

# ANR - SLAMS

## Intérêt et potentiel de la technologie Lidar pour l'analyse de mouvements de terrain - Application au site de Séchillienne

Au 1<sup>er</sup> janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmef et le Sétra fusionnent pour donner naissance au **Cerema** : centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

- CETE : Centre d'études techniques de l'équipement
- Certu : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
- Cetmef : Centre d'études techniques maritimes et fluviales
- Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements

# ANR - SLAMS

## Intérêt et potentiel de la technologie Lidar pour l'analyse de mouvements de terrain - Application au site de Séchilienne

**Septembre 2013**

| Date         | Version | Commentaires                                            |
|--------------|---------|---------------------------------------------------------|
| juillet 2013 | v1      | Version rédigée par Marie-Aurélien CHANUT               |
| août 2013    | v2      | Version relue par Laurent DUBOIS et Jean-Paul DURANTHON |



### Département Laboratoire de Lyon

25, avenue François Mitterrand  
CS 92803

69674 BRON CEDEX

Tél.: +33 (0)4 72 14 33 00 - Fax.: +33 (0)4 72 14 33 11

Courriel : [dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr](mailto:dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr)

## Récapitulatif de l'affaire

Client : ANR SLAMS

Objet de l'étude : ANR - SLAMS - Intérêt et potentiel de la technologie Lidar pour l'analyse de mouvements de terrain - Application au site de Séchilienne

Référence dossier : Affaire 41829

Offre : Devis N° 41829

Accord client :

Diffusion/Archivage : Documentation CETE de Lyon

Chargé d'affaire : Marie-Aurélie CHANUT –Département Laboratoire de Lyon –  
Tél. +33 (0)4 72 14 33 00 / Fax +33 (0)4 72 14 33 11  
Courriel : marie-aurelie.chanut@developpement-durable.gouv.fr

Mots Clés : Mouvement de terrain, Lidar, Séchilienne, évolution, MNT, MNT différentiel, pentes, orthophotos, déplacements, mécanismes

ISRN :

## Liste des destinataires

| Contact   | Adresse | Nombre - Type  |
|-----------|---------|----------------|
| ANR SLAMS |         | 1 ex numérique |

## Conclusion – Résumé

Dans ce rapport, des outils et méthodes sont développées pour exploiter les données issues d'acquisitions Lidar (Modèles Numériques de Terrain - MNT, orthophotos) et ainsi évaluer l'intérêt et le potentiel de ces données pour l'analyse des mouvements de terrains. Le tableau ci-dessous synthétise les outils à utiliser en fonction de l'analyse que l'on veut faire du mouvement de terrain.

La richesse de l'analyse réside dans la complémentarité des outils qui permettent d'aller du général au spécifique. Les éléments requis pour effectuer l'analyse d'un mouvement de terrain sont donc accessibles à partir des données Lidar : il faut ensuite acquérir les données en fonction des objectifs d'analyse.

En conclusion, les traitements des données Lidar sont donc multiples, complémentaires et riches en informations pour l'analyse des mouvements de terrain.

| Outils                                                                     | Séries MNT – vue 2D ombrée | Séries MNT – surface 3D | Profils séries MNT | MNT différentiel – courbes de niveau | MNT différentiel – vue 2D ombrée | Inclinaison et direction des pentes | Orthophotos |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Identification de zones affectées par un mouvement et tendance d'évolution | x                          | x                       |                    |                                      | x                                | x                                   | x           |
| Mécanisme du mouvement de terrain                                          |                            | x                       | x                  |                                      |                                  |                                     |             |
| Analyse spatiale du mouvement                                              |                            |                         | x                  |                                      |                                  |                                     |             |
| Direction du mouvement                                                     | x                          | x                       | x                  |                                      |                                  | x                                   |             |
| Déplacement qualitatif                                                     | x                          |                         |                    |                                      |                                  |                                     | x           |
| Déplacement quantitatif                                                    |                            |                         | x                  |                                      |                                  | x                                   | x           |
| Morphologie de la surface et son évolution                                 |                            |                         |                    |                                      |                                  | x                                   |             |
| Identification des zones éboulées                                          | x                          | x                       |                    |                                      |                                  |                                     | x           |
| Volumes des zones éboulées                                                 |                            |                         |                    |                                      |                                  |                                     |             |



# Sommaire

|                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <a href="#">Introduction</a>                                                                          | 7         |
| <a href="#">Objectifs</a>                                                                             | 7         |
| <a href="#">Terminologie</a>                                                                          | 7         |
| <a href="#">État de l'art</a>                                                                         | 9         |
| <a href="#">Analyse des séries multi-temporelles de MNT</a>                                           | 9         |
| <a href="#">Données et outils utilisés</a>                                                            | 10        |
| <a href="#">Données disponibles</a>                                                                   | 10        |
| <a href="#">Données utilisées</a>                                                                     | 11        |
| <a href="#">Outils utilisés</a>                                                                       | 11        |
| <a href="#">Étude des séries de MNT</a>                                                               | 12        |
| <a href="#">Introduction</a>                                                                          | 12        |
| <a href="#">Superposition des 2 MNT</a>                                                               | 12        |
| <a href="#">Profils</a>                                                                               | 15        |
| <a href="#">Étude de sensibilité de la direction des profils</a>                                      | 16        |
| <a href="#">Analyse des profils</a>                                                                   | 18        |
| <a href="#">Conclusions</a>                                                                           | 24        |
| <a href="#">Étude du MNT différentiel</a>                                                             | 25        |
| <a href="#">Introduction</a>                                                                          | 25        |
| <a href="#">Représentation surface 3D</a>                                                             | 25        |
| <a href="#">Représentation en vue 2D ombrée</a>                                                       | 26        |
| <a href="#">Représentation en courbe de niveau</a>                                                    | 27        |
| <a href="#">Conclusions</a>                                                                           | 28        |
| <a href="#">Analyse des pentes du MNT</a>                                                             | 29        |
| <a href="#">Introduction</a>                                                                          | 29        |
| <a href="#">Carte des inclinaisons et des directions des pentes</a>                                   | 29        |
| <a href="#">Convexité du relief</a>                                                                   | 32        |
| <a href="#">Conclusions</a>                                                                           | 32        |
| <a href="#">Étude des orthophotos</a>                                                                 | 33        |
| <a href="#">Introduction</a>                                                                          | 33        |
| <a href="#">Données</a>                                                                               | 33        |
| <a href="#">Post-traitement des données</a>                                                           | 34        |
| <a href="#">Analyse qualitative visuelle</a>                                                          | 35        |
| <a href="#">Analyse quantitative par corrélation d'images</a>                                         | 36        |
| <a href="#">Conclusion</a>                                                                            | 37        |
| <a href="#">Bibliographie</a>                                                                         | 38        |
| <a href="#">Conclusions</a>                                                                           | 39        |
| <a href="#">Lidar : outil performant de génération de MNT</a>                                         | 39        |
| <a href="#">Méthodes d'exploitation des MNT et apport quant à l'analyse d'un mouvement de terrain</a> | 39        |
| <b><a href="#">Annexes</a></b>                                                                        | <b>42</b> |
| Annexe A - <a href="#">Étude de sensibilité de la direction des profils</a>                           | 42        |

# Introduction

---

## Objectifs

Les technologies Lidar et Radar sont actuellement en plein essor et deviennent extrêmement performantes quant à la résolution des données géographiques fournies. Ceci est notamment la conséquence du développement des capacités de stockage et de calcul des ordinateurs. Dans ce contexte, il paraît intéressant d'évaluer l'apport et le potentiel de la technologie Lidar pour l'analyse des mouvements de terrain.

Ce travail aura pour support deux acquisitions Lidar aéroportées du site de Séchilienne réalisées en janvier 2011 et février 2012 (la campagne 2012 a été financée par l'ANR SLAMS).

### *Analyse des mouvements de terrain*

L'objectif poursuivi dans ce rapport est triple :

- évaluer l'intérêt et l'apport des données Lidar par rapport aux données fournies par une instrumentation classique,
- proposer des outils et des méthodes pour exploiter et interpréter ces données,
- définir des conditions d'acquisition des données pour pouvoir faciliter l'exploitation faite par la suite.

### *Application au site de Séchilienne*

Le CETE de Lyon assure le suivi du site de Séchilienne depuis sa réactivation en 1985. Différentes techniques d'instrumentation (extensométrie, géodésie, radar sol-sol, GPS) permettent de surveiller et d'étudier la cinématique des mouvements du versant et de la zone frontale la plus active [Duranton et al, 2012].

L'exploitation des données Lidar acquises sur le site de Séchilienne pourra ainsi être confrontée à la connaissance du site acquise par le CETE et aux valeurs mesurées de déplacement.

---

## Terminologie

Dans cette partie, le contexte de travail est défini en précisant les notions de Lidar et de modèles numériques de terrain (MNT).

### *Lidar*

Le terme Lidar est l'abréviation de Light Detection and Ranging, c'est à dire un procédé de détection à distance utilisant un laser. Cette technologie est proche du radar : la seule différence est la gamme de longueur d'onde utilisée ( >2-3 mm pour le radar – ondes radio, 0,3 et 10  $\mu$ m pour le laser – domaines visible et infra-rouge).

Le Lidar fait appel à un rayon laser émis vers la surface de la Terre et qui est ensuite retransmis au capteur. Connaissant la vitesse de la diffusion de ce laser (vitesse de la lumière), il est possible de calculer la distance qui sépare le capteur du sol ou des objets opaques qui le recouvrent (leur altitude). Il en résulte ensuite un semis de points tridimensionnels (x,y,z) dont la précision (la dizaine de cm) permet de modéliser le relief du terrain avec une grande finesse.

L'acquisition Lidar peut être réalisée :

- à partir du sol : dans ce cas, le Lidar est appelé également scanner laser terrestre,
- à l'aide d'un vecteur aéroporté : il s'agit donc d'un Lidar aéroporté.

A partir du semis de points acquis, un MNT est construit. La technologie Lidar permet donc de produire des modèles numériques de terrain avec une

performance difficilement accessible par d'autres techniques en termes de précision, densité et aussi rendement au km<sup>2</sup>.

Le Lidar est donc pour nous un moyen de disposer d'un MNT avec une grande précision et une vision complète et rapide de la zone (par opposition au scanner laser terrestre qui demande, par exemple sur le site de Séchilienne, des acquisitions réalisées depuis plusieurs points).

**MNT** Un modèle numérique de terrain est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur.

Un MNT peut être représenté sous différentes formes :

- des courbes de niveaux : courbes d'isoaltitudes définies suivant une équidistance entre deux courbes successives,
- des réseaux de triangles irréguliers (TIN pour Triangular Irregular Network),
- des grilles régulières appelées format raster : sur chaque pixel est indiqué l'altitude moyenne de la zone.

Le MNT informe du relief du terrain contrairement au modèle numérique de surface (MNS) qui tient compte du sursol (végétation, constructions) et informe sur le relief de la surface des objets au sol. Les MNT sont des données couramment utilisées en Sciences de la Terre. S'ils informent avant tout sur la topographie d'une zone, ce sont également des paramètres d'entrée de nombreux modèles géologiques ou géophysiques 3D.

La précision du MNT rend compte de la qualité de description du terrain et, pour les MNT Raster, on parle de deux résolutions :

- résolution planimétrique (spatiale) qui correspond à la taille du pixel,
- résolution altimétrique qui indique la précision de l'altitude.

Dans ce rapport, nous raisonnons à partir du MNT et plus particulièrement de deux MNT pris à des dates différentes pour suivre l'évolution du site.

