

## **ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE ET STRUCTURALE DE MNT OBTENUS PAR LIDAR AERIEN SUR DES GRANDS GLISSEMENTS**

### **USE OF DTM OBTAINED THROUGH HD LIDAR FOR GEOMORFOLOGICAL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF LARGE LANDSLIDES**

François VALDIVIELSO<sup>1</sup>, Philippe LAHEURTE<sup>2</sup>, David SABATIER<sup>3</sup>, Xavier PERROT<sup>4</sup>, Didier VIRELY<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Cerema Sud- Ouest, Toulouse, France

<sup>2</sup> Cerema Sud-Ouest, Toulouse, France

<sup>3</sup> DIRSO, District Sud, précédemment ONF –RTM Pyrénées, Foix, France

<sup>4</sup> MTSI, Ramonville-Saint-Agne, France

<sup>5</sup> Cerema Sud-Ouest, Toulouse, France

**RÉSUMÉ** – De grands glissements à cinématique lente ont été mis en lumière ces dernières années dans les Pyrénées. L'exploitation de MNT obtenus par LIDAR HD est pressentie pour étudier ces mouvements de terrains. En effet cette technique permet de suivre l'évolution de tels glissements de façon pérenne et pour un coût relativement modique. La méthode et des illustrations d'une telle étude sont décrites dans cet article.

**ABSTRACT** – Large landslides with slow cinematic have been reactivated during the last years in Pyrenees due to severe weather conditions. Digital terrain model obtained via High Définition Lidar have been used to follow the evolution of this landslides at low-cost and for long period of time. Differents studies are presented illustrating the use of DTM.

### **1. Introduction**

Lors d'épisodes pluvieux intenses du début de l'été 2013, ayant entraîné de multiples glissements de terrain ainsi que d'autres incidents géotechniques dans les Hautes-Pyrénées et en Haute-Garonne, le Cerema a constaté des signes d'érosion et de mouvement au pied d'un versant affecté historiquement par un glissement de grande ampleur : le glissement de St-Lary-Soulan (Cap du Mont). Ce versant ne faisait plus l'objet d'une surveillance depuis une dizaine d'années, or une campagne de mesures inclinométriques réalisée après les pluies a mis en évidence des déplacements au sein du versant. Du fait de son absence de suivi régulier, il n'a pas été possible de déterminer à partir de quel moment le mouvement s'était enclenché, et donc a fortiori, la cinétique réelle du glissement.

Ce constat a mis en relief une problématique : il existe sur le massif Pyrénéen plusieurs glissements de grande ampleur qui ont été suivis mais ne font plus, aujourd'hui, l'objet d'une attention particulière de la part de services de l'État tels que l'ONF-RTM, le Cerema ou des collectivités locales par manque de moyens ou par manque d'intérêt porté à cette problématique. Bien qu'ayant une cinétique lente, ces mouvements de terrains concernent des superficies et des volumes importants de matériaux, ils peuvent impacter des

infrastructures et peuvent être réactivés brutalement par des conditions météorologiques hors norme.

Cet article présente une méthodologie pérenne et non dispendieuse de suivi de ces glissements à long terme (au-delà de 30 ans).

## **2. Méthodologie de suivi de glissements orphelins**

Le suivi de ces glissements à cinématique lente ne nécessite pas la mise en place de protocoles de suivi lourds comme par exemple les glissements de Roquebillière et de la Clapière dans le département des Alpes-Maritimes ou de Séchillienne en Isère. Ainsi, pour surveiller ces glissements, il suffit de mettre en place des moyens robustes, pérennes et fiables, qui peuvent tolérer une longue période d'inactivité et sont d'un coût réduit.

Ces moyens doivent permettre d'acquérir des données avec un pas de temps de plusieurs années correspondant à la cinématique du mouvement et à la précision des mesures. Les enregistrements doivent présenter un format transférable et archivable car les acteurs et les méthodes de mesures peuvent évoluer au cours du suivi. Enfin ces données doivent pouvoir être interprétées même après une longue période d'inactivité.

La méthodologie consiste donc à mettre en place deux phases successives :

- La définition du modèle géotechnique, géologique et géomorphologique initial ;
- Le suivi à long terme.

### **2.1. Etablissement d'un point zéro**

Pour mettre en place un suivi des glissements sur le long terme par des moyens non dispendieux, il est nécessaire d'établir un état initial des différents sites. En effet, une connaissance précise du secteur au temps  $T_0$  est indispensable pour :

- Définir précisément la zone d'étude,
- Permettre de localiser les évolutions du glissement,
- De prévoir l'étendue et l'impact des déformations sur les enjeux identifiés,
- Engager et mettre en place des mesures de protection des enjeux.

Cette situation initiale prend la forme d'une étude succincte du glissement, elle est fondée sur une recherche bibliographique, sur l'étude d'imagerie aérienne/satellitaire et éventuellement sur une campagne légère de sondages géotechniques (sondages carottés, pressiométriques et pose de tubes inclinométriques).

Elle est ensuite complétée par la mise en œuvre d'un relevé Lidar (light detection and ranging) haute résolution, afin d'élaborer un premier modèle numérique de terrain (MNT).

### **2.2. Le suivi à long terme**

La base du suivi et ses deux qualités principales, en dehors de sa pertinence technique, sont :

- La pérennité : la plupart des grands glissements recensés dans les Pyrénées montrent des mouvements lents. Cependant, des phases d'avancée critique peuvent être engendrées par des conditions météorologiques particulières. La périodicité de ces phénomènes est de nature à augmenter avec les changements climatiques liés au réchauffement. Il est essentiel de fonder le suivi sur des dispositifs qui peuvent être conservés durant plusieurs décades et bénéficier au cours de cette période d'avancées technologiques.
- Le caractère non dispendieux ; sa modicité : les mesures doivent être poursuivies, avec un pas de temps à définir, sur de longues périodes. Pour cela, il faut s'assurer que les dispositifs mis en place permettent des interventions faciles et d'un coût modique.

Les outils traditionnels de la géotechnique tels que les piézomètres, inclinomètres... (Guide LCPC 1994) sont coûteux et relativement peu durables.

L'approche combinant la micro-géodésie (avec un pas de temps annuel) et des relevés de types Lidar à haute définition (pas quinquennal ou décennal) pourra être également utilisée.

Si la micro-géodésie est intéressante pour le relevé de mouvements relativement localisés et rapides, le levé Lidar haute définition devient plus adapté pour des zones étendues et de cinématique lente.

### **3. Apport du Lidar haute résolution**

Les apports de la télédétection par laser haute définition sont significatifs. Le traitement du nuage de points bruts permet de s'affranchir du couvert végétal. La vision en trois dimensions du terrain déforesté virtuellement donne accès à la géomorphologie d'une façon déterministe. Dans le cas du glissement de Viella dans le département des Hautes-Pyrénées, il est intéressant de constater que la vision obtenue grâce au MNT issu du Lidar est en tout point conforme à celle décrite par un ingénieur général dans son rapport datant d'un siècle (Rapport de l'ingénieur des Eaux et Forêt M FABRE 1901), à une époque où les cultures et l'exploitation du bois laissaient le terrain à nu.

De fait, l'examen du MNT 3D permet, sous différents angles de vue, avec par exemple l'analyse des cartes des pentes, d'accéder à une connaissance des indices de surface remarquable.

### **4. Caractéristiques des prestations du Lidar haute définition**

Le levé Lidar est réalisé par système aéroporté. Le vol est effectué, par exemple, à l'aide d'un hélicoptère muni d'un laser à la vitesse de 70km/h, à 80 m de hauteur par rapport au sol. C'est en partie cette altitude et cette vitesse faibles qui permettent l'acquisition de données précises. Des passages multidirectionnels permettent de minimiser les zones d'ombre en relief accidenté. Le traitement des données obtenues permet d'élaborer le modèle numérique de terrain. On notera qu'il était prévu d'utiliser un drone d'une capacité

d'emport de 25 kg (lidar et centrale inertielle) mais au final les autorisations administratives étaient plus faciles à obtenir pour un hélicoptère.

#### **4.1. Conditions et périodes d'acquisition**

La période d'acquisition favorable se situe généralement entre le 1<sup>er</sup> août et le 1<sup>er</sup> novembre. En effet, les secteurs concernés étant situés en zone de montagne, avec un relief souvent marqué, une partie importante du massif est couverte de peuplements forestiers parfois denses. Cette couverture végétale limite fortement la pénétration du signal laser jusqu'au sol. De plus, il est nécessaire d'œuvrer avec de conditions météorologiques favorables : sol sec, sans brouillard et aucune couverture neigeuse sur l'ensemble de la zone levée ; les campagnes de mesures en été sont donc plus adaptées. L'intervention ne doit également pas perturber la nidification des espèces protégées (prise en compte des zones réglementaires, type zone de sensibilité majeure).

#### **4.2. Préparation de la mission au sol**

Des points de contrôle sont représentés par des balises au sol (points saillants) avec une densité d'un point pour 50 hectares. Ces points de contrôle sont localisés dans la bordure extérieure du glissement, réputée stable. Quelques points de contrôle sont également localisés à l'intérieur du périmètre. En complément, à l'intérieur du périmètre relevé, des points dits « représentatifs » seront matérialisés par des bornes facilement identifiables (éléments géométriques saillants d'au moins 2 m<sup>3</sup>).

#### **4.3. Caractéristiques du levé Lidar**

##### 4.3.1. Densité d'émission

La densité minimale d'émission doit être indiquée et adaptée en fonction du type de terrain : meuble, rocheux, ou falaise, ainsi que du type de végétation à relever (absence de végétation, feuillus, résineux denses). La validité de cette densité est calculée par la moyenne des densités réfléchies (premiers retours) sur chaque cellule élémentaire de 100 m<sup>2</sup> (soit 10 x 10 m).

La surface cumulée des cellules élémentaires de 100 m<sup>2</sup> (10 x 10 m) sur lesquelles la densité émise est inférieure à

- 20 points par m<sup>2</sup> (conditions sans végétation au sol),
- 150 points par m<sup>2</sup> (condition de forêt de feuillus),
- 250 points par m<sup>2</sup> (condition de forêt de résineux dans des terrains en pente)

ne doit pas dépasser 5% de la surface de l'emprise levée.

Le prestataire de la télédétection doit s'assurer d'une bonne isotropie de la répartition des points en (X, Y), recouvrement compris. Pour cela, il doit notamment s'assurer d'un recouvrement suffisant entre les bandes de vol.

#### 4.3.2. Densité de points au sol

La surface unitaire maximale sans point au sol est fixée à 1 m<sup>2</sup> (1 x 1 m). Les rayonnements réfléchis par le terrain et retenus en tant que sol devront présenter une densité d'au moins 20 unités/m<sup>2</sup> (i.e. 20 points/m<sup>2</sup>). La surface cumulée des cellules élémentaires de 1 m<sup>2</sup> (1x 1 m) sans point au sol ne doit pas dépasser 5% de la surface de l'emprise levée. La taille de l'empreinte au sol (tâche lumineuse) est inférieure à 10 cm, et la précision minimale des points (pour chaque écho du signal LIDAR) est de 10 cm en planimétrie (X, Y) et en altimétrie (Z).

#### 4.3.3. Traitement du nuage de points (GLENN et al, 2005)

Le nuage de point est filtré automatiquement, dans le but de sélectionner pour chaque dalle du MNT le point de plus faible altitude. Ce calcul permet de retirer artificiellement le couvert végétal, il s'agit d'une déforestation virtuelle. Les données sont découpées en dalles carrées (parallèles aux axes X et Y du référentiel géographique) jointives de 1 x 1 km, au pas de 0.25 m (cellules ou pixels carrés de 0.25 x 0.25 m).

*Ce travail permet de disposer d'un MNT présentant une précision de l'ordre du décimètre en X, Y et Z.*

### 5. L'exploitation du premier modèle numérique de terrain

Idéalement, une station de travail suffisamment puissante est recommandée pour ces travaux. Pour une surface de 300 hectares comme le glissement de Saint-Lary, on obtient un fichier brut de plusieurs téraoctets et 1,5 gigaoctets après traitement.

#### 5.1. Analyse qualitative : apport structural, géomorphologique et hydrogéologique

L'analyse du MNT traité aboutit au relevé de familles de fractures et discontinuités (failles, diaclases, stratifications) représentées directement dans le MNT. Ces familles peuvent ensuite être reportées sur canevas de Schmidt ou Wulff, pour en déduire les mécanismes de ruptures (cf illustrations 5-1 et 5-2)

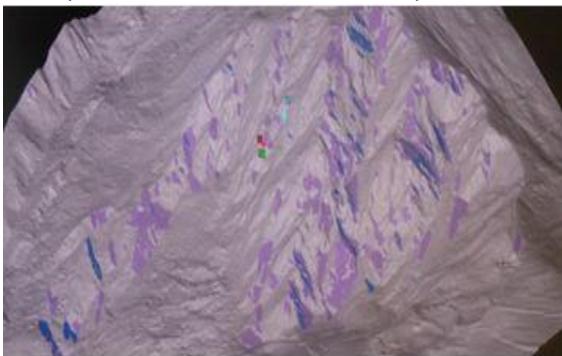


Illustration 5-5-1 : Relevés de famille de discontinuités

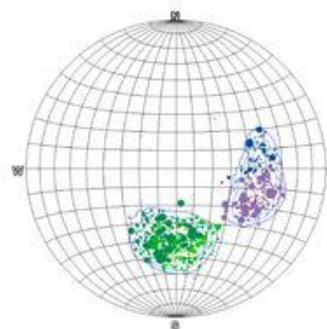


Illustration 5-5-2 : Report sur le canevas de Schmidt

De plus, une analyse géomorphologique de la représentation 3D du glissement permet de montrer le fonctionnement dans son ensemble du glissement. Ainsi sur le MNT il peut être identifié : des gradins d'arrachement, des loupes de glissement, des bourrelets et accumulations de pieds, des figures de propagations, des ensembles décrochés, des alignements de figures karstiques, des zones d'arrachements, d'affaissement ou de gonflement (cf illustrations 5-3 et 5-4).

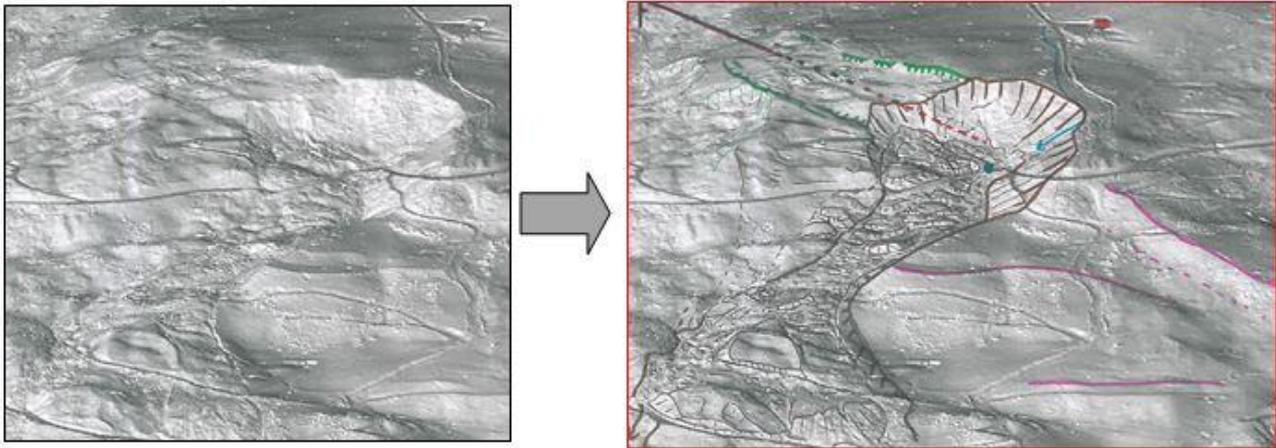


Illustration 5-3 : Analyse géomorphologique d'une zone d'arrachement (ligne de rupture, zone de transport, zone de dépôt)



Illustration 5-4 : Massif du Lacondre, commune d'Urdos (64) – détection des zones d'arrachement

En complément, des relevés hydrogéologiques sur le MNT permettent de repérer des éléments aggravants, telles que des zones d'infiltrations (pertes), des dolines, des dépressions, des zones d'émergences (sources, ravinement).

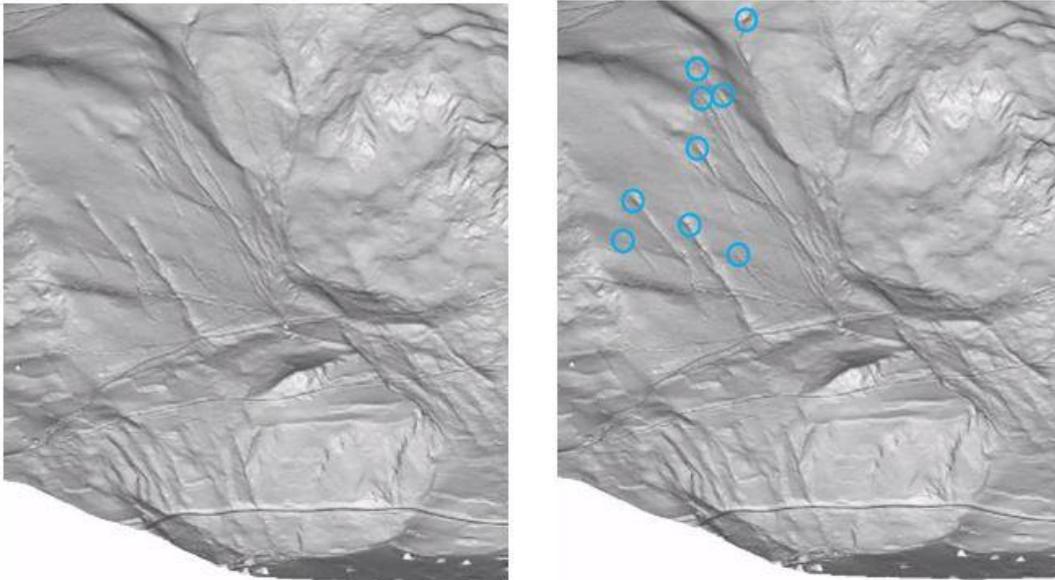


Illustration 5-5 : Détection de résurgences, massif du Lacondre, Urdos (64)

Enfin, il est possible :

- D'effectuer une analyse forestière du site (différentiation résineux/feuillus, densité de végétation, détermination du sommet des arbres, estimation du diamètre des arbres à hauteur sous poitrine) ;
- De mettre en évidence les ouvrages (ponts, barrages, seuils, murs maçonnés, réseau d'irrigation ou de drainage, etc.), ainsi que les bâtiments ;
- D'intégrer des éléments cartographiques en 3D tels des ouvrages pare-avalanches et pare-blocs fournis par le donneur d'ordre.

## 5.2. Analyse quantitative

Dans un deuxième temps, une fois réalisé le modèle géologique issu de l'analyse qualitative, une analyse quantitative peut être conduite à partir de profils en travers et en long établis depuis le MNT. Les volumes ou l'aire affectés par le glissement peuvent être calculés. Si plusieurs MNT pris à des dates différentes sont disponibles, une inertie du mouvement peut être déduite, les compartiments du glissement sujet au mouvement peuvent être ciblés. Ce dernier point permet éventuellement d'ajouter des points de mesures secondaires sur des secteurs clefs (inclinomètres, prismes, etc.).

## 6. Conclusion

L'examen d'un MNT établi à partir d'un levé Lidar haute-définition permet d'analyser les origines et les évolutions de glissements de terrain. La comparaison de plusieurs MNT dans le temps permet de juger de la cinétique de ces glissements. Pour des grands glissements lents, une période de levé quinquennale paraît adaptée. Le prestataire du levé Lidar doit posséder de solides compétences en géologie et hydrogéologie afin d'avoir

un regard critique sur la qualité de sa prestation. Un point majeur doit être abordé : les conditions de formatage des données et de leur conservation dans un coffre-fort numérique pour en disposer à tout moment dans les cent prochaines années, et permettre de les comparer avec des méthodes d'acquisition développées durant cette période.

## **7. Remerciements**

Ce travail a été rendu possible par l'action « Glissements Orphelins » prise en charge au titre des actions de partenariat par le CEREMA et l'ONF –RTM services des Hautes-Pyrénées et Pyrénées Atlantiques. Egalement merci aux services DTN RTM 31 ainsi qu'à la commune d'Arcizan et le SYMIHL, maître d'ouvrage de l'étude du glissement d'Arcizan.

## **8. Références bibliographiques :**

Ingénieur Général Fabre (1900). RTM – Mouvement de Viella 1898 – 1900.

Surveillance des pentes instables (1994). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, collection Environnement : les risques naturels, Paris, 125 pages.

Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrains (2000). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, collection Environnement : les risques naturels, Paris, 91 pages.

Glenn N.F., Streutker D.R., Chadwick D.J., Thackray G.D., Dorsch S.J. (2005). Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. Department of Geosciences, Idaho State University, USA