



Pôle Grenoblois d'étude et de recherche
pour la prévention des Risques Naturels



Programme de recherche 2008

Financé par le Conseil général de l'Isère

Rapport de synthèse

Etude morphologique de l'évolution de glissements de terrain par techniques Lidar : Application au suivi des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière (Trièves).

Coordinateur :

Stéphane SCHWARTZ

Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines - LGCA - UMR 5025
Université Joseph Fourier – Grenoble 1

Participants :

Erwan Pathier¹, Ulrich Kniess¹ et Thierry Villemin²

(1) Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique LGIT - UMR 5559
Université Joseph Fourier - Grenoble 1

(2) Laboratoire EDYTEM - UMR 5204 Université de Savoie

Date : 26 Janvier 2010

Etude morphologique de l'évolution de glissements de terrain par technique Lidar : application au suivi des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière (Trièves).

Projet présenté au

Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels

par

*Stéphane Schwartz*¹, *Erwan Pathier*², *Ulrich Kniess*² et *Thierry Villemin*³

(1) Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines - LGCA - UMR 5025
Université Joseph Fourier – Grenoble 1

(2) Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique LGIT - UMR 5559
Université Joseph Fourier - Grenoble 1

(3) Laboratoire EDYTEM - UMR 5204 Université de Savoie

Résumé

Ce projet a permis de financer la réalisation en Avril 2009 d'une scannerisation laser (LIDAR) hélicopté, associée à des prises de vue photographiques, de la bordure orientale du plateau de Sinard. Cette zone du Trièves est constituée par une importante épaisseur d'argile litée, jusqu'à 250m, reposant sur un substratum rocheux irrégulier. Cette masse argileuse est affectée par des glissements de terrain dont certains, comme le glissement de l'Harmalière et celui d'Avignonet, font l'objet d'une instrumentation permanente dans le cadre de l'Observatoire de mouvements de terrain OMIV. La méthodologie proposée vise à étudier l'évolution de la morphologie et du réseau de drainage en comparant le MNT haute - résolution d'une précision de 10 cm avec un pas de 2 m, avec un autre relevé Lidar réalisé en Novembre 2006 (financement VOR). L'analyse et la comparaison des deux MNT se révèlent être essentiels pour la caractérisation de haute qualité de (i) l'état de surface des zones en mouvement et (ii) du réseau de drainage associé. Ces derniers sont des marqueurs importants de l'activité des mouvements de terrain. De plus, l'élaboration d'un protocole expérimental visant à comparer les deux MNT permet la réalisation de cartes locales de déplacement qui apportent des informations inédites sur la dynamique de la masse argileuse.

Sommaire

1. Présentation du projet.....	p.4
1.1. Objectifs.....	p.4
1.2. Contexte du projet.....	p.5
-Problématique.....	p.5
-Méthodologie.....	p.9
-Caractère Novateur.....	p.11
2. Présentation des Résultats.....	P.12
2.1. Acquisition LIDAR 2009 : description technique.....	p.12
2.2. Traitement afin d'obtenir le Modèle Numérique de Terrain.....	p.13
2.3. Analyse morphologique.....	p.14
-Orientation et inclinaison des pentes.....	p.14
-Indices morphologiques.....	p.15
-Rugosité.....	p.17
-Bassins versants et réseau de drainage.....	p.18
2.4. Comparaison des MNT.....	p.20
-Différence d'altitude.....	p.20
-Corrélation sub-pixel.....	p.21
-Comparaison des profils topographiques.....	p.23
3. Conclusion.....	p.25
4. Bibliographie.....	p.26

1. Présentation du Projet

1.1. Objectifs

Ce projet a pour but d'établir et de valider une méthodologie utilisant des techniques de télédétection rapprochée haute-résolution LIDAR (Light Detection and Ranging) afin d'améliorer le suivi de l'évolution de la surface de glissements de terrain en milieux argileux. Un tel suivi est fondamental dans l'étude des risques liés à ce type de glissements très présents dans la région du Trièves.

La méthodologie proposée vise à étudier l'évolution de la morphologie et du réseau de drainage de mouvements de terrain en comparant les MNT haute-résolution issus de données Lidar acquises par hélicoptère à deux dates différentes. Cette comparaison a été réalisée sur un site test situé sur la bordure orientale du plateau de Sinard (Trièves) qui inclut deux glissements de terrains actifs et bien documentés (glissements d'Avignonet et de l'Harmalière). Nous disposons actuellement sur cette zone d'un relevé Lidar et photo, effectué par hélicoptère en novembre 2006 (financement VOR). Pour les besoins de la comparaison, nous avons demandé le financement au Pôle Grenoblois des Risques Naturels d'un nouveau relevé de données LIDAR, couvrant la même zone qu'en 2006. Ce relevé a été effectué en Avril 2009.

Dans une première étape, nous chercherons à identifier les changements morphologiques détectables liés aux glissements sur une période de deux ans et à les valider par rapport aux données existantes (points GPS mesurés deux fois par an et observations de terrain). L'étude s'attachera à obtenir des cartes de vitesses de déplacement et des flux de matière dans les zones les plus actives et à définir les potentialités de détection de la méthode sur la période investiguée en fonction des caractéristiques dynamiques des glissements. Des premières conclusions seront tirées sur la répétitivité temporelle des acquisitions requise pour détecter de manière significative les déformations liées aux glissements. En confrontant le potentiel théorique de ces techniques nouvelles avec la réalité du terrain, cette étude devrait permettre de donner des indications concrètes concernant les conditions d'application de cette méthode à la détection et au suivi de glissements de terrain sur la région du Trièves.

Au-delà des objectifs méthodologiques, les résultats obtenus sur ce site test de l'Observatoire OMIV s'intégreront directement dans les études pluridisciplinaires qui y sont menées actuellement, et plus largement dans nos activités de recherche concernant la caractérisation de la dynamique et les mécanismes de déstabilisation dans les argiles.

1.2. Contexte du projet

Problématique

Lors de la dernière phase glaciaire du Würm (-110 000 à -12 000 ans), le glacier de l'Isère a bloqué l'ensemble des écoulements torrentiels du Trièves en provenance du sud générant un lac d'extension variable (Monjuvent, 1973). Ce lac a été progressivement comblé par des alluvions argilo-limoneux, provenant principalement de l'érosion des piedmonts du Vercors et du Devoluy. La région du Trièves est la principale zone d'affleurement des "argiles litées", qui s'étendent sur plus de 300 km². Depuis leur dépôt ces argiles n'ont subi aucune perturbation ni recouvrement autre que des sédiments glacio-lacustres terminaux. De grandes surfaces d'affleurement sur des dénivellations importantes résultent de cette évolution donnant lieu à des mouvements de versant généralisés dont certains sont particulièrement actifs. La zone d'étude se localise au coeur du Trièves à 25 km au sud de l'agglomération grenobloise. Elle correspond au plateau de Sinard situé en rive gauche du lac du Monteynard (Figure 1).

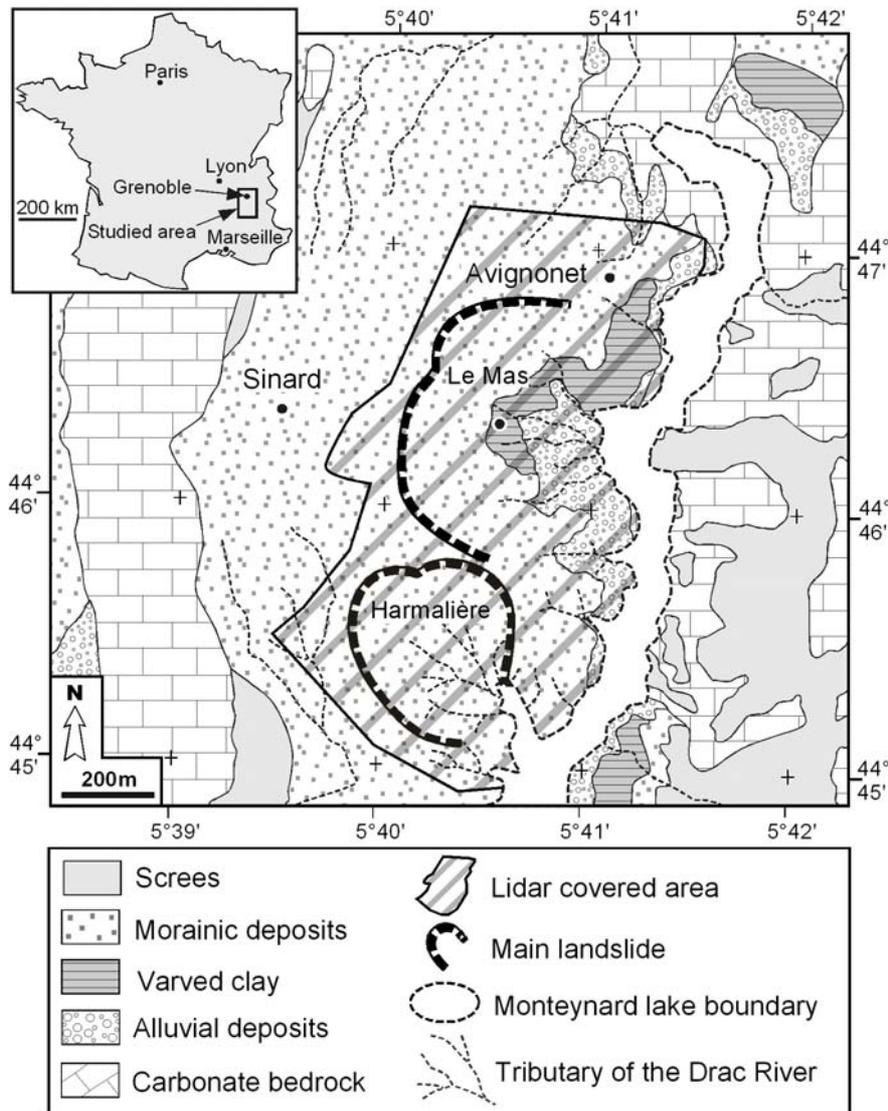


Figure 1. Carte géologique du plateau de Sinard et localisation des glissements de terrain d'Avignonet et de l'Harmalière). La zone couverte par les relevés LIDAR de 2006 et 2009 est indiquée en hachuré.

Les terrains de couverture du plateau sont constitués d'argiles dont l'épaisseur maximale peut atteindre 250 m (Antoine et al., 1981) et qui reposent sur un substratum marno-calcaire entaillé par des paléo-vallées quaternaires comblées par des alluvions (galets, graviers et sables). Le plateau est affecté par deux glissements de terrain majeurs (Avignonet et l'Harmalière) formant des combes juxtaposées sur une superficie totale dépassant 4 km² (Figure 1). Ces zones instables constituent un problème important d'aménagement du territoire pour les collectivités territoriales. En effet, plusieurs zones d'habitations sont concernées en étant situées soit sur les zones en mouvement (Lotissement du Mas), soit en amont de ces dernières (village de Sinard).