## État de l'art

### Analyse des séries multi-temporelles de MNT

Plusieurs méthodes d'analyse de séries multi-temporelle de MNT rencontrées dans la littérature sont indiquées : elles ont inspiré les développements réalisés dans la suite.

Il est possible de suivre l'évolution topographique d'une surface à partir d'une série multi-temporelle de MNT.

Différentes analyses peuvent être conduites :

- évolution de la topographie de la surface,
- caractérisation des pentes,
- variations verticales de la topographie,
- champ de déplacements des zones instables.

#### *Evolution de la topographie de la surface*

La représentation des MNT successifs permet de détecter visuellement l'évolution de la topographie de la surface.

#### *Caractérisation des pentes*

Certaines particularités du relief ne sont pas toujours visibles à partir des seules altitudes. Ces structures topographiques peuvent alors être mises en évidence en étudiant l'inclinaison et la direction des pentes, extraites à partir du MNT [Serratrice 2006].

#### *MNT différentiel*

Un MNT différentiel peut être calculé à partir de deux MNT [Casson 2004, Kasperski 2009, Girault et al 1994, Bodin 2011]. Il s'agit d'effectuer la soustraction des altitudes pixel par pixel ce qui permet de quantifier les variations verticales de la topographie et de réaliser un bilan de matières :

- ablation de matériel pour les zones où la différence est négative,
- accumulation de matériels pour les zones où la différence est positive,
- équilibre pour les zones où les variations de topographie sont nulles.

Attention cependant au cas où deux phénomènes opposés peuvent se compenser tels un déplacement et l'action de l'érosion qui peuvent générer des ablations ou des accumulations fictives.

#### *Champ de déplacements*

A partir des MNT, il est possible de construire des images orthorectifiées. Ensuite, une corrélation d'images (dans le domaine fréquentiel) permet de quantifier les déplacements de surface des zones instables [Kasperski, 2009].

#### *Conditions d'analyse*

La comparaison de deux MNT, en particulier via le MNT différentiel, nécessite une compatibilité des résolutions des deux MNT. Par ailleurs, ils doivent être de taille identique et représenter la même surface topographique.

#### *Conclusion*

L'étude de deux ou plusieurs MNT établis à des dates différentes est riche en informations si elle est basée sur plusieurs méthodes d'analyse qui vont fournir des informations complémentaires sur les phénomènes et les mécanismes mis en jeu.

## Données et outils utilisés

### Données disponibles

Deux acquisitions Lidar ont été réalisées sur le versant du Mont-Sec (figure 1 :

- en janvier 2011 : le vol initial a eu lieu en juillet 2010 et a été complété en janvier 2011,
- en février 2012.

Bien que ce soit la même société qui ait effectué les relevés, les données disponibles présentent des caractéristiques différentes : les objectifs des deux acquisitions étaient, en effet, différents et les moyens techniques ont évolué entre les deux dates. Les caractéristiques de ces acquisitions sont inscrites dans le tableau 1.

| Caractéristiques        | Lidar janvier 2011          | Lidar février 2012                                    |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Zone                    | Versant complet du Mont Sec | Zone frontale                                         |
| Type de données         | MNT 50 cm (points)          | Semis MNT<br>MNT 50 cm (raster)<br>MNT 25 cm (raster) |
| Précision planimétrique | 20 cm                       | 20 cm                                                 |
| Précision altimétrique  | 10 cm                       | 10 cm                                                 |

Tableau 1 : caractéristiques des données issues des deux acquisitions Lidar

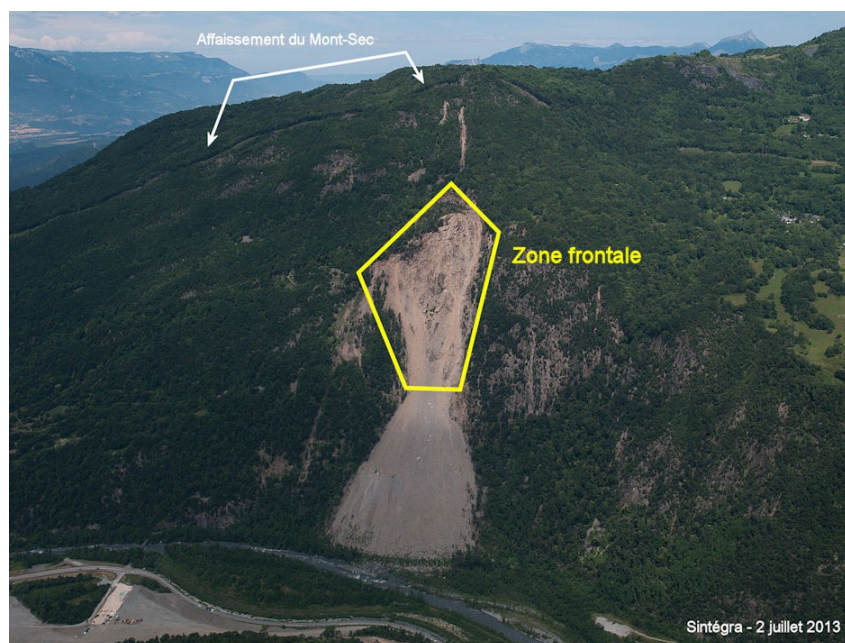


Figure 1 : Vue du versant du Mont-Sec et de la zone frontale

## Données et outils utilisés (suite)

### Données utilisées

L'étude des 2 MNT a été conduite sur la zone commune aux deux acquisitions, à savoir la zone frontale ce qui nous permettra d'étudier l'évolution de celle-ci. Le MNT 2011 a donc été restreint uniquement à la zone décrite par le MNT de 2012.

Après la compatibilité topographique, la compatibilité en résolution a dû être effectuée. La résolution la plus grande à savoir 50 cm a été retenue et le format raster a été adopté. Il a donc fallu notamment générer le MNT 2011 sous format raster. Le travail préparatoire pour rendre compatibles les données est le préalable à toute analyse et doit être effectué rigoureusement.

Sur la figure 2, les deux MNT rendus compatibles sont représentés en vue 3D.

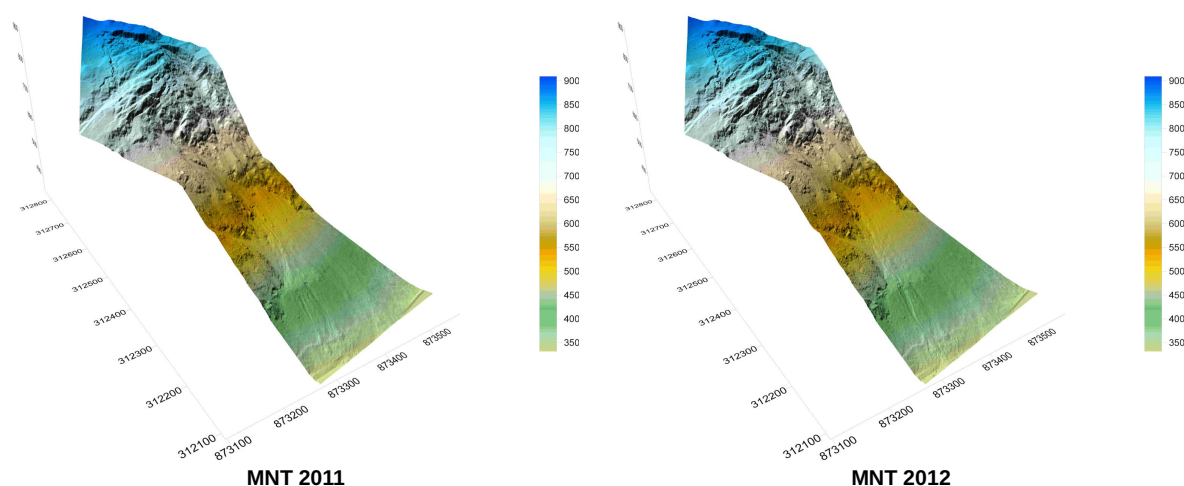


Figure 2 : MNT 2011 et 2012 représentés en surface 3D

### Outils utilisés

Trois logiciels ont été utilisés pour effectuer l'analyse des MNT :

- principalement Surfer, outil de représentation des MNT et des calculs sur ces modèles,
- Envi, logiciel de traitement de photographies, pour les calculs de corrélation d'images,
- Corel Draw pour le suréchantillonnage des images.

# Étude des séries de MNT

## Introduction

Les MNT présentés décrivent deux zones (figure 3) :

- la zone frontale affectée de mouvements,
- la partie basse appelée cône d'éboulis qui ne sera pas étudiée dans cette partie.

On se restreint donc à l'étude de la zone frontale à l'intérieur du pentagone dans cette partie.

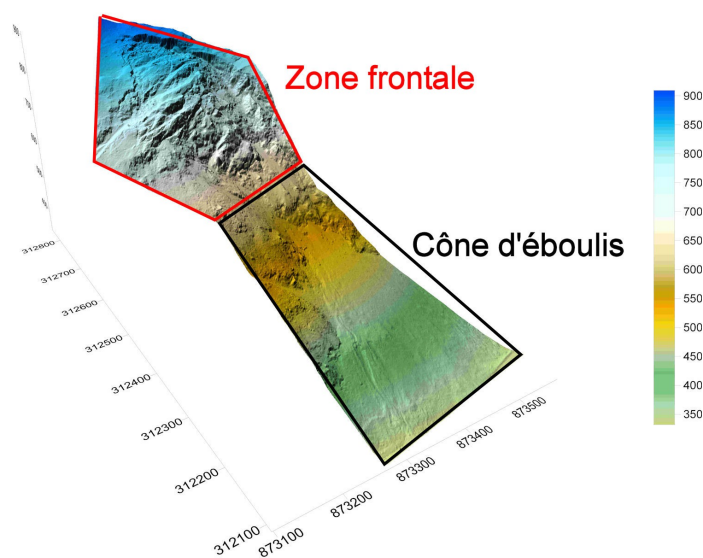


Figure 3 : Identification des zones d'intérêt des MNT

## Superposition des 2 MNT

Parmi les différentes représentations des MNT (courbes de niveaux, surface 3D, semis de points, vue 2D ombrée, maquette fil de fer ..), deux représentations nous ont paru pertinentes pour visualiser les évolutions du mouvement de terrain :

- vue 2D ombrée,
- surface 3D.

Elles sont détaillées dans la suite.

### Vue 2D ombrée

Une animation a été réalisée par superposition des deux vues ombrées (figure 4). L'animation au format gif animé est jointe au rapport sous format numérique.

Cette animation permet (figure 5) :

- d'identifier la zone en mouvement,
- de visualiser les déplacements planimétriques : directions et amplitudes,
- d'identifier les zones affectées par des éboulements notables.



## Étude des séries de MNT (suite)

### Superposition des 2 MNT (suite)

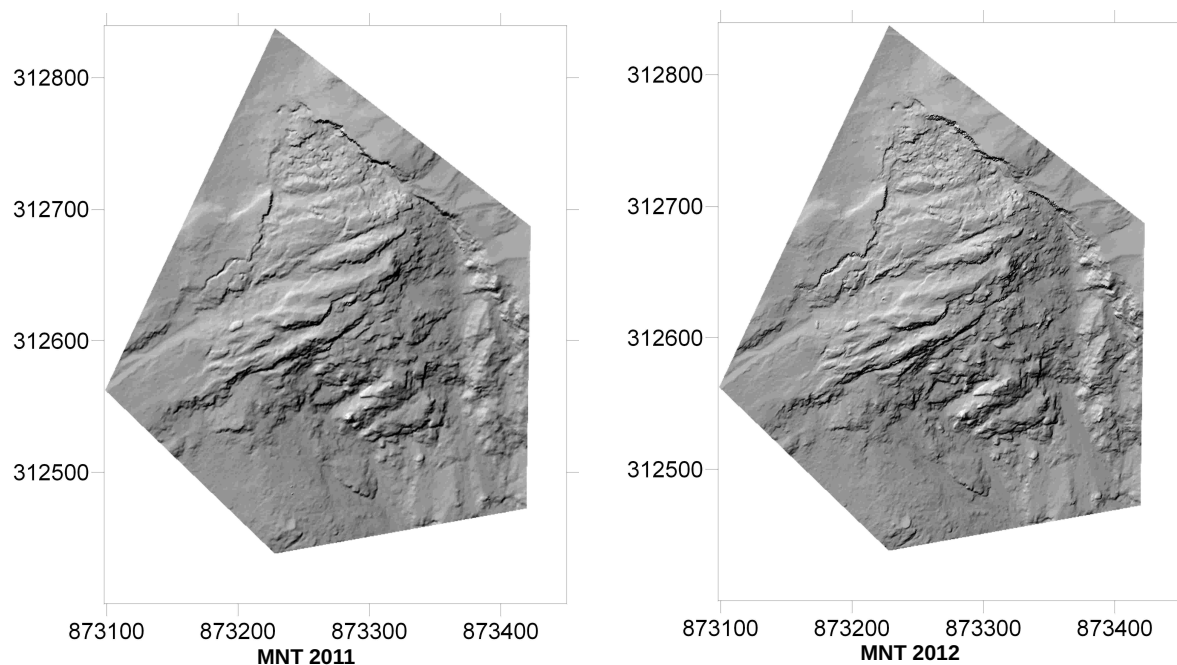


Figure 4 : Vues 2D ombrées des MNT

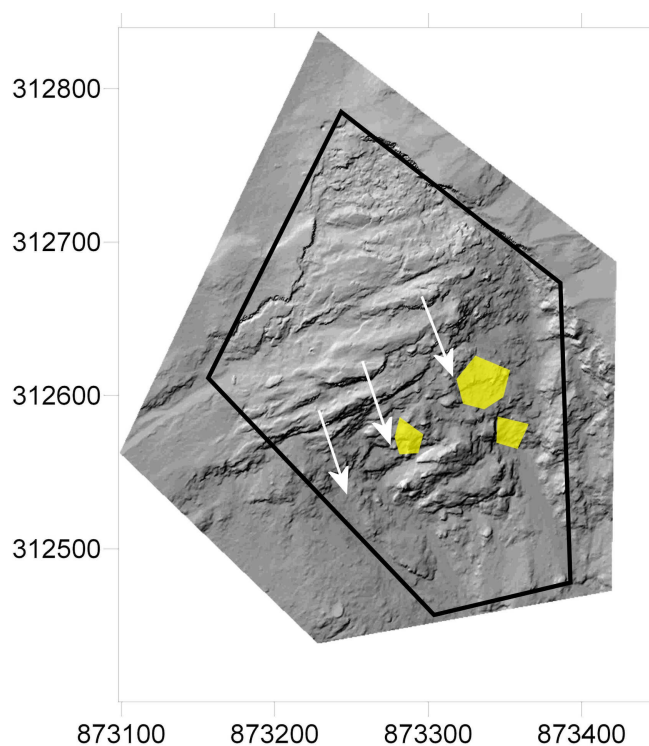


Figure 5 : Synthèse des informations fournies par l'animation par superposition des vues 2D ombrées (les principales zones éboulées sont représentées en jaune)



## Étude des séries de MNT (suite)

### Superposition des 2 MNT (suite)

**Surface 3D** Une deuxième animation a été réalisée par superposition des deux surfaces 3D (figure 6). L'animation au format gif animé est également jointe au rapport au format numérique.  
Cette animation permet de rendre compte de la troisième direction (figure 7) à savoir :

- l'affaissement de la partie supérieure de la zone frontale,
- le basculement des lanières.

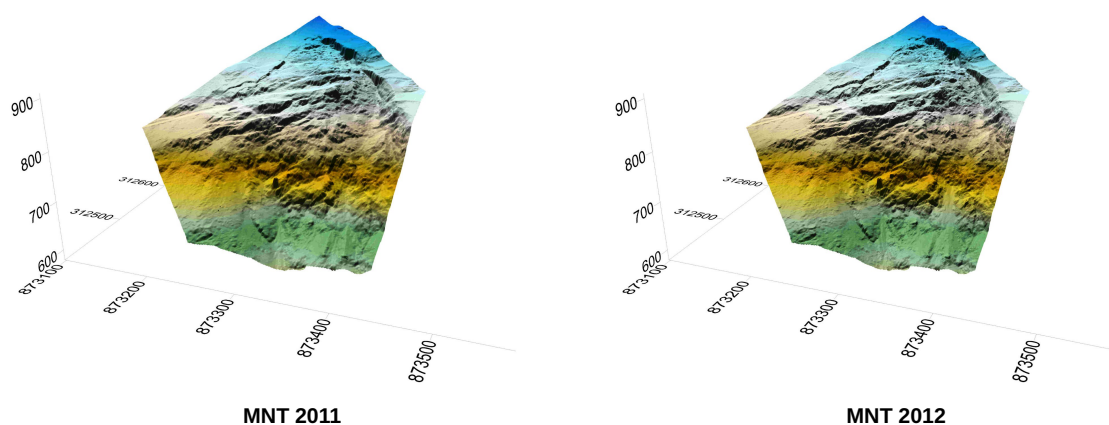


Figure 6 : MNT représentés sous la forme de surface 3D

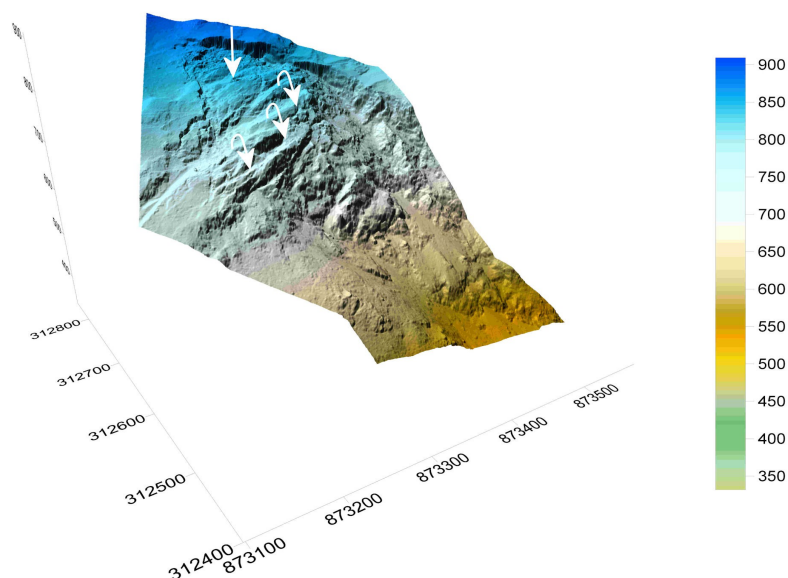


Figure 7 : Synthèse des informations fournies par l'animation par superposition des 2 MNT sous la forme de surfaces 3D

## Étude des séries de MNT (suite)

## Profils

L'étude des vues successives permet de mener une analyse qualitative. Pour affiner l'étude et mieux comprendre les mécanismes, une étude des profils (coupes du MNT) est réalisée dans la suite.

### **Direction des profils**

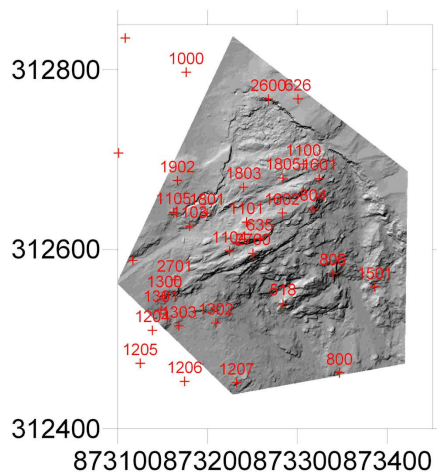
De façon générale, la direction des profils peut être estimée de façon approximative avec l'animation par superposition des 2 MNT, ce qui permet d'estimer la direction du mouvement. Dans le cas de la zone frontale de Séchilienne, nous estimons une valeur autour de N150/160°.

Puisque par ailleurs, sur ce site, nous disposons d'un relevé topographique annuel des points de mesure (figure 8), nous pouvons valider et préciser cette valeur de direction de mouvement. Le tableau 2 confirme les valeurs approximatives :

- entre 143° et 153° pour la partie est de la zone frontale,
- entre 140° et 169° pour la partie ouest.

|                            | Point | Dx    | Dy     | Dz     | Direction xy déplacement |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------------------------|
| Partie Est zone frontale   | 804   | 85,8  | -135,8 | -113,9 | 147°                     |
|                            | 1100  | 96,5  | -147,7 | -155,2 | 147°                     |
|                            | 1601  | 118,6 | -157   | -130   | 143°                     |
|                            | 1602  | 84,8  | -167,5 | -95    | 153°                     |
|                            | 1804  | 82,7  | -161,6 | -150,3 | 153°                     |
| Partie Ouest zone frontale | 635   | 62,2  | -138,1 | -104,5 | 155°                     |
|                            | 1101  | 45,9  | -157,9 | -90,3  | 163°                     |
|                            | 1103  | 23,2  | -27,8  | -34    | 140°                     |
|                            | 1801  | 15,9  | -47    | -74,6  | 161°                     |
|                            | 1803  | 26,2  | -139,6 | -93    | 169°                     |

**Tableau 2: Variations topographiques de plusieurs points de mesure entre 2011 et 2012 en mètres (campagnes SINTEGRA 2011 et 2012)**



**Figure 8 : Localisation des points de mesure**

## Étude des séries de MNT (suite)

### Étude de sensibilité de la direction des profils

Avant de réaliser les profils et de les analyser, la pertinence du profil, en particulier sa direction, doit être vérifiée. Nous proposons donc d'étudier la sensibilité des résultats obtenus vis-à-vis de la direction du profil. Trois profils Ps1, Ps2 et Ps3 (figure 9) ont été retenus et des variations de directions ont été réalisées autour de ces profils. Nous présentons dans la suite les résultats obtenus pour le profil Ps1, les résultats obtenus à partir des profils Ps2 et Ps3 figurent en Annexe A.

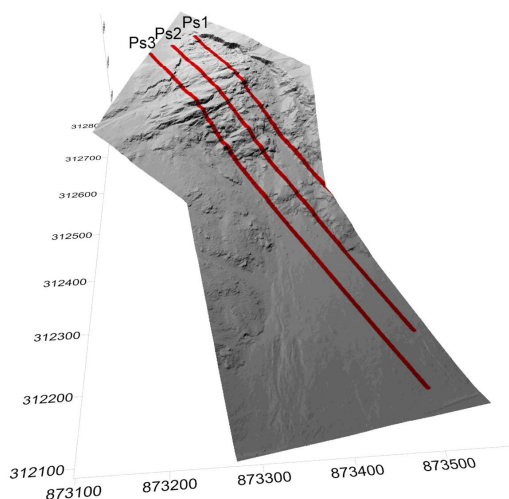


Figure 9 : Profils test d'étude de la sensibilité de la direction du profil

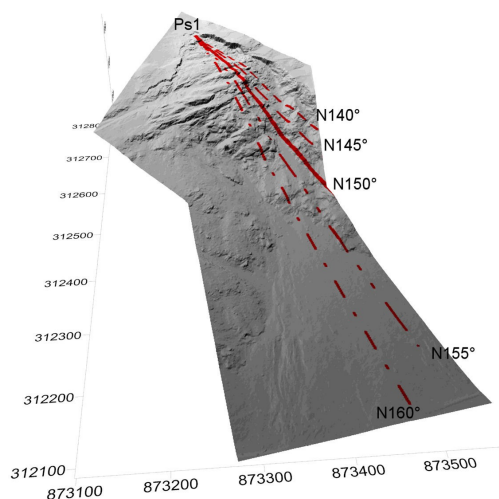


Figure 10 : Profils d'étude de la sensibilité à la direction autour du profil Ps1

**Profil Ps1** Pour le profil Ps1, cinq directions sont étudiées : de N140° à N160° avec un pas de 5° (figure 10). On constate l'importance du choix d'un angle pertinent de direction (figure 11) :

- dans les directions N140°, N145° et N150°, les différents mécanismes (affaissement et basculement) apparaissent. Ils restent cependant plus marqués dans la direction N150°.
- Les mécanismes sont plus atténués dans les directions N155° et N160°.

Dans cette zone (est de la zone frontale), la direction optimale pour réaliser un profil semble donc être N150°

## Étude des séries de MNT (suite)

### Étude de sensibilité de la direction des profils (suite)

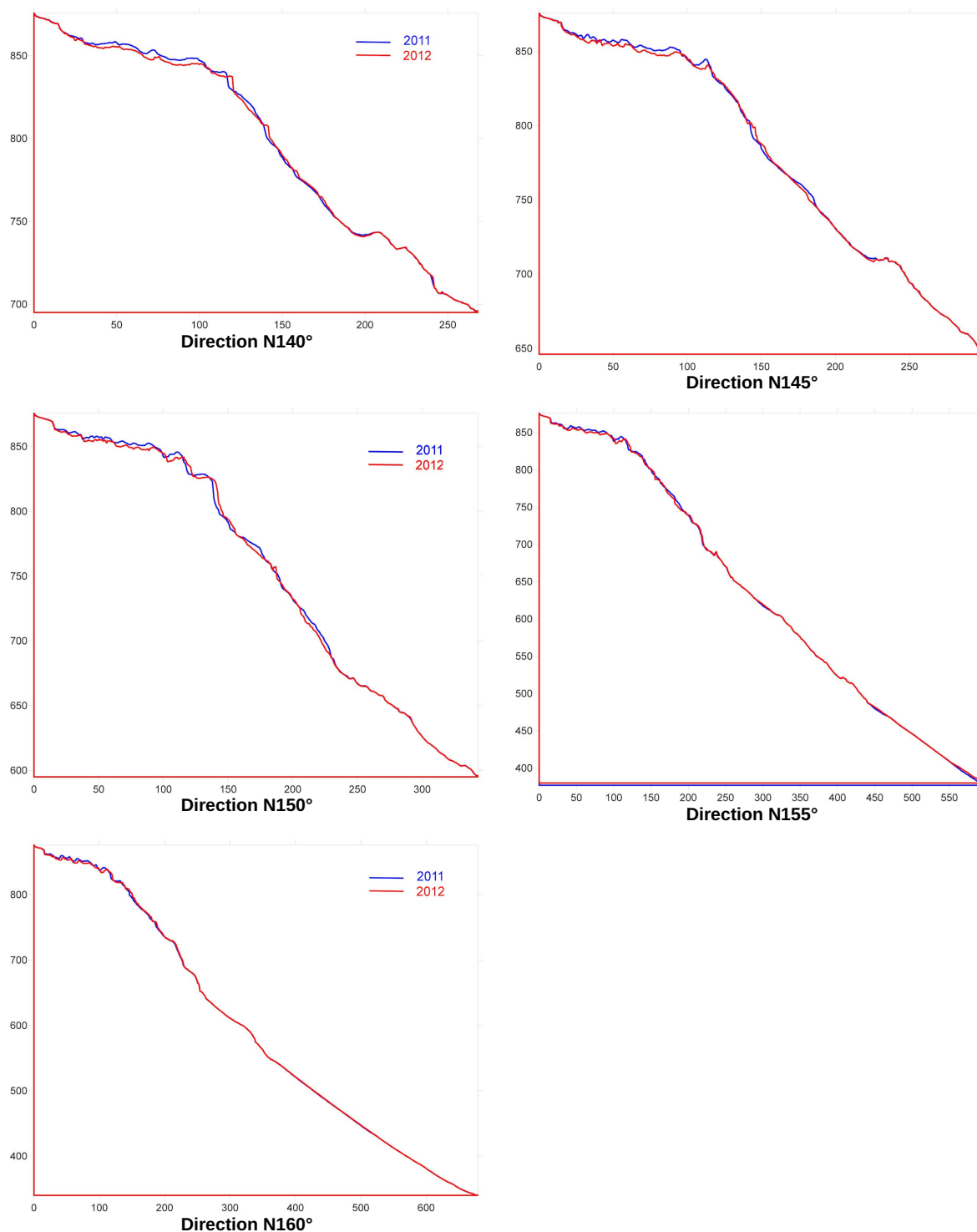


Figure 11 : Profils obtenus dans des directions allant de N140° à N160° autour de Ps1

## Étude des séries de MNT (suite)

### Analyse des profils

Au niveau de la zone frontale, 7 profils ont été réalisés avec des angles validés par l'analyse de sensibilité effectuée précédemment. Il nous semblait au départ que des directions de profils légèrement différentes entre la partie est et la partie ouest seraient les plus appropriées. In fine, la direction N150° semble être la plus pertinente sur l'ensemble de la zone.

La figure 12 montre les profils réalisés. La figure 13 montre les superpositions des profils issus des MNT 2011 et MNT 2012 selon les sept profils retenus. Cette série de profils permet :

- d'identifier les mécanismes du mouvement de terrain,
- de quantifier les mouvements,
- d'effectuer une analyse spatiale du mouvement.

Ces points sont détaillés dans la suite de façon successive.

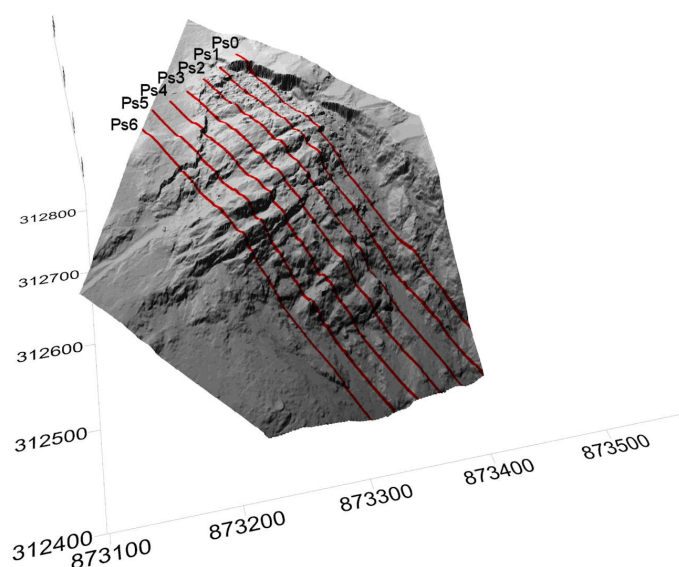
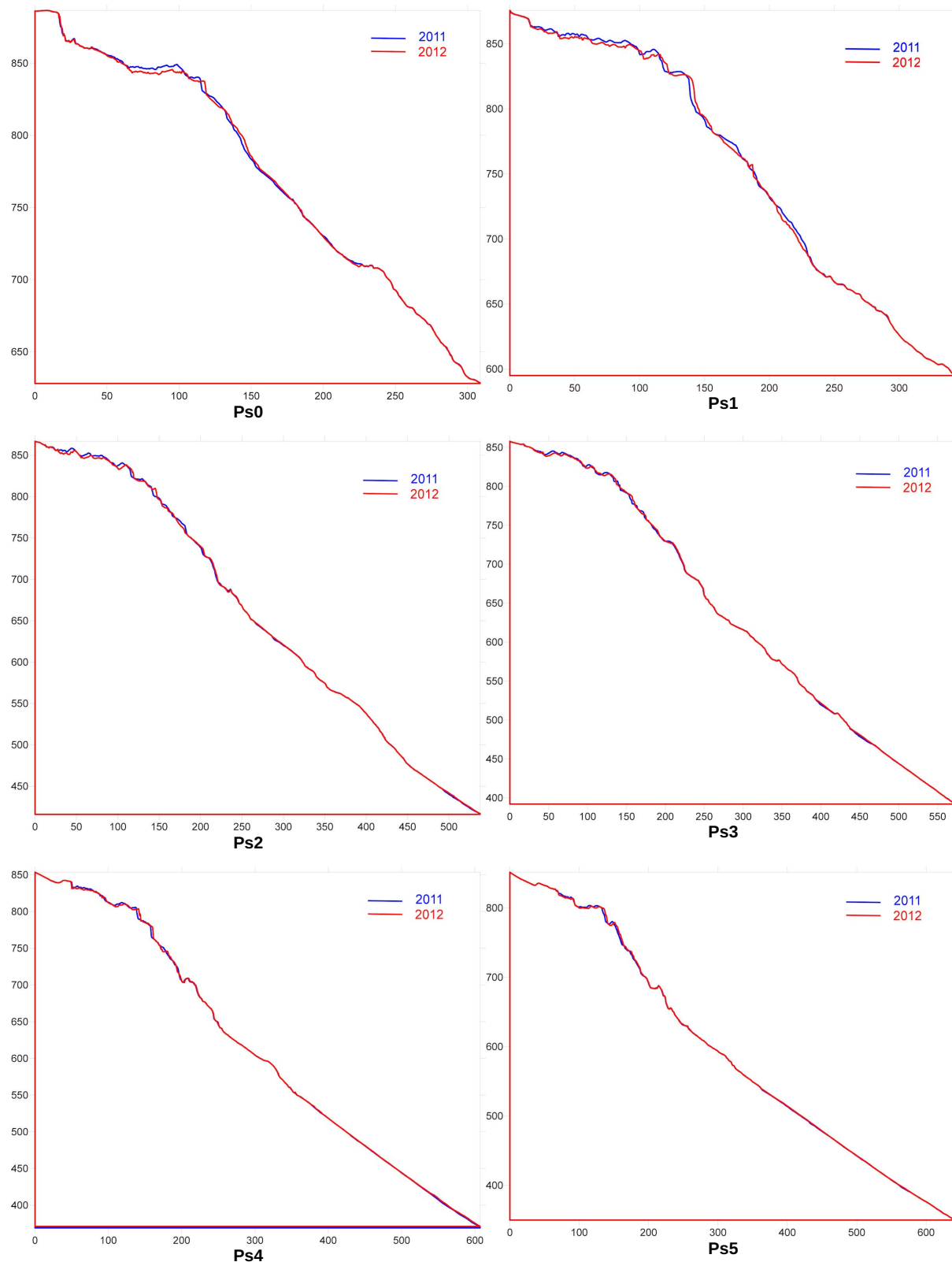


Figure 12 : profils utilisés pour l'analyse

## Étude des séries de MNT (suite)

### Analyse des profils (suite)



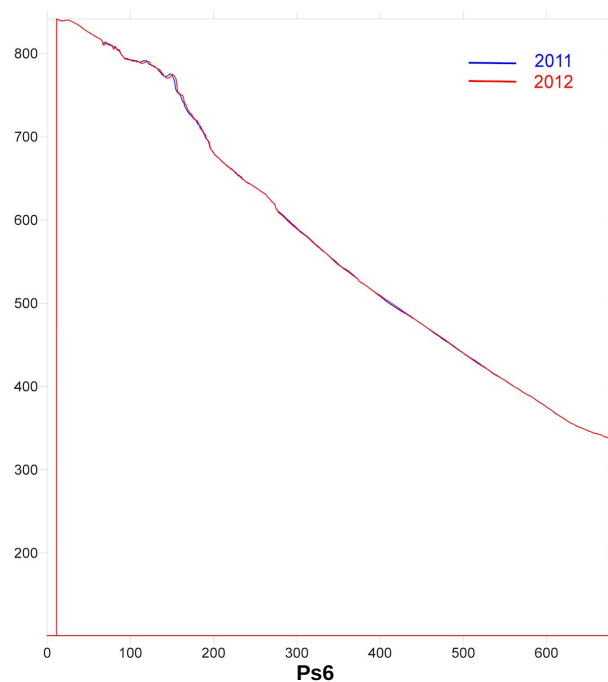


Figure 13 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long des 7 profils

### Identification des mécanismes

Sur l'ensemble des 7 profils, l'affaissement de la partie supérieure de la zone frontale est identifiable. De même, le basculement des lanières est visible de façon plus ou moins marquée en fonction de la localisation du profil (figure 14).

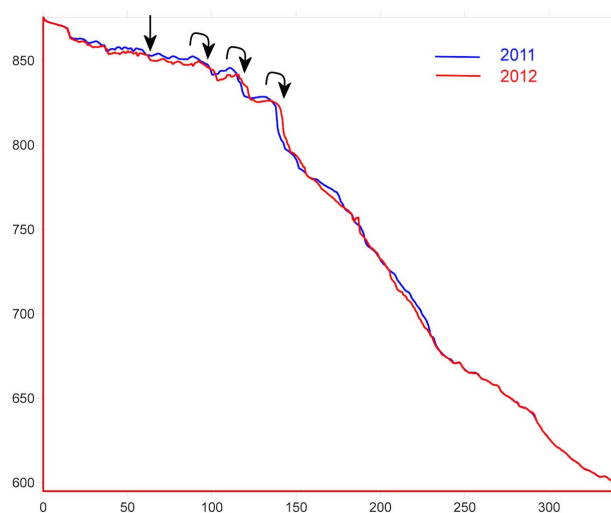


Figure 14 : Synthèse des informations obtenues quant à l'identification des mécanismes

## Étude des séries de MNT (suite)

### Analyse des profils (suite)

#### Quantification des mouvements

A l'aide de la superposition des deux profils, il est possible de quantifier :

- le déplacement consécutif à l'affaissement,
- le déplacement consécutif au basculement.

Les valeurs déduites de la superposition des deux topographies le long des profils obtenus sont indiquées dans le tableau 3. Ce ne sont pas des valeurs précises comme celles qui peuvent être fournies par les techniques classiques d'instrumentation. Ce sont des ordres de grandeurs car la résolution des MNT utilisés (50 cm) et la précision (altimétrique : 10 cm, planimétrique : 20 cm) peuvent introduire des erreurs de l'ordre de 1 m. De plus, étant donné les éboulements ayant affecté certaines zones, les points pris comme référence sur le premier profil pour calculer la distance ne se retrouvent pas nécessairement sur le deuxième. Ce phénomène peut aussi bien augmenter la distance que la réduire.

Il est donc important d'insister sur le fait que ce sont uniquement des ordres de grandeurs de déplacements qui sont fournis.

| Profil | Affaissement         | Basculement                        |
|--------|----------------------|------------------------------------|
| P0     | 3 m (1100 : 1,5 m)   | 3-4m (1100 : 2,34m, 1601 : 2,35 m) |
| P1     | 3m                   | 3-4m(804 : 2m)                     |
| P2     | 3 m (1805 : 1,5 m)   | 3-4m (1805 : 2,35 m)               |
| P3     | 2-3 m                | 3 m (1602 : 2,1 m)                 |
| P4     | 2 m (1803 : 0,9 m)   | 2-3 m (1803 : 1,7 m)               |
| P5     | 1-2 m (1101 : 0,9 m) | 2-3 m (1101 : 1,87 m)              |
| P6     | 1 m (1104 : 0,75 m)  | 2 m (1104 : 1,75 m)                |

Tableau 3 : Ordres de grandeurs des déplacements déduits à partir des profils

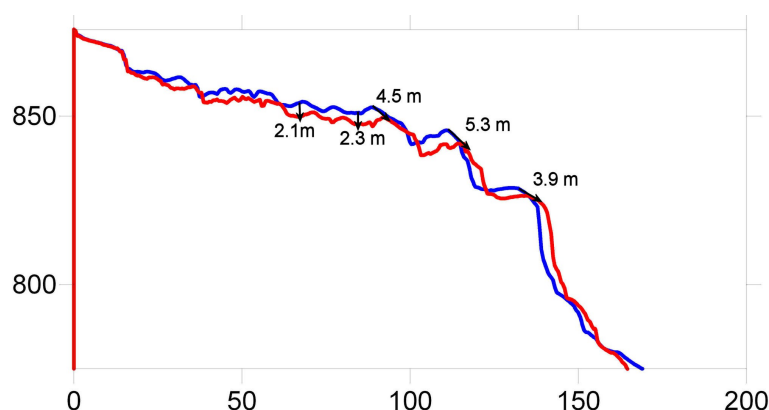


Figure 15 : Synthèse des ordres de grandeurs des déplacements obtenus au niveau du profil Ps1



## Étude des séries de MNT (suite)

### Analyse des profils (suite)

On peut donc comparer les valeurs obtenues à partir de la superposition des profils et les valeurs de déplacements déduites des deux campagnes d'auscultation annuelle géodésique réalisées par Sintégra (fin novembre 2010 et mi-novembre 2011). Dans le tableau 3, le numéro du prisme à proximité du profil est indiqué ainsi que la valeur du déplacement mesuré.

Les valeurs indiquées entre parenthèses concernent une période de 11,5 mois alors que l'écart entre les deux acquisitions Lidar est de 12,5 mois. Il faut donc rajouter environ 10 % aux valeurs mesurées sur le terrain pour que les valeurs soient comparables.

Malgré ceci, les valeurs fournies par les profils s'avèrent supérieures aux mesures ponctuelles fournies par la campagne Sintégra. Deux raisons expliquent cela :

- les valeurs que nous avons calculées à partir des profils sont calculées en des points remarquables du profil, avec une tendance plus marquée et représentent donc des valeurs maximales,
- les valeurs des campagnes Sintégra sont ponctuelles et renseignent donc localement.

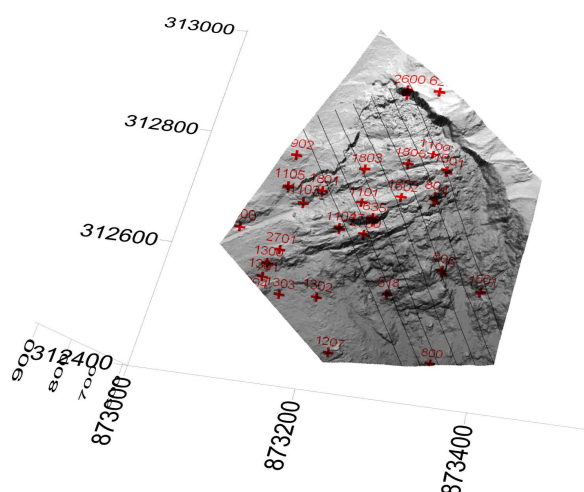


Figure 16 : profils et points de mesure (prismes)

## Étude des séries de MNT (suite)

### Analyse des profils (suite)

#### **Analyse spatiale du mouvement**

La série des 7 profils permet d'effectuer une analyse spatiale des mouvements. Au niveau des profils P0, P1 et P2, l'ampleur des mouvements est importante et supérieure à ceux observés sur les profils plus à l'Ouest (figure 17).

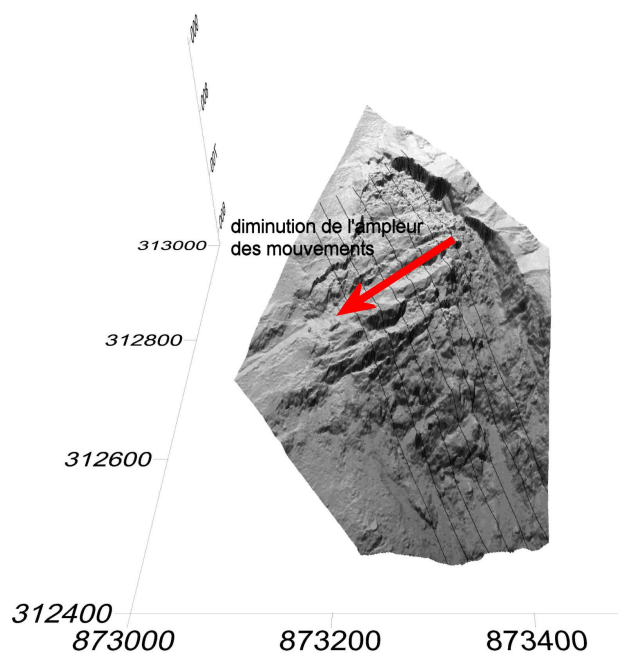


Figure 17 : Synthèse de l'analyse spatiale du mouvement

**Conclusions** L'étude des profils est riche en informations à la condition d'avoir au préalable recherché et identifié une direction pertinente des profils. Il est ainsi possible d'analyser finement le mouvement : mécanisme, direction, ordre de grandeur des déplacements.

## Étude des séries de MNT (suite)

---

### Conclusions

L'analyse des séries des MNT, une fois rendus compatibles, permet d'accéder à :

- des éléments qualitatifs avec une vue globale de l'ensemble du mouvement : détection des zones en mouvement, mécanismes mis en jeu via des animations par superposition des représentations des MNT sous la forme de vues 2D ombrées ou de surfaces 3D.
- des éléments plus quantitatifs : direction et valeur des déplacements à l'aide des profils.

Ces différents outils sont complémentaires et s'alimentent les uns les autres.

## Étude du MNT différentiel

### Introduction

Dans cette partie, nous nous intéressons à la notion de MNT différentiel. Un MNT différentiel est obtenu par soustraction point par point des altitudes de deux MNT. Nous cherchons à identifier quelles informations ce MNT différentiel peut nous apporter sur le mouvement de terrain.

Le MNT différentiel est un nouveau MNT qui peut être représenté selon plusieurs modes qui sont détaillés dans la suite avec leur intérêt.

### Représentation surface 3D

Le MNT est représenté sur la figure 18 à l'aide d'une surface 3D.

Cette représentation permet d'identifier une zone très chahutée : la zone frontale en cours de dislocation qui est affectée par des mouvements importants. Cette représentation met en avant les irrégularités mais ne permet de visualiser l'ensemble de l'information : les variations négatives ne sont pas visibles sur la figure 18 et si on accède aux variations négatives, on ne visualise plus les variations positives. Cette représentation ne permet pas de visualiser simultanément toutes les variations d'altitudes.

Concernant le cône d'éboulis, zone où les variations sont plus continues, cette représentation permet d'identifier les zones d'accumulation de matériaux.

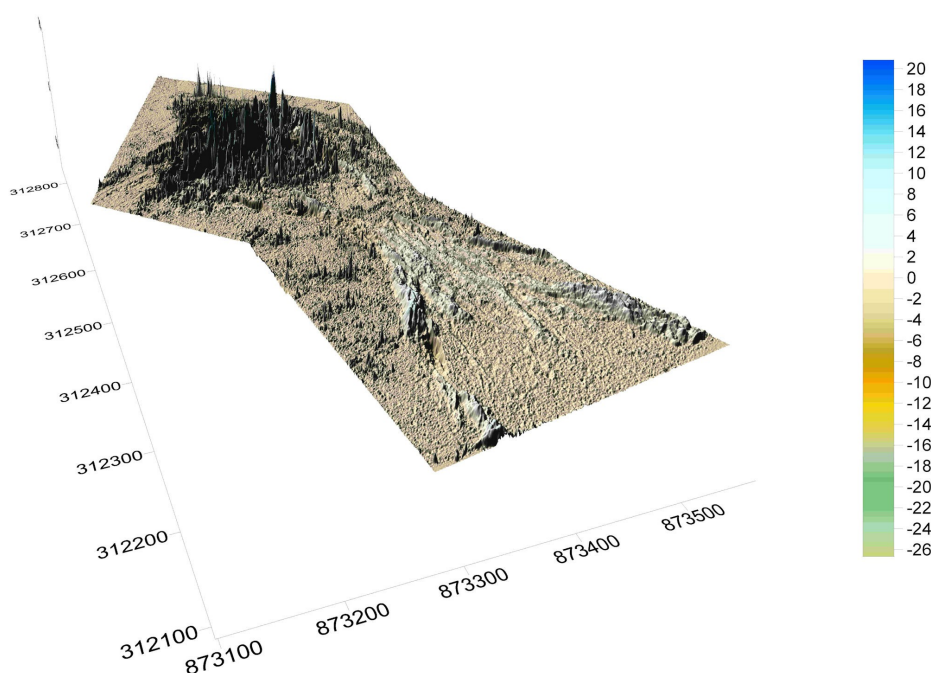


Figure 18 : MNT différentiel représenté par une surface 3D

## Étude du MNT différentiel (suite)

### Représentation en vue 2D ombrée

Une deuxième représentation en vue 2D ombrée est présentée sur la figure 19. Cette représentation permet de :

- identifier la zone frontale,
- mettre en avant l'affaissement de la partie supérieure de la zone frontale,
- visualiser l'accumulation de matériaux au niveau des contacts entre les lanières dû au basculement.

De la même façon au niveau du cône d'éboulis, la zone d'engraissement du cône est bien visible.

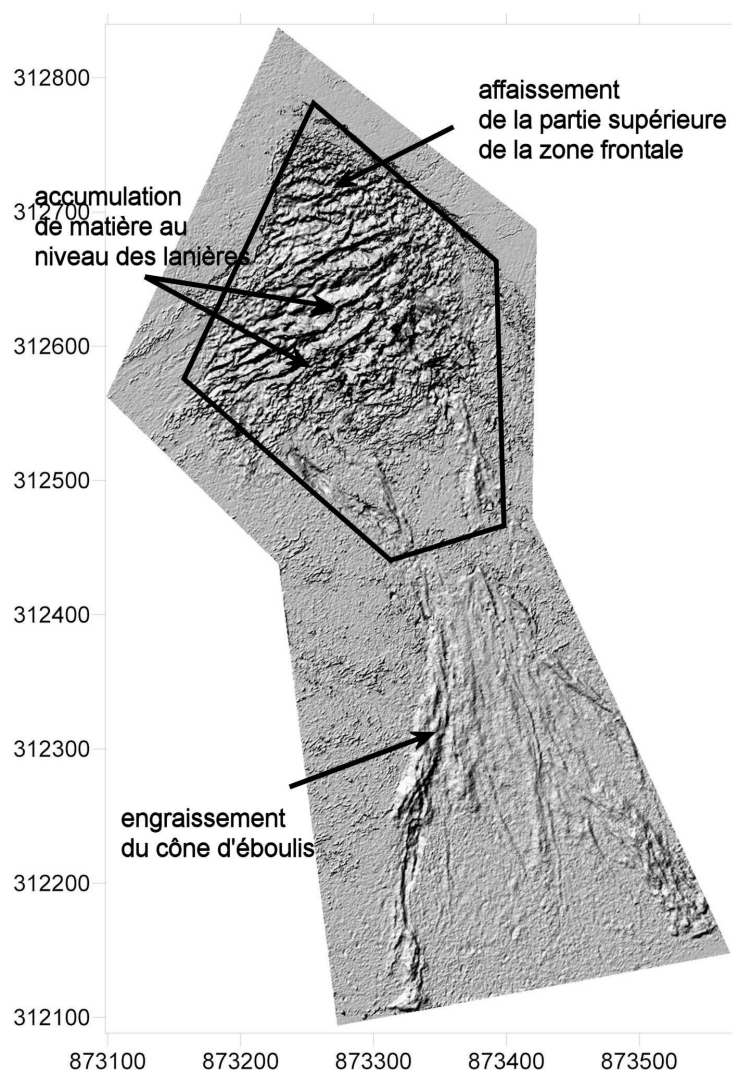


Figure 19 : MNT différentiel représenté par une vue 2D ombrée

## Étude du MNT différentiel (suite)

### Représentation en courbe de niveau

Une dernière représentation est proposée ici : en courbes de niveau (figure 20). Les lignes d'iso-valeurs ne sont pas affichées, c'est la couleur qui rend compte des valeurs d'accumulation ou d'érosion selon la légende jointe au graphe.

Cette représentation en courbes de niveau est très intéressante dans le sens où elle permet de mettre en avant l'affaissement de la partie supérieure de la zone frontale, de visualiser les lanières, et mettre en avant l'avancée de la partie la plus raide de la zone frontale en cours de basculement.

Au niveau du cône d'éboulis, les zones d'accumulation sont également visibles.

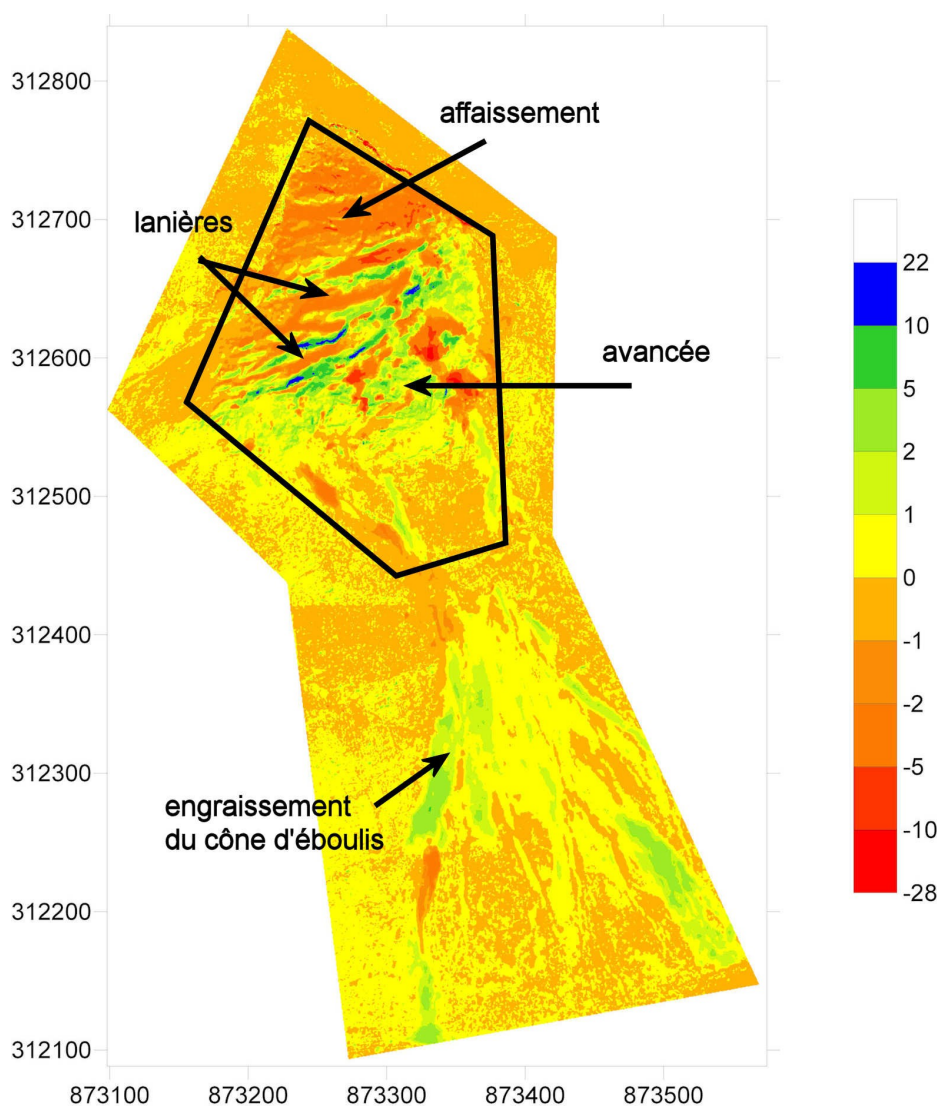


Figure 20 : MNT différentiel représenté par les courbes de niveau

## Étude du MNT différentiel (suite)

---

### Conclusions

La notion de MNT différentiel paraissait aux premiers abords la plus naturelle pour comparer plusieurs MNT. Le MNT différentiel permet en effet d'apporter de l'information à condition de choisir la représentation appropriée. La représentation sous forme de courbes de niveau permet de présenter synthétiquement les phénomènes observés : affaissement de la partie supérieure, avancée de la partie la plus raide en cours de basculement, engraissement du cône d'éboulis. Elle est donc complémentaire des animations-superposition des deux MNT.

Toutefois, le MNT différentiel ne rend compte que de la variation d'altitude d'un point donné sans tenir compte des décalages planimétriques. La notion de MNT différentiel nous semble pour cette raison moins riche que l'analyse comparée des deux MNT.



## Analyse des pentes du MNT

### Introduction

Dans cette partie, nous souhaitons évaluer l'apport des cartes de pentes pour l'étude d'un mouvement, de son évolution et de la morphologie du terrain. Nous étudions donc :

- l'inclinaison des pentes,
- leur direction,
- la convexité du relief.

### Carte des inclinaisons et des directions des pentes

Les inclinaisons des pentes des MNT 2011 et 2012 ont été calculées à l'aide du logiciel Surfer (figure 21). Il s'agit bien de l'inclinaison dans le sens de la plus grande pente (plus fort gradient). En complément, sur la figure 23, est indiquée la direction de la pente locale (qui est perpendiculaire à la direction de plus grande pente).

### Identification des zones en mouvement et de leur morphologie

L'animation par superposition des cartes d'inclinaison des pentes (figure 21) ou des cartes de direction (figure 23) permet d'identifier visuellement les zones en mouvement et de prendre connaissance en première approche de la morphologie du terrain (pente ou non, lisse ou non). Ce travail ne remplace en rien une visite sur le terrain mais peut le préparer.

Dans le cas du site de Séchilienne, le mouvement de la zone frontale est bien visible. Concernant la morphologie, on constate effectivement que la partie supérieure est moins pentue que la zone intermédiaire plus raide (figure 21). On peut également visualiser les lanières.

Les principales zones éboulées sont également mises en évidence avec cette représentation.

### Qualification du mouvement

Des superpositions précédentes, on peut également évaluer les directions et un ordre de grandeur des déplacements planimétriques par le suivi ou la reconnaissance de motifs.

Pour le site de Séchilienne, on visualise le déplacement dans la direction N150° et il est possible de les quantifier en mesurant la distance entre motifs identiques.

### Evolution de la morphologie de surface

Les cartes de directions de pentes (figure 23) permettent d'appréhender la régularité de la topographie.

| Si                                  | Alors            |
|-------------------------------------|------------------|
| Variations continues des directions | Surface lisse    |
| Variations brutales des directions  | Surface chahutée |

On déduit de la figure 23 deux informations importantes :

- la partie supérieure de la zone frontale est chahutée,
- et surtout, elle est de plus en plus chahutée.



## Analyse des pentes du MNT (suite)

### Carte des inclinaisons et des directions des pentes (suite)

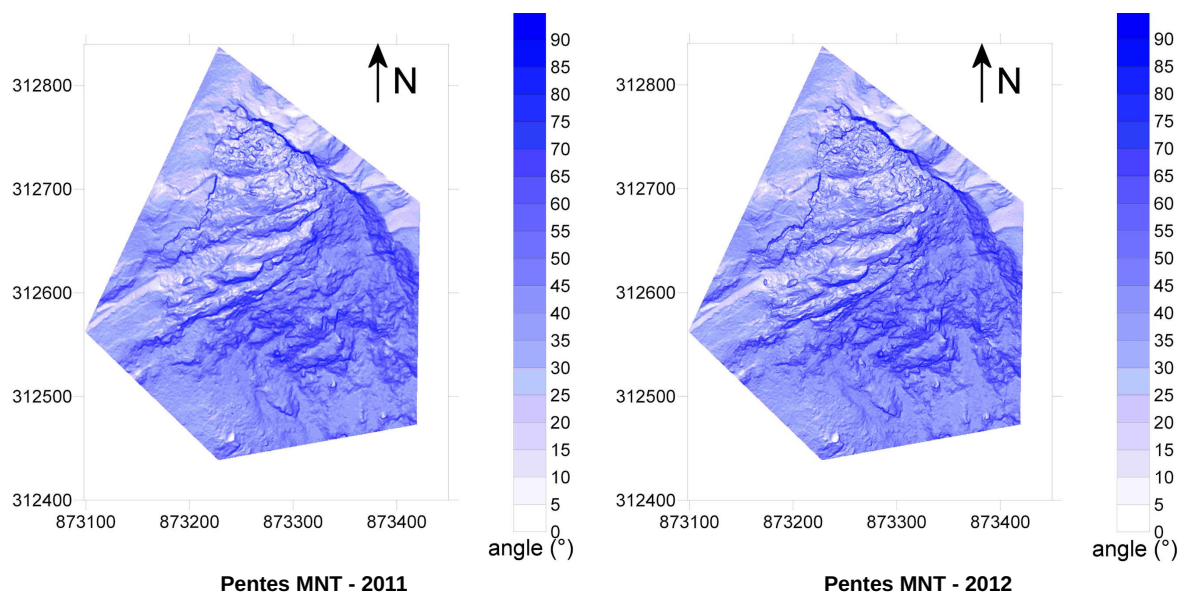


Figure 21 : inclinaison des pentes locales par rapport à l'horizontale

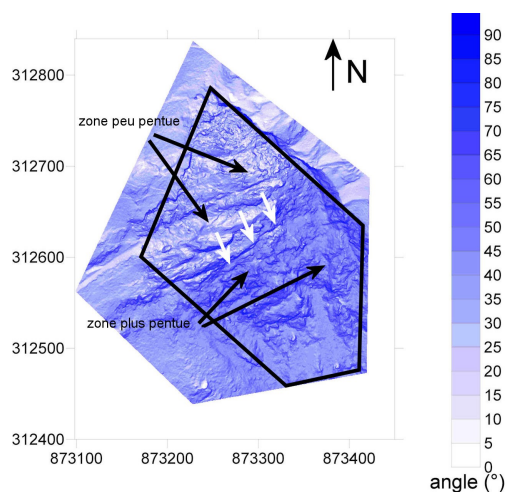


Figure 22 : synthèse des informations fournies par la carte des inclinaisons des pentes locales

## Analyse des pentes du MNT (suite)

### Carte des inclinaiions et des directions des pentes (suite)

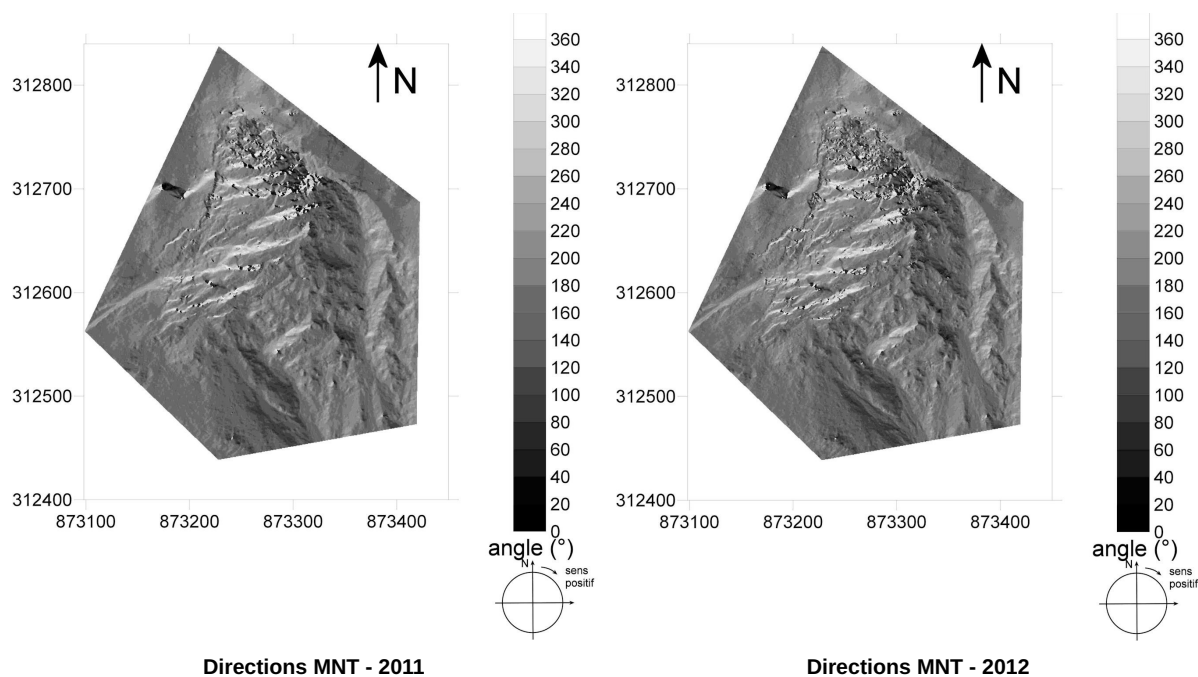


Figure 23 : direction des pentes locales par rapport au nord

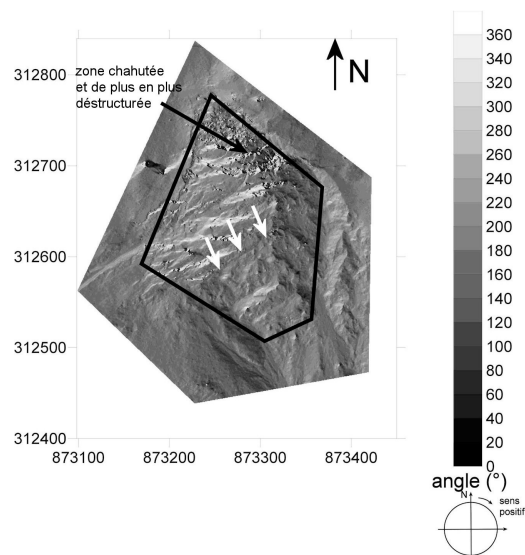


Figure 24 : synthèse des informations fournies par la carte des directions des pentes locales

## Analyse des pentes du MNT (suite)

### Convexité du relief

La figure 25 présente la convexité de la topographie calculée sur les MNT de 2011 et 2012.

L'analyse menée à partir de ces cartes de convexité est délicate. En 2011, on observe clairement une alternance de structures concaves et convexes. En 2012, les structures sont beaucoup plus difficilement identifiables et la carte est beaucoup plus pixelisée.

L'évolution des deux cartes de convexité pourrait donc montrer la déstructuration qui s'opère à la surface.

L'animation par superposition permet d'observer des mouvements mais étant donné l'état de pixellisation de la carte de 2012, la direction planimétrique du mouvement ne peut pas être déterminé de façon fiable.

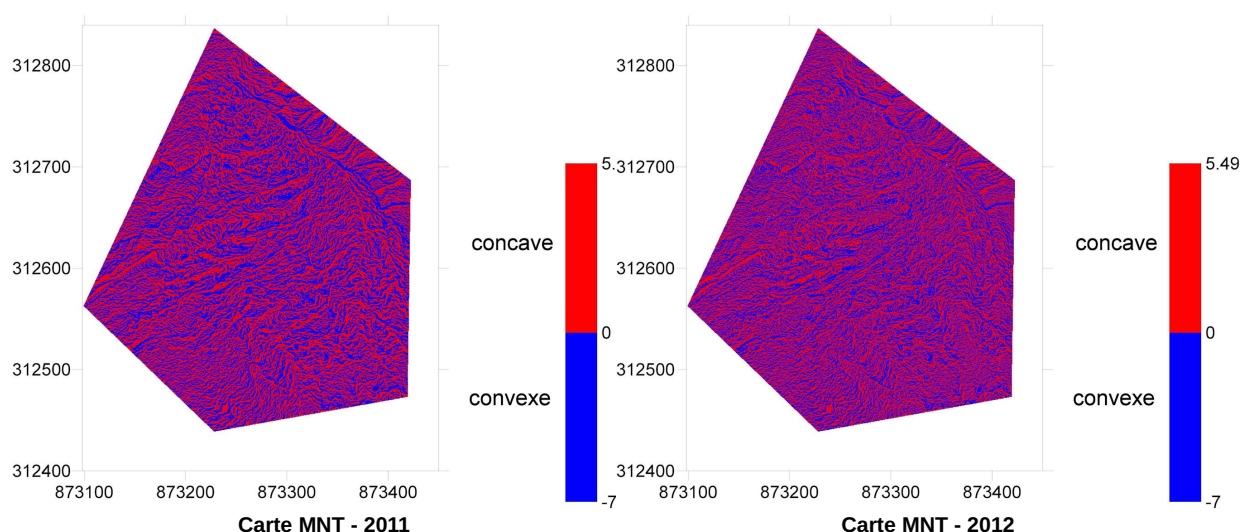


Figure 25 : carte de convexité

### Conclusions

Les pentes locales des MNT ont été étudiées avec différentes approches : calcul de l'inclinaison, de la direction et de la convexité.

Deux approches (inclinaison et direction) semblent porteuses d'informations. La carte de convexité n'a pas aidé à l'analyse pour le mouvement de Séchilienne.

Au-delà des informations classiques (délimitation de la zone en mouvement, direction et quantification du mouvement), des informations spécifiques sont fournies notamment par les directions de pentes. En effet, ces séries montrent l'évolution de la morphologie de surface, sa régularité et son angulosité.

L'état de déstructuration de surface constaté sur le terrain est mis en évidence avec cette approche.

## Étude des orthophotos

### Introduction

Dans cette partie, l'enjeu est de quantifier par analyse d'images les mouvements, notamment par corrélation d'images. Pour cela, les images traitées doivent être compatibles en résolution et en localisation comme ceci a été fait précédemment pour les MNT.

### Données

Les deux campagnes d'acquisition Lidar ont fourni des orthophotos (figure 26) d'extension et de résolution différentes (tableau 4). On note que la première orthophoto est issue de la campagne incomplète de juillet 2010 et n'a pas été refaite avec la nouvelle acquisition en janvier 2011. Les deux orthophotos sont donc distantes d'une année et demie.

| Acquisition | Zone                | Résolution | Taille des données |
|-------------|---------------------|------------|--------------------|
| 07/10       | Versant du Mont-Sec | 10 cm      | 1213385 ko         |
| 02/12       | Zone frontale       | 5 cm       | 411336 ko          |

Tableau 4 : caractéristiques des deux orthophotos



Figure 26 : Orthophotos suite aux acquisitions Lidar

## Étude des orthophotos (suite)

### Post-traitement des données

Deux traitements successifs sont réalisés pour rendre les données compatibles (figure 27) :

- compatibilité de localisation : zoom de l'orthophotographie de 2010 sur la surface de la zone des Ruines décrite par l'orthophoto de 2012,
- compatibilité de résolution : rééchantillonnage de l'orthophoto de 2012 qui présente une résolution double de celle de 2011 (orthophoto 2012 suréchantillonnée).

Le post-traitement doit être effectué rigoureusement et nécessite une grande mémoire de l'ordinateur. La taille des orthophotos (cf tableau 4) peut être un frein au post-traitement. La taille de l'orthophoto de 2010 est proche de la taille maximale acceptée par Photoshop.



Orthophoto juillet 2010



Orthophoto février 2012

Figure 27 : orthophotos compatibles : même résolution (10 cm) et même localisation



## Étude des orthophotos (suite)

### Analyse qualitative visuelle

Une première analyse qualitative a été réalisée à l'aide d'une superposition des deux orthophotos : l'animation est fournie avec la version numérique du rapport.

Deux éléments empêchent une bonne lisibilité du mouvement :

- la végétation existante en partie haute de la zone frontale ne permet pas de rendre compte du mécanisme de basculement. Ce phénomène est amplifié par le fait que la végétation est très différente entre les deux photos : l'une est prise en juillet alors que l'autre est prise en février.
- la luminosité et les phénomènes d'ombres ne permettent pas de percevoir la partie la plus raide de la zone frontale de la même façon. Ainsi, les mouvements de basculement ou de déplacement de direction N150° ne sont pas visibles sur cette animation.

On identifie néanmoins certaines zones actives du mouvement pour lesquelles la végétation a été modifiée suite à l'éboulement de la zone ou d'une zone située au-dessus.

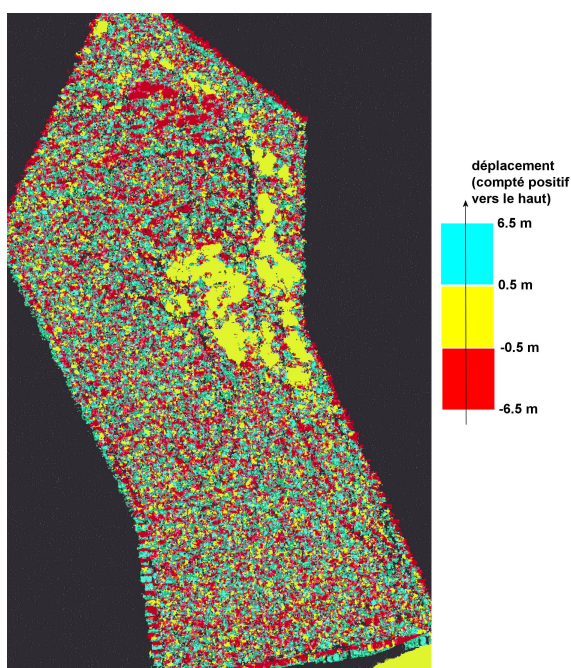


Figure 28 : carte des déplacements N-S obtenue par corrélation d'images

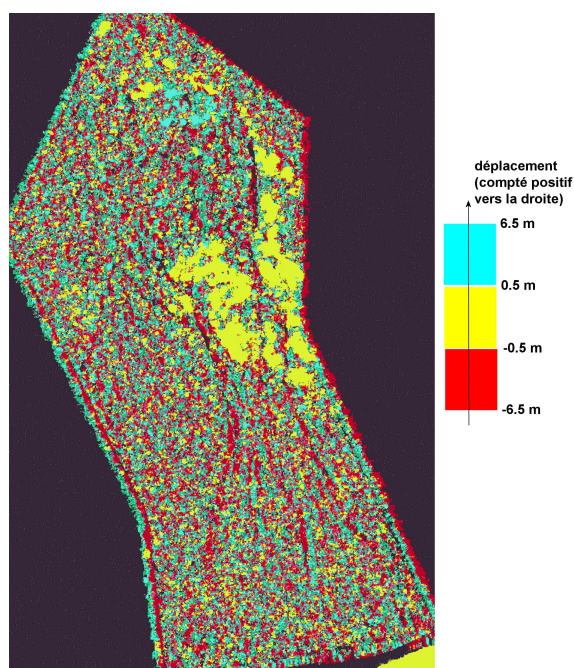


Figure 29 : carte de déplacements E-O obtenue par corrélation d'images

## Étude des orthophotos (suite)

### Analyse quantitative par corrélation d'images

Malgré les deux remarques mentionnées dans le paragraphe précédent, un calcul de corrélation d'image a été lancé sur les deux photos (à l'aide du logiciel Envi). Les deux photos étant espacées de 19 mois, la taille de la fenêtre de corrélation a été choisie pour accéder à des déplacements potentiels de l'ordre de 5-6 m. Une taille de fenêtre de 128 pixels (1 pixel = 10 cm) a été retenue et permet de déterminer des déplacements de 6,4 m dans les 4 directions. Le calcul de corrélation sous Envi a duré 3 semaines.

Les résultats sont présentés sur les figures 28 et 29. On observe des cartes de déplacements nord-sud et est-ouest très pixellisées qui ne traduisent pas de tendances de valeur ou de direction de déplacement à l'exception de deux zones (figure 30) :

- zone A : marquée par un déplacement vers le bas et vers l'est. Cette zone correspond à la partie supérieure de la zone escarpée (et donc sans végétation),
- zone B : affectée par des déplacements d'amplitude faible. Cette zone correspond à la partie en dessous de la partie la plus escarpée.

Les informations obtenues ne sont toutefois pas très nettes et sont surtout très localisées : les résultats de la majeure partie de la zone frontale sont inexploitable. Ce résultat est dû très clairement :

- à la présence de végétation pour la zone supérieure de la zone frontale,
- aux différences de luminosité et d'éclairage pour la zone nue : différence de luminosité due aux heures différentes de prises de vues et aussi à la période de l'année.

Cette technique de corrélation d'images a pourtant fait ses preuves en terme de quantification de déplacements [Kasperski, 2009, Chanut et al, 2012] mais les conditions d'application de cette méthode ne sont pas réunies avec ces deux photos. Pour d'éventuelles futures acquisitions, il faudra les réaliser à une période de l'année compatible avec les précédentes acquisitions, avec le moins de végétation possible et spécifier l'heure de prise de vue (matin, début d'après midi, fin d'après-midi).

## Étude des orthophotos (suite)

### Analyse quantitative par corrélation d'images (suite)

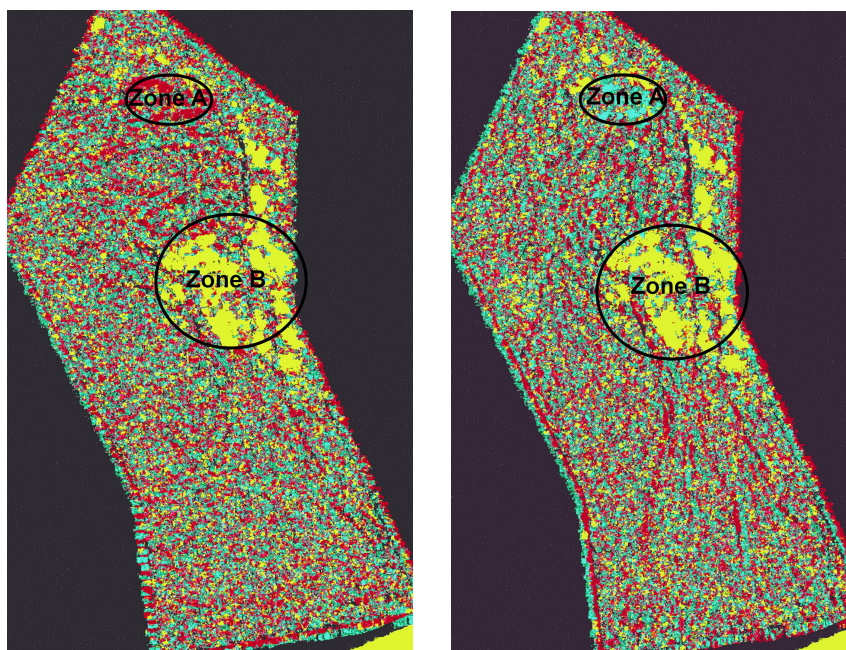


Figure 30 : identification de zones au sein des cartes des déplacements N-S et O-E

### Conclusion

Le traitement des orthophotos a été compliqué dans le sens où un post-traitement des données fournies a été nécessaire. Il a fallu en effet rendre compatibles en localisation et résolution les orthophotos ce qui requiert des ressources informatiques adéquates.

Dans notre cas particulier, les analyses quantitatives et qualitatives n'ont pas fournies d'information pertinente quant au mouvement de terrain.

Par contre, avec des orthophotos prises à des périodes similaires dans l'année et à des heures identiques, des informations intéressantes quant à la quantification et la direction peuvent être apportées à l'aide des techniques de corrélation d'images.



## Bibliographie

- X. Bodin, (2011), Apport des données Lidar terrestre pour le suivi et l'analyse du déplacement d'un glacier rocheux, Collection EDYTEM n°12
- F. Girault, M. Terrier, (1994), Analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain : application aux sites de la Clapière, du Friolin, de Boulc et de l'Harmalière, Rapport BRGM.
- B. Casson (2004), Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain, Thèse UCBL1.
- M-A Chanut, V. Barthelet, J. Kasperski, (2012) Corrélation d'images : méthode originale de tri automatique des photographies, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012
- J-P. Duranthon, L. Dubois, M-A. Chanut, (2013), Ruines de Séchilienne – Rapport annuel de suivi du site Avril 2012 – Mars 2013 - CETE de Lyon
- J. Kasperski, (2008), Confrontation des données de terrain et de l'imagerie multi-sources pour la compréhension de la dynamique des mouvements de versants, Thèse UCBL 1.
- J-F. Serratrice (2006), Modélisation des grands éboulements rocheux par épandage. Application aux sites de la Clapière (Alpes-Maritimes) et de Séchilienne (Isère), Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n°236/264.

## Conclusions

### Lidar : outil performant de génération de MNT

Dans ce rapport, nous avons essentiellement travaillé à partir des MNT et on peut penser que le mode de génération du MNT importe peu. Ceci est faux. La réalisation de MNT à partir d'acquisition Lidar aérien permet de disposer d'une vue générale de l'ensemble du mouvement rapidement et de façon exhaustive. A l'inverse, selon les sites, une acquisition par Lidar terrestre peut se révéler difficile, délicate et moins précise.

On peut également souligner que, en cas de besoin, une nouvelle acquisition Lidar peut être réalisée très vite et rapidement interprétée.

La précision, la densité et son rendement font du Lidar un outil performant pour la génération de MNT.

### Méthodes d'exploitation des MNT et apport quant à l'analyse d'un mouvement de terrain

Plusieurs outils ont été mis en œuvre :

- études de la série de MNT, animation par superposition, profils,
- analyse du MNT différentiel,
- études des cartes de pentes,
- analyse des orthophotos.

Le tableau 5 résume les outils qu'il est possible d'utiliser pour effectuer telle ou telle analyse.

| Outils                                                                     | Séries MNT – vue 2D ombrée | Séries MNT – surface 3D | Profils séries MNT | MNT différentiel – courbes de niveau | MNT différentiel – vue 2D ombrée | Inclinaison et direction des pentes | Orthophotos |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------|
| Identification de zones affectées par un mouvement et tendance d'évolution | x                          | x                       |                    |                                      | x                                | x                                   | x           |
| Mécanisