement des données LiDAR

Le traitement du LiDAR commence par un nettoyage du nuage de points, des points de réflexions dus à la végétation, mais aussi tout autre objet qui n'est pas du sol et également des surfaces trop réfléchissantes telle que les flaques d'eau et les plaques de neige. Le nettoyage peut s'effectuer à l'aide du logiciel Polyworks (voir annexe 5). Il faut ensuite aligner le nuage de points dans le même système de coordonnées que celui de référence puis géoréférencer le nuage de points. Pour ce faire deux méthodes sont possibles : par des points de contrôle sur les nuages, ou plus facilement grâce à un autre nuage de points de la zone déjà géoréférencée (généralement un nuage de points ALS). Dans ce deuxième cas, toujours avec le logiciel Polyworks, on commence par recaler manuellement le nuage de points à géoréférencer sur celui de référence en superposant les zones stables. Ensuite grâce à un outil du logiciel on détermine les zones à plus forte densité de points homologues. Ceux-ci sont sélectionnés pour servir de base à l'affinement du géoréférencement.

Le LiDAR permet donc d'obtenir un nuage de points assez dense et très bien localisé (au millimètre près) mais qui comme son nom l'indique n'est pas une surface. Il va donc falloir créer une surface en interpolant le nuage de points, c'est à dire calculer les données absentes entre chaque points. La qualité de la surface obtenue dépend de la densité et de l'homogénéité initiale du nuage de points, mais aussi de la méthode et du choix du pas d'interpolation (résolution).

Les méthodes d'interpolation spatiale peuvent se répartir en deux groupes :

- les déterministes, basées sur des algorithmes,
- les géostatistiques, qui s'appuient sur une modélisation probabiliste de l'objet.

Dans notre étude nous avons testé une méthode déterministe rapide par voisin naturel, qui attribue les valeurs en fonction de celle du voisinage immédiat et en appliquant un lissage de la surface résultante. Nous avons également appliqué le krigeage, méthode géostatistique longue mais de très bonne qualité. Elle repose sur des modèles statistiques qui comprennent l'auto-corrélation (relation statistique parmi les points mesurés), et permet donc de produire une surface de prévision et même de fournir des mesures quant à l'exactitude de ces prévisions. L'interpolation peut être faite sous Polyworks, mais d'autres logiciels proposent des méthodes d'interpolation comme Surfer ou ArcMap (voir annexe 5). Nous avons choisi Surfer car il est plus optimisé pour l'interpolation qu'ArcMap et dispose d'un plus large choix de méthodes. De plus la méthode kriging n'a pas fonctionné sous ArcMap.

Une fois la surface créée, un ombrage peut être effectué pour faire ressortir les structures. Le choix de l'azimut et de l'élévation de la source lumineuse dépendra de la configuration de la zone (relief) et de l'orientation des structures principales qui sont généralement les fractures en extension à la surface du glissement. L'ombrage a été effectué avec ArcMap qui permet aussi de définir le système de projection et de convertir en un large choix de format. Il permet également d'extraire des zones rigoureusement identiques entre les différentes images multi-temporelles, ce qui est nécessaire pour la corrélation. Une fois que cette chaîne de traitements est effectuée, les images sont prêtes à être corrélées avec cosi-corr.

Partie III : Présentation du site d'étude

A. Contexte général du site

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de glissements de terrain par corrélation d'images multi-temporelle de télédétection spatiale Pléiades à très haute résolution est appliquée aux glissements de La Valette et de Super-Sauze dans la vallée de l'Ubaye, située dans le bassin de Barcelonnette au sud des Alpes française (Alpes-de-Haute-Provence, France). Cette zone d'étude a été choisie en raison de son risque élevé associé aux glissements de terrain typiques des régions montagneuses, avec plusieurs glissements actifs référencés suivis depuis de nombreuses années, comme ceux de La Valette, initié en 1982 sur le versant Adret, Super-Sauze, déclenché entre 1956 et 1971 et Poche (début au 19^{ème} siècle), sur le versant Ubac (Malet 2003, Travelletti 2006).

Les glissements de La Valette et de Super-Sauze (voir figure 5) sont deux très bon exemples de glissements coulées lents. Ils sont mis en place dans des terrains meubles et peu consolidés que sont les marnes à faciès schisteux du Callovo-oxfordien dites « terres noires ». Ces glissements présentent plusieurs particularités qui en font de très bons sites d'étude. De par leurs risques élevés ils sont suivis depuis plusieurs années par l'OMIV (Observatoire des Mouvements et Instabilités de Versants) qui en offre une description détaillée.

Le glissement de La Valette fait plus de deux kilomètres de long sur 200 m de large (jusqu'à 500 m en amont à l'escarpement) de 2000 m à 1320 m d'altitude avec une pente moyenne de 20°. Il mobilise plus de $3,5 \cdot 10^6$ m³ de matériel, ce qui en fait le plus important glissement de France. C'est un glissement lent avec une vitesse moyenne de un à deux mètres par an (voir la figure 6A illustrant le champs de vitesses) mais qui peut devenir bien plus rapide, notamment lors de périodes à fortes précipitations, comme par exemple en avril 1989 avec des pics de déplacement de 40 cm par jour ! Le glissement est particulièrement bien surveillé, car il menace directement la commune de Saint-Pons mais aussi celle de Barcelonnette en contre bas. Il a fait l'objet de plusieurs mesures visant à réduire les risques notamment une végétalisation et un drainage régulier du sol pour réduire les risques dûs à la faible cohésion du sol mais aussi une déviation du cours d'eau de La Valette en aval pour forcer le glissement qui suit son lit à contourner Barcelonnette.

Le glissement de Super-Sauze suit lui aussi le lit d'un cours d'eau du même nom. Il fait 900 m de long sur 135 m de large de 2105 m à 1740 m d'altitude avec une pente moyenne de 25°. Il mobilise un volume de 750000 m³ avec une vitesse moyenne de 0,01 à 0,4 m par jour (voir figure 6B) mais peut subir de fortes accélérations comme en mai 1999 avec 2,1 m en trois semaines (Malet et al. 2002). Il est isolé (pas d'anthropisation) et pas végétalisé (sauf au bas du pied). Cela en fait un objet d'étude vierge, idéal pour l'observation et la recherche scientifique sur les glissements. Son absence de végétation est également un avantage pour l'étude à l'aide de la photogrammétrie. Du point de vue géomorphologique on peut découper

les glissements-coulée en 3 zones. Tout d'abord la zone d'escarpement (ou d'ablation) qui initie le glissement, caractérisée par une succession de glissements rotationnels pour La Valette et plutôt du glissement planaire et des éboulements pour Super-Sauze. Les fractures observables en haut de l'escarpement marquent donc les futures zones de détachement et annoncent l'éminence d'un nouveau glissement. Ensuite, nous avons la zone de transition formant le glissement-coulée proprement dit, marquée par un déplacement important en amont et une atténuation en aval. Et enfin la zone d'accumulation au pied du glissement généralement avec une cinématique très lente (moins de 50 cm par an) mais qui peut se transformer en coulée boueuse à cause du torrent qui le traverse (risque lors de forte pluies et de la fonte des neiges).

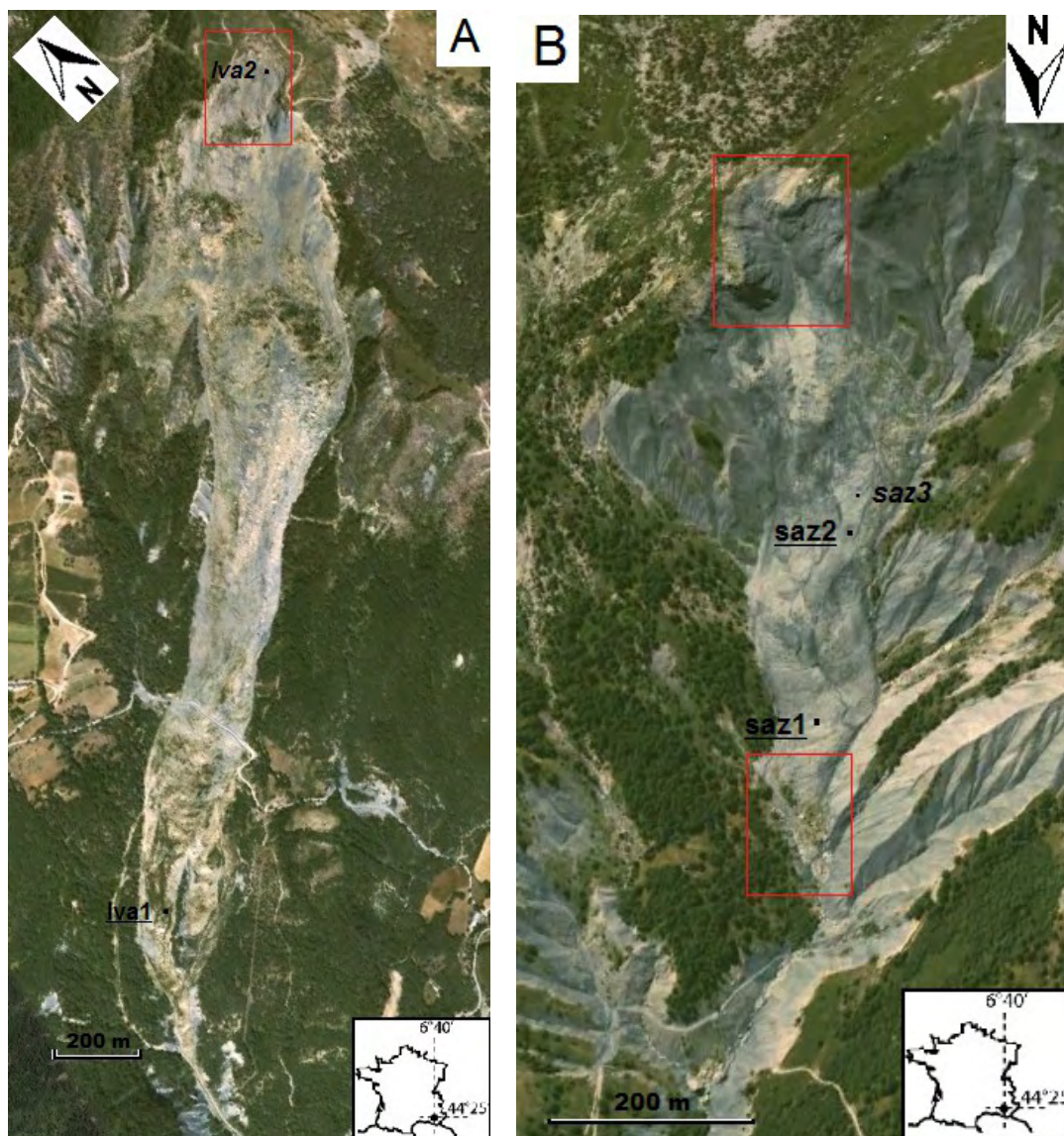


Figure 5 : Photos google Earth des deux sites d'étude.

A : Glissement de La Valette.

B : glissement de Super-Sauze.

Les cadres rouges représentent les zones couvertes par le LiDAR terrestre et les points noirs les GPS permanents (lorsque le nom de la station est en italique non surligné c'est que les données ne sont pas accessibles sur notre période d'étude).

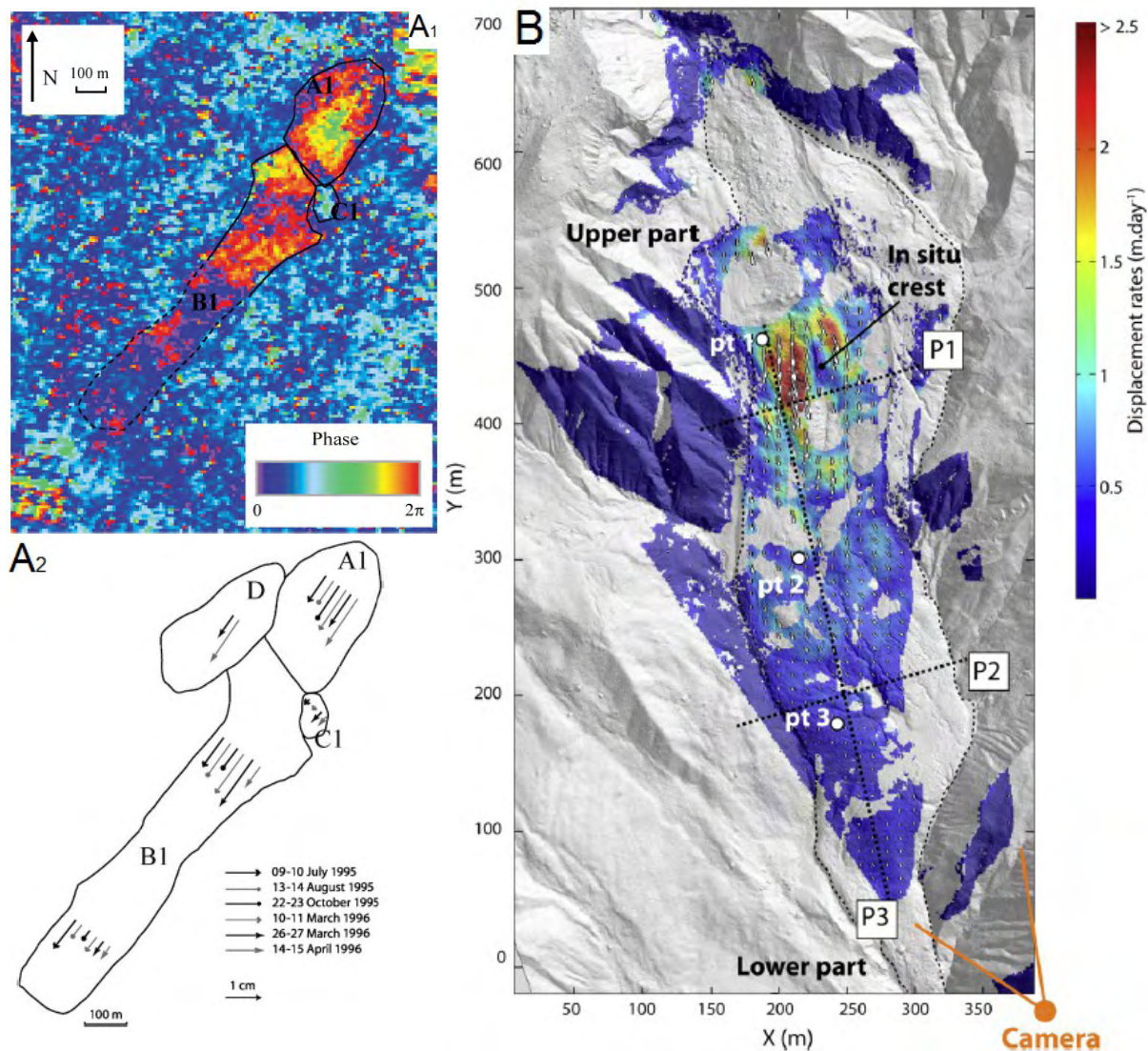


Figure 6 : Intensité et direction du déplacement des deux sites tirées d'autres études.

A : Sur La Valette issus de données SAR (d'après Squarzoni 2002) Aa : Interferogramme SAR du 22-23 octobre 1995 illustrant la magnitude du déplacement et sa répartition sur le glissement. Ab : Champ et taux de déplacements journaliers pour cinq dates sur la période juillet 1995, avril 1996.

B : Intensité et direction du déplacement par corrélation de surfaces issues de données LiDAR du 1 au 4 juin 2008 (d'après Travelletti et al. 2012).

B. Caractéristiques des données

Les images par télédétection spatiale optiques à très haute résolution de Pléiades 1A constituent donc les données principales de notre étude, et ses traitements le cœur du sujet. Grâce à la Recette Thématique Utilisateurs (RTU) du CNES qui a demandé à l'ensemble des participants et experts du Programme Préparatoire ORFEO de compléter la liste des sites géographiques d'intérêt pour l'acquisition d'images Pléiades, nous disposons d'une image monoscopique du 7 août 2012 et d'un couple stéréoscopique du 5 octobre 2012 qui couvrent toute la vallée de Barcelonnette. Nos images sont des images matricielles au format geoTIFF.

Elles sont accompagnées par leur fichiers de méta-données avec les dimensions de l'image dans le fichier au format TWF, et leur RPC (Rational Polynomial Coefficient) au format XML qui contient les informations générales du modèle du capteur du satellite. Les coordonnées des images sont fournies en degrés décimaux dans le système de données WGS84. Pour chaque acquisition nous avons l'image en multi-spectral MS (4 bandes : Rouge, Bleu, Vert et Infra Rouge) et en panchromatique P (1 bande) comme illustré par la figure en annexe 1. La résolution (taille des pixels) est de 2,5 m en MS et de 0,5 m en P. Par la suite nous n'utiliserons que les images en panchromatique qui présentent une meilleure résolution. En effet, ceci est préférable afin d'avoir une mesure du déplacement par corrélation plus précise.

Les glissements de La Valette et de Super-Sauze sont des sites bien surveillés et étudiés. Ce qui nous permet de disposer d'autres sources de données utiles pour la comparaison et la validation des résultats issus des images Pléiades (voir tableau 1).

Tout d'abord des données qui font parties de la photogrammétrie avec capteur actif : des nuages de points LiDAR. Nous avons un nuage de point par LiDAR aéroporté sur Super-Sauze pris le 28 août 2012 par la société Suisse HéliMap. Il nous permettra d'évaluer la qualité du MNS extrait à partir du couple d'images stéréoscopiques Pléiades. Pour le champs de déplacement mesuré entre août et octobre 2012 par la corrélation des images Pléiades, la validation se fera grâce à des nuages de points par LiDAR terrestre. Nous avons six acquisitions, prises sur l'escarpement de La Valette, l'escarpement et le pied de Super-Sauze en juillet et septembre 2012 (voir localisation des zones sur la figure 4 et 7).

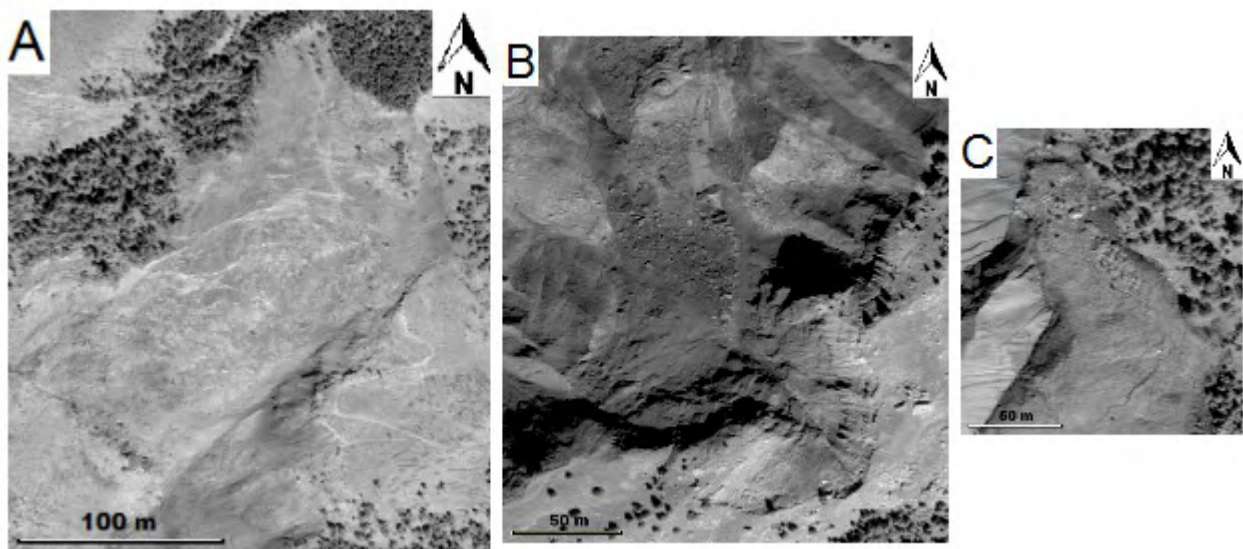


Figure 7 : Aperçu sur les images Pléiades en Panchromatique des zones couvertes par le LiDAR terrestre.

A : Escarpement de La Valette.

B : Escarpement de Super-Sauze.

C : Pied de Super-Sauze.

Enfin, des mesures dGPS (GPS différentiel) sont également à notre disposition grâce à

plusieurs stations GPS permanentes visibles sur la figure 5 ou sur le site de l'OMIV (Observatoire des Mouvements et Instabilités de Versants) de l'université de Strasbourg d'où les données ont été prises. Le réseau de GPS permanents comprend une station en zone stable au Sud-Ouest du glissement de La Valette (station LVAL) qui sert de point de référence, puis deux stations sur le glissement de La Valette (voir figure 4. A) et trois sur celui de Super-Sauze (voir figure 4. B) qui enregistre donc le déplacement. Le taux de déplacement et sa variation se mesurent le long de la « baseline » qui relie chaque GPS permanents situés sur les glissements au GPS LVAL (station LVAL figuré en rouge sur la figure en annexe 2). Au final, sur notre notre période d'étude (début juillet à fin octobre 2012), les données sont accessibles sur trois « baselines » (LVAL_lva1, LVAL_saz1 et LVAL_saz2) illustrées sur la figure en annexe 2 ; celles reliant lva2 et saz3 étant absentes sur notre période de juillet à octobre 2012.

L'ensemble des données utilisées dans cette étude est résumé dans le tableau ci-dessous

Synthèse des données utilisées pour cette étude					Nombre d'acquisition par site et date	
Type de données	Techniques	Caractéristiques	Résolution / précision	La Valette	Super-Sauze	
Données images	Géomorphologique	images par télédétection spatiale très haute résolution	acquisition par le satellite Pléiades du CNES à capteur optique agile, très haute résolution	résolution de 0,5 m	3 images qui couvrent tout le bassin de Barcelonnette : - une monoscopique du 7 août 2012 - un couple stéréoscopique du 5 octobre 2012	
Données aériennes	Géomorphologique	Nuage de points par scanner laser aéroporté	acquisition effectué par la société suisse HéliMap	interpolation à 1 m	1 acquisition du 28 août 2012	
Données au sol	Géomorphologique	Nuage de points par scanner laser terrestre		interpolation à 0,25 m	2 acquisitions sur l'escarpement : - juillet 2012 - octobre 2012	2 acquisitions sur l'escarpement : - juillet 2012 - octobre 2012 2 acquisitions sur le pied : - juillet 2012 - octobre 2012
	Cinématique	GPS différentiel à partir de stations permanentes	GPS du réseaux permanent de l'OMIV dont les données journalières sont accessibles librement sur leur site	Précision : X +/- 3 mm Y +/- 2,5 mm Z +/- 12 mm	Différentiel le long d'une baseline : - LVAL_lva1 au pied Différentiel le long de deux baseline : - LVAL_saz1 en bas de la zone de transition - LVAL_saz2 en haut de la zone de transition	

Tableau 1 : Présentation résumée des données de cette étude.

Partie IV : Résultats et discussions

A. Résultats du traitement des images Pléiades

Dans le cadre de cette étude, trois logiciels de traitement des images par télédétection optique spatiale ont été testés : l'Orfeo ToolBox du CNES, ENVI d'Exelis et enfin Erdas Imagine LPS d'Intergraph (voir la liste détaillée des programmes en annexe 4). L'organigramme sur la figure 8 ci-dessous résume les étapes du traitement effectué pour chaque logiciel.

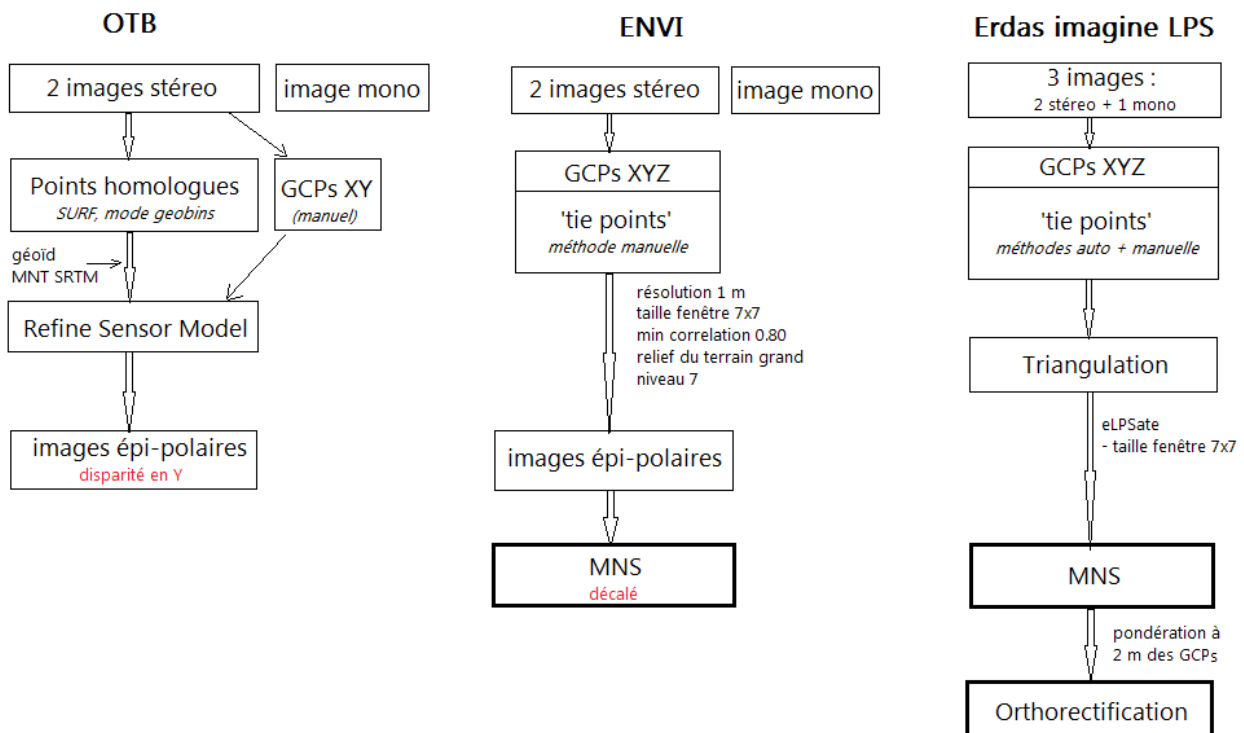


Figure 8 : Organigramme résumant les étapes du traitement de nos images Pléiades effectuées sous chaque programme.

Ce sujet étant placé dans le cadre d'une étude du CNES sur les capacités des images Pléiades pour l'observation des objets à la surface de la Terre, le logiciel Orfeo toolbox (OTB), que le CNES a développé, a été testé en premier. De plus OTB permet d'effectuer le traitement des images par télédétection optique spatiale de façon totalement automatisée. Ce programme fonctionne à l'aide de lignes de commandes. Mais l'équivalent est possible avec un support graphique (commande `otb_gui`) ou avec l'application Monteverdi qui effectue les mêmes opérations avec une interface graphique plus conventionnelle.

1) Avec l'Orfeo ToolBox

Tout d'abord nous avons commencé le traitement sans l'affinage du modèle du capteur de nos images Pléiades. Or nous observons, comme illustré sur la figure 9, que sans affinement les 2 images présentent un décalage trop important. Cela ayant pour conséquence une trop forte disparité suivant l'axe X sur les images ré-assemblées en géométrie épi-polaire (de -100 à 200 pixels environ). Et qui, par la suite, ne permet pas d'obtenir une carte de disparités exploitable (décalage trop important et perte totale de la cohérence entre les deux images).

L'anaglyphe qui superpose les deux images en géométrie épi-polaire est un bon support pour contrôler la validité du modèle du capteur affiné. Les images étant projetées sur la ligne de visée de leur paire stéréoscopique, nous obtenons un ré-assemblage mono-dimensionnel, c'est à dire que la disparité sur la composante Y doit être nulle (voir figure 6A). Si ce n'est pas le cas, c'est que des erreurs importantes se sont introduites lors du ré-assemblage en géométrie épi-polaire, mettant en cause la justesse du modèle du capteur. La poursuite du traitement est rendue impossible (voir figure 9).

Lors de l'observation de la disparité entre les deux images stéréoscopiques il a été constaté qu'elle est plus grande dans le fond de vallée que sur les reliefs. Cela peut s'expliquer par le fait que le fond de vallée est plus loin du capteur que les crêtes (erreurs liées au temps de parcours dans l'atmosphère), ainsi que l'effet de la projection du relief.

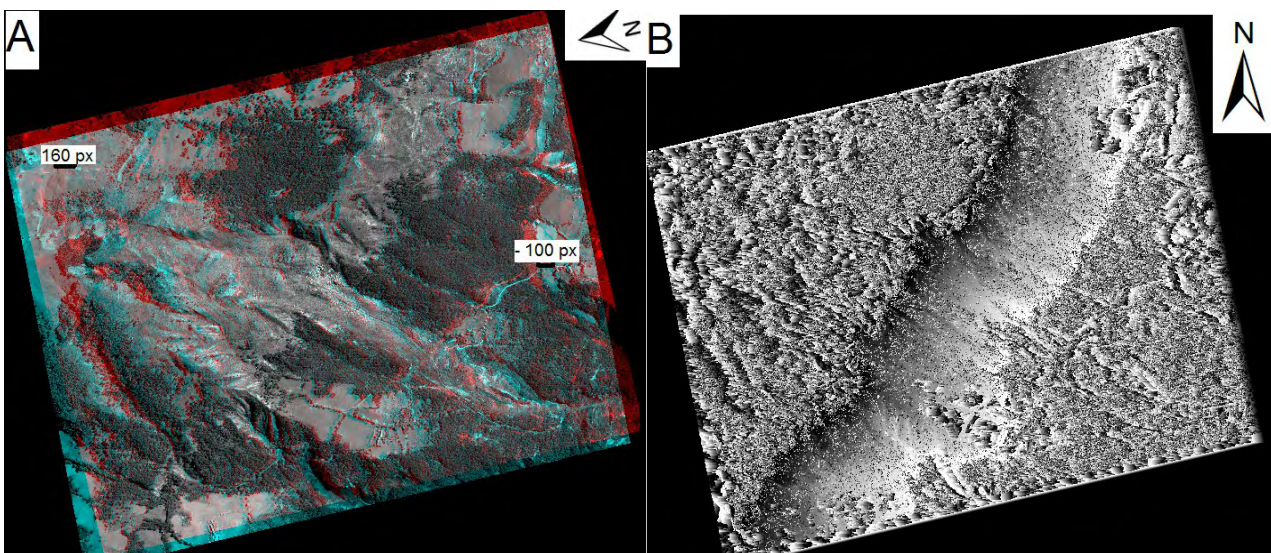


Figure 9 : Exemple sous OTB du résultat du ré-assemblage en géométrie épi-polaire et de la corrélation des couples de points homologues pour créer la carte des disparités sur une imagerie de La Valette.

A : L'anaglyphe superposant les deux images en géométrie épi-polaire.

B : Carte de la disparité.

Par la suite nous avons donc tenté d'extraire un MNS en effectuant préalablement les corrections et affinements du modèle du capteur de nos images grâce à une sélection

automatique de points homologues entre nos deux images stéréoscopiques du 5 octobre 2012. Avec OTB le processus d'extraction d'un MNT à partir d'un couple stéréoscopique s'appuie sur le modèle du géoïde et sur un MNT initial qui peut être mal résolu, comme par exemple en MNT SRTM à 90 m accessible librement. Avant l'extraction, une correction du modèle du capteur est effectuée. Le traitement se déroule donc comme suit avec avec OTB :

1. Lecture des fichiers de méta-données et création d'un unique fichier rassemblant toutes les méta-données (format .geom) avec lequel fonctionne OTB (otbgui_ReadImageInfo)
2. Extraction des points homologues (otbgui_HomologousPointsExtraction). Le pas et la taille des fenêtres de recherche doivent être définis. Nous pouvons aussi choisir le filtre et la précision qui déterminent à partir de quel seuil deux points seront considérés comme homologues. L'affinage se fait sur l'une des images du couple stéréoscopique par rapport à la deuxième. Nous avons pris comme référence la première image du couple. Les coordonnées des points homologues sont donc données dans le système géographique WGS84 pour l'image de référence et en ligne/colonne du pixel sur l'image à corriger.
3. Affinage du modèle du capteur (otbgui_RefinSensorModel). Cette étape permet à l'aide du fichier de points homologues d'affiner le fichier contenant les méta-données. Aucune donnée n'est modifiée mais des coefficients qui n'étaient initialement pas définis sont calculés.
4. Création de la grille pour la re-projection et la rectification des images stéréoscopiques (otbgui_StereoRectificationGridGenerator). Pour ce faire l'estimation du déplacement pour chaque couple de points homologues est effectuée.
5. Ré-assemblage des images en géométrie épi-polaire. Cette opération doit se faire deux fois, une pour chaque image (otbgui_GridBasedImageResampling).
6. Création de l'anaglyphe (otbgui_ConcatenateImages). Cette étape est facultative, elle permet de visualiser le relief grâce à la superposition des deux images en géométrie épi-polaire mais également de vérifier si la disparité n'est pas trop importante. Dans notre cas, cette étape est très utile, en effet elle nous permet de constater qu'il y a une disparité sur l'axe Y (voir figure 11) alors quelle doit être toujours nulle (principe de la géométrie épi-polaire). Il est donc inutile de poursuivre le traitement car l'acquisition des images épi-polaire est fautive. Cela met en cause une erreur dans le modèle du capteur du satellite et donc dans le géoréférencement des images. Il faut alors retourner à l'étape de l'extraction des points homologues qui doivent être mal géoréférencés.
7. Création de la carte des disparités issue de l'écart observé pour chaque couple de points sur l'axe X des images épi-polaires (otbgui_BlockMatching). Si des erreurs

sont présentes sur les images en géométrie épi-polaire, il y aura une perte totale de cohérence sur la carte des disparités. Dans notre cas nous avons observé une mosaïque de pixels colorés qui illustrent parfaitement une incohérence totale.

8. Filtrage de la carte des disparités (otbgui_BandMath).

9. Création de la carte d'élévation (MNT) à partir de la carte des disparités filtrées.

Lors de notre étude nous ne sommes pas allés plus loin que la carte des disparités car les erreurs du modèle du capteur de Pléiades introduisent directement lors de la géométrie épi-polaire des biais tels qu'ils rendent toute poursuite du traitement inutile car inexploitable. De plus l'opération d'affinement a augmenté ces erreurs (apparition d'une disparité sur Y en géométrie épi-polaire) au lieu de les avoir corrigées. Il y a donc un problème lors de l'extraction des points homologues. Après plusieurs tests nous avons optimisé l'extraction avec les paramètres suivant :

```
otbcli_HomologousPointsExtraction
-in1 IMG_PHR1A_P_201210051030181_SEN_579436201-002_R1C1.TIF
-in2 IMG_PHR1A_P_201210051030398_SEN_579436201-001_R1C1.TIF
-mode geobins
-mode.geobins.binstep 512
-mode.geobins.binsize 512
-mfilter 1
-precision 50
-backmatching 1
-2wgs84 1
-out homologous_points4.txt
-outvector vectorpoint.shp
-elev.dem N44E006/
-elev.geoid OTB-Data/Input/DEM/emg96.grd
```

Deux modes de recherche des points homologues est possible, le mode « full » qui recherche les points sur l'image entière (trop lourd sur de grandes images) et le mode « geobin » que nous avons choisie car applicable sur de larges images. Le mode « geobin » permet de rechercher des points sur de petites fenêtres espacées régulièrement sur l'image. L'option « binsize » définit la taille des fenêtres et l'option « binstep » le pas entre elles (voir figure 10, avec la répartition des points homologues figurés en noirs). Les options « mfilter » et « precision » fonctionnent ensemble, « mfilter » permet de filtrer les points et supprimer ceux dont l'écart dépasse la valeur indiquée avec l'option « precision » (distance euclidienne). Donc plus la valeur sera faible moins nous aurons de points enregistrés (voir figure 10). Lorsque nous augmentons la précision nous pouvons constater que les points détectés sont moins nombreux et se concentrent sur les reliefs. Cette absence de points dans la vallée, lorsque la précision, est augmentée peut s'expliquer par le fait que l'écart entre les coordonnées géographiques attribuées sur les deux images stéréoscopiques soit plus important au fond de la vallée. Une autre option permet de contrôler la qualité des points homologues :

« backmatching ». Elle vérifie la qualité du point en effectuant la recherche en sens inverse, c'est à dire de l'image 1 par rapport à l'image 2 puis inversement.

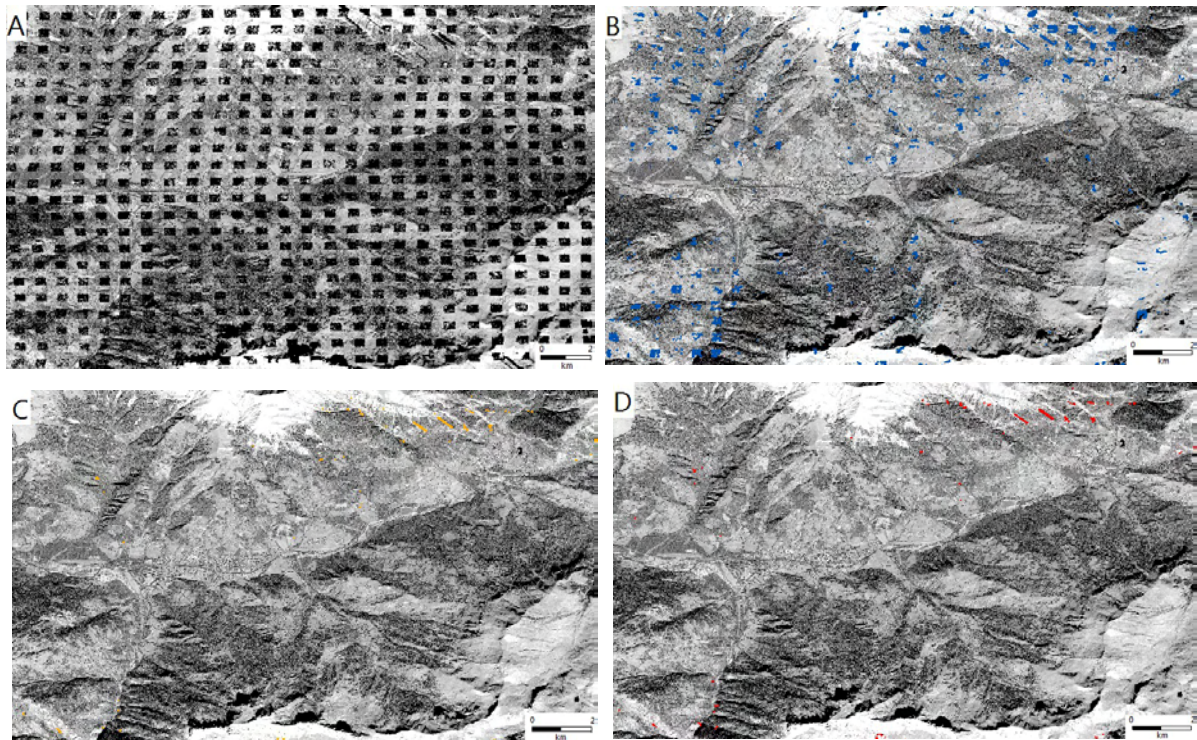


Figure 10 : Répartition des points homologues et écart entre les 2 images obtenus avec différents paramètres. A : Avec une « précision » de 50 et sans « backmatching ». B : Avec une « précision » de 20. C : Avec une « précision » de 10 sans « backmatching ». D : Avec une « précision » de 10 avec « backmatching ».

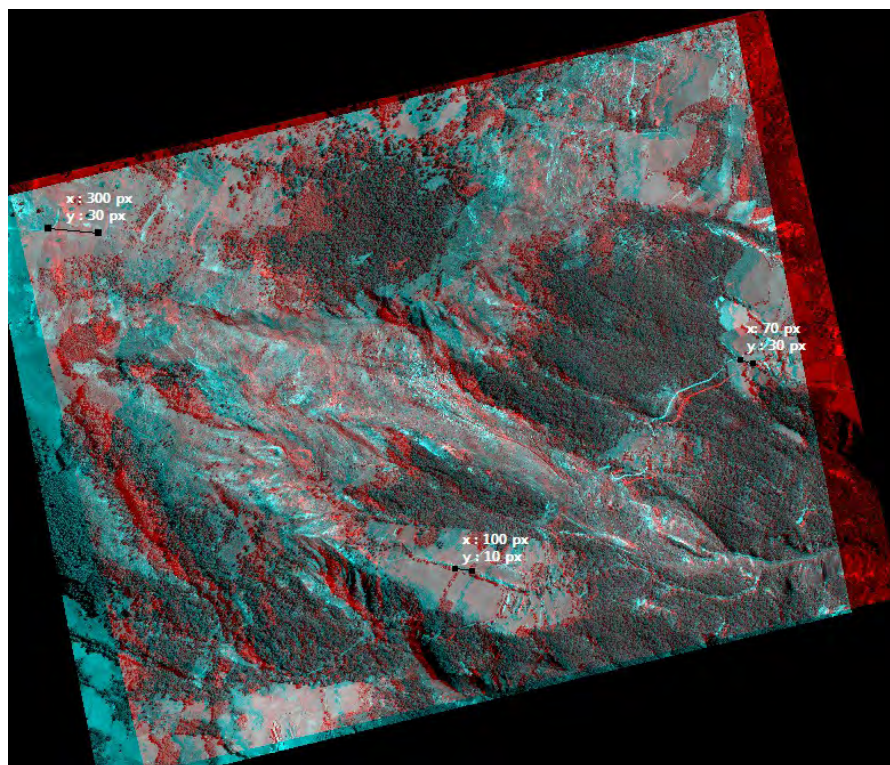


Figure 11 : Anaglyphe superposant les deux images ré-assemblées en géométrie èpi-polaire sur une imagette de La Valette.

A noter également que le logiciel a besoin de connaître l'élévation moyenne de la zone pour l'extraction de points homologues, ou mieux, surtout pour les régions à fort relief, d'un modèle numérique de terrain et du modèle du géoïde (emg96.grd). Dans cette étude nous avons travaillé avec un MNT du SRTM résolu à 90 m.

L'affinement étant mauvais nous avons regardé de plus près les points homologues extraits. Après vérification de la localisation des points, nous avons constaté que les coordonnées géographiques attribuées aux points, sur l'image dite de référence, sont fausses. Elles ne correspondent ni aux coordonnées réelles, lues sur une orthophotographie de 2009 de l'IGN dont nous disposons, ni aux coordonnées affichées par Monteverdi. En effet, elles présentent un écart de l'ordre de $0,001^\circ$ soit environ 200 m. Pour résoudre le problème nous avons joué sur les différents paramètres proposés pour l'extraction des points homologues, mais sans succès. La détermination des points homologues est bonne comme le montre le résultat avec les coordonnées indiquées en ligne et colonne du pixel sur les deux images (option -2wgs84 0).

Les points homologues étant bien détectés c'était donc l'attribution des coordonnées longitude et latitude en WGS84 des points qui était faussée (option -2wgs84 1). Nous avons donc tenté la création manuelle d'un fichier de points homologues en attribuant les coordonnées, en WGS84, affichées sur l'interface de Monteverdi pour les points de l'image de référence. Cependant cela a aussi échoué. Ce qui peut s'expliquer par une erreur de géoréférencement des images due à une mauvaise prise en compte du modèle du capteur Pléiades (voir tableau en annexe 3). Pour finir un dernier test a été effectué pour corriger les erreurs de géoréférencement du modèle et l'affiner. Grâce à une orthophotographie aérienne de l'IGN sur le bassin de Barcelonnette de 2009, bien géoréférencée, les coordonnées exactes de chaque point ont été acquises. Cette procédure a été faite pour les deux images du couple stéréoscopique, c'est à dire d'abord avec les coordonnées en ligne et colonne du pixel pour la première image, et en longitude et latitude pour la deuxième, puis inversement. Ce test visait à rectifier les fichiers de métadonnées intégrant le modèle du capteur pour les deux images, mais cela n'a pas résolu le problème. Malgré l'aide et les conseils demandés aux développeurs du logiciel sur le forum du groupe google des utilisateurs de OTB, aucune solution n'a été trouvée pour rectifier cette erreur de géoréférencement.

Malgré l'échec du traitement, une orthorectification (otbgui_OrthoRectification) sans correction du modèle du capteur, et avec le MNT SRTM résolu à 90 m seulement, a été effectuée pour visualiser l'erreur engendrée par l'imprécision combinée du modèle sensor et du MNT. Les deux images orthorectifiées du couple stéréoscopique du 5 octobre 2012 présentent des distorsions et une erreur dans le géoréférencement de 25 m en relief à 30 m en fond de vallée en direction du Nord-Ouest.

Le logiciel Orfeo ToolBox n'a pas permis d'effectuer le traitement de nos images Pléiades, notamment à cause d'une mauvaise prise en compte du modèle du capteur, entraînant un modèle affiné pas suffisamment précis voire incorrect et l'utilisation d'un MNT

SRTM v2 peu précis (le SRTM v4 n'a pu être utilisé car non disponible au format .hgt requis par OTB). Nous avons donc tournés vers un autre logiciel libre: MicMac, développé par l'IGN. Malheureusement ce logiciel requière le modèle RPC du capteur du satellite au format RTO et non en XML, comme fourni avec nos images. De même le fichier créé par OTB (.geom) n'est pas reconnu par MicMac. Or il s'avère qu'il n'existe pas de logiciel permettant la conversion automatique entre les formats XML et RTO. Nous avons donc demandé à l'IGN s'il pouvait effectuer la conversion, sans obtenir de réponse de leur part. Ainsi, le traitement sous MicMac n'a pu être réalisé, du fait du format incompatible des fichiers.

Nous nous sommes alors tournés vers des logiciels commerciaux de traitement des images par télédétection, et avons commencé par tester un logiciel assez répandu : ENVI.

2) Avec ENVI

Le logiciel ENVI propose un module pour le traitement semi-automatique pour extraire un MNT à partir d'un couple stéréoscopique, nommé « DEM extraction wizard ». Il fonctionne en 9 étapes. Il faut tout d'abord ouvrir les images Pléiades sur ENVI, la version 5 du logiciel n'intégrant pas directement les images Pléiades. Pour ce faire il faut télécharger un fichier permettant de les reconnaître, accessible librement sur le site du développeur EXELIS. Les points de contrôles sont préalablement sélectionnés sous le logiciel ArcMap. Nous avons prélevé nos points à partir de nuage de points LiDAR aéroporté projeté sur une orthophoto aérienne de l'IGN, parfaitement géoréférencée, de notre zone de 2009 (voir figure 11). Une fois cette opération effectuée le module d'extraction du MNT peut être lancé.

- Etape 1 : sélection de l'image placée à gauche et celle à droite. Au début l'ordre n'a pas d'importance, par contre il faudra par la suite toujours sélectionner la même image du bon côté si les fichiers de GCPs et de 'tie points' sont réutilisés car ils s'y réfèrent (voir étape 2-3 et 4-5).
- Etape 2 : permet de déterminer le mode de sélection des GCPs : automatique, interactif ou à partir d'un fichier. Le mode automatique est bien sûr exclu à cause des erreurs du modèle du capteur qui rendraient les points sélectionnés faux (pas les bonnes coordonnées attribuées aux points). Le mode interactif est la méthode manuelle que nous allons effectuer, elle permet de rentrer les coordonnées X/Y/Z d'un point et de pointer le pixel correspondant sur les deux images (voir étape 4). L'option d'utiliser un fichier existant permet de réutiliser les GCPs déjà acquis lors d'une précédente extraction du MNT sous ENVI, et permet de passer directement à l'étape 4.
- Etape 3 : Sélection et visualisation des GCPs. L'outil prédiction est fort utile, il évite de devoir naviguer sur toute l'image pour repérer chaque point. Bien sûr sa prédiction est erronée (sinon nous n'aurions pas besoin de sélectionner des GCPs manuellement). Grâce à l'orthophotographie de l'IGN de 2009 nous pouvons évaluer cet écart. L'erreur observée est plus importante sur la première image stéréoscopique.

Cela peut s'expliquer par le fait que c'est l'image qui a été prise avec le plus grand angle d'incidence, donc celle où les distorsions géométriques et les erreurs de géoréférencement sont les plus grandes. Nous observons aussi que cette erreur est plus importante sur l'axe Est-Ouest que Nord-Sud et également qu'elle augmente dans le fond de la vallée par rapport au relief (voir tableau en annexe). Mais globalement elle varie de l'ordre de $0,0001^\circ$ à $0,001^\circ$, soit entre 10 m (relief) et 200 m (en fond de vallée sur l'axe Est-Ouest). Une fois le pixel repéré il suffit de le pointer et de l'enregistrer. Pour chaque point l'erreur de positionnement (qui est l'écart entre le point réel et celui prédit) est calculée. Le fichier de GCPs sur le couple stéréoscopique, en vue de l'extraction du MNT, se présente sous la forme de sept colonnes. Les deux premières représentent les coordonnées X/Y en ligne/colonne du pixel sur l'image sélectionnée à gauche. Les deux autres colonnes qui suivent représentent la même chose, mais pour l'image de droite. Les trois dernières sont les coordonnées X/Y/Z réelles du point au système de référence choisie, avec Z la hauteur à l'ellipsoïde et non l'altitude (référence au géoïde, c'est à dire au niveau de la mer). Les points doivent être de préférence dans le même système que les images bien que ENVI gère très bien la conversion des coordonnées. Dans notre cas les images sont en longitude et latitude dans le système WGS84.

- Etape 4 : permet de déterminer le mode de sélection des 'tie points' comme pour les GCPs. Pour les tie points le mode automatique donne de bons points mais il n'en trouve pas dans le fond de vallée où il faut donc en rajouter manuellement. Pour plus de sécurité tous les points ont été déterminés de façon interactive.

- Etape 5 : Sélection et visualisation des 'tie points'. Des points homologues sont repérés entre les deux images et pointés. Le logiciel calcule à chaque nouvelle acquisition d'un point, son erreur de parallaxe ainsi que l'erreur globale moyenne. L'erreur de parallaxe doit être inférieure à 10 pour pouvoir lancer l'extraction du MNT, mais une valeur inférieure à 3 est souhaitable pour une meilleure précision. Nous avons effectué deux relevés de points homologues. L'un peu dense et avec une répartition assez hétérogène donnant une erreur de parallaxe total de 2. Et un deuxième avec une erreur de parallaxe de 3,7 mais avec des points en plus grand nombre et répartie de façon plus homogène. Le fichier de 'tie points' se présente sous la forme de quatre colonnes, contenant les coordonnées en ligne/colonne du pixel, de l'image de gauche pour les deux premières colonnes, et de l'image de droite pour les deux dernières.

- Etape 6 : Projection des images en géométrie épi-polaire. Sélection du nom de sortie des fichiers et de leur résolution. A cette étape il est également possible de voir l'anaglyphe qui superpose les deux images en géométrie épi-polaire, permettant ainsi de visualiser le relief. Dans ce cas la création des images épi-polaires se fait de suite au lieu d'être lancées seulement à la fin de l'étape 8 avec tout le reste du traitement. Les images épi-polaires créées ne peuvent être réutilisées, comme le fichier de GCPs et de 'tie points', lors d'une nouvelle procédure d'extraction de MNT. Elles sont de nouveau créées.

– Etape 7 : Choix de la résolution du MNT et de son système de coordonnées. Pour l'utilisation que nous allons faire du MNT (observation des structures et déformations de surface ajoutée à une orthorectification basée sur ce MNT) une bonne précision est nécessaire. Cependant, extraire un MNT à la même résolution que le couple stéréoscopique risque de faire ressortir les éventuels erreurs et artéfacts dus au traitement. Il est généralement conseillé d'extraire à une résolution au moins deux fois plus faible que les images sources. Nous avons donc choisi de prendre une résolution à 1 m bien que des tests à 0,5 m et 2 m ont aussi été effectués. Nous avons également choisi de projeter le MNT en UTM zone 32 plutôt que de le laisser en coordonnées géographiques (c'est à dire en longitude et latitude).

– Etape 8 : Choix des paramètres pour l'extraction du MNT. L'optimisation des paramètres s'est fait grâce à plusieurs tests. Le relief : nous avons le choix entre faible, modéré ou haut. Notre zone d'étude étant à fort relief nous avons toujours appliqué 'high'. Pour la fenêtre de recherche des points homologues, la taille à choisir dépend de l'homogénéité de la zone. Elle doit être grande pour les surfaces uniformes à faible relief et faible pour les surfaces très contrastées et à fort relief. Le bassin de Barcelonnette étant une zone montagneuse avec des paysages assez contrastés, une fenêtre de 7 par 7 donne le meilleur résultat. En effet lorsque nous augmentons la taille de la fenêtre (15 par 15 par exemple) nous observons une perte de la cohérence sur les reliefs. Un autre paramètre important que nous avons fait jouer est la valeur du minimum de corrélation. Il permet de déterminer à partir de quel pourcentage de correspondance (intensité lumineuse) deux pixels sont considérés comme homologues. Nous avons obtenu les meilleurs résultats avec 0,80. Il faut également prendre en compte le niveau d'extraction du MNS, c'est à dire le nombre d'itérations de la triangulation et de la corrélation (plus fines à chaque nouvelle itération), avec 1 le plus faible jusqu'au maximum qui dépend de la résolution des images épi-polaires. Avec nos images résolues à 0,5 m le niveau peut aller jusqu'à 8 mais nous nous sommes limités au 7 car le niveau maximum demande un temps de traitement plus long et plus de puissance à l'ordinateur. Lorsque nous l'avons testé le logiciel n'a pas pu aller au bout du traitement.

– Etape 9 : Visualisation du MNT extrait.

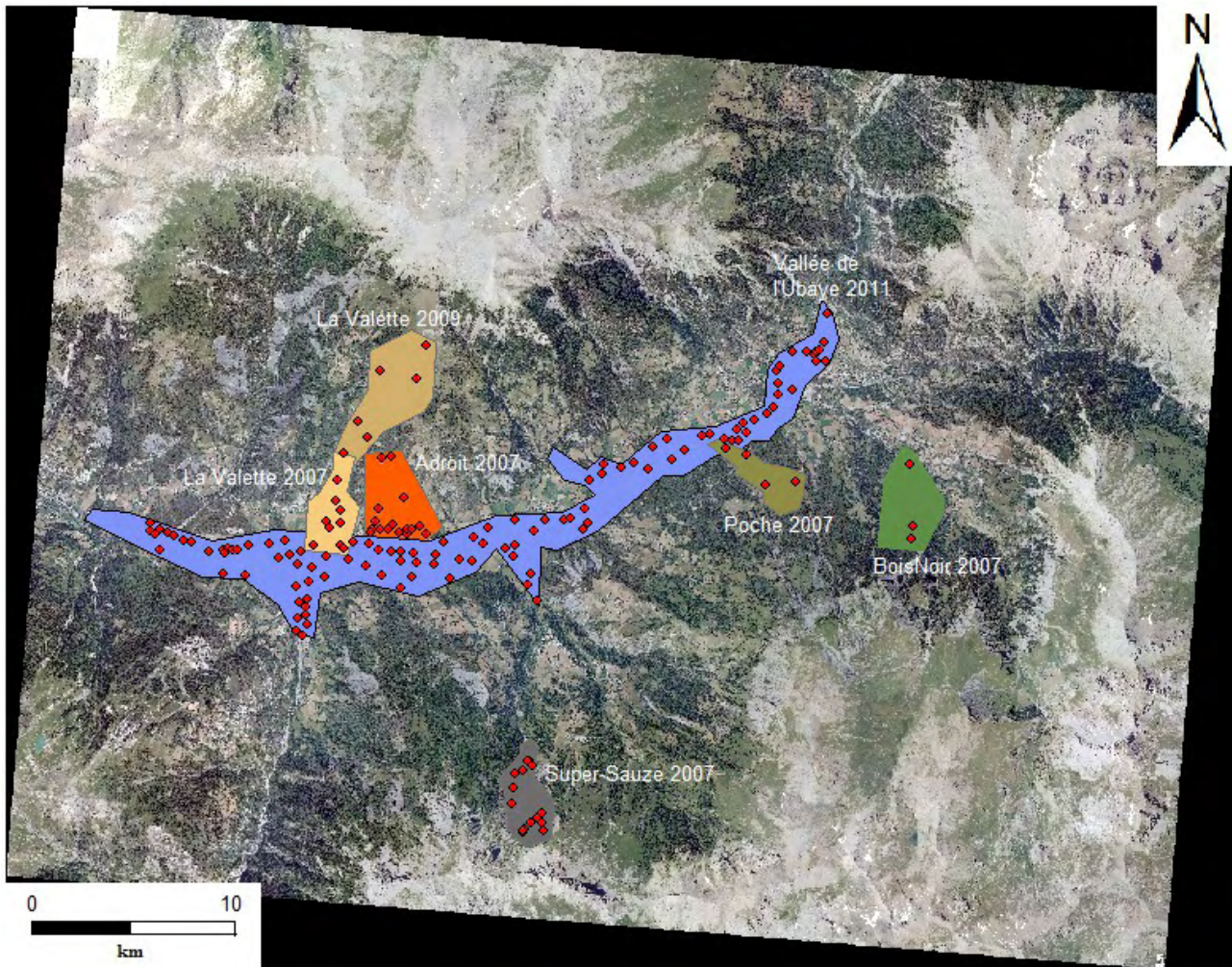


Figure11 : Données utilisées pour la sélection des points de contrôle. Projection des nuages de points de LiDAR aéroporté en Lambert 3 Sud sur une orthophoto de 2009 du bassin de Barcelonnette en UTM32 WGS84. Chaque plage de couleur représente un nuage de points. Les points rouges localisent les points de contrôle sélectionnés.

Une fois le MNS extrait, une meilleure visualisation de sa qualité est effectuée avec un ombrage. Il est ensuite ouvert avec l'ortho-photographie de 2009 sous ArcMap pour pouvoir les superposer et vérifier s'il n'y a pas de décalage ou distorsion du MNS. A cette occasion nous avons pu constater que le décalage est très important et non constant, ce qui met en évidence la présence de distorsions. Nous observons alors un décalage d'environ 100 m vers l'ouest en haut de La Valette, 115 m vers l'NO-O en haut de Super-Sauze, et de 45 à 100 m vers le N-NE dans le fond de vallée en se déplaçant de l'Ouest vers l'Est (voir figure 12). La qualité des GCPs a été plusieurs fois vérifiée et ne peut donc pas être incriminée, de même que la fiabilité des sources de données que sont les nuages de points LiDAR et l'orthophoto de 2009 parfaitement géoréférencés.

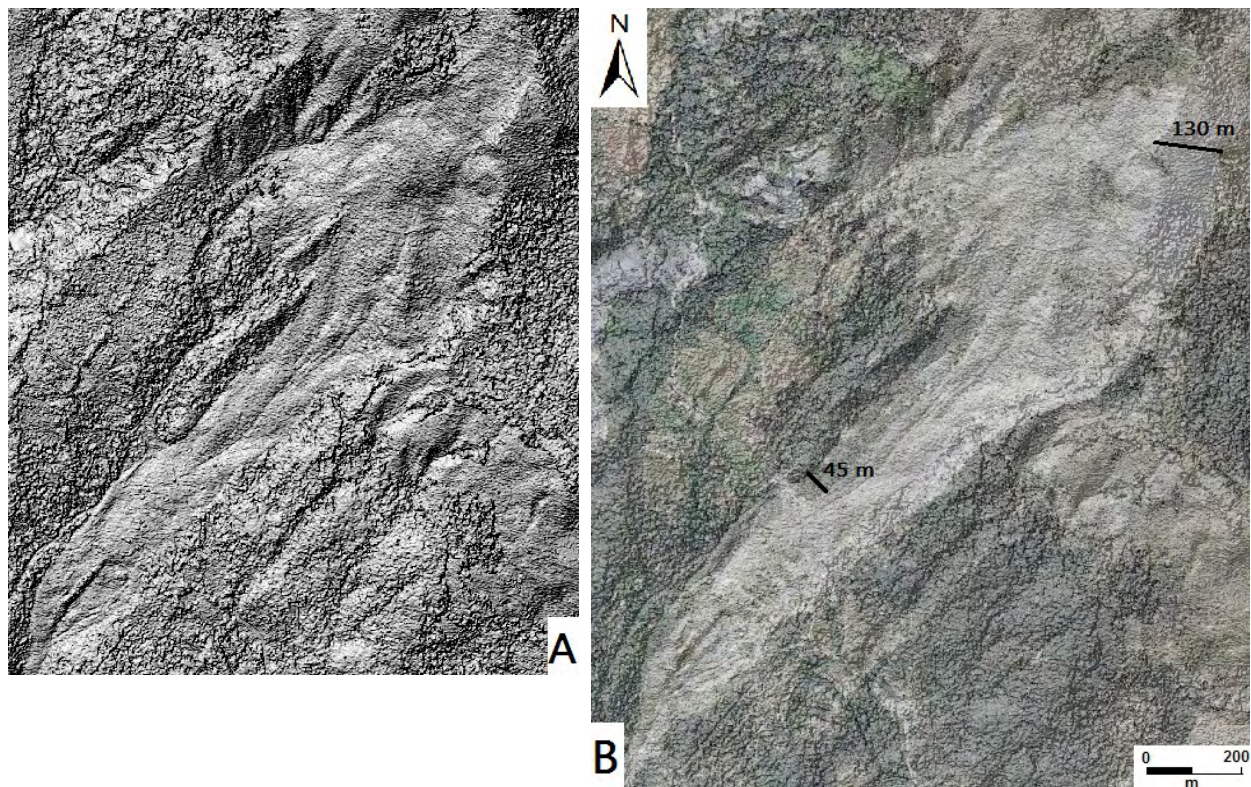


Figure 12 : Illustration du MNT extrait avec ENVI sur La Valette et de ses décalages ainsi que distorsions observés par rapport à l'orthophoto de 2009.

A : Extrait du MNT sur La Valette.

B : Superposition du MNT par transparence à l'orthophoto de référence, exemple de la distorsion et des erreurs de géolocalisation observées.

Malgré le décalage et la distorsion importante du MNT extrait, nous avons procédé à l'orthorectification en espérant que les images orthorectifiées se superposeraient entre elles. Pour ce faire nous avons utilisé l'orthorectification avec GCPs. Les GCPs utilisés sont les mêmes que pour l'extraction du MNS à ceci près que la coordonnée Z est cette fois en référence au géoïde (altitude) et non plus à l'ellipsoïde. La différence entre la hauteur à l'ellipsoïde et l'altitude représente l'écart N entre l'ellipsoïde et le géoïde qui varie spatialement comme l'illustre le schéma de la figure 13. Pour Barcelonnette cette différence est de 53,2 m environ. Mais pour plus de précision la conversion a été effectuée avec le logiciel Circé France de l'IGN (voir annexe 5) qui permet une transformation très précise entre les différents systèmes de coordonnées et projection qui recouvrent le territoire français. La précision de sa conversion en X et Y est meilleure que celle d'ArcMap (différence de l'ordre du centimètre). De plus ArcMap ne gère pas la transformation de la coordonnée Z entre l'altitude et la hauteur. Une fois les GCPs enregistrés (il faut de nouveau faire un pointage manuel pour les trois images à orthorectifier), l'orthorectification peut commencer.

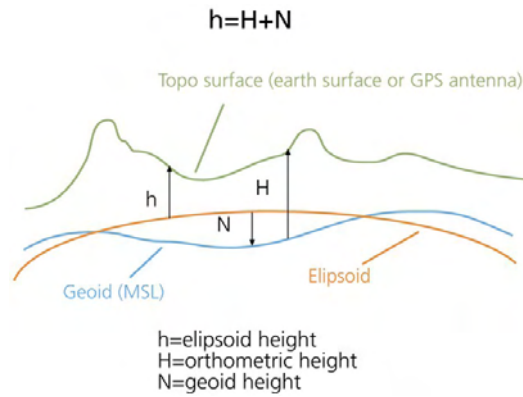


Figure 13 : Schéma de la différence entre l'altitude (référence au géoïde) et la hauteur (référence à l'ellipsoïde).

Le résultat de l'orthorectification a montré sans surprise un décalage et une distorsion entre les trois images orthorectifiées (la monoscopique de août et le couple stéréoscopique d'octobre 2012) avec un décalage variable de 10 à 30 m. Nous avons testé avec les trois méthodes d'interpolation proposées, plus proche voisin, linéaire et bicubique sans grande différence. La méthode par plus proche voisin, qui est la plus rapide (car la moins robuste), donne normalement de bons résultats pour les images optiques spatiales et est donc suffisante. Nous avons également testé l'orthorectification en prenant un MNT SRTM en libre accès (le même que pour le traitement avec OTB) qui, bien que très mal résolu (90 m), ne présente pas de problème de distorsion et de géoréférencement. Le problème demeure donc. Bien que vouée à l'échec, l'orthorectification nous a cependant permis de noter que les distorsions et erreurs de géoréférencement observées sont moins importantes que pour le MNS.

Le traitement sous ENVI 5 comme sous OTB ne permet pas de corriger efficacement les erreurs géométriques et radiométriques du capteur Pléiades. Une deuxième version d'ENVI 5 qui intègre initialement la lecture des images Pléiades étant récemment disponible, nous avons effectué un nouveau traitement. Bien que la prédiction soit meilleure (voir tableau en annexe 3) le MNS extrait présente toujours les mêmes problèmes de distorsions et erreurs de géoréférencement. Nous observons toutefois l'amélioration de la qualité des structures sur le MNS extrait : les surfaces sont un peu plus lisses (voir figure 14).

Le logiciel ENVI ne ayant également échoué à traiter nos images Pléiades nous avons testé un autre logiciel commercial : Erdas Imagine d'Infograph (voir tableau en annexe 3).

Figure 14 : Comparaison de la qualité du MNS sur l'escarpement de La Valette, extrait à partir du couple stéréoscopique Pléiades du 5 octobre 2012 avec les deux versions du logiciel ENVI 5.



A : MNS extrait avec ENVI 5
 B : MNS extrait avec ENVI 5v2

3) Avec Erdas Imagine

Le traitement sous Erdas Imagine avec le module LPS est dans les grandes lignes similaire à celui sous ENVI. Mais plus d'option sont proposés et l'extraction d'un MNS avec un couple stéréoscopique se fait aussi par géométrie épi-polaires mais sans étapes intermédiaires. A partir des deux images stéréoscopiques la valeur Z est estimée, puis une triangulation comprenant également l'image monoscopique (les trois images sont traitées ensemble), est effectuée (voir tableau 2) à l'aide des GCPs et des points homologues. A partir de cette triangulation le logiciel affine le modèle du capteur Pléiades et estime l'erreur de géoréférencement sur les trois axes XYZ.

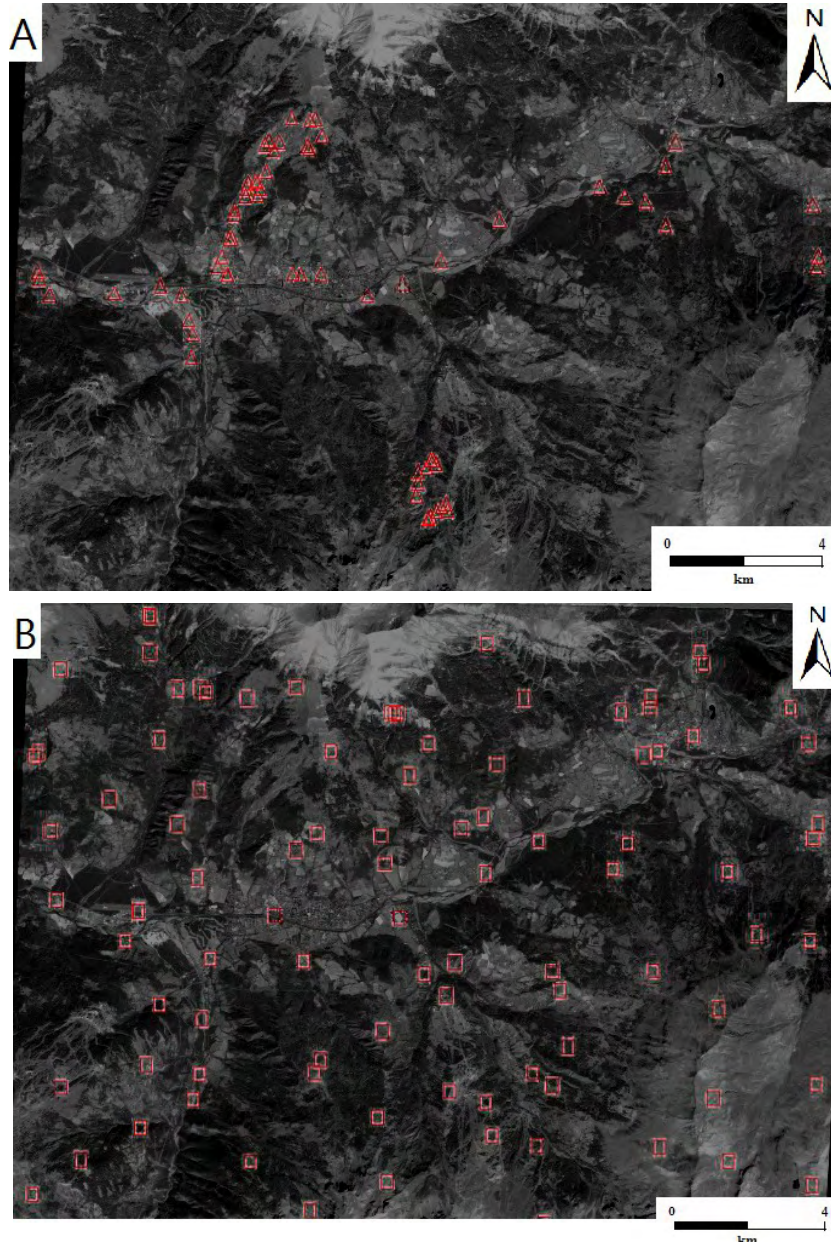


Figure 15 : Répartition des points de contrôle et des « tie points » pour le traitement sous Erdas Imagine.

A : Les points de contrôle (après densification sur La Valette)

B : Les « tie points »

Total Image RMSE : 0,4972594 pixels			
Control Point RMSE :		Check Point RMSE :	
Ground X	2,05507360 (65)	Ground X	2,4794850 (13)
Ground Y	2,4259794 (65)	Ground Y	4,7380247 (13)
Ground Z	0,8521432 (65)	Ground Z	2,3864574 (13)
Image X	0,4418812 (195)	Image X	0,5276502 (39)
Image Y	0,3953303 (195)	Image Y	0,4311547 (39)

Tableau 2 : Résultats de la triangulation et calcul du Root Mean Square Error de nos points sur les 3 images Pléiades avec Erdas Imagine.

Pour ce faire il faut comme pour ENVI entrer les coordonnées du GCP puis pointer le pixel correspondant sur les deux images. Pour ce faire l'outil prédiction est aussi présent sous Erdas, et sa précision est nettement meilleure, avec une erreur de l'ordre de la dizaine de mètre voir moins, alors qu'avec Monteverdi et ENVI 5 elle est de l'ordre de la centaine de mètres (voir tableau en annexe). Parmi les GCPs, sélectionnés avec une répartition la plus homogène possible, nous désignons ceux avec la plus grande incertitude comme 'check point'. Et enfin les 'tie points' qui peuvent se faire automatiquement mais qui comme pour OTB et ENVI se localise sur les reliefs. Il faudra donc en rajouter manuellement dans le fond de vallée (voir répartition finale des points sur la figure 15B). Les paramètres pour l'extraction du MNS ont été laissé par défaut, sauf pour la taille de la fenêtre de recherche des points homologues lors de la corrélation. Nous avons choisi 7 par 7 car le traitement avec ENVI a permis d'établir que cela donne le meilleur résultat pour nos images.

Le MNS ainsi extrait est de bonne qualité comme le montre la comparaison avec un nuage de point LiDAR aéroporté de 2012 interpolé en voisin naturel à 1 m sur Super-Sauze (voir figure 16). Bien que moins évidentes les structures principales tels que les sillons, les grosse fractures, et les gros blocs sont visibles. Et il se superpose parfaitement à l'orthophotographie de référence de 2009. Cependant la précision de la coordonnée Z n'est pas satisfaisante. En effet elle varie de 46,7 m à -63,1 m par rapport au MNT issu du LiDAR (voir figure 16 C1). Néanmoins les très forts écarts situés au bas de l'escarpement et à l'Est et Ouest de la coulée peuvent s'expliquer. Au bas de l'escarpement et à l'Ouest de la coulée nous observons de nombreuses zones d'ombre dues au relief sur les images Pléiades du couple stéréoscopique (voir surfaces triangulaires sur la figure 16A et les ombres sur la figure 21A₂). Ces ombres entraînent une perte de l'information et donc une mauvaise évaluation de l'élévation par la corrélation de ces images lors de l'extraction du MNS. Pour l'Est de la coulée le fort écart observé peut être expliqué par la présence de végétation sur les images qui perturbe l'estimation de la coordonnée Z. Toutefois, en dehors de ces zones l'erreur reste non négligeable comme le montre les extraits sur les figures 16C₂ et C₃, où la moyenne calculée est de 3 m de différence avec le MNT issu du LiDAR.

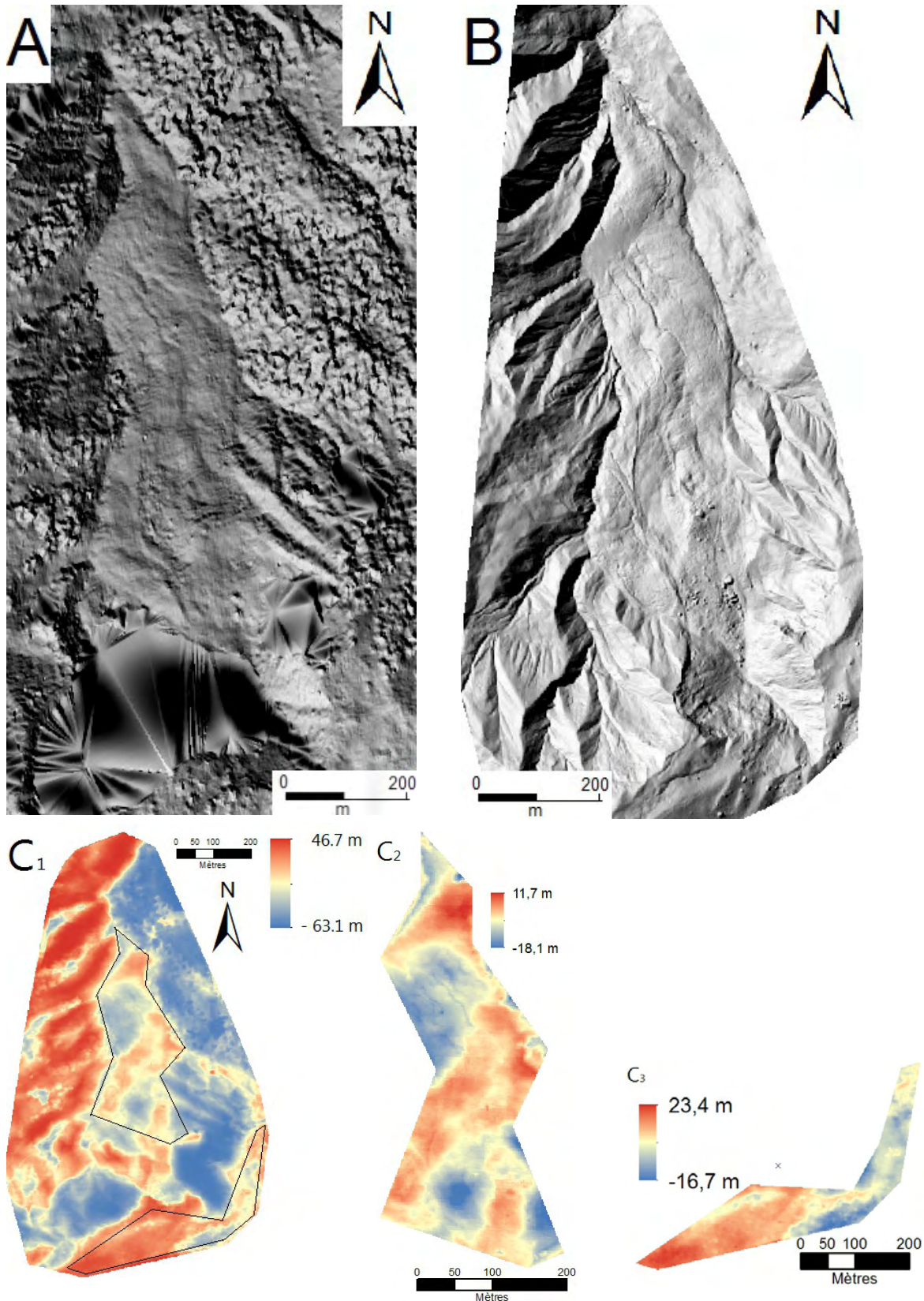


Figure 16 : Comparaison de la qualité du MNT résolu à 1 m sur Super-Sauze.

A : MNS Extrait du couple stéréoscopique Pléiades d'octobre 2012 à 0,5 m avec Erdas Imagine PLS.

B : MNT issu de l'interpolation du nuage de points ALS de août 2012.

C1 : soustraction du MNS ALS de août 2012 à celui issu des images Pléiades et évaluation de l'erreur sur la coordonnée Z ; C2 zoom sur la coulée et C3 zoom sur le haut de l'escarpement.

Sur la vallée nous comparé le MNS à un MNT issu d'un nuage de point LiDAR de 2011 (voir figure 17). La l'évaluation de la qualité en Z peut donc se faire que sur les zones nues (pas sur le bâti et la végétation). L'erreur observée au niveau des routes et des champs est inférieure à 1 m. Le MNS est donc de meilleur qualité sur la vallée que sur Super-Sauze.

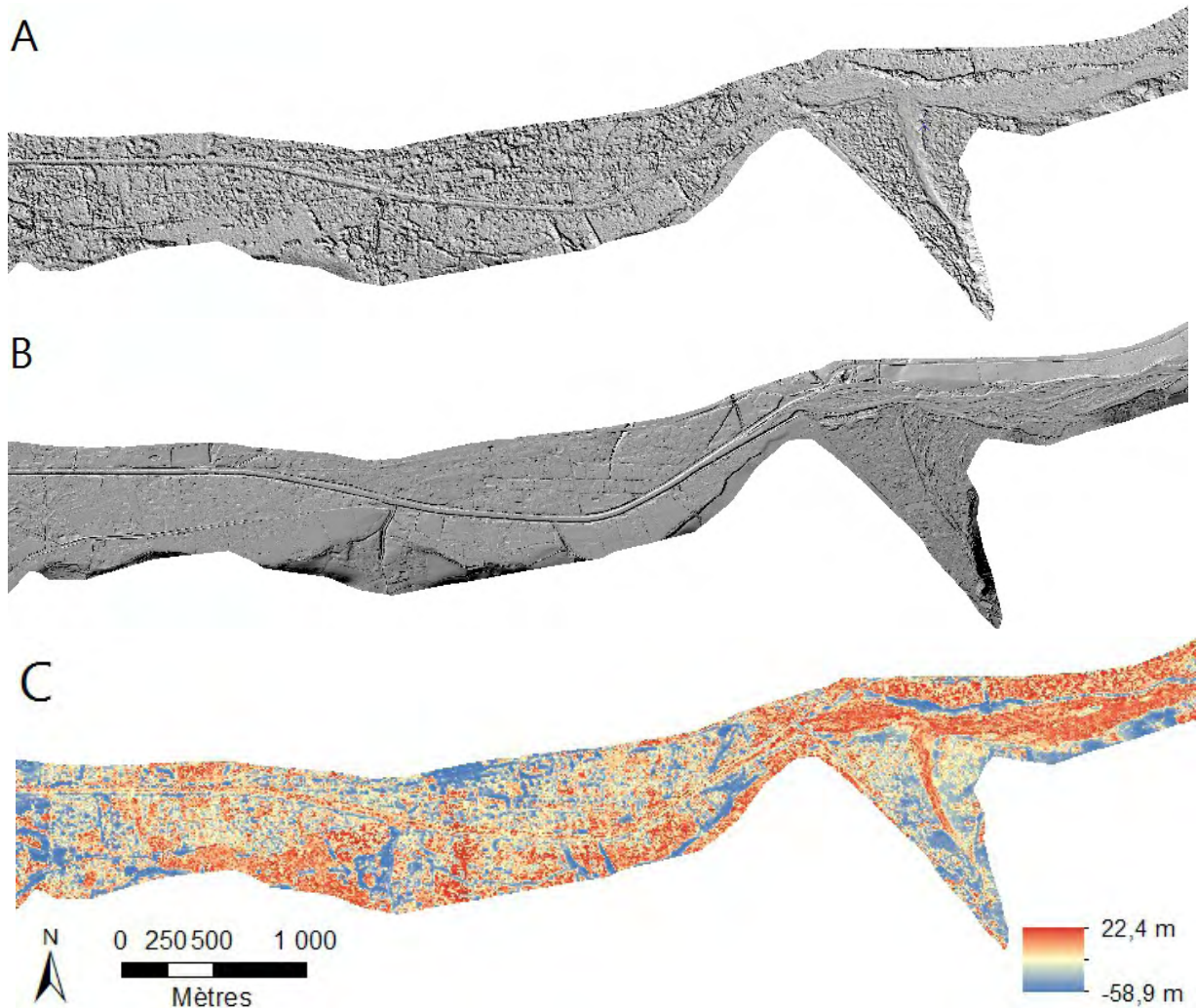


Figure 17 : Comparaison de la qualité du MNT résolu à 1 m sur Barcelonnette.

A : MNS extrait du couple stéréoscopique Pléiades d'octobre 2012 à 0,5 m avec Erdas Imagine PLS

B : MNT issu de l'interpolation du nuage de points ALS de 2011.

C : soustraction du MNS ALS 2011 à celui issu des images Pléiades et évaluation de l'erreur sur la coordonnée Z.

L'extraction du MNT ayant réussie sans distorsions et décalage nous avons pu poursuivre avec l'orthorectification

Avec Erdas pas besoin de ré-enregistrer les GCPs pour l'orthorectification, les trois images sont liées et fonctionnent avec le même fichier de points où est regroupé les GCPs et 'tie points'. Il faudra juste pointer les GCPs et 'check point' sur l'image monoscopique. Erdas Imagine PLS présente tout de même l'inconvénient d'avoir une moins bonne interface qu'ENVI, la navigation y est moins fluide, de plus les points enregistrés s'affichent sur l'interface

de navigation et ne sont pas bloqués, nous pouvons les déplacer facilement à tout instant en pointant la souris dessus et en les faisant glisser et donc par erreur ! Il faut systématiquement faire attention, et si cela arrive, s'en rendre compte tout de suite pour pouvoir faire retour en arrière.

Une première orthorectification avec une pondération automatique des GCPs a été effectuée. Le résultat donne des images bien orthorectifiées, elles ne présentent, au premier abord, aucun décalage et aucune distorsion et se superpose correctement au MNT et à l'orthophoto de 2009. Les ortho-images étant toutes bien géoréférencées et superposables la corrélation va pouvoir être effectuée.

B. Résultats de la corrélation

1) Avec les images Pléiades

Nous avons choisi de corréler l'image du 7 août 2012 avec la deuxième image du couple stéréoscopique du 5 octobre 2012 qui présente une plus petite différence d'angle d'incidence lors de la prise de vue (voir tableau 3). Les deux images ayant un angle de prise de vue plus proche elles auront moins d'écart de géoréférencement et de distorsion entre elles, et donc les légères erreurs d'orthorectification qui peuvent se produire auront un impact moindre sur la corrélation. En effet pour mesurer la déformation il est plus important que les deux images à corréler se superposent le plus parfaitement possible entre elles plutôt qu'à l'image de référence qui représente la géométrie réelle de la région.

	Monoscopique du 7/18/2012	Stéréoscopique 1 du 5/10/2012	Stéréoscopique 2 du 5/10/2012
Angle d'incidence long track	-7°	8,9°	-4°

Tableau 3 : Angles d'incidence lors de l'acquisition des images.

La corrélation sub-pixel (Leprince et al., 2007) s'est faite grâce à l'outil Cosi-corr (voir annexe 5) qui est une application développée pour la plate-forme ENVI. Un premier test de corrélation sur une imagerie rectangulaire de La Valette a été effectué. Mais la végétation crée un champ de vecteurs aléatoires qui rend la visualisation de celui sur le glissement plus difficile car plus faible. Nous avons donc extrait le contour des glissements avant de faire une nouvelle corrélation (voir figure 18).

La corrélation sur La Valette est plutôt satisfaisant au niveau de l'escarpement mais pour le reste de la coulée la direction semble erronée. Elle devrait suivre le sens de déversement du glissement vers le SO, pas plein Sud (voir figure 18A). Pour Super-Sauze (voir figure 18B) le champ de déplacement suit bien la coulée et les variations d'intensité

marquent bien les ruptures de pente et la limite entre les trois zones du glissement que sont l'escarpement, la zone de transition et le pied.

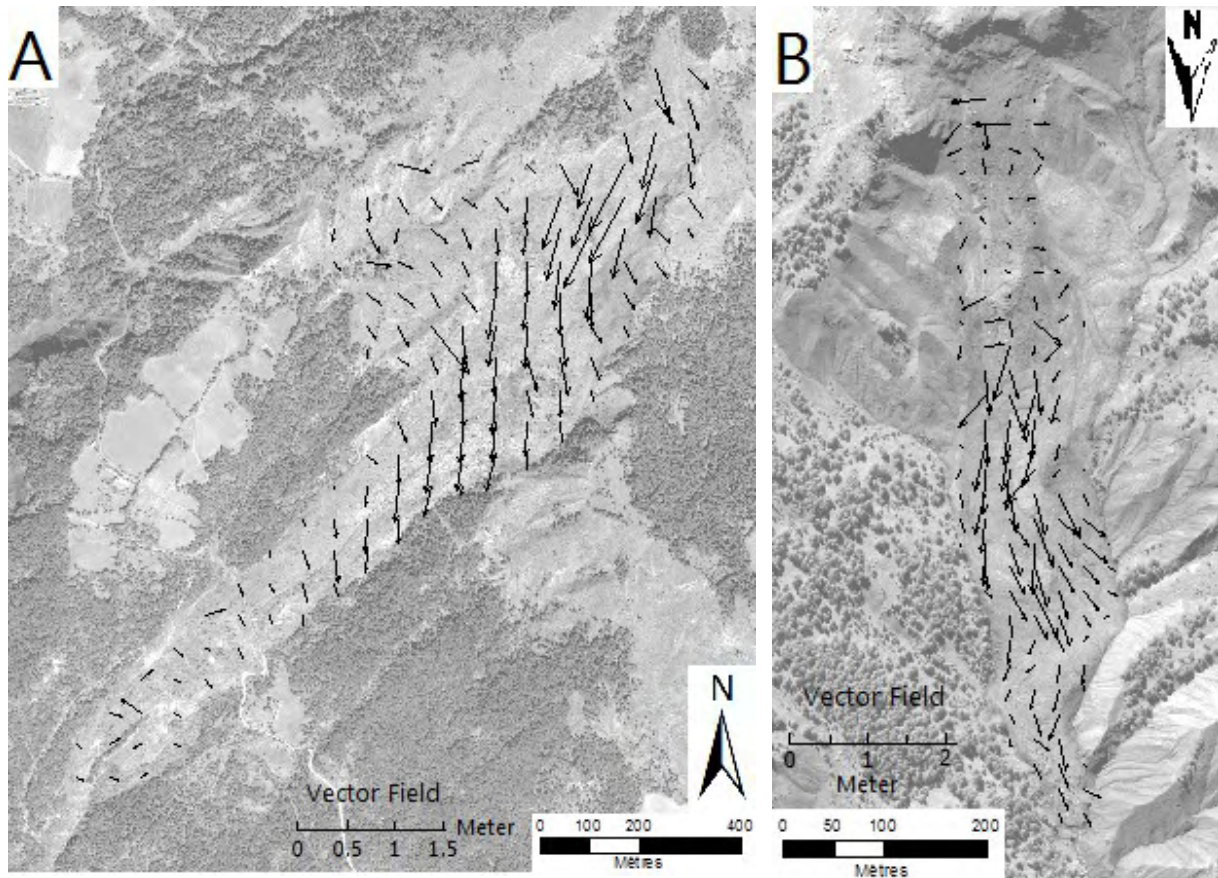


Figure 18 : Champs de déplacements obtenus par corrélation des images Pléiades après la première orthorectification.

A. Sur La Valette, B. Sur Super-Sauze.

Les incohérences observées sur la mesure du champ de déplacements peuvent être dues à une mauvaise orthorectification qui n'a pas été détecté à l'œil nu. Nous avons donc effectué une deuxième orthorectification en densifiant les GCPs sur La Valette (voir figure 15A). Mais cela n'a pas suffi à corriger le problème. Nous avons donc effectué une troisième orthorectification avec une pondération à 2 m des GCPs ce qui correspond au RMSE moyen sur nos 3 axes de nos points (voir tableau 2).

Une fois la corrélation de nos images nouvellement orthorectifiées effectuée nous avons procédé à un filtrage du bruit sur le résultat de notre corrélatin grâce à l'outil NLM Filter de Cosiscorr (Non Local Means Filter). En effet nos images sont très bruitées, notamment à cause de la végétation (voir figure 19A). Le filtrage permet d'éliminer une bonne partie du bruit mais pas complètement comme le montre le résultat sur la figure 19B. Toutefois sur les zones sans végétation, comme la surface de nos glissements, le filtrage ne modifie pas le résultat.

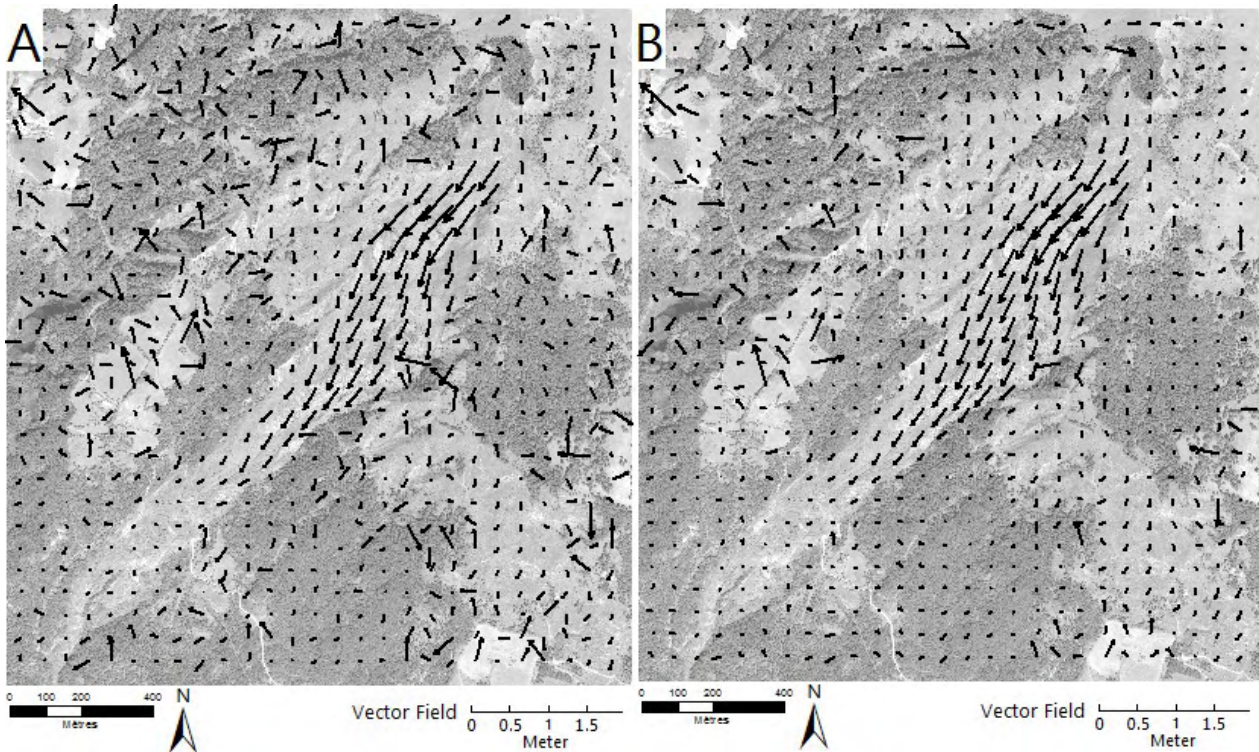


Figure 19 : Comparaison des champs de déplacements obtenus sur La Valette avant et après filtrage du bruit.

A : Sans filtrage, B : Avec filtrage

Tout d'abord, pour le glissement de La Valette, le déplacement mesuré est bien plus cohérent que lors du premier test (voir figure 20A). En effet le glissement se déplace vers le Sud-Ouest parallèlement à la coulée (voir figure 20C). L'intensité varie d'environ 0,7 m en haut de la zone de transition, juste après la rupture de pente, puis diminue progressivement jusqu'à 0,3 m en bas de la zone de transition. Au niveau du pied le déplacement mesuré est très faible, de l'ordre du centimètre. Si nous décomposons le mouvement mesuré, nous observons que la majorité s'effectue sur l'axe Nord vers le Sud, avec 0,3 m en bas de l'escarpement, puis le maximum à 0,6 m en haut de la zone de transition jusqu'à 0,2 m en bas. L'observation sur l'axe Est permet de mettre en évidence les changements d'orientation de la coulée, avec 0,5 m mesuré en haut de la coulée, 0,2 m au milieu et enfin 0,25 m au bas de la zone de transition.

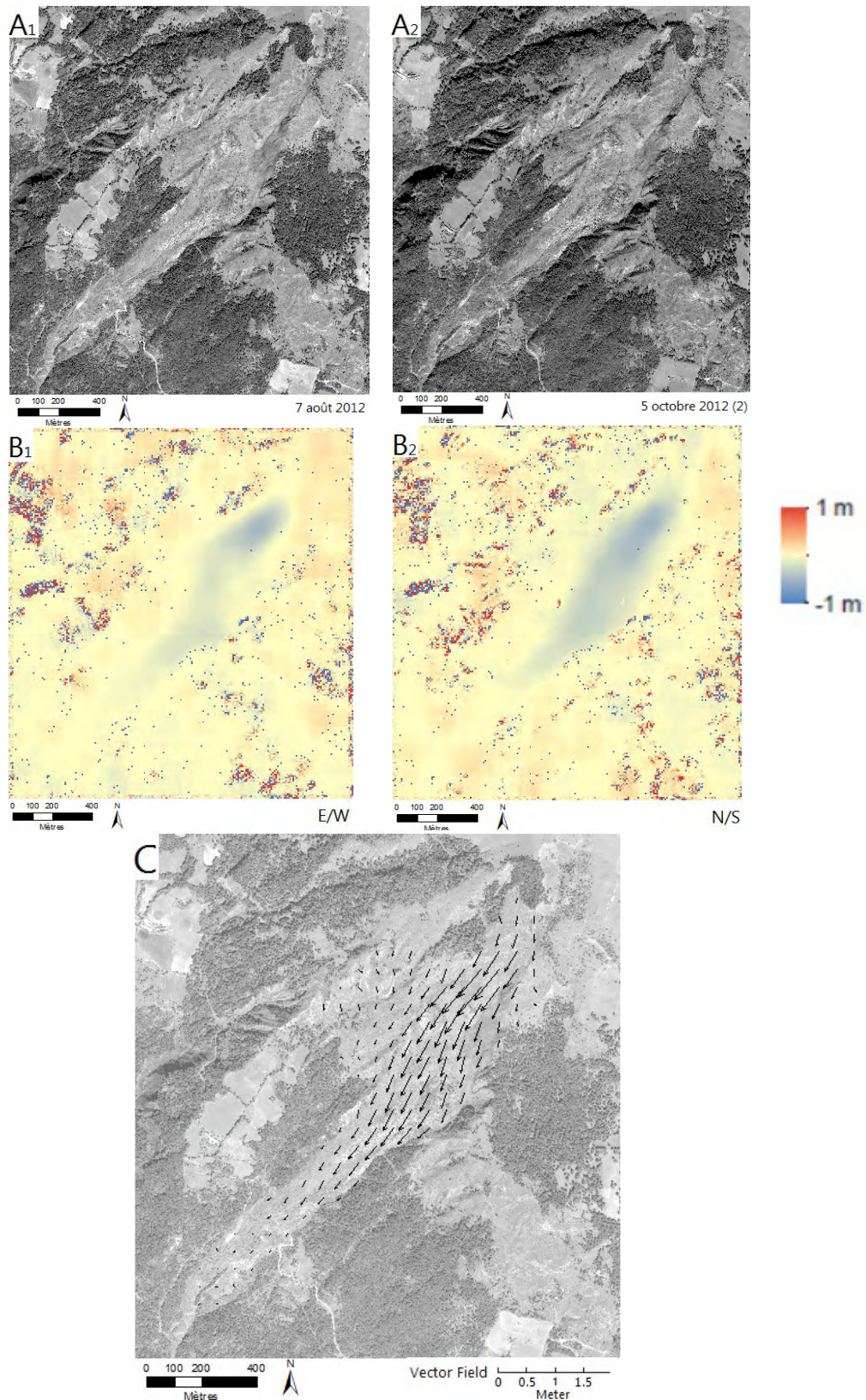


Figure 20 : Corrélation des images Pléiades sur La Valette (après la troisième orthorectification) entre le 7 août et 5 octobre 2012

A : Images Pléiades orthorectifiées qui ont été corrélées, avec pour A1 l'images du 7 août 2012 et pour A2 la deuxième image du couple stéréoscopique du 5 octobre.

B : Intensité du déplacement, avec pour B1 sur l'axe Est et pour B2 sur l'axe Nord.

C : Représentation du champ de déplacement

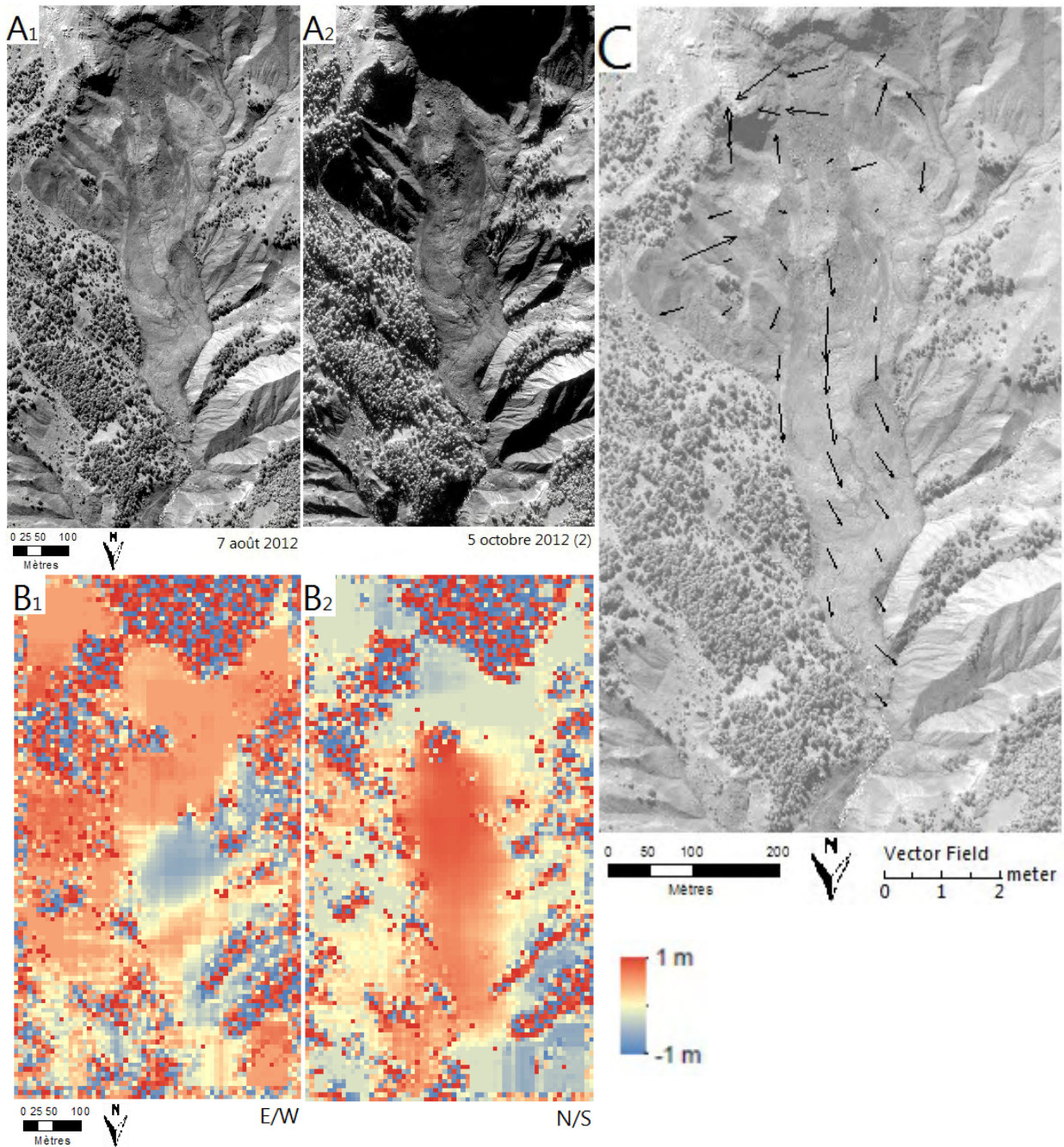


Figure 21 : Corrélation des images Pléiades, avec filtrage du bruit, sur Super-Sauze (après la troisième orthorectification) entre le 7 août et 5 octobre 2012

A : Images Pléiades orthorectifiées qui ont été corrélées, avec pour A1 l'images du 7 août 2012 et pour A2 la deuxième image du couple stéréoscopique du 5 octobre.

B : Intensité du déplacement, avec pour B1 sur l'axe Est et pour B2 sur l'axe Nord.

C : Représentation du champ de déplacement

Pour Super-Sauze le résultat à partir de la première orthorectification est plus satisfaisant. En effet il met bien en évidence les ruptures de pentes et les changements d'orientations de la coulée (voir figure 18B). Sur le nouveau résultat illustré sur la figure 21 Nous pouvons voir que la direction du déplacement au bas de la zone de transition n'est pas celle attendue. Elle devrait être Nord, Nord-Est comme sur la figure 18B or elle est Nord,

Nord-Ouest (voir figure 21C). Toutefois les intensités mesurées sont cohérentes, avec 0,6 m en haut de la zone de transition et 0,3 m au pied, principalement sur l'axe Nord (voir figure 21B et 21C). Tout comme pour La Valette l'intensité sur l'axe Est permet de mettre en évidence le changement d'orientation de la coulée, avec 0,01 m en haut de la zone de transition (donc plein Nord), 0,2 m vers l'Ouest au bas de la zone de transition et enfin 0,05 m sur le pied du glissement. Nous observons également qu'au niveau de l'escarpement Est (à gauche sur la figure 21C) le déplacement mesuré ne suit pas celui du glissement. Cela peut s'expliquer par le fait que sur l'escarpement nous n'avons pas un glissement proprement dit mais des éboulements. Ce qui est mesuré est probablement du bruit ou une perte de cohérence due à l'érosion survenue sur l'escarpement. Pour l'escarpement principal au Sud, la perte de cohérence s'explique par les ombres (perte d'informations) importantes sur l'image du 5 octobre 2012 (voir figure 21A2).

Nous allons donc, par la suite, comparer ces premiers résultats à ceux issus du LiDAR et du GPS différentiel.

2) Le LiDAR terrestre

Nous disposons de six nuages de points LiDAR terrestre déjà nettoyés de la végétation. Avec une acquisition en juillet et une en octobre de l'année 2012 prises sur trois zones : le pied et l'escarpement de Super-Sauze, ainsi que l'escarpement de La Valette. La disponibilité d'images multi-temporelles couvrant la même période que celle de Pléiades va nous permettre de comparer et valider le champ de déplacement mesuré avec les images du satellite.

Nous avons commencé le traitement avec Polyworks pour aligner et géoréférencer les nuages de points. Pour ce faire, un nuage de points obtenu par LiDAR aéroporté de 2012 est utilisé pour Super-Sauze, et un de 2009 pour La Valette. Nous avons constaté que les nuages de points se superposent très bien d'office, mais le recalage à l'aide de la sélection de zones stables a quand même été effectué pour plus de sécurité.

Ensuite le logiciel Surfer7 (voir annexe 4) a été utilisé pour interpoler les nuages de points et créer des surfaces. Nous avons choisi de faire le traitement avec le krigeage qui est une méthode géostatistique longue mais très précise. Cela permet justement de réduire au maximum les erreurs d'interpolations qui pourraient par la suite introduire des artefacts dans la corrélation. Toutefois une comparaison avec la méthode d'interpolation déterministe par plus proche voisin a été effectuée pour évaluer la différence sur l'axe Z. Pour ce faire nous avons soustrait des deux MNT avec le logiciel ArcMap (voir figure 22). Nous pouvons observer que l'écart est faible, de plus au moins 0,1 m, sauf pour les zones où la densité de points est plus faible et donc la qualité de l'interpolation moindre. Nous pouvons également noter que les surfaces les plus éloignées du laser, qui est situé au Nord en haut de l'escarpement, présentent une plus grande différence, comme le montre le début de la coulée. Cet écart sur l'axe Z, bien que non négligeable, ne devrait pas avoir un grand impact sur la

corrélation qui mesure un déplacement seulement à l'horizontal (axes X et Y). L'interpolation par plus proche voisin peut donc être utilisée, mais pour plus de précision le krigeage a été privilégié.

La résolution choisie est de 0,25 m, soit une résolution deux fois meilleure que celle des images Pléiades (0,5 m). Nous aurions pu choisir une résolution encore plus fine (0,10m par exemple) mais l'objectif de la corrélation à partir de surfaces interpolées de points LiDAR était de valider celle faite avec les images Pléiades et était donc prioritaire sur le souhait de mesurer une déformation la plus fine possible. La résolution à 0,25 m a donc constitué un bon compromis, elle n'est pas trop éloignée de celle des images Pléiades. Cela ne gêne donc pas la comparaison, et permet tout de même de détecter des déplacements de l'ordre du centimètre. A noter qu'il faut faire attention à ce que la résolution de l'interpolation soit rigoureusement la même entre les images multi-temporelles (typiquement un pas de 0,25001 m pour l'une et de 0,24999 m pour l'autre) sinon Cosi-corr refusera de lancer la corrélation. De plus corriger cette différence de résolution par la suite est délicat et peut, de plus, introduire de légères distorsions.

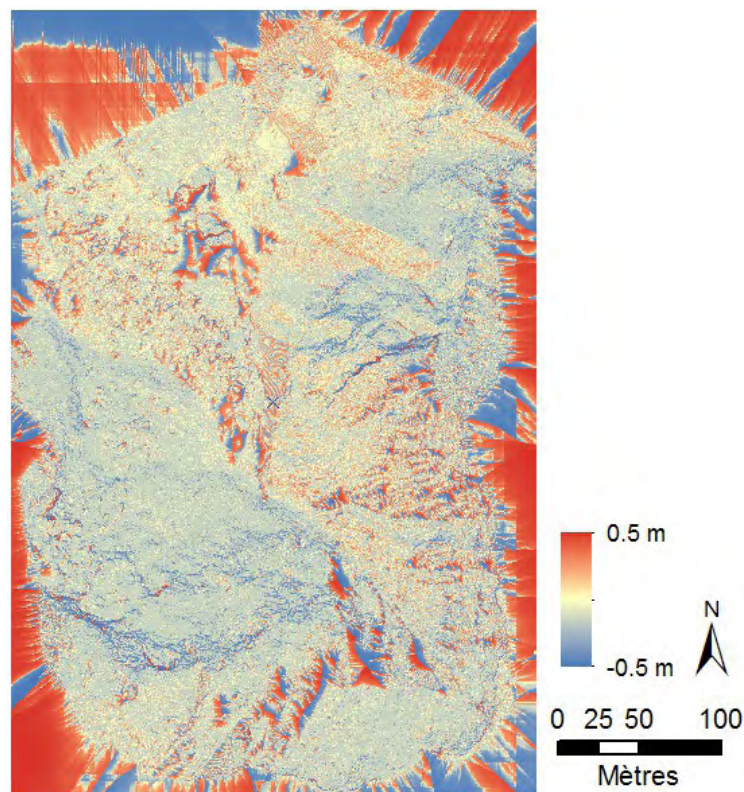


Figure 22 : Comparaison de la qualité sur l'axe Z par soustraction entre le MNT interpolé en kriging et en plus proche voisin.

Une fois les surfaces interpolées nous avons procédé à un ombrage sous ArcMap pour faire ressortir les structures, notamment le relief, la présence de gros blocs sur les surfaces de glissement (particulièrement sur Super-Sauze) et les fractures en extension (voir les surfaces interpolées et ombrées sur la figure 23). Les structures en extension sont généralement

perpendiculaires au sens de déplacement. La simple observation des surfaces permet donc de déduire le sens du déplacement. De plus, le jeu de superposition des couches avec ArcMap permet de voir, à l'œil nu, le déplacement et même de faire une première estimation grossière du taux de déplacement (voir les surfaces créées en figure 23).

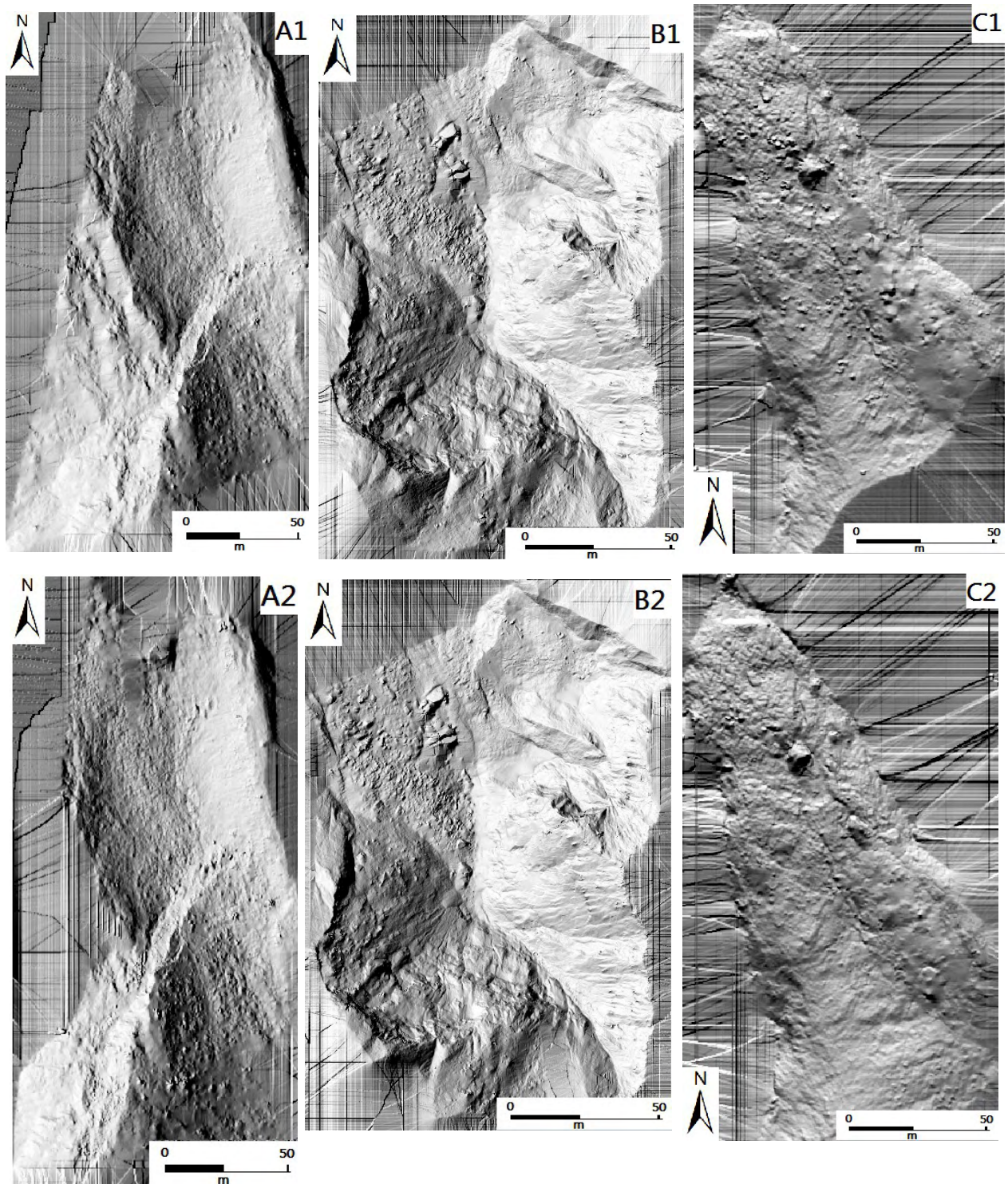


Figure 23 : Modèles numériques de terrain issus du LiDAR terrestre.

A : Escarpement de La Valette. A1 de juillet 2012 et A2 d'octobre 2012. Ombrage 270N 25°
 B : Escarpement de Super-Sauze. B1 de juillet 2012 et B2 d'octobre 2012. Ombrage 300N 35°
 C : Pied de Super-Sauze. C1 de juillet 2012 et C2 d'octobre 2012. Ombrage 350N 15°

Les surfaces sont obtenues après interpolation en kriging à 0,25 m des nuages de points, et par ombrage de la surface.

Ensuite, toujours sous ArcMap, nous choisissons la zone à corrélérer que nous délimitons avec la création d'un fichier « de forme » de type polygone. Celui-ci servira par la suite de masque afin d'extraire exactement la même zone entre les deux dates (outil « extraction par masque »). Une fois ces extraits enregistrés au format .tiff, nous pouvons les ouvrir sous ENVI et commencer la corrélation avec Cosi-corr. Pour les surfaces issues du LiDAR, la méthode statistique donne un résultat plus satisfaisant. Et a donc été employé.

Tout d'abord pour l'escarpement de La Valette nous pouvons voir un infime déplacement (environ 0,1 m) sur le haut de l'escarpement (voir figure 24). Cette zone, bien qu'en dehors de la coulée, n'est pas parfaitement stable. En effet l'escarpement de La Valette est caractérisé par de nombreux glissements rotationnels qui forment des blocs basculés dont les crêtes forment les sommets. Ainsi le haut de l'escarpement n'est pas une zone stable et peut donc enregistrer du déplacement. Ce déplacement de 0,1 m environ correspond à celui mesuré avec la corrélation des images Pléiades à l'Est de l'escarpement. En contre bas un déplacement cohérent est mesuré, vers le S-SO (vers le bas de la pente) et de l'ordre de 0,4 à 0,7 m, le long de l'escarpement. Sur les images Pléiades la même direction de déplacement est observée en bas de l'escarpement avec un taux de 0,4 à 0,5 m. Cela correspond donc bien avec le LiDAR terrestre, en tenant compte que les images Pléiades couvrent un mois de moins que les données LiDAR. Il est donc normal qu'elles enregistrent un déplacement légèrement plus faible. La mesure du déplacement par la corrélation des images Pléiades sur l'escarpement Est de La Valette est donc bien validée.

Pour Super-Sauze, sur l'escarpement (voir figure 25), nous observons un déplacement de 0,3 m environ vers le Nord-Nord-Ouest en bas de l'escarpement. C'est un sens de déplacement cohérent puisqu'il suit la direction de la coulée. Sur les parois de l'escarpement, très abruptes en cet endroit, il n'y a pas de glissement proprement dit mais des éboulements. La corrélation ne mesure donc pas du déplacement dû à la coulée mais plutôt l'érosion et la migration des petites particules le long du pendage des couches de marnes schisteuses. Malheureusement la mesure du déplacement n'a pu être obtenue sur l'escarpement avec les images Pléiades à cause de l'ombre projetée par son relief. Cela crée une surface trop sombre pour distinguer les points homologues et donc effectuer une corrélation cohérente. En effet nous avons obtenu un champ de vecteurs partant dans tout les sens sur cette zone d'ombre (voir figure 21C).

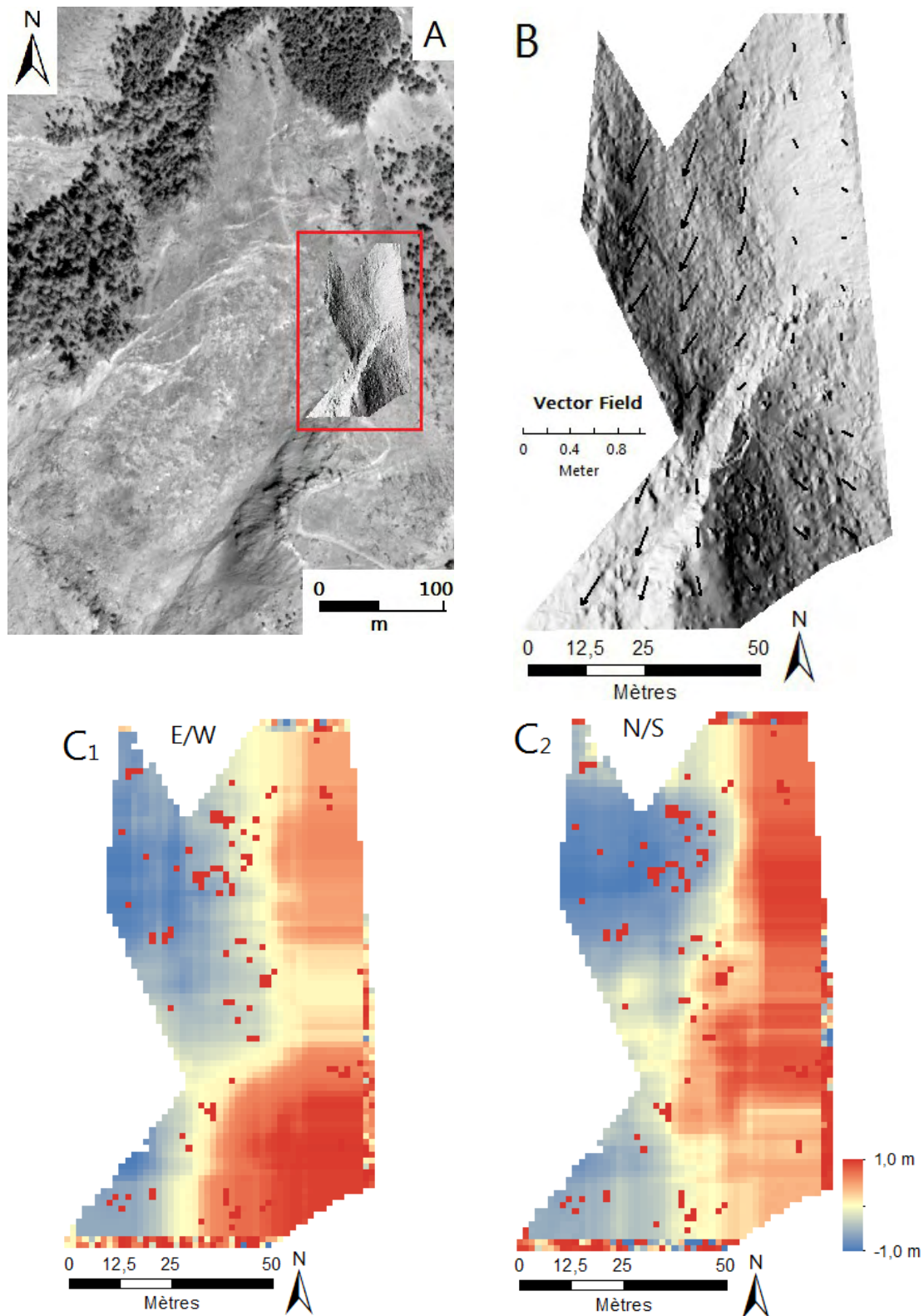


Figure 24 : Corrélation des MNT issus du LiDAR terrestre entre juillet et octobre 2012 sur l'escarpement de La Valette.

A : Localisation de la zone sur l'image Pléiades orthorectifiée de août 2012.

B : Illustration du champ de déplacement mesuré

C : Intensité du déplacement avec sur C_1 pour l'axe Est-Ouest et sur C_2 pour l'axe Nord-Sud (les pixels rouges isolés sont des pixels sans données enregistrées)

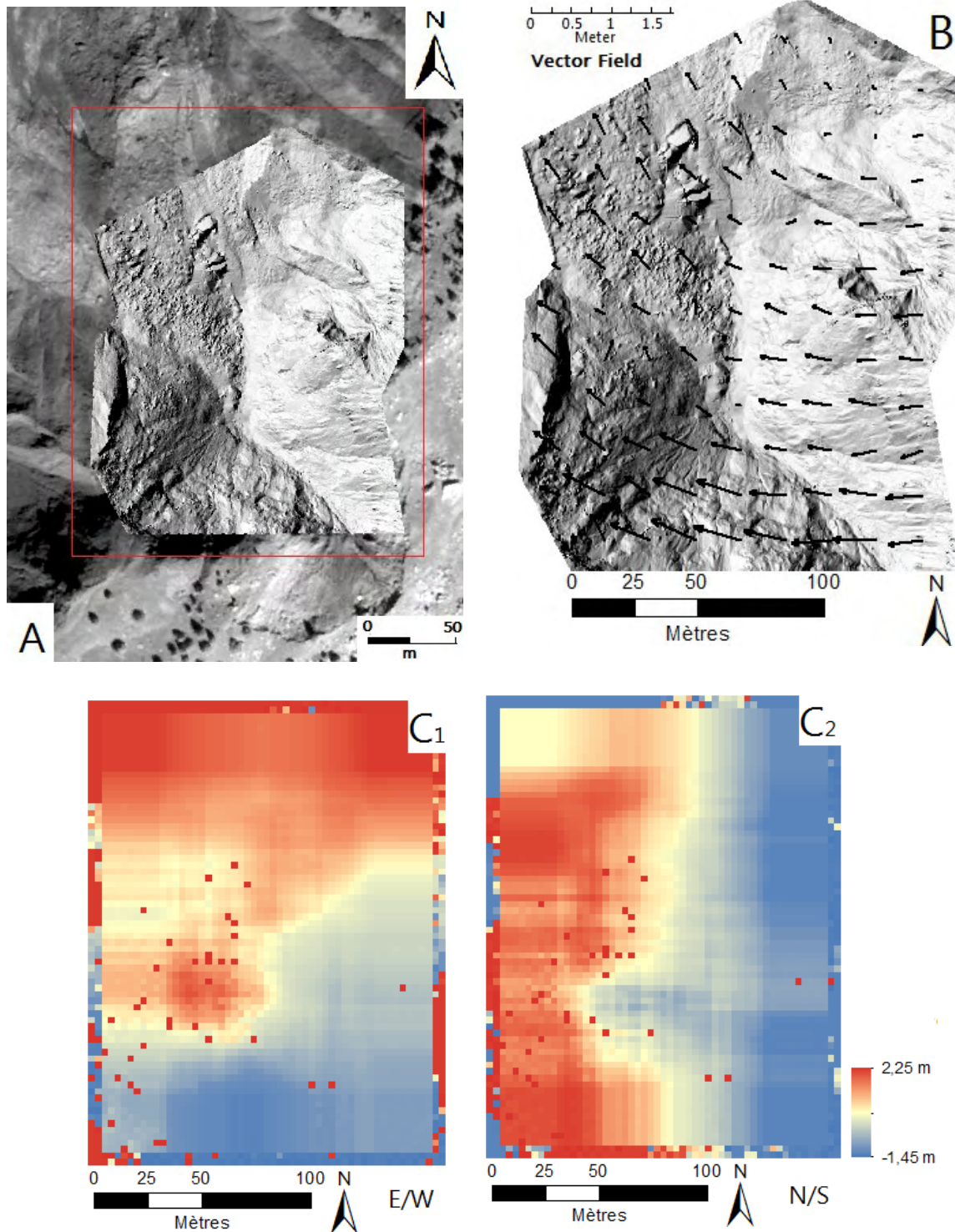


Figure 25 : Corrélation des MNT issus du LiDAR terrestre entre juillet et octobre 2012 sur l'escarpement de Super-Sauze.

A : Localisation de la zone sur l'image Pléiades orthorectifiée de août 2012.

B : Illustration du champ de déplacement mesuré

C : Intensité du déplacement avec sur C₁ pour l'axe Est-Ouest et sur C₂ pour l'axe Nord-Sud (les pixels rouges isolés sont des pixels sans données enregistrées)

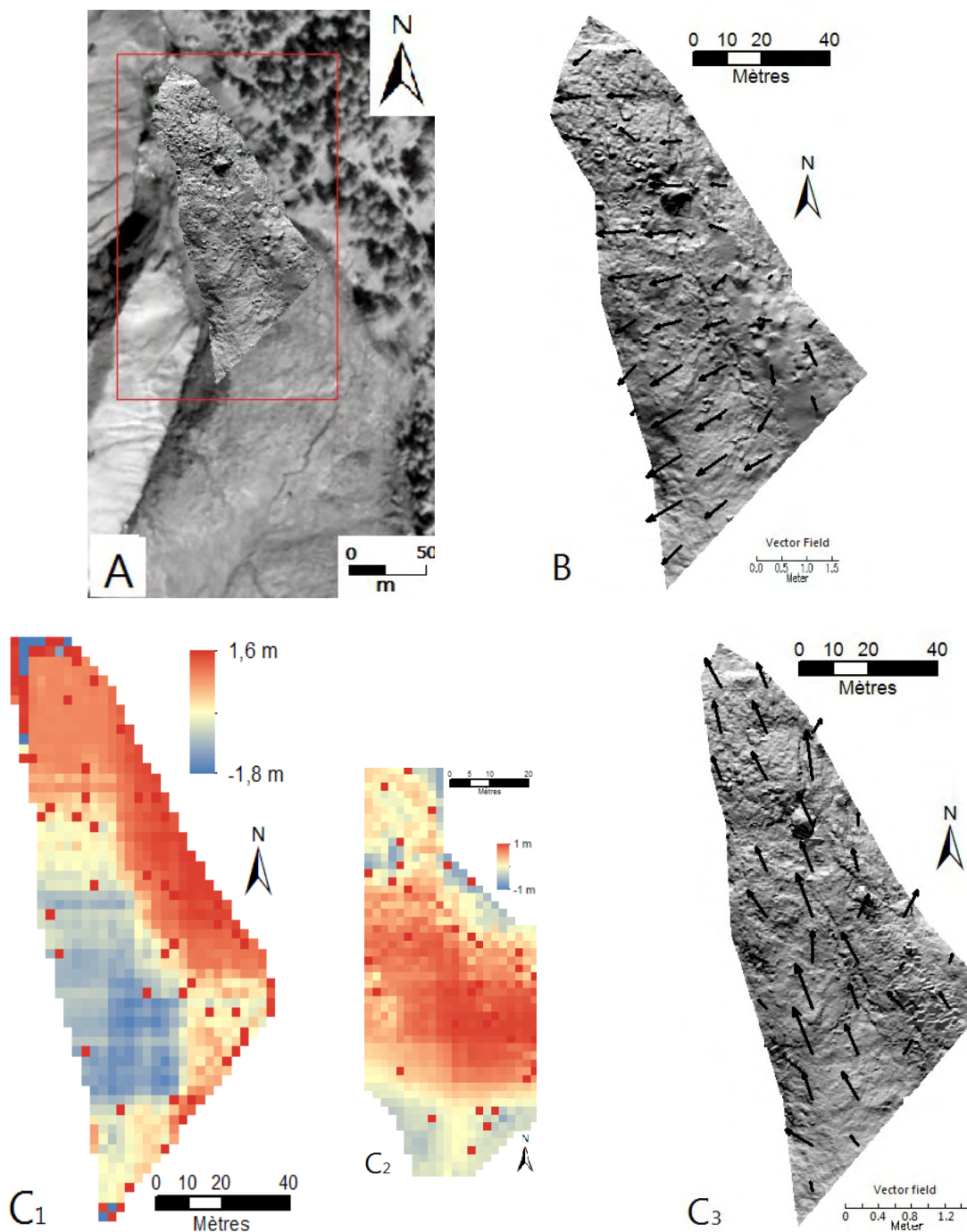


Figure 26 : Corrélation des MNT issus du LiDAR terrestre entre juillet et octobre 2012 sur le pied de Super-Sauze.

A : Localisation de la zone sur l'image Pléiades orthorectifiée de août 2012.

B : Illustration du champ de vecteur obtenu avec un mauvais recalage des nuages de points.

C : Mesure du déplacement avec les nuages de points bien recalés et géoréférencés ; avec C1 l'intensité du déplacement sur l'axe Est-Ouest, C2 sur l'axe Nord-Sud et C3 le champ de déplacement.

Pour le pied de Super-Sauze (voir figure 26) une première mesure a donné un résultat incohérent, que ce soit du point de vue de la direction ou du sens de déplacement ainsi que de son intensité (voir figure 26B). Le sens devrait être Nord-Nord-Ouest dans l'axe de déversement du glissement et non vers l'Ouest voire même Ouest-Sud-Ouest comme mesuré

sur le haut du pied. De plus le pied est une zone en accumulation qui enregistre généralement de faibles déplacements, donc le taux mesuré de l'ordre de 0,8 à 1 m est surprenant. Nous avons donc procédé à un nouveau traitement de nos nuages de points, notamment le recalage, pour corriger cette erreur. Le nouveau résultat obtenu, après corrélation, donne un champ de déplacement cohérent (voir figure 26C). Le déplacement est bien Nord-Nord-Ouest comme attendu et présente une intensité de 0,6 à 0,7 m au centre du pied qui diminue jusqu'à 0,3 m au bas du pied. Cela confirme la mesure issue des images Pléiades présentant un bon champ de déplacement vers le Nord-Nord-Ouest de 0,6 m environ. Le taux de déplacement est toutefois plus grand qu'attendu pour une zone dite d'accumulation, et d'autant plus pour une période estivale, où le risque de forte précipitation entraînant une coulée est faible. Cependant cela n'est pas impossible compte tenu du fait que le pied se situe dans le lit du torrent de Super-Sauze.

C'est premières observations vont, par la suite, pouvoir être validées ou invalidées à l'aide des données enregistrées par le GPS différentiel.

3) Les données du GPS différentiel

Grâce aux stations GPS permanentes installées sur les glissements (voir figure en annexe 2) un suivi journalier du déplacement le long des baselines reliant la station stable (LVAL) est enregistré. Ces données vont permettre la comparaison et la validation du taux de déplacement issu de la corrélation des images Pléiades.

Il est regrettable que, sur La Valette, les données sur la baseline reliant le bas de son escarpement n'ont pas été enregistrées sur notre période d'étude. En effet le pied du glissement avec ses vitesses très faibles, de l'ordre du millimètre par jour, a un déplacement trop infime pour être calculé par la corrélation de nos images résolues à 0,5 m. Par ailleurs, même si ce très faible déplacement est détecté, il reste inférieur aux bruits mesurés par la corrélation de nos images, et donc invisible. Ce déplacement est tellement ténu sur notre période d'étude qu'il est en dessous de la barre d'erreur de la mesure du GPS, d'où des courbes en dents de scies observées (voir figure 27C). Cependant en lissant grossièrement ces courbes on peut déterminer un déplacement global (courbe rouge) de 3 mm entre le 7 août et le 5 octobre 2012 avec un maximum de déplacement sur la composante Est (courbe bleue) de 5 mm environ. Le tableau présenté sur la figure 27D montre la comparaison du déplacement mesuré sur les axes Est et Nord, entre la corrélation des images Pléiades et le GPS différentiel. Nous constatons donc que l'intensité du déplacement mesuré à partir de la corrélation des images Pléiades est d'un ordre de grandeur au dessus de celui de la valeur réelle (centimètre au lieu du millimètre). Cela montre bien l'impossibilité de mesurer de très petits déplacements par la corrélation de nos images Pléiades puisque le bruit mesuré est justement de l'ordre du centimètre et noie donc tout déplacement inférieur au millimètre.

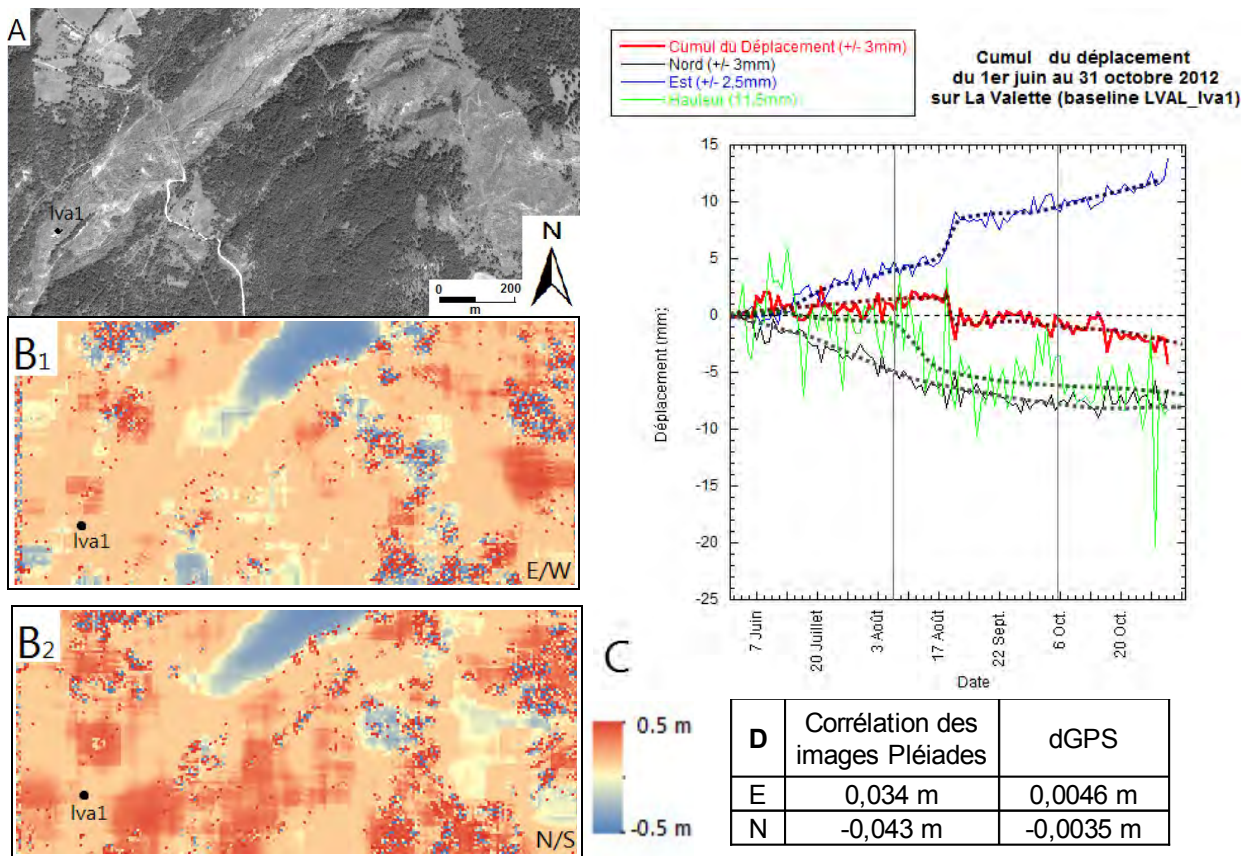


Figure 27 : Comparaison du déplacement mesuré entre la corrélation des images Pléiades et le dGPS au pied de La Valette (station Iva1).

A : Localisation de la station GPS Iva1

B : Champ d'intensité de la corrélation des images Pléiades sur le pied de La Valette, avec B₁ pour l'axe Est et B₂ pour l'axe Nord.

C : Graphique illustrant le cumul du déplacement total et sur les trois axes enregistrés par dGPS (les 2 traits verticaux gris délimitent la période couverte par nos images Pléiades).

D : Tableau comparatif de la valeur d'intensité mesurée sur les axes Est et Nord.

Une meilleure validation peut se faire sur Super-Sauze, notamment grâce à la station saz2 qui permet d'enregistrer le déplacement sur la zone de transition. La ligne de base LVAL_saz2 (voir figure 28C₂) enregistre un déplacement de 0,5 m sur la période couverte par les images Pléiades et jusqu'à 1,5 m entre juillet et octobre 2012. Le maximum de déplacement est enregistré sur la composante Nord avec environ 0,6 m (voir tableau figure 28D). Cela est cohérent avec le champ de vecteurs de direction N-NE, au milieu de la zone de transition observée par la photogrammétrie spatiale Pléiades (voir figures 28B et D). De plus le taux de déplacement mesuré est du même ordre de grandeur (entre 0,4 et 0,5 m) d'août à octobre avec la corrélation des images Pléiades. En revanche nous pouvons observer que l'intensité mesurée sur les images Pléiades est plus faible que la valeur réelle, avec 18 cm d'écart sur l'axe Nord et 12 cm sur l'axe Est (voir tableau comparatif sur la figure 28D).

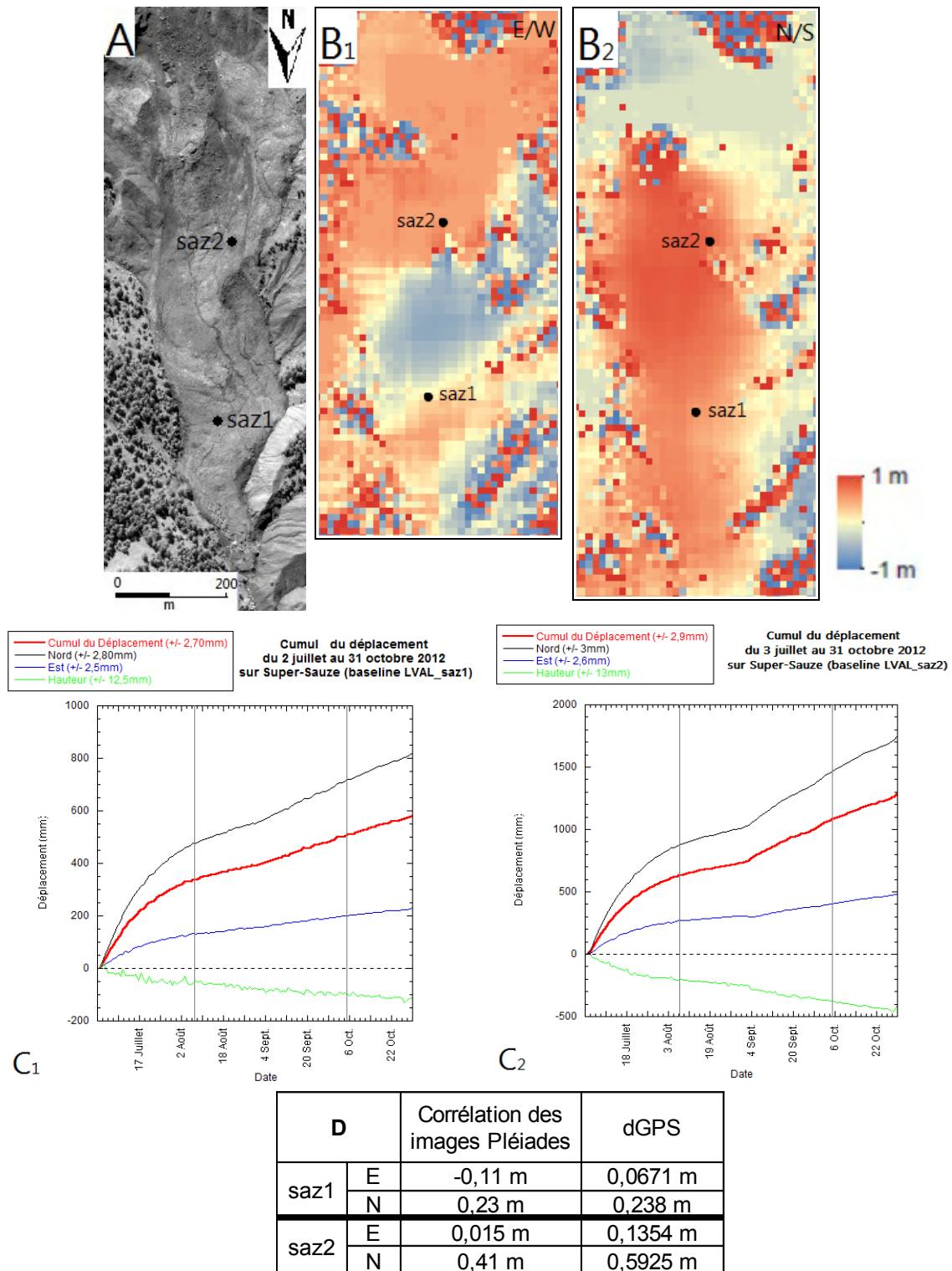


Figure 28 : Comparaison du déplacement mesuré entre la corrélation des images Pléiades et le dGPS sur la coulée de Super-Sauze (station saz1 et saz2).

A : Localisation des stations GPS saz1 et saz2.

B : Champ d'intensité de la corrélation des images Pléiades sur Super-Sauze, avec B₁ pour l'axe Est et B₂ pour l'axe Nord.

C : Graphique illustrant le cumul du déplacement total et sur les trois axes enregistrés par dGPS, avec C₁ à la station saz1 et C₂ à la station saz2.

D : Tableau comparatif de la valeur d'intensité mesurée sur les axes Est et Nord.

Pour la ligne de base LVAL-saz1 (voir figure 28C) qui couvre le pied de Super-Sauze, les vitesses sont bien sûr plus faibles (zone d'accumulation) mais tout de même non négligeables, avec un déplacement global de 0,15 m entre août et octobre. Ce taux de déplacement correspond à celui mesuré de 0,2 à 0,4 m vers le NE avec les images Pléiades (voir figure 28B). Sur l'axe Nord l'intensité du déplacement mesurée est parfaitement validée (voir tableau comparatif sur la figure 28D). Par contre, nous observons un écart sur l'axe Est, bien que peu important (5 cm en plus). Cette erreur observée sur l'axe Est pourrait provenir d'une erreur d'orthorectification de nos images Pléiades plus marquée sur cet axe. Cela est suggéré par l'erreur de géoréférencement, initialement observée avec les différents programmes, et qui est toujours plus importante sur l'axe Est. A noter également le fort déplacement de 0,5 m entre juillet et octobre (voir figure 28C₁). En effet, que ce soit avec la station saz1 ou saz2, le plus fort déplacement se produit au cours du mois de juillet sur Super-Sauze. Cela justifie aussi le fait que le déplacement mesuré avec le LiDAR qui intègre le mois de juillet soit plus important que celui mesuré avec les images Pléiades.

C. Discussions

L'expérimentation de plusieurs logiciels de traitement d'images optiques par télédétection spatiale a montré que des erreurs résiduelles sont présentes dans le modèle du capteur de Pléiades. L'affinage du modèle à l'aide de points de contrôle est donc indispensable comme nous l'avions supposé. Mais même l'intégration de GCPs n'a pas suffi pas à affiner et corriger le modèle avec le traitement sous OTB et ENVI. Des décalages et distorsions sont systématiquement observés avec le traitement sous OTB et ENVI. A noter aussi un fait surprenant, les coordonnées affichées d'un même point entre l'interface ENVI et Monteverdi/OTB sont différents. Cette différence est de l'ordre de 0,001 degrés, soit de l'ordre de la centaine de mètres, ce qui est important (voir tableau en annexe 3). Cela montre que pour l'instant le modèle du capteur Pléiades n'est pas traité correctement avec ces deux logiciels. La différence est-elle due à une lecture différente du RPC entre les deux programmes ? Une erreur de la lecture du modèle RPC Pléiades est possible avec ENVI 5, c'est certainement pour cela qu'une nouvelle version 5v2 a été lancée seulement quelques mois après la mise en service de la version 5. En effet l'erreur de géoréférencement avec ENVI 5v2 est de l'ordre de la dizaine de mètres voire une centaine, tout comme le logiciel Erdas Imagine (voir tableau en annexe 3). Cependant cette nouvelle version d'ENVI n'a toujours pas permis d'effectuer correctement le traitement de nos images.

Une hypothèse sur l'échec de OTB et ENVI 5 est que ces deux programmes présentent des erreurs dans le traitement du modèle du capteur Pléiades comme le montre les erreurs de géoréférencement observées. Pourtant le logiciel ENVI 5v2 a un traitement du modèle du capteur Pléiades qui semble correct (voir annexe 3C) et ne permet toujours pas de traiter efficacement nos images. Une autre hypothèse peut être que OTB et ENVI utilisent la méthode de la géométrie épi-polaire avec des étapes intermédiaires (réassemblage des images

en géométrie épi-polaire) pour extraire un MNT. Or au cours des différentes étapes les erreurs résiduelles présentes dans le modèle du capteur, ainsi que les légères erreurs de son traitement par le logiciel, peuvent se cumuler et entraîner une erreur finale conséquente. Cela nous a amené à tester ERDAS IMAGINE qui extrait un MNT par la géométrie épi-polaire sans étapes intermédiaires. Le traitement a bien fonctionné, le MNS est correctement géoréférencé et se superpose bien à l'orthophotographie de 2009 de l'IGN. Le problème semble donc bien venir des erreurs dans le traitement du modèle du capteur Pléiades et leurs cumuls lors de la décomposition de l'extraction du MNS par géométrie épi-polaire en plusieurs étapes.

La très bonne résolution des images Pléiades nous a permis d'obtenir un bon modèle de surface où les structures principales apparaissent. Mais il reste néanmoins de bien moins bonne qualité que celui obtenu par l'interpolation d'un nuage de points LiDAR où les surfaces sont bien plus lisses et les structures principales plus marquées. Une erreur d'environ 3 m sur l'axe Z est également présente sur le MNS extrait à partir des images Pléiades. Ce qui est tout de même non négligeable. Or, lors de l'extraction, le logiciel Erdas Imagine affichait un RMSE inférieur à 2 m sur Z. Cette erreur de 3 m en vertical peut se répercuter sur le plan horizontal lors de l'orthorectification. Toutefois l'orthorectification a également bien fonctionné, notre MNS, ainsi que nos images orthorectifiées, se superposent correctement à l'orthophotographie de 2009 de l'IGN.

Cependant, même si le traitement sous ERDAS IMAGINE a plutôt bien fonctionné et nous a permis d'effectuer une corrélation et une mesure de déplacement, le résultat n'est pas parfait. De légères erreurs peuvent subsister, comme après la première orthorectification où la corrélation montre un champ de vecteurs incohérents sur la coulée de La Valette avec une direction de déplacement plein Sud alors quelle devrait suivre la coulée vers le Sud-Ouest. Le problème peut venir du nombre limité de GCPs sur La Valette, mais aussi d'une répartition générale trop hétérogène des points et/ou d'un MNS imparfait qui ne permettent pas de rectifier assez efficacement les distorsions géométriques. Il faut également prendre en compte le choix des paramètres d'orthorectification qui ont une grande influence comme le montre la troisième orthorectification, avec une pondération à 2 m des GCPs. En effet cela a permis une mesure du déplacement plus juste (voir figures 18 et 20, 21).

L'erreur de géoréférencement des images Pléiades est plus grande sur la coordonnée Est quelque soit le logiciel de traitement. Cela peut expliquer que l'orthorectification présente de légères erreurs sur cet axe et que la mesure du déplacement y soit moins précise comme le montre la comparaison avec l'intensité du déplacement en Est mesuré avec le LiDAR et le GPS différentiel. Nous pouvons également supposer qu'en l'absence de MNS pour le 7 août 2012, le déplacement sur l'axe Z n'est pas pris en compte entre les deux dates. Or ce déplacement existe, il est donc transposé sur le plan horizontal et entraîne des erreurs sur les axes X et Y. Ces problèmes de géométrie dues à des erreurs sur l'axe Z, notamment pour l'image du 7 août 2012 où le MNS du 5 octobre est utilisé, peuvent donc se répercuter lors de l'orthorectification.

La comparaison avec les données de validation nous a également montré que le

déplacement mesuré est sur-estimé avec la corrélation des images Pléiades. En effet le co-enregistrement a beaucoup de bruits qui vient s'ajouter et fausser la mesure du déplacement. Il y a notamment le problème de la végétation qui perturbe la corrélation et qui subsiste même après filtrage du bruit (voir figure 19). Une possibilité pour supprimer son influence est de créer un masque de la végétation. Pour ce faire une extraction d'objets à partir des images en multi-spectrales peut être réalisée (pixels verts considérés comme étant de la végétation et extraits). Mais le bruit n'est pas seulement causé par la végétation, il y a aussi les surfaces trop réfléchissantes, et/ou trop homogènes, ainsi que la différence d'angles et d'intensités lumineuses entre les deux images qui peuvent gêner la reconnaissance des pixels homologues lors de la corrélation et donc la mesure du déplacement par corrélation.

Avec le LiDAR terrestre nous avons vu que des erreurs peuvent également apparaître (voir figure 26). Elles peuvent être issues du choix de la méthode d'interpolation, du choix de l'azimut et de l'angle de l'ombrage qui peut créer des erreurs lors de la corrélation. Mais encore lors de l'extraction de la zone à corréler qui peut découper les pixels et engendrer un léger décalage qui affecte la précision de la corrélation. Mais le plus probable est une erreur lors des recalages et géoréférencement initiaux de nos nuages de points. En effet nous avons pu observer que la différence de la méthode d'interpolation pouvait causer un écart de l'ordre de 0,1 m sur l'axe Z (voir figure 22). Cela n'est pas suffisant pour expliquer l'erreur mesurée sur les axes X et Y lors de la corrélation (voir figure 26). Plusieurs tests ont été effectués pour repérer l'élément incriminant et c'est bien le recalage qui était en cause.

Pour finir il a été prouvé que la mesure des déplacements par corrélation des images Pléiades est possible, et peut être appliquée aux glissements de terrains. Bien qu'une bonne validation de l'intensité mesurée n'a pu être effectuée en raison du faible nombre de GPS permanents à notre disposition. Les erreurs observées peuvent être incriminées par une imprécision du traitement amont (orthorectification) et un bruit important, comme discuté plus haut. Ces erreurs ne mettent donc pas en cause la possibilité de mesurer le déplacement avec la corrélation des images Pléiades. Mais en terme de qualité de la mesure du déplacement une optimisation du traitement amont et une réduction du bruit est indispensable.

Conclusion

Lors de cette étude nous avons pu tester et valider l'utilisation des images optiques Pléiades à très haute résolution pour l'observation de glissements-coulés lents. Cette observation nécessite l'acquisition d'un MNS et de la mesure des déplacements par corrélation d'images multi-temporelles. Pour ce faire, plusieurs logiciels de traitement d'images ont été expérimentés et leurs efficacités dans ce domaine évaluées, notamment pour l'extraction d'un MNS à partir d'images stéréoscopiques et pour l'orthorectification visant à corriger les erreurs de géométrie et le géoréférencement des images. Au final seul le logiciel Erdas Imagine nous a permis d'aboutir au traitement de nos images. Sur l'Orfeo ToolBox et ENVI 5 une inadaptation du logiciel à gérer le modèle du capteur Pléiades a été mise en cause. D'autre part, l'échec d'ENVI 5v2 montre que l'extraction du relief à partir des images réassemblées en géométrie épi-polaire ne tolère pas d'erreurs de géoréférencement dans le modèle du capteur. Ce qui ne convient pas pour les images Pléiades où la grande agilité de son capteur entraîne des erreurs non négligeables. Il est donc préférable d'éviter les étapes intermédiaires lors de l'extraction du MNS qui peuvent accentuer les erreurs.

Lorsque la chaîne de traitement a pu aboutir à l'obtention de nos images correctement orthorectifiées grâce à Erdas, une mesure du déplacement par corrélation sur les glissements de terrain de La Valette et de Super-Sauze a pu être effectuée. Le champ de vecteurs obtenu est cohérent avec la direction et le sens de la coulée ainsi que la géomorphologie du glissement. Mais la comparaison avec les données issues du LiDAR et du GPS différentiel montre de légères erreurs sur la mesure de l'intensité, notamment sur l'axe Est-Ouest. En effet les valeurs d'intensités du déplacement mesurées à partir des images Pléiades sont plus grandes. Cela peut s'expliquer par une orthorectification imparfaite qui induit un faux déplacement, mais aussi par du bruit lors de la corrélation des deux images multi-temporelles et dû à la végétation, ou par la différence d'intensité lumineuse entre les deux images ou encore par une trop grande homogénéité sur certaines zones qui peuvent fausser la corrélation. L'erreur de mesure est donc d'autant plus grande quand le déplacement est très faible (bruit mesuré plus important).

Malgré les biais observés, le satellite Pléiades répond donc bien aux attentes dans le domaine de la gestion du risque grâce à ses images optiques à très haute résolution, sa revisite régulière et son capteur agile. Ces images permettent d'obtenir une mesure cohérente du déplacement par corrélation d'images multi-temporelles. Mais des progrès dans l'optimisation du traitement restent à faire pour obtenir un modèle numérique de surface de meilleure qualité et une orthorectification plus fine. Ceci afin de minimiser les artefacts et source d'erreur sur les images pour mesurer le plus justement possible le déplacement.

Bibliographie

- Aguiaro G., Poli D., Remondino F., 2012. *Testfield trento: geometric evaluation of very high resolution satellite imagery*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXIX-B1, commission I – WG4.
- Binet R. 2012. *Mesure des déformations de terrain à l'aide d'images satellitaires visibles THR*. Présentation CEA.
- Bitelli, G., Dubbini M., Zanutta A., 2004. *Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslides bodies*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 35.
- Cardenal J., Mataa E., Perez-Garciaa J.L, Delgadoa J., Hernandeza M.A, Gonzalezb A., Diaz-de-Teranb J.R., 2008. *Close-range digital photogrammetry techniques applied to landslide monitoring*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37.
- Casson, B. 2004. *Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.
- Debela-Gillo M. and Käab A. 2011. *Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation*. Remote Sensing of Environment 115, 130-142.
- Delacourt C., Allemand P., Casson B., Vadon B., 2004. *Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images*. Geophysical research letters, vol.31 (L15619), 1-5.
- Delacourt C., Allemand P., Berthier E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P., Pambrun C., Varel E., 2007. *Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: A review*. Bulletin de la Société Géologique de France , vol.178 (2), 89–100.
- Greslou D., De Lussy F., Delvit J.M., Dechoz C., Amberg V., 2012. *Pleiades-hr innovative techniques for geometric image quality commissioning*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXIX-B1.
- Guérin C., Binet R., Pierrot-Deseilligny M., 2012. *Détection des changements d'élévation d'une scène par imagerie satellite stéréoscopique*. Reconnaissance des formes et intelligence artificielle.
- Haug T., Käab A., Skvarca P., 2010. *Monitoring ice shelf velocities from repeat MODIS and Landsat data – a method study on the Larsen C ice shelf, Antarctic Peninsula, and 10 other ice shelves around Antarctica*. The Cryosphere 4, 161-178.
- Heid T. and Käab A. 2012. *Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery*. Remote sensing of environment, vol.118, 339-355.
- Jacobsen K., 2008. *Satellite image orientation*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXVII-B1, commission I, WG I/5.
- Krishna B. G., Amitabh, Srinivasan T. P., Srivastava P. K., 2008. *Dem generation from high resolution multi-view data product*. International Archives of the Photogrammetry,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXVII-B1, commission I, ThS-3.

- Leprince S., *Student Member, IEEE*, Barbot S., *Student Member, IEEE*, Ayoub F., Avouac J.-P., 2007. *Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements*. IEEE Transactions on geosciences and remote sensing, vol 45, no 6.
- Li A.K.Y. and Batchvarova T., 2008. *Topographic mapping and terrain modeling from multi-sensor satellite imagery*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXVII-B1, commission I, WG I/2.
- Ligua A., Piatti D., Rinaudo F., 2008. *Remote monitoring of a landslide using an integration of gb-insar and LiDAR techniques*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXVII-B1, commission I, WG I/5.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E., 2002. *The use of global positioning system techniques for the continuous monitoring of landslides*. Geomorphology, vol. 43 (1–2), 33–54.
- Panem C., Bignalet-Cazalet F., Baillarin B., 2012. *Pleiades-hr system products performance after in-orbit commissioning phase*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXIX-B1.
- Poli D. and Caravaggi I. 2012. *Digital surface modelling and 3D information extraction from spaceborne very high resolution stereo pairs*.
- Squarzoni, C. 2003. *Mesure des champs de déplacement de surface et modélisation numérique des glissements de terrain*. Thèse de doctorat, ENS Lyon.
- Toutin T. 2004. *Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods*. Int. J. Remote sensing, vol 25, no 10, 1893-1924.
- Traveletti J., Delacourt C., Allemand P., Malet J.-P., Schmittbuhl J., Toussaint R., Bastard M., 2012. *Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 70, 39-55.
- Traveletti J. 2011. *Imagerie multi-paramètres et multi-résolutions pour l'observation et la caractérisation des mécanismes de glissements-coulées*. Thèse de Doctorat, Université de Caen.
- Zhang C. and Fraser C., 2008. *Generation of digital surface model from high resolution satellite imagery*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol XXXVII-B6, commission VI, WG VI/4.

Remerciements

Je remercie tout d'abord M. Jean-Philippe MALET, mon tuteur de stage, pour la confiance qu'il m'a accordé en me confiant ce sujet, ainsi que de m'avoir permis de découvrir le monde de la recherche.

M. André STUMPF pour son aide, sa disponibilité, ses conseils, les recherches et le temps qu'il m'a consacré pour son assistance informatique et pour avoir fait l'effort de me donner les explications en français. Un grand merci.

Je tiens également à remercier particulièrement M. Grzegorz SKUPINSKI pour sa bonne humeur communicative, sa grande gentillesse, ses discussions et son humour qui ont égaillé mes heures de bureau, ainsi que son aide, ses conseils et ses bonnes idées qui m'ont été très précieux.

Merci également à :

Julien PONTON pour avoir de par sa gaieté, son sourire et son aide, créé une ambiance détendue et productive.

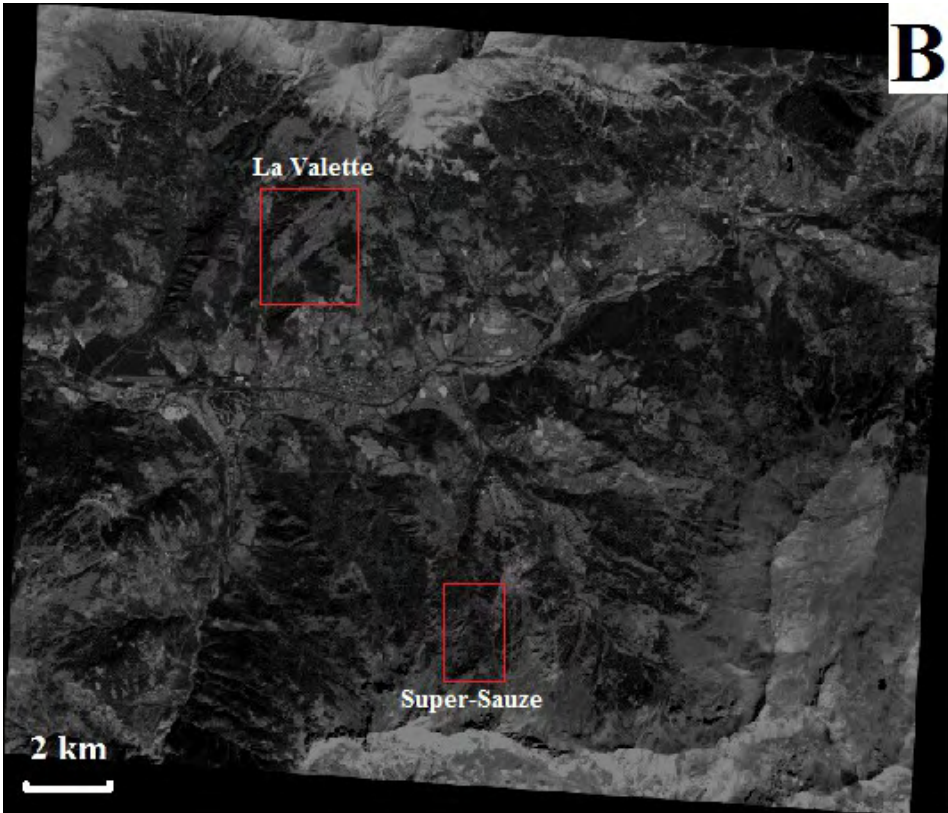
Alexandre MATHIEU pour le voyage aller et retour à Barcelonnette et son empathie communicative tout au long de la semaine de terrain, ainsi qu'à tout le personnel de Séolane à Barcelonnette pour leur accueil chaleureux.

Mes camarades de promotion Aurélie, Cyril, Fred, Gilles, Marc et Pauline pour tous les repas que l'on a partagé ensemble dans la joie et la bonne humeur. Je remercie personnellement Pauline pour sa bonne humeur ses discussions passionnées, Marc pour s'acharner à essayer de trouver une blague qui me fasse rire alors qu'il y arrive très bien sans, Aurélie pour avoir partagé nos problèmes aidant ainsi à en débloquent certains. Et Gilles pour nos discussions et débats littéraires ainsi que pour m'avoir continuellement soutenue et encouragée. Vous étiez un soutien précieux durant tout ce stage.

Alexandra pour nos discussions et nos fous rires ainsi que son soutien.

Et enfin toute ma famille, pour son appui au quotidien et particulièrement ma sœur.

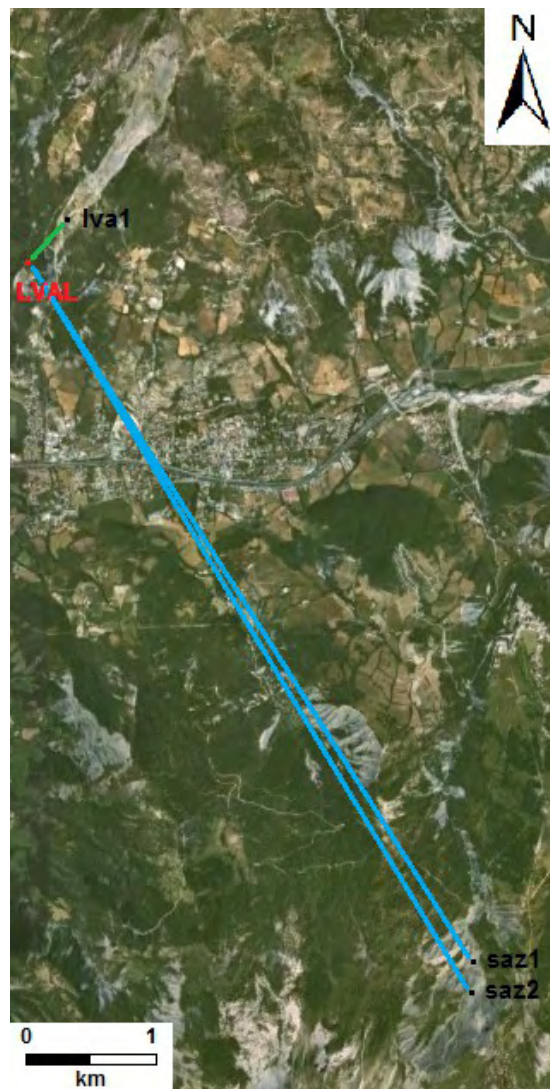
Annexe 1 : Présentation des images Pléiades



A : En MS (rouge, bleu, vert) résolution 2,5 m.

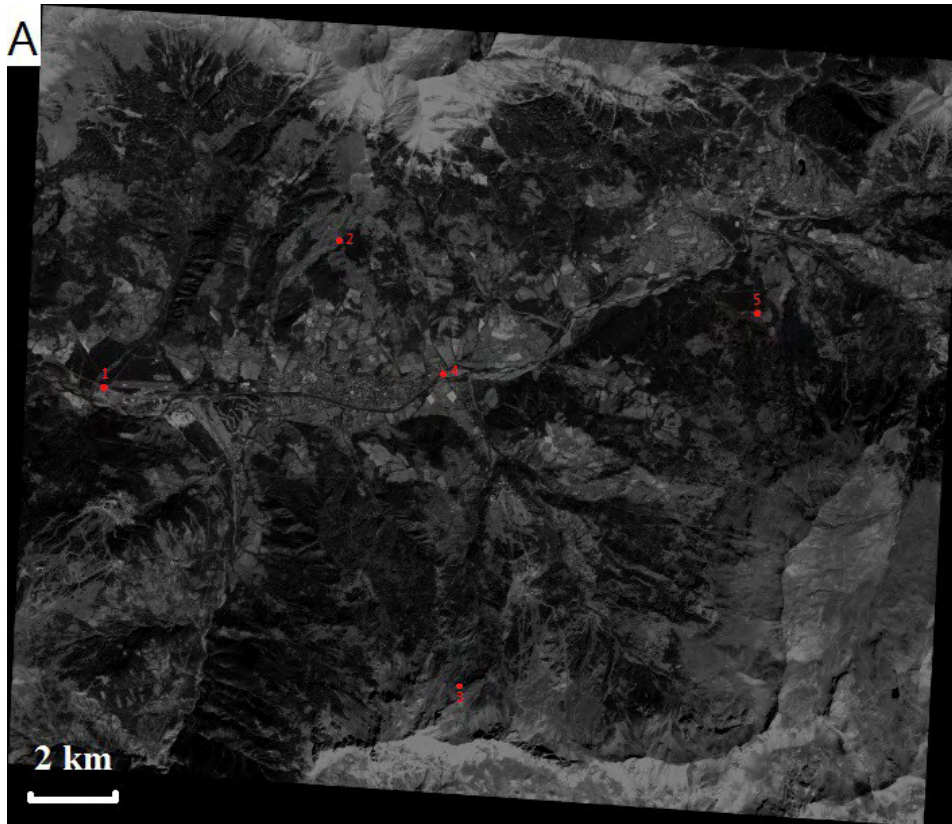
B : En P (gris) résolution 0,5 m

Annexe 2 : Présentation du réseau de station pour le dGPS



Localisation des stations GPS permanents et tracés des baselines utilisées pour la validation du taux de déplacement (en bleu pour Super-Sauze et en vert pour La Valette). La station LVAL représenté en rouge est la station en zone stable qui sert de référence.

Annexe 3 : Tableau comparatif des erreurs de géoréférencement des images Pléiades pour les différents programmes.



Annexe 3A : Localisation des 5 points choisis pour l'évaluation des erreurs de géoréférencement.

B	Pixel		Monteverdi		ENVI 5		ENVI 5v2		ERDAS IMAGINE	
image monoscopique 7 août 2012	3263	12494	6,599475	44,385623	6,6023444444	44,3879388889	6,6023555556	44,3879305556	6,6023527778	44,387930556
	11212	6545	6,648449	44,413307	6,6511916667	44,4156166667	6,6512027778	44,4156083333	6,6512027778	44,415608333
	15536	22115	6,675181	44,342312	6,6777583333	44,3446277778	6,6777666667	44,3446194444	6,6777666667	44,344622222
	14106	12076	6,666306	44,388157	6,6689611111	44,3904694444	6,6689694444	44,3904611111	6,6689722222	44,390461111
	24659	10361	6,731257	44,396559	6,7337138889	44,3988666667	6,7337222222	44,3988583333	6,7337194444	44,398861111
Image 1 couple stéréoscopique 5 octobre 2012	3271	13109	6,598462	44,388704	6,6029972222	44,3857611111	6,6030055556	44,3857527778	6,6030055556	44,385752778
	10947	6446	6,646708	44,418838	6,6511166667	44,4158916667	6,6511194444	44,4158833333	6,6511222222	44,415880556
	15177	21606	6,673406	44,347873	6,6776527778	44,3449361111	6,6776555556	44,3449277778	6,6776555556	44,344930556
	13896	12287	6,665285	44,391336	6,6696	44,3883944444	6,6696166667	44,3883888889	6,6696111111	44,388386111
	24207	10054	6,729987	44,400518	6,7340972222	44,397575	6,7341055556	44,3975694444	6,7341055556	44,397572222
Image 2 couple stéréoscopique 5 octobre 2012	3308	12561	6,597678	44,386279	6,6035777778	44,3876055556	6,6035916667	44,3876	6,6035888889	44,3876
	10797	6565	6,645288	44,41444	6,6510638889	44,4157583333	6,6510638889	44,4157444444	6,6510722222	44,415752778
	14981	22038	6,671976	44,343448	6,6775833333	44,3447722222	6,6775916667	44,3447638889	6,6775916667	44,344766667
	13815	12162	6,664481	44,388846	6,6701638889	44,3901638889	6,6701722222	44,3901611111	6,670175	44,390158333
	23988	10450	6,728965	44,397382	6,7344472222	44,3986944444	6,7344583333	44,3986861111	6,7344555556	44,398683333

orthophoto IGN 2009	
6,601163	44,3869
6,651216	44,4141
6,677965	44,3447
6,667921	44,3895
6,733147	44,3982

Annexe 3B : Coordonnées en ligne/colonne du pixel et en longitude/latitude dans le système WGS84 données par les différents logiciels pour chaque images sur 5 points.

Suite annexe 3

C	Monteverdi		ENVI 5		ENVI 5v2		ERDAS IMAGINE	
Monteverdi	6,599475	44,385623	-0,0028694	-0,0023159	-0,0028806	-0,0023076	-0,0028778	-0,0023076
	6,648449	44,413307	-0,0027427	-0,0023097	-0,0027538	-0,0023013	-0,0027538	-0,0023013
	6,675181	44,342312	-0,0025773	-0,0023158	-0,0025857	-0,0023074	-0,0025857	-0,0023102
	6,666306	44,388157	-0,0026551	-0,0023124	-0,0026634	-0,0023041	-0,0026662	-0,0023041
	6,731257	44,396559	-0,0024569	-0,0023077	-0,0024652	-0,0022993	-0,0024624	-0,0023021
ENVI 5			6,6023444444	44,387938889	-0,0000111	0,0000083	-0,0000083	0,0000083
			6,6511916667	44,415616667	-0,0000111	0,0000083	-0,0000111	0,0000083
			6,6777583333	44,344627778	-0,0000083	0,0000083	-0,0000083	0,0000056
			6,6689611111	44,390469444	-0,0000083	0,0000083	-0,0000111	0,0000083
			6,7337138889	44,398866667	-0,0000083	0,0000083	-0,0000056	0,0000056
ENVI 5v2					6,6023555556	44,3879305556	0,0000028	0,0000000
					6,6512027778	44,4156083333	0,0000000	0,0000000
					6,6777666667	44,3446194444	0,0000000	-0,0000028
					6,6689694444	44,3904611111	-0,0000028	0,0000000
					6,7337222222	44,3988583333	0,0000028	-0,0000028
ERDAS IMAGINE							6,6023527778	44,3879305556
							6,6512027778	44,4156083333
							6,6777666667	44,3446222222
							6,6689722222	44,3904611111
							6,7337194444	44,3988611111

Annexe 3C : Exemple de l'erreur relative de géoréférencement observée entre chaque logiciel pour l'image monoscopique du 7 août 2012 (valeur sur la ligne – valeur sur la colonne)

D	Monteverdi		ENVI 5		ENVI 5v2		Erdas Imagine	
écart entre les 2 images du couple stéréoscopique	0,000784	0,002425	-0,000581	-0,001844	-0,000586	-0,001847	-0,000583	-0,001847
	0,001420	0,004398	0,000053	0,000133	0,000056	0,000139	0,000050	0,000128
	0,001430	0,004425	0,000069	0,000164	0,000064	0,000164	0,000064	0,000164
	0,000804	0,002490	-0,000564	-0,001769	-0,000556	-0,001772	-0,000564	-0,001772
	0,001022	0,003136	-0,000350	-0,001119	-0,000353	-0,001117	-0,000350	-0,001111
écart entre l'image monoscopique et la 1ère stéréoscopique	0,001013	-0,003081	-0,000653	0,002178	-0,000650	0,002178	-0,000653	0,002178
	0,001741	-0,005531	0,000075	-0,000275	0,000083	-0,000275	0,000081	-0,000272
	0,001775	-0,005561	0,000106	-0,000308	0,000111	-0,000308	0,000111	-0,000308
	0,001021	-0,003179	-0,000639	0,002075	-0,000647	0,002072	-0,000639	0,002075
	0,001270	-0,003959	-0,000383	0,001292	-0,000383	0,001289	-0,000386	0,001289
écart entre l'image monoscopique et la 2ème stéréoscopique	0,001797	-0,000656	-0,001233	0,000333	-0,001236	0,000331	-0,001236	0,000331
	0,003161	-0,001133	0,000128	-0,000142	0,000139	-0,000136	0,000131	-0,000144
	0,003205	-0,001136	0,000175	-0,000144	0,000175	-0,000144	0,000175	-0,000144
	0,001825	-0,000689	-0,001203	0,000306	-0,001203	0,000300	-0,001203	0,000303
	0,002292	-0,000823	-0,000733	0,000172	-0,000736	0,000172	-0,000736	0,000178

Annexe 3D : Écart en degrés décimaux entre les 3 images pour chaque logiciel.

Annexe 4 : Liste des programmes utilisés lors de cette étude

Liste des programmes utilisés dans cette étude					
Nom	version	Développeur	Accessibilité	Application générale	Outils utilisés dans cette étude
ArcMap (suite ArcGIS)	10 10.1	ERSI	payant licence avancé	Système d'information géographique, Géomatique	- Visualisation des images - Projection - Création des 'shapes files' pour les nuages de points - Interpolation - Ombrage - Extraction par masque ...
CircéFrance	4.2	IGN (Institut national de l'information géographique et forestière)	gratuit libre	Conversion de coordonnées cartographiques	- Conversion entre projection Lambert 3 Sud, UTM WGS84 zone 32, et coordonnées géographiques en WGS84 en longitude et latitude - Conversion de la coordonnées Z entre altitude et hauteur
CloudCompare	2	EDF (électricité de France)	gratuit libre	Visualisation et traitement de nuage de points	- Ouverture de fichier de points LIDAR au format .L3 et conversion en .txt - Visualisation et découpage des nuages de points
Cosi-corr (application sur plateforme ENVI)		Californian Institute of Technology	gratuit non libre	Mesure de la déformation en surface par corrélation d'image optique	- corrélation - champ de vecteurs
ENVI	4.8 5 5v2	EXELIS	payant	Traitement des images par télédétection	- image Pléiades - module d'extraction de MNT - Orthorectification avec GCPs
ERDAS IMAGINE PLS		Intergraph	payant	Traitement des images par télédétection	- image Pléiades - module d'extraction de MNT - Orthorectification avec GCPs
Orfeo ToolBox (OTB)		CNES (Centre National d'Étude Spatiale)	gratuit libre	Traitement des images par télédétection	- Extraction de points homologues - affinage du modèle sensor de Pléiades - génération des images épipolaires, réassemblage et anaglyphe - carte de disparité et extraction du MNT - Orthorectification
Polyworks/Aligne	10 11	InnovMetric logiciels Inc	payant	Métrie 3D (traitement de nuages de point à très haute densité)	- Alignement - Géoréférencement - Découpage des nuages de points
Surfer	7	GoldenSoftware	payant	Visualisation 3D et modélisation de surfaces	- Interpolation