Depuis 2006, le glissement d'Avignonet a été retenu avec trois autres sites dans le cadre d'un Observatoire de Mouvement de terrain labellisé par l'INSU (projet Mouvargi au niveau régional devenu OMIV au niveau national). Il est actuellement équipé de 3 stations sismologiques permanentes (dont une de référence), de trois stations GPS permanentes et d'une station météorologique. Dans ce cadre, il a fait récemment l'objet de reconnaissances géophysiques (Renalier et al., 2007) qui montrent une corrélation entre les déformations gravitaires (morphologie, vitesses de déplacements) et la vitesse de propagation des ondes S (à l'échelle pluri-métrique). D'autre part, une cartographie de la profondeur du substratum est actuellement réalisée (Bièvre et al., soumis) en utilisant les enregistrements de bruit sismique (méthode H/V) qui montrent des différences significatives sous les deux glissements étudiés. Le présent projet bénéficiera donc de l'expérience et des résultats acquis par les autres travaux réalisés ou en cours ainsi que des équipements installés sur le site.

Les zones en mouvement sur le site test ont fait l'objet de plusieurs études géologiques, géotechniques et géophysiques (Giraud et al., 1991; Renalier et al., 2007). Elles se caractérisent par l'existence de plusieurs surfaces de rupture dans les argiles. Dans le cas du glissement de terrain d'Avignonet on observe une surface de glissement superficielle située à environ 5 m de profondeur, une surface intermédiaire localisée entre 10 et 20 m, et une surface de glissement profonde aux environs de 40 à 50 m de profondeur. Les vitesses de déplacement sur ce glissement sont hétérogènes et varient entre quelques cm/an et quelques dm/an tandis qu'elles peuvent atteindre plusieurs m/an ou plus sur le glissement de l'Harmalière. Morphologiquement, l'activité des glissements se traduit par la présence d'escarpements, de fissures, de bourrelets, de contre-pentes et de zones humides. Les mesures piézométriques montrent la présence d'une nappe superficielle (quelques mètres de profondeur maximum) dont le niveau fluctue avec les précipitations. En cas de forte pluviométrie ou de fonte rapide d'un manteau neigeux, les glissements peuvent évoluer en coulée comme cela a été observé à l'Harmalière en 1981. Actuellement l'escarpement sommital le plus actif de ce glissement recule en moyenne de plusieurs m à plusieurs dizaines de m/an sous l'action combinée d'une érosion régressive en amont et d'un mouvement en masse du glissement (Moulin and Robert, 2004). Si le rôle déclencheur ou accélérateur des infiltrations d'eau et des variations de pression d'eau sur les glissements de terrain dans les argiles est bien connu (Giraud et

al., 1991, Picarelli, 2000), les chemins parcourus par l'eau dans les cas présents restent difficiles à identifier. D'après Van Asch et al. (1996), le système hydrologique des glissements dans le Trièves consiste en une nappe superficielle dans la couverture colluvionnaire qui approvisionne en eau les fissures dans les argiles, à partir desquelles l'eau peut s'infiltrer plus ou moins horizontalement dans les couches plus silteuses. Les eaux météoriques ne peuvent donc s'infiltrer jusqu'aux surfaces de rupture que via des fissures sub-verticales résultant de la déformation due au glissement et soumises aux cycles saisonniers. L'écoulement des eaux pluviométriques de surface du plateau de Sinard sont en partie collectées et drainées par les deux glissements (combes) vers le lac du Monteynard, par l'intermédiaire un réseau d'écoulement temporaire plus ou moins hiérarchisé suivant le glissement.

Il ressort de ces travaux antérieurs que la morphologie précise de la surface du glissement et son évolution spatiale et temporelle sont des caractéristiques importantes pour comprendre les mécanismes du glissement. Cette situation a motivé l'acquisition, en novembre 2006 sur l'ensemble des deux glissements d'Avignonet et de l'Harmalière, d'un relevé hélicoptère LIDAR auquel étaient associées des prises de vue numériques. La technique LIDAR s'est en effet imposée ces dernières années comme un outil de choix pour l'obtention de MNT à haute résolution sur les glissements de terrains (Schulz, 2004, Carter et al., 2007). L'intérêt de l'acquisition par hélicoptère par rapport à l'avion est de pouvoir réaliser des mesures à plus faible altitude et à plus faible vitesse permettant l'acquisition de mesures topographiques rapprochées avec une grande précision même dans le cas de fortes pentes. Réalisées par Helimap system® (Vallet and Skaloud, 2004) et financées par la structure fédérative VOR, ces données d'altimétrie laser ont fait l'objet d'une première phase de traitements qui a permis d'obtenir un MNT et de géocoder précisément les photos numériques. Le MNT obtenu (filtré de la végétation et des habitations) dont une illustration est présentée en Figure 2, a un pas de 2 mètres et une précision altimétrique d'environ 10 centimètres. Ces caractéristiques sont à comparer à celle du meilleur MNT à notre disposition auparavant sur la zone, à savoir le MNT de l'IGN au pas de 50 m et une précision de l'ordre de plusieurs mètres.

Ce nouveau MNT met clairement en évidence les limites des zones instables et leur relation spatiale, et permet de caractériser l'état de surface des deux glissements et de visualiser l'ensemble du réseau hydrographique. Le MNT permet de comprendre les variations d'orientation des vecteurs déplacements, qui sont influencées par la morphologie locale. Globalement, le glissement d'Avignonet subit un mouvement vers l'ESE, tandis que la partie très active du glissement de l'Harmalière, qui apparaît très clairement sur le MNT, se caractérise par un mouvement vers le SE.

Une étude morphologique détaillée de ce MNT à haute résolution spatiale est en cours (Thèse de U. Kniess) afin de préciser les limites des glissements et leurs interactions, de produire des cartes d'indices de mouvement et de valeurs et de directions des pentes, et de réaliser une étude comparative des réseaux hydrographiques entre les deux glissements. Cette étude incorpore

également des informations géologiques et géophysiques afin de comprendre les différences d'activité, de forme et d'orientation entre les deux glissements.

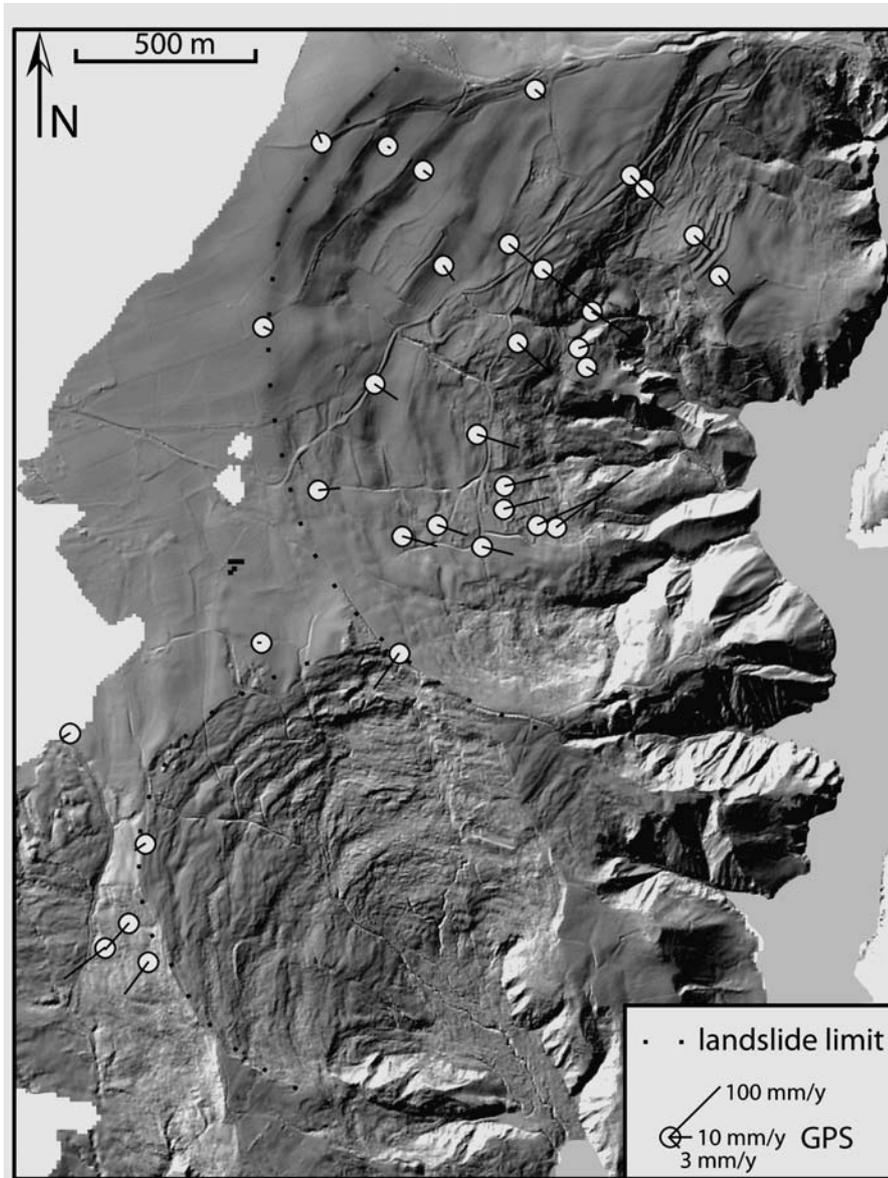


Figure 2. MNT ombré de la zone d'étude du plateau de Sinard, obtenu à partir du relevé hélicoptère LIDAR du mois de Novembre 2006. Les données Lidar ont été traitées afin de ne conserver que les points de mesure correspondant au sol et d'enlever ceux correspondant au couvert végétal et aux habitations.

Pour aller plus loin dans l'analyse, il faut rajouter la dimension temporelle à l'instantané fourni par le MNT Lidar à haute résolution spatiale. En effet, la connaissance des déplacements et des changements morphologiques, confrontée aux autres paramètres comme par exemple la pluviométrie ou la géologie, est essentielle pour décrire et interpréter la dynamique d'un glissement. Ainsi, depuis 1995, trente-deux points GPS sont mesurés deux fois par an par RTM dans la zone étudiée (cf Figure 2 pour la localisation). Les valeurs moyennes des vitesses de déplacements varient entre quelques mm/an à plus de 14 cm/an dans la partie basse du glissement d'Avignonet. Malgré plusieurs

tentatives, aucun point GPS stable n'a pu être implanté sur le glissement de l'Harmalière en raison de sa forte activité. Les données GPS existantes ne fournissent cependant que des valeurs ponctuelles sur les vitesses de déplacement. Aucune information de taux de déplacement n'est disponible sur la bordure sud et nord de ce glissement et sur le glissement de l'Harmalière, qui constituent les zones les plus actives. Pour comprendre la dynamique générale du système constitué par ces deux glissements emboîtés, il est donc indispensable de disposer d'une information spatialement continue. Le MNT haute-résolution de novembre 2006 fournit une référence à un temps donné et une seconde acquisition LIDAR similaire est nécessaire pour obtenir une carte des vitesses de déplacement et des flux de matière dans les zones les plus actives.

L'intérêt de ces deux glissements contigus est qu'ils présentent des dynamiques et des vitesses de déplacements différentes, variant de quelques cm/an à plusieurs m/an. L'existence de grands déplacements nous assure de la possibilité d'observer des différences entre les MNT Lidar à deux ans d'intervalle au regard de la précision de positionnement de l'ordre de 10-15 cm de la technique. D'autre part, la large gamme des taux de déplacements mesurés nous aidera à évaluer les limites de la méthode appliquée. La méthodologie développée pour mesurer les déplacements de la surface de glissement vient en complément d'autres approches, qui sont évaluées dans le cadre de la thèse en cours d'Ulrich Kniess. Ces autres approches sont (1) la réalisation de MNT à plusieurs époques partir de couples stéréoscopiques de photo aériennes (le plus ancien remontant à 1948), (2) la corrélation d'images à partir des même photos pour obtenir des mesures de déplacements, (3) l'interférométrie radar satellitaire.

Méthodologie

Le projet déposé au PGRN concerne l'étude et le suivi temporel des glissements de terrain d'Avignonet et de l'Harmalière qui affectent la bordure orientale du plateau de Sinard par comparaison de donnée LIDAR et de photos numériques à deux ans d'intervalle. La demande financière a permis l'acquisition d'un relevé hélicopté LIDAR sur l'ensemble de la zone effectué en Avril 2009. Ces données viennent compléter l'acquisition similaire faite en automne 2006. L'intervalle de deux ans choisi entre les deux acquisitions résulte du compromis entre une bonne résolution temporelle et la nécessité d'accumuler suffisamment de changements (déplacements, érosion...) sur cette période pour qu'ils puissent être décelables par la méthode. Le choix de la date de réalisation (Avril 2009) a dépendu des conditions météorologiques.

D'un point de vue technique, le système laser Helimap® repose sur l'association de trois capteurs. Le premier est un récepteur GPS permettant de déterminer la trajectoire suivie par le capteur laser. Le second est un capteur inertiel qui fournit l'orientation du système. Enfin, le dernier élément du système est un scanner laser qui mesure la distance capteur-sol. Simultanément des prises de vue photographiques sont acquises avec un capteur à 22 Mpixel.

Dans le cas du site test choisi, la superficie totale à couvrir est d'environ 500 ha. La hauteur de vol sera d'environ 300 mètres ce qui permet l'acquisition d'un nuage de point de mesure avec environ 2-3 points par m² en moyenne et une précision sur la localisation des points de l'ordre de 10-15 cm. Les photos numériques ont un pixel d'environ 8 cm.

Afin d'assurer la bon géoréférencement des points, la présence d'une station de référence GPS au sol est nécessaire, ainsi que la connaissance des coordonnées d'au moins un point de base bien dégagé au sol. Cela, combiné aux données du récepteur GPS et du capteur inertiel embarqués sur l'hélicoptère, permet de calculer la position au sol des points vu par le scanner laser ainsi que l'orientation directe de chaque image.

La méthodologie suit les étapes suivantes :

1- Acquisition

La première étape consiste donc en l'acquisition du jeu de données. Les données livrées seront les suivantes :

- Laser : une liste des coordonnées X,Y,Z du nuage de points en Lambert93 et l'intensité de la réflexion laser associée, (format ASCII).
- Les images au format JPG avec leur orientation directe (i.e. la position et les angles d'orientation du capteur lors de chaque prise de vue).

2- Traitement

Dans une deuxième étape, il faut filtrer le nuage de points qui contient à la fois des points au sol et des points au dessus de la surface (arbre, bâtiment, ...) et quelques points d'artefacts liés à des réflexions sur l'hélicoptère. Le filtrage s'effectue avec le logiciel SCOP++® IPF (2004). Nous avons accès à ce logiciel grâce à nos partenaires de l'ITC (situé au Pays-Bas) dans le cadre du programme européen « Mountain Risks ». Ce logiciel permet un filtrage robuste qui à partir de l'analyse locale du nuage de point permet la classification des points selon leur nature (sol, couvert végétal, bâtiment) et ensuite de n'interpoler que les points au sol pour fournir le MNT au pas voulu (ici 2 m). Un contrôle qualité du MNT est ensuite effectué quantitativement à partir de points de contrôle mesurés par GPS au sol. Un contrôle qualitatif est également effectué sur quelques zones représentatives du paysage observé.

3- Analyse et comparaison des MNT

Dans un premier temps une comparaison directe des deux MNT Lidar sera effectuée en calculant la différence d'altitude entre les deux. Cette opération devrait permettre de mettre en évidence les zones de transfert de matière (zone d'accumulation et zone de départ) les plus importantes sur l'ensemble des glissements d'Avignonet et de l'Harmalière. Elle permet également de quantifier les volumes mis en jeu pour le même intervalle de temps. Sur les zones stables la comparaison des

MNT permettra de calibrer la précision de la mesure. Un deuxième type de comparaison fondée sur l'analyse des réseaux des drainages sera effectué. Un calcul automatique du réseau de drainage sera effectué (MATLAB) sur chaque MNT, et une comparaison des deux réseaux extraits permettra de mettre en évidence les changements de topographie qui, lorsqu'ils sont tenus, peuvent échapper lors de la première approche.

Les résultats obtenus seront confrontés aux données de suivi temporel de surface obtenues par GPS. L'interprétation des résultats cherchera à caractériser la dynamique d'écoulement de matière au sein des deux glissements et proposer des mécanismes de déstabilisations.

Sur les zones où les caractéristiques du glissement sont bien contraintes par des stations GPS proche ou par des observations de terrain, la cohérence avec les résultats issus de la méthodologie décrite ci-dessus sera analysée afin d'évaluer les limites de cette méthode dans différentes situations (déplacements centimétrique, décimétrique et métrique, zone à couvert forestier, zone de prairie, infrastructure routière ou zone habitée, etc.).

Caractère novateur

Le projet de recherche comporte les aspects novateurs suivants :

- Application des techniques de LIDAR hélicopté sur des glissements argileux sur une superficie de plus de 5 km².
- Développement de méthode d'analyse des données LIDAR, notamment par MNT différentiel, afin de tracer les transferts de matière et les volumes mis en jeux sur deux glissements du Trièves.
- Suivi des évolutions des indices de mouvement et relation avec les déplacements de surface mesurés par GPS sur le glissement d'Avignonet.
- Suivi et évolution du réseau de drainage à deux ans d'intervalle permettant de préciser un modèle hydrologique d'écoulement de surface dans les deux glissements.
- Etude et compréhension de la dynamique de deux glissements présentant des activités différentes dans un même contexte géologique

2. Présentation des Résultats

2.1. Acquisition LIDAR 2009 : description technique

Le scan laser a été réalisé en Avril 2009 en utilisant le système hélicoptère de cartographie Helimap® (Vallet and Skaloud, 2004) positionné sur un hélicoptère volant à une altitude de 300 mètres au dessus de la surface du sol. Dans la zone de survol le paysage correspond à de larges zones agricoles constituées par des champs et des prairies alternant localement avec des zones boisées. Il y a peu de structures artificielles à part quelques chemins agricoles sur le site de l'Harmalière et une ligne électrique haute tension avec trois pylônes et 54 constructions pour le site d'Avignonet. La période d'acquisition a été fixée au mois d'Avril afin d'une part de limiter le développement de la végétation et d'autre part d'éviter la présence d'une couverture neigeuse persistante. L'hélicoptère a suivi un plan de vol suivant des lignes parallèles et orientées NW-SE avec un balayage du scanner laser perpendiculairement (Figure 3).

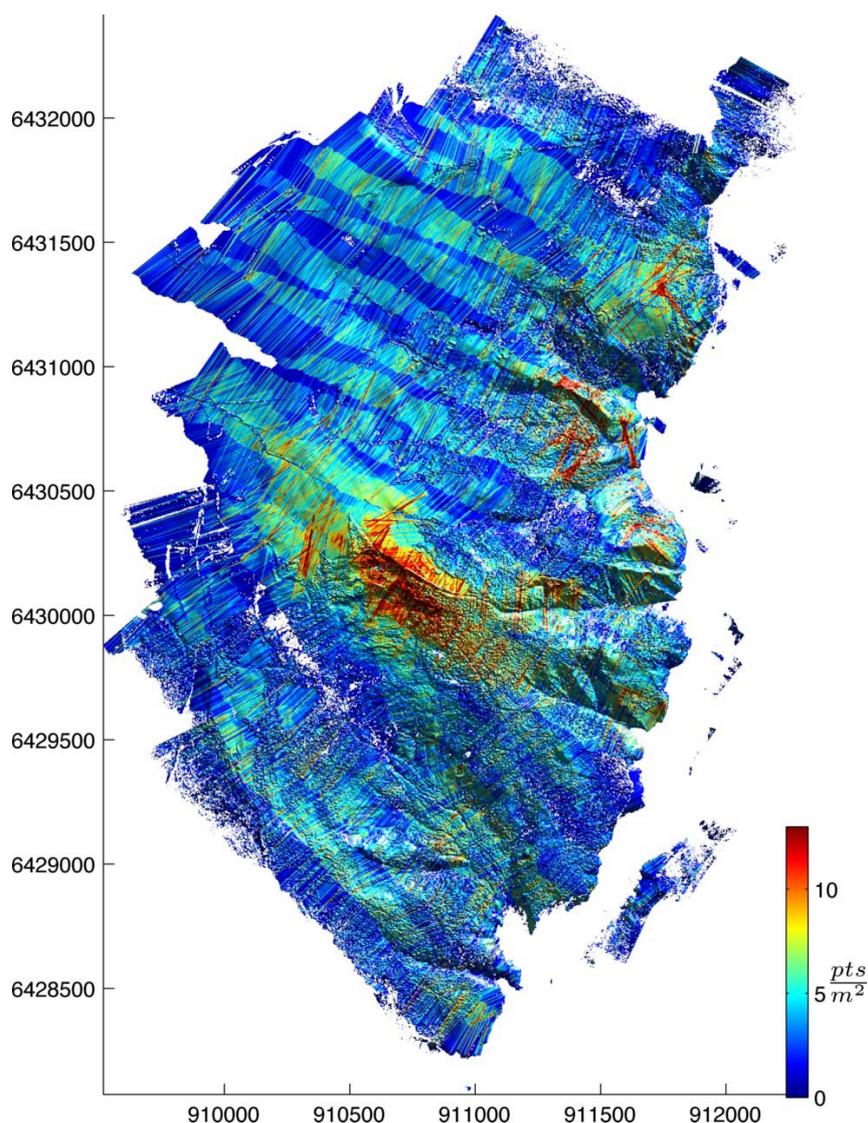


Figure 3. Carte non filtrée de densité de points (pts/m^2) obtenue lors du survol d'Avril 2009. La densité moyenne est de $6 \text{ pts} / \text{m}^2$. Les coordonnées correspondent au système métrique Lambert-93.

Ce dispositif de mesure a permis l'enregistrement de 26 millions d'échos laser sur la surface de réflexion dont la répartition moyenne est de 6 points par m^2 (Figure 3). La résolution verticale et horizontale obtenue est de 10cm.

2.2. Traitement afin d'obtenir le Modèle Numérique de Terrain

Afin d'obtenir le modèle numérique de terrain (MNT) excluant la végétation et les habitations, le nuage de points a été filtré et classifié en utilisant le logiciel SCOP++® IPF (2004) (Figure 4).

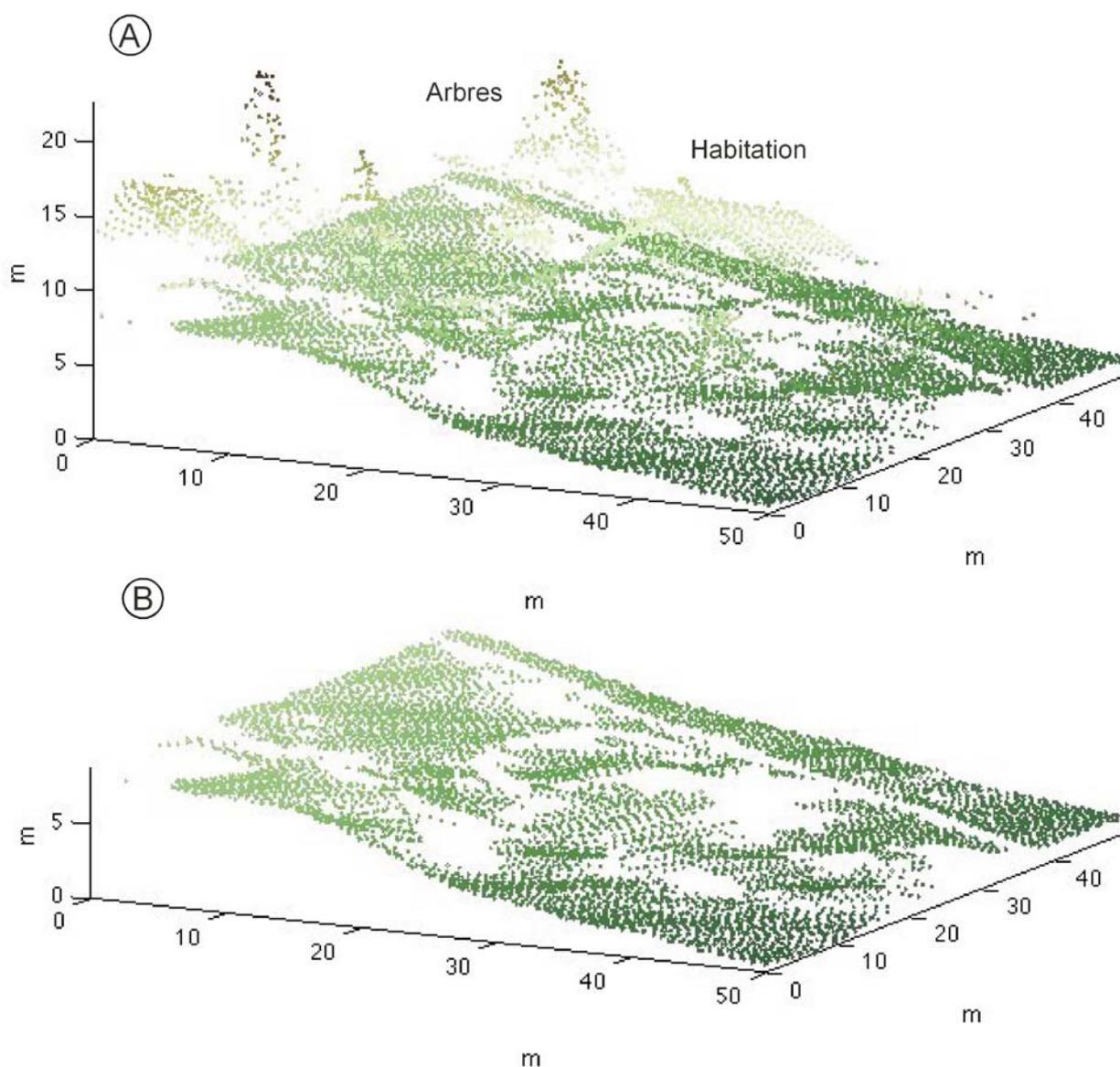


Figure 4. Exemple de traitement et filtrage effectué par scop++ sur une zone réduite du nuage du point. Avant traitement (A), les habitations et les arbres sont visibles. Après traitement (B), il ne reste plus que les points correspondant à la surface du sol.

Ce nuage de point ainsi traité est interpolé suivant la méthode de Briese et al. (2002) sous le logiciel MATLAB. Ces opérations permettent de générer une grille raster de 2m de résolution. Cette grille finale utilise 18 millions de réflexions au sol équivalente à 1,4 points par m². Des représentations ombrées suivant une direction d'éclairage préférentielle ont été effectuées pour l'interprétation morphologique (Figure 5).

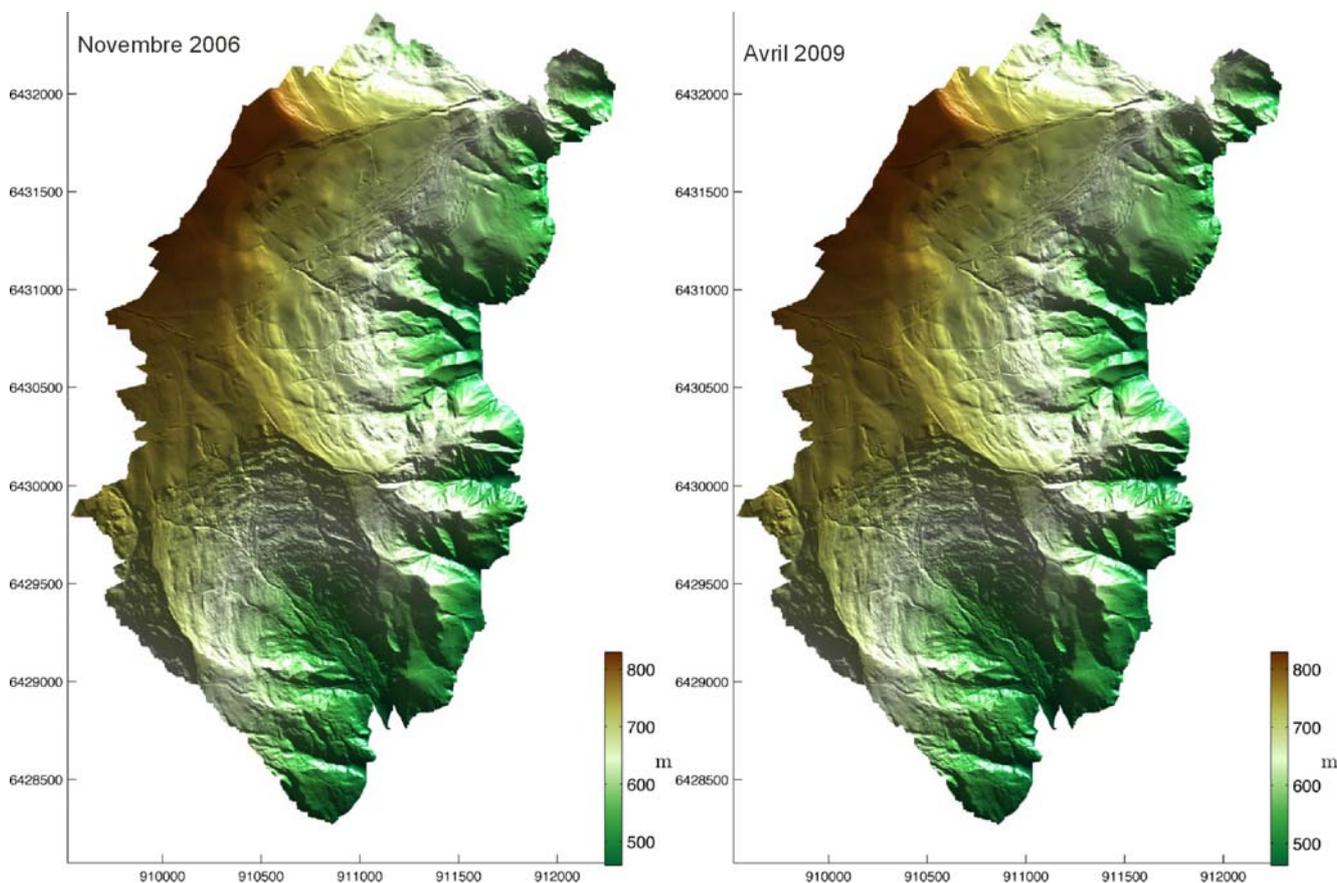


Figure 5. Modèles numériques de terrain Lidar à 2m de résolution à 29 mois d'intervalle. Le code de couleur correspond à l'altitude superposé à un ombrage de la surface suivant une direction d'éclairage venant du NE. Les protocoles de traitement et de filtrage effectués ont été les mêmes pour les deux MNT. La comparaison morphologique entre les deux MNT ne fait pas apparaître de nouvelles zones de déstabilisation mais des zones localement en réactivation.

2.3. Analyse morphologique

Orientation et inclinaison des pentes

Le MNT Lidar à 2m peut être traité afin d'obtenir les orientations des pentes et leur pendage respectif (Figure 6). La zone stable forme un plateau subhorizontal orienté vers le SE. Ce plateau correspond à la surface originale du toit des dépôts argileux avant toute déstabilisation. Ce plateau est affecté par une succession d'arcs de cercle plus ou moins emboîtés dont la concavité est orientée globalement vers l'est en direction du lac du Monteynard (Figure 6). Les deux principales zones instables (Avignonet de Harmalière) se caractérisent par une succession de paliers concentriques orientés vers le sud-ouest et séparés par des ruptures de pente importantes (pentes >20°) orientés vers l'est. La masse argileuse repose sur un substratum géologiquement composite (alluvions et

carbonates) plus compétent qui se traduit par des pentes fortes supérieures à 30° (Figure 6) dont l'orientation se révèle être localement variable.

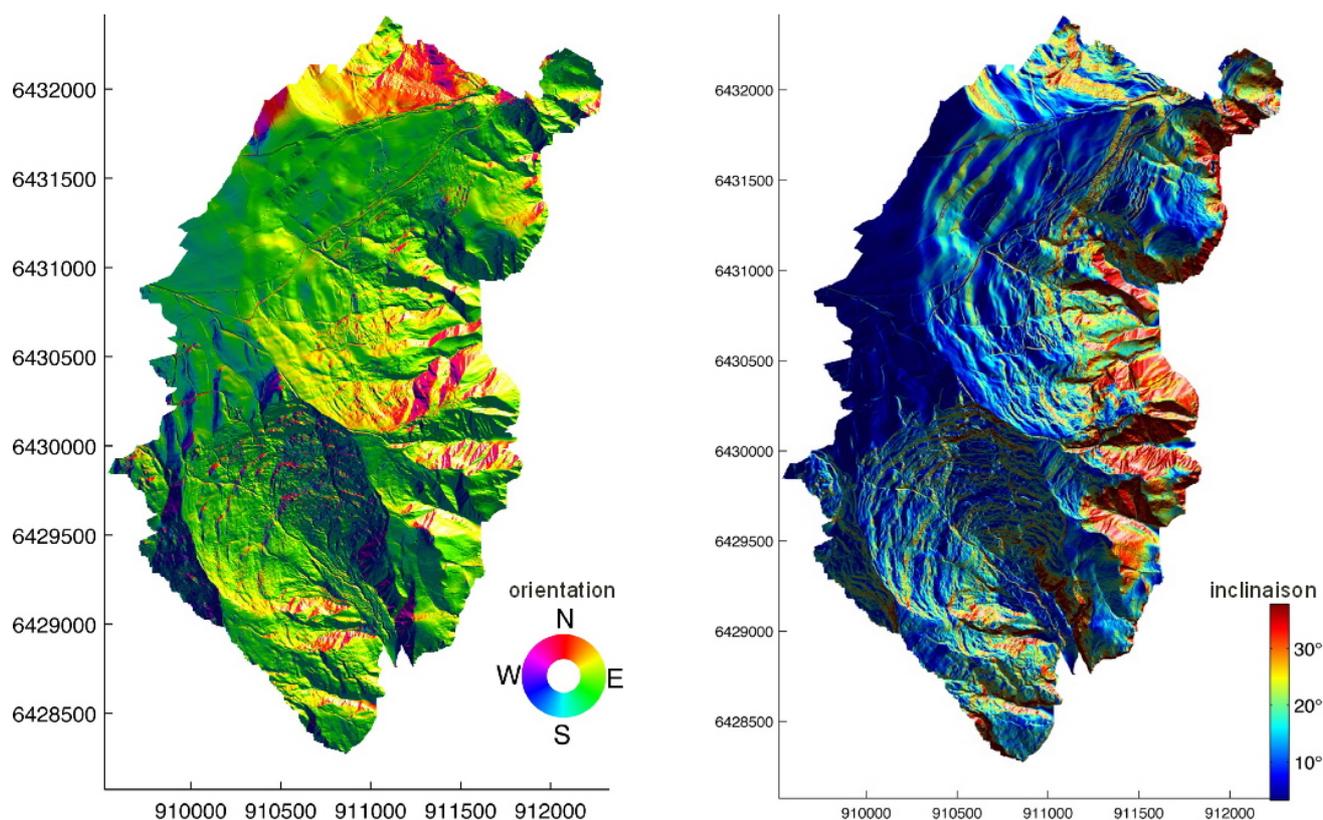


Figure 6. Cartes d'orientation (gauche) et d'inclinaison (droite) des pentes obtenues d'après le MNT à 2m. Les coordonnées sont en Lambert 93.

Ces orientations reflètent la géométrie de l'entaille érosive réalisée par l'écoulement du Drac. Le MNT Lidar permet également d'obtenir les limites des zones argileuses affectées par la déstabilisation. Dans le cas du glissement d'Avignonet la surface instable représente 1,8 km² contre 1,2 km² pour le glissement de l'Harmalière (Figure 7).

Indices morphologiques

Le MNT à 2m permet la cartographie fine des indices de mouvement (Figure 6). Ces indices ont été repérés systématiquement. Ils ont été classés en escarpements et niches d'arrachement, coulées et zones ravinées. Cette carte géomorphologique montre que, dans le cas de l'Harmalière, la limite supérieure correspond à une succession d'escarpements emboîtés dessinant une courbe d'axe de symétrie orienté NNW-SSE. Il se caractérise également par une zone centrale dont la surface est plus lisse et qui correspond à l'emplacement d'une large coulée depuis l'escarpement sommital jusqu'au lac. Dans le cas d'Avignonet la limite supérieure est beaucoup plus développée et continue. La concavité est orientée vers l'Est perpendiculairement au lac. Il est à noter l'absence de coulée comme pour l'Harmalière.

Globalement la zone de l'Harmalière apparaît géomorphologiquement plus déstructurée (Figure 7) que la zone d'Avignonet. Cette variation dans la déstructuration se traduit également par une différence de rugosité.

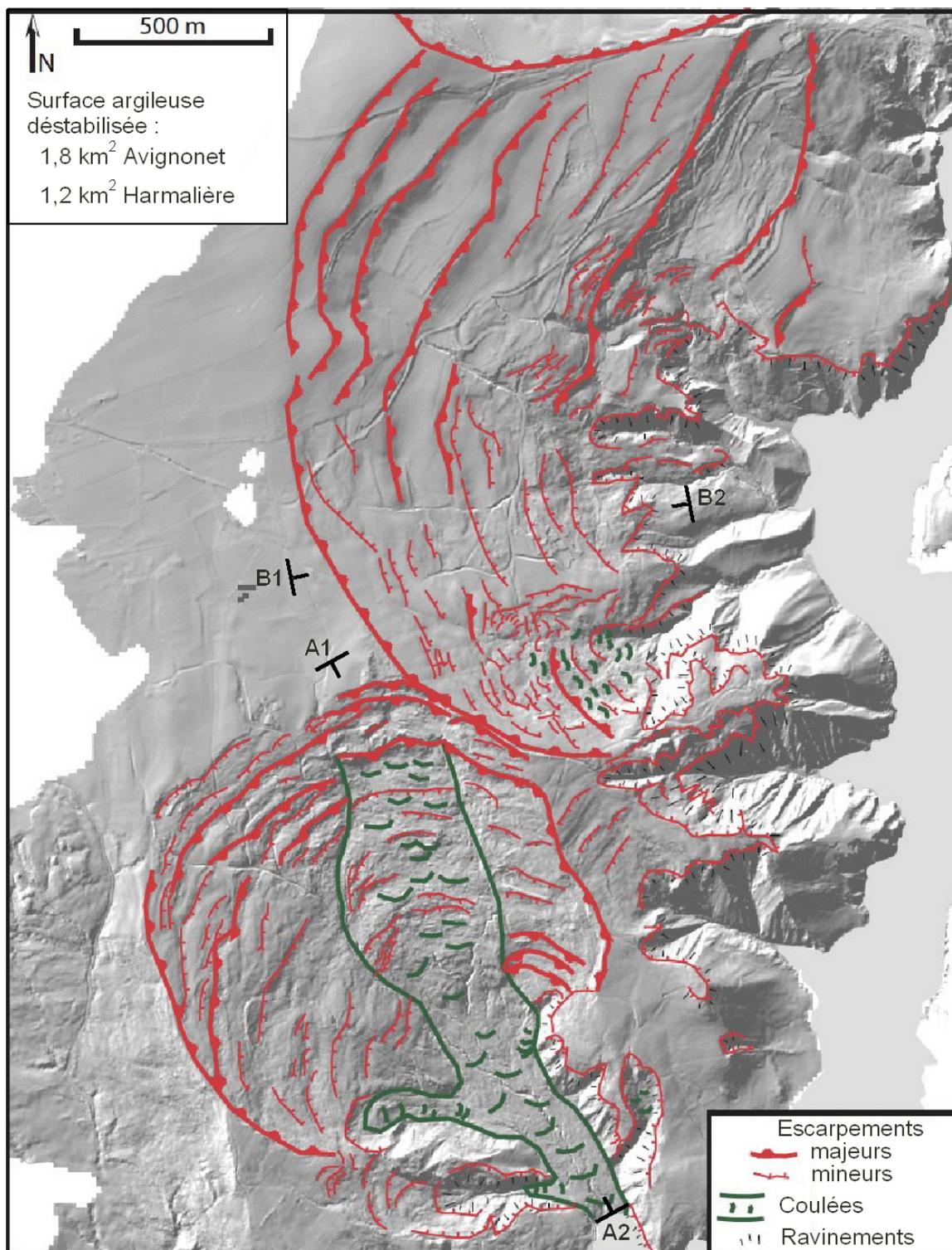


Figure 7. Carte géomorphologique des indices de déstabilisation. La superficie concernée pour chaque glissement est indiquée. Il est à noter la variation de rugosité entre les deux glissements. Les profils A1-A2 et B1-B2 correspondent aux profils topographiques de la figure 8.

Rugosité

Le changement de rugosité de la surface dans des zones affectées par des mouvements de terrain peut être utilisé comme un indicateur de l'activité du glissement (Glenn et al., 2006). Plus l'activité du glissement est importante plus la surface est déstructurée, développant une rugosité à petite échelle avec des longueurs d'onde et des amplitudes caractéristiques faibles. L'analyse de la rugosité de surface à partir du MNT Lidar (Figure 8) montre des différences majeures entre les glissements de l'Harmalière et d'Avignonet en termes de longueur d'onde et d'amplitude parallèlement à la ligne de plus grande pente. Pour l'Harmalière la rugosité dominante est de petite échelle. Elle se caractérise par des longueurs d'onde de 5 à 15 m et des amplitudes de 0,5 à 5 m. La rugosité à plus grande échelle se caractérise par des longueurs d'onde de 80 à 200m et des amplitudes de 5 à 20 m. Sur le site d'Avignonet seule la rugosité à grande échelle est observée suggérant l'absence d'activation récente majeure du glissement contrairement à l'Harmalière. De plus les profils obtenus (Figure 8) pour l'Harmalière et Avignonet sont significativement différents. En effet, pour Avignonet le profil est bombé par rapport à celui de l'Harmalière suggérant une accumulation d'argile plus importante que pour l'Harmalière qui a subi d'ailleurs une vidange partielle dans sa partie avale lors de l'évènement catastrophique de 1981. Cela se traduit à l'heure actuelle par un profil topographique lisse et continu (Figure 8).

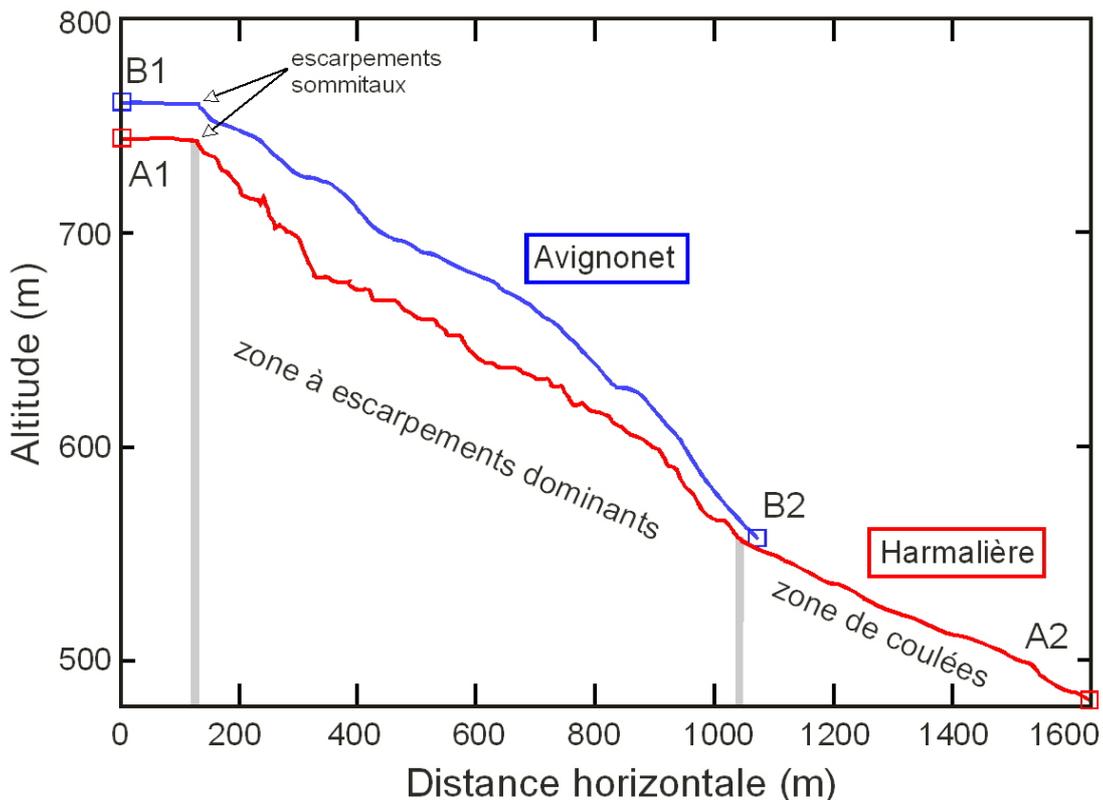


Figure 8. Profils réalisés sur les zones de l'Harmalière et d'Avignonet mettant en évidence des variations de rugosité. Les profils sont localisés sur la figure 7.

La rugosité peut être influencée par les paramètres liés à construction du MNT, comme la densité de points de données au sol après filtrage. Dans le cas des zones boisées, le filtrage utilisé va diminuer la densité de points et ainsi conduire à une diminution de la rugosité. Dans le cas du MNT construit à

une résolution de 2 mètres les points de laser sont encore assez denses pour éviter tout effet de lissage dû à l'interpolation. Par exemple, la partie sud-ouest du glissement de l'Harmalière, qui est en grande partie boisée, montre une rugosité supérieure à petite échelle que la zone agricole du glissement d'Avignonet.

D'autre part l'effet de l'agriculture sur les terrains doit être également pris en considération. En effet l'activité agricole va avoir tendance à lisser la rugosité, particulièrement à petite échelle. De plus, si l'activité du glissement de terrain est trop importante c'est-à-dire si la rugosité est élevée, le champ sera abandonné. Par conséquent, on peut dire que l'agriculture amplifie les contrastes en termes de rugosité. Actuellement, l'activité agricole est complètement arrêtée sur le site de l'Harmalière, tandis que le site d'Avignonet est en majorité cultivé. La partie active dans le sud d'Avignonet qui était autrefois cultivée a été récemment abandonnée. Tenant compte de ces limitations, la comparaison des rugosités entre les glissements d'Avignonet et de l'Harmalière suggère une différence significative en termes d'activité cohérente avec les données GPS récemment publiées (Jongmans et al., 2009).

Bassins versants et réseau de drainage

Afin d'analyser et de visualiser le réseau hydrographique, le MNT Lidar 2m a été combiné au MNT IGN au pas de 50m. Cela permet l'analyse du réseau de drainage à l'échelle du plateau et des versants instables localisés en rive ouest du lac du Monteynard. Le traitement permet d'établir la surface drainée en amont d'un pixel et ainsi de définir les écoulements préférentiels. Les écoulements de surface se répartissent suivant 4 grands bassins versants (Figure 9).

Les bassins versants les plus importants concernent le plateau et ses terminaisons sud et nord. Les écoulements se font suivant des directions parallèles aux reliefs constitués par les calcaires jurassiques. L'eau tombant sur le plateau est évacuée par ruissellement vers la Vallée du Drac selon une direction préférentielle NNW-SSE au sud et SSW-NNW au nord. Ce réseau de drainage n'est que peu capté par le glissement d'Avignonet dont le bassin versant couvre une superficie réduite de 2,35km², avec un système de drainage globalement orienté E-W perpendiculairement au lac. Par contre le bassin versant pour l'Harmalière est plus petit avec 1,7km² mais revêt une géométrie allongée parallèlement aux écoulements du plateau (Figure 9).

Les écoulements de surface pour le plateau et pour l'Harmalière sont similaires et compatibles avec l'érosion préférentielle d'une partie de la masse argileuse en direction du Drac suivant une orientation globale NNW-SSE. Cette érosion est rendue possible par la disparition vers le Sud de la ride rigide (constituée de calcaire marneux et d'anciennes alluvions consolidées) située le long du lac au niveau du glissement d'Avignonet. L'érosion de l'argile et les écoulements de surface apparaissent donc fortement contrôlés par la paléotopographie du substratum rocheux, comme l'ont proposé Bièvre et al. (soumis) pour expliquer la différence de morphologie entre les deux glissements.

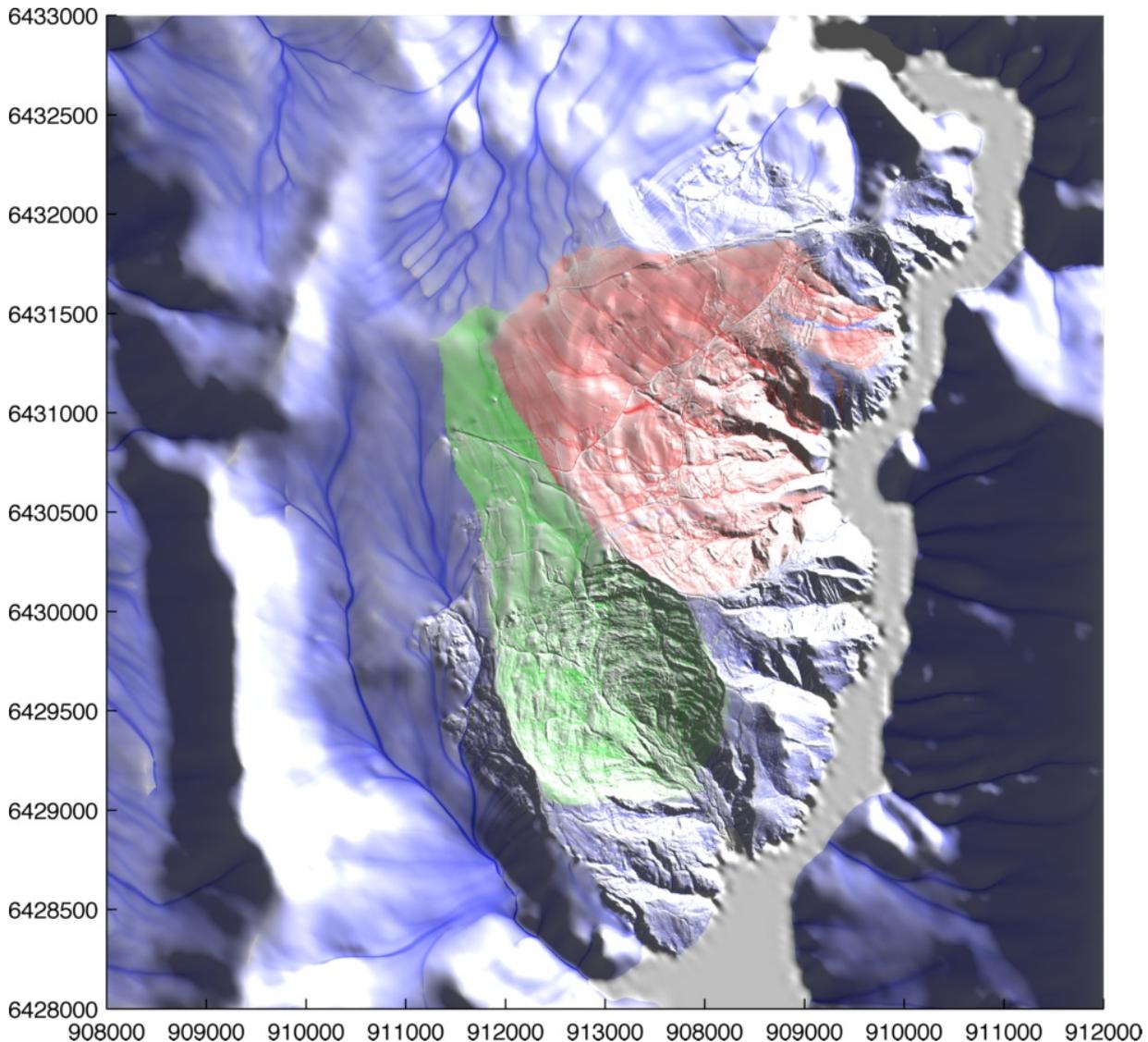


Figure 9. Carte des écoulements de surface obtenue après traitement du MNT Lidar combiné au MNT IGN au pas de 50m. Les couleurs matérialisent la surface de drainage des différents bassins versants avec en rouge le bassin versant du glissement d'Avignonet et en vert celui de l'Harmalière. L'intensité de couleur en un point traduit la superficie du bassin versant en amont de ce point : plus la couleur est intense plus le bassin drainé est grand. Les coordonnées sont en Lambert 93.

Le volume de matériel argileux érodé peut être calculé par soustraction du MNT Lidar par rapport à une surface à 800 m d'altitude. Cette surface correspond au sommet de la couche d'argile avant la fonte des glaciers. La différence entre les deux surfaces représente alors le volume de matériel érodé en dessous de l'altitude 800m. Ce volume est de 436 millions de m³ pour Avignonet et 340 millions de m³ pour l'Harmalière. Si l'on divise ces valeurs par la surface des glissements on obtient 157m de matériel argileux érodé par m² pour Avignonet contre 195m par m² pour le glissement l'Harmalière. Cela suggère une activité moyenne à long terme plus importante pour l'Harmalière que pour Avignonet.

2.4. Comparaison des MNT

Afin de quantifier l'évolution de la surface des deux glissements, une comparaison des deux MNT lidar acquis en novembre 2006 et avril 2009 (soit environ deux ans et demi d'intervalle) a été menée. Trois méthodes ont été employées pour effectuer cette comparaison : (i) la différence d'altitude, (ii) la corrélation sub-pixel des grilles d'altitude, et (iii) la comparaison de profils topographiques.

Différence d'altitude

La différence d'altitude est la méthode la plus simple à réaliser. Elle consiste à rééchantillonner le nuage de point lidar de chacun des MNT sur une grille régulière avec une même résolution horizontale, ici 2m, de telle sorte que les deux grilles se superposent pixel à pixel. Ensuite la différence d'altitude est calculée pixel à pixel (figure 10).

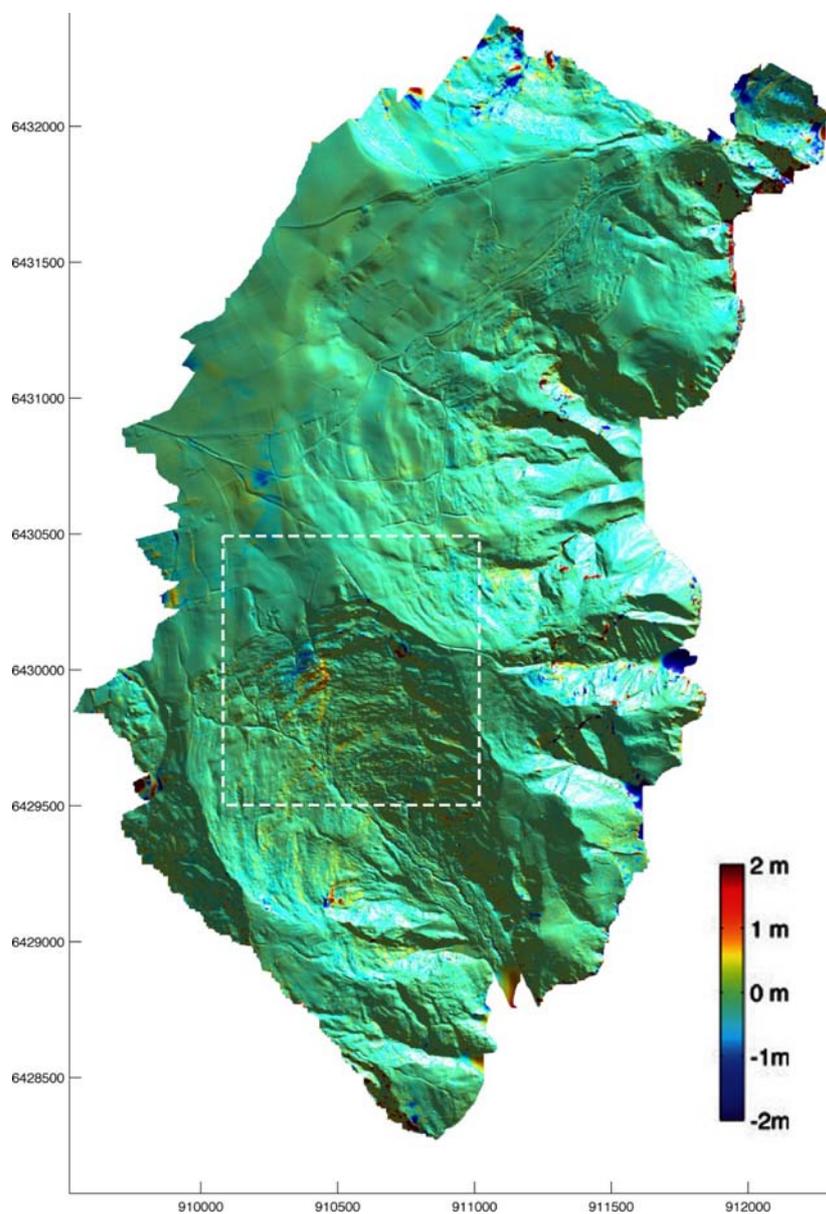


Figure 10. Comparaison des MNT Lidar acquis en novembre 2006 et avril 2009. Image de la différence des MNT (superposée à un MNT ombré par le Nord-Est) montrant en bleu les zones où l'altitude a diminué entre les

deux dates et en rouge celles où l'altitude a augmenté (l'échelle de couleur se situe sur le bord droit de la figure). Le cadre blanc montre l'extension de la *figure 11*.

Ainsi, des zones où, entre les deux dates, l'altitude a diminué ou augmenté au delà de la résolution altimétrique du MNT (environ 10cm) peuvent être repérées. La différence d'altitude est censée être faible dans les zones hors glissements, alors qu'à l'intérieur on peut s'attendre à voir à la fois des zones où de la matière a disparu (érosion) ou au contraire s'est accumulée (dépôts). Toutefois plusieurs facteurs peuvent introduire des artefacts excédant l'erreur standard de localisation des points Lidar. Tout d'abord, les MNT sont construits à partir de nuages de points Lidar dont la densité de point n'est pas homogène spatialement et qui varie d'une date d'acquisition à l'autre (voir figure 3). Ainsi sur les zones où les deux MNT présentent des différences importantes de densité de points, les étapes de filtrage et de reéchantillonnage peuvent créer des différences d'altitude dans la grille finale. Cet effet est particulièrement important en bordure de la zone commune des deux MNT. Ces problèmes liés au filtrage et à l'interpolation sont accentués dans les zones en falaise où l'orientation des visées Lidar lors de l'acquisition (qui elle aussi varie d'une date à l'autre) à également une grande importance. Le changement de niveau du lac entre les deux dates réduit également la zone commune exploitable entre les deux MNT. Pour ces deux raisons, la figure 10 montre une image des différences d'altitude qui a été partiellement masquée sur ses bordures. La différence de densité de points sur la zone du plateau de Sinard semble responsable des différences d'altitudes importantes (plus ou moins 50cm) qui y sont visibles sur la figure 10 alors qu'il s'agit d'une zone stable. Une autre source d'erreur peut provenir de biais plus ou moins systématiques dans le positionnement horizontal des points Lidar. Ainsi même sans aucune erreur altimétrique un décalage systématique horizontal entre les 2 grilles MNT introduit des différences d'altitude artificielles. Cet effet étant d'autant plus grand s'il y a des pentes fortes et si leur direction de plus grande pente est parallèle au décalage systématique. Un tel artefact a été observé par exemple sur des rides Est-Ouest à l'Est du glissement d'Avignonet (N 6430500 / E 911500), et nécessitera des corrections spécifiques.

L'image de différence d'altitude brute présentée en figure 10 nécessite donc une certaine expertise avant de pouvoir être interprétée. Elle présente pourtant des informations intéressantes sur la dynamique du glissement. Ainsi on peut y observer dans le glissement de l'Harmalière des zones où en diminution d'altitude, en bleu, adjacente à des zones d'augmentation, en rouge (voir le zoom de la figure 10 présenté sur la figure 11). Ces couples bleu-rouge sont des indications d'évolution de la surface liées au glissement de terrain et qui peuvent prendre différentes formes.

Corrélation sub-pixel

Toutefois une des limitations de la méthode de différence d'altitude est qu'elle ne donne pas directement d'information sur la composante horizontale des mouvements du sol, qui est souvent non négligeable dans les glissements de terrains. Pour pallier cette difficulté une autre méthode de comparaison a été employée : la corrélation sub-pixel des grilles MNT. Cette méthode consiste à comparer sur une petite zone (par exemple 30m par 30m), appelée fenêtre, les deux MNT : on déplace, suivant les lignes et les colonnes, la fenêtre d'une date par rapport à l'autre dans un certain périmètre d'exploration. Pour chaque nouvelle position est calculée la fonction de corrélation entre les

deux fenêtres. La position qui correspond au maximum des valeurs de corrélation calculées est celle pour laquelle les deux zones montre le plus de similarités. Ainsi, s'il n'y a pas eu de déplacement du sol, les décalages en ligne et colonne devraient être nuls. Afin d'obtenir des mesures de décalages plus fines que la résolution du pixel (ici 2m), les fenêtres sont d'abord suréchantillonnées spatialement afin d'atteindre une précision sub-pixel. Les résultats de cette méthode, complémentaire de la précédente, sont présentés dans la figure 11 qui correspond à la partie haute de la zone de l'Harmalière. Cette zone a été retenue pour commencer notre analyse par corrélation, au vu des résultats de la différence de MNT. Sur les premiers résultats de la corrélation, la plupart des vecteurs montrent une direction compatible avec celle du glissement avec notamment une zone particulièrement active allant jusqu'à presque 2m de déplacement horizontal. Cette zone est corrélée avec des différences d'altitude importante. Toutefois des zones localisées sur le plateau (coin Nord-Est sur la figure 11) présentent elles aussi des déplacements importants, alors que cette zone est supposée stable, évoquant des artefacts.

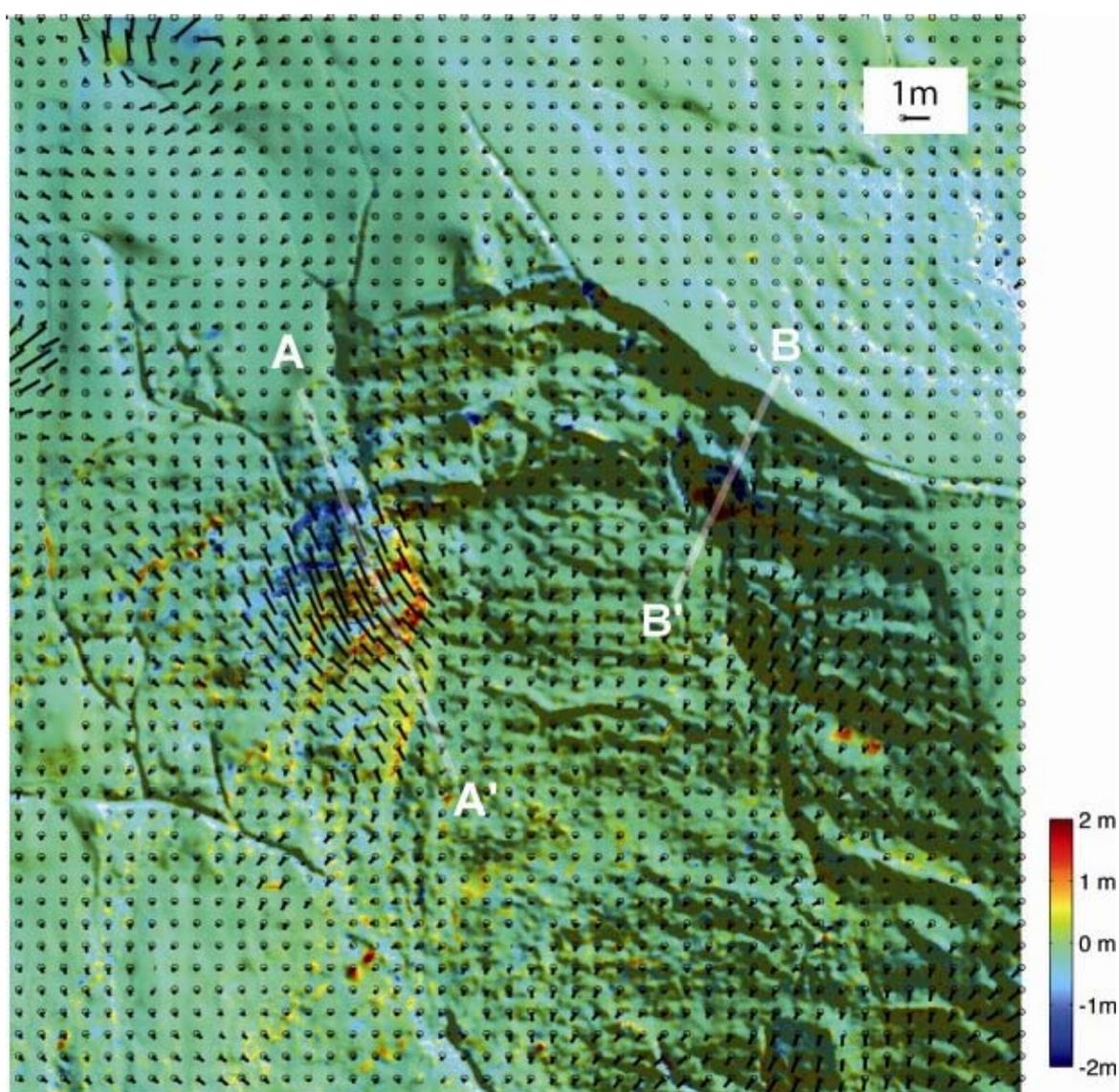


Figure 11. Zoom Comparaison sur la zone de l'Harmalière, de l'image de différence d'altitude (même échelle de couleur, *figure 10*) sur laquelle sont superposés les vecteurs de déplacements horizontaux du sol estimés par

une méthode de corrélation sub-pixel des deux MNT. La localisation des deux profils topographique AA' et BB' de la *figure 12* sont indiqués en blanc.

En effet, la méthode de corrélation présente elle aussi des limitations : elle fonctionne bien si la surface du sol comprise dans la fenêtre de corrélation a subi une simple translation homogène sans trop de modifications de sa forme (soit liée à des artefacts de traitement, soit réel comme par exemple une érosion non homogène de la surface). D'autre part la taille de la fenêtre doit être suffisamment grande pour que la mesure de similarités soit statistiquement valide. Ainsi, il y a un compromis à effectuer sur la taille de la fenêtre : grande taille pour assurer une meilleure qualité de la corrélation contre petite taille pour assurer une meilleure homogénéité des déplacements dans la fenêtre. Dans cette méthode aussi, la différence de densité de point entre les deux MNT peut modifier l'aspect d'une même surface après filtrage et reéchantillonnage et ainsi réduire les performances de la corrélation. Un autre problème peut arriver lorsque la surface considérée est trop plate et sans aspérités. Dans ce cas, quelque soit le décalage entre les deux fenêtres, les valeurs de corrélation seront très proches, et il sera difficile de trouver un maximum significatif, des valeurs aberrantes peuvent alors être trouvées. Il semblerait que ce type de problèmes soit à l'origine des fortes valeurs de déplacements horizontaux (de l'ordre du mètre) dans la zone du plateau censée être stable. La *figure 9* montre des résultats bruts non filtrés qui pourrait être améliorés par exemple en éliminant les mesures où la densité de points Lidar est trop faible ou trop différentes entre les deux acquisitions, ou encore lorsque le pic de corrélation n'est pas bien marqué.

L'analyse de comparaison utilisant les deux méthodes est donc applicable à l'ensemble de la zone d'étude. Elle présente l'avantage de permettre de cerner rapidement les zones les plus actives sur lesquels une analyse plus complète peut être menée. Ainsi des comparaisons de profils topographiques peuvent être effectuées afin de mieux interpréter les processus à l'œuvre. Cette interprétation devra également être complétée par du travail de terrain et l'analyse des photos numériques (avec une résolution d'environ 8cm) prises lors de chaque acquisition Lidar de ces zones.

Comparaison des profils topographiques

La *figure 12* montre deux exemples de comparaison de profils topographique qui soulignent des modalités différentes d'évolution de la surface du glissement de l'Harmalière. Le profil AA' a été réalisé dans une zone où des différences significatives d'altitude (négative et positive) sont observées et associées à des vecteurs déplacements importants (1 à 2m) suivant la direction de la pente.

La comparaison de profils topographiques traversant cette zone (suivant la direction des vecteurs) montre bien que, dans ce cas, le processus dominant correspond à un déplacement en masse du sol suivant la direction de plus grande pente. Les différences d'altitudes semblent ici dominées par le décalage des escarpements liés au déplacement en masse plutôt qu'à des processus d'érosion, même si ceux-ci sont certainement aussi présents. La situation est différente dans le profil BB' qui traverse une zone avec de forte différences d'altitude (négatives en amont et positives en aval) mais avec des vecteurs horizontaux plus faibles (inférieur au mètre). Dans ce cas, la comparaison de

profils topographiques montre plutôt une évolution où dominant des processus plus superficiels avec des glissements très localisés et peu profond (inférieur à 2m) des argiles dans la partie sommitale qui viennent se déposer en contrebas.

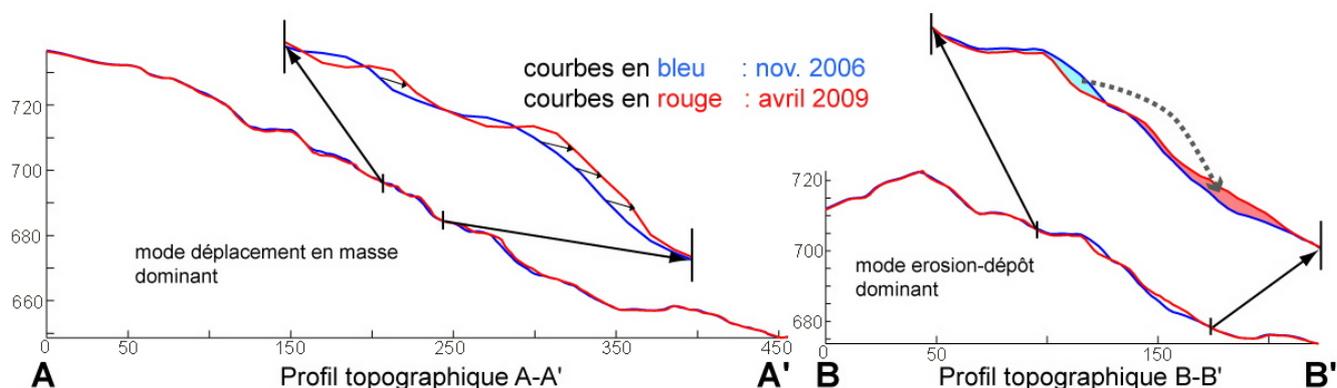


Figure 12. Comparaison des profils topographiques des deux MNT suivant les profils AA' et BB' (en bleu, novembre 2006 et en rouge avril 2009). La portion encadrée par les flèches noires correspond à un grossissement du profil. Dans le cas du profil AA', la différence indique un glissement en masse suivant la direction de la pente atteignant environ 2-3 m d'amplitude. Dans le cas du profil BB' la portion encadrée par les flèches noires montre un grossissement du profil où a eu lieu une érosion (surface en bleu) de la partie sommitale (environ 2m de différence d'altitude) associé à un dépôt d'amplitude similaire dans la partie avale (surface en rouge).

En comparant les valeurs obtenues de déplacements horizontaux obtenus par corrélation et par comparaison de profils, on observe que pour les déplacements les plus importants, les valeurs issues de la corrélation sont inférieures à celles estimées par comparaison de profils (amplitude d'environ 1.5 à 2m contre 2 à 3m). Cela peut s'expliquer par le fait que la technique de corrélation, utilise ici une fenêtre de corrélation de 42m par 42m, qui estime un déplacement moyen de l'ensemble de cette zone alors que les profils eux sont réalisés à partir de pixels à 2 m de résolution horizontale où localement les déplacements peuvent être plus importants.

Conclusion

L'utilisation de l'imagerie aérienne Lidar dans les zones argileuses instables a permis de rapidement obtenir un modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 10 cm et se révèle être un outil puissant pour caractériser leur état de surface.

Dans le cas des glissements de l'Harmalière et d'Avignonet, le traitement du MNT a fourni une cartographie détaillée des indices de mouvement, des configurations de pente et du réseau de drainage. L'analyse de ces cartes a montré que deux glissements présentaient des caractéristiques différentes en terme de rugosité, de géométrie de déstabilisation et de réseaux de drainage. L'examen du système hydrographique a mis en évidence que la localisation des exutoires et l'érosion correspondante de la couche argileuse recouvrant le plateau de Sinard ont été et sont toujours contrôlées par la paléotopographie du substratum rocheux.

La comparaison préliminaire des deux modèles numériques de terrain obtenus à 29 mois d'intervalle a permis de mettre en évidence des zones présentant des mouvements de masse avec des déplacements de plusieurs dizaines de centimètres entre les deux acquisitions Lidar.

Cette technique présente l'avantage de fournir rapidement une image tridimensionnelle de la cinématique des masses argileuses en surface. Elle apparaît donc comme un outil précieux pour le suivi de l'activité des glissements de terrain de cette taille. Les images Lidar obtenues doivent faire l'objet d'une analyse plus poussée et être validées sur le terrain afin de déterminer la limite inférieure des déplacements détectables en fonction de la densité du nuage de points initial.

Il est à noter que la couverture photographique haute résolution couplée au relevé Lidar n'a pas été utilisé. L'utilisation de ces photographies par auto-corrélation d'image dans des zones à déplacement important (zone amont du glissement de l'Harmalière) s'intègre dans un travail à moyen terme visant la quantification des déplacements. Ce travail est en cours actuellement via la thèse U. Kniess.

7-Bibliographie

- Antoine, P., Giraud, A., Montjuvent, G., 1981. Les argiles litées du Trièves (Isère) ; conditions de gisement et exemples de propriétés géotechniques. Bulletin de la Société Géologique de France (7), t. XXIII (2), 117–127.
- Bièvre, G., Kniess, U., Jongmans, D., Pathier, E., Schwartz, S., Villemin, T., van Westen, C., Zumbo, V., 2009. Combined use of remote-sensing and ground geophysical techniques to investigate geological control on landslides (Trièves area, Western Alps). *Geomorphology*, soumis
- Briese, C., Pfeifer, N., Dorninger, P., 2002. Applications of the robust interpolation for DTM determination. In: IAPGIS XXXIV. Vol. 3A. pp. 55–61.
- Carter, W.E., Shrestha, R L., Slatton, K. C, 2007. Geodetic laser scanning. *Physics Today*, vol. 60, issue 12, p. 41, doi:10.1063/1.2825070
- Giraud, A., Antoine, P., Van Asch, T.W.J., Nieyuwenhuis, J.D., 1991, Geotechnical problems caused by glaciolacustrine clays in the French Alps: *Engineering Geology* 31, 185-195.
- Glenn, N.F., Streutker, D.R., Chadwick, D.J., Thackray, G. D., Dorsch, S.J., 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology* 73 (1-2), 131–148.
- IPF, 2004. Software SCOP++,
http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/scop_dtm_sheet.htm.
- Jongmans, D., Bièvre, G., Schwartz, S., Renalier, F., Beaurez, N., 2009. Geophysical investigation of the large Avignonet landslide in glaciolacustrine clays in the Trièves area (french Alps). *Engineering Geology* 109, 45–56.
- Monjuvent, G., 1973. La transfluence Durance-Isère. Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes françaises). *Géologie Alpine* 49, 57–118.
- Moulin, C. and Robert, Y. 2004. Le glissement de l'Harmalière sur la commune de Sinard. Proceedings of the workshop Ryskhydrogeo, Program Interreg III, La Mure (France).
- Picarelli L. 2000. Mechanisms and rates of slope movements in fine grained soils. *Int Conf Geotech Geol Eng GeoEng 2000* 1:1618–1670
- Renalier, F., Jongmans, D., Bièvre, G., Schwartz, S., Orengo, Y. 2007. Characterisation of a landslide in clay deposits using Vs measurements. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Istanbul, 3-4 September 2007, 4p.
- Schulz, 2004. Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396
- Vallet, J. and Skaloud J., 2004. Development and Experiences with A Fully-Digital Handheld Mapping System Operated From A Helicopter, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Vol. XXXV, Part B, Commission 5.
- Van Asch, T.W.J., Hendriks, M.R., Hessel, R., Rappange, F.E., 1996. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps. *Engineering Geology* 42, 239-251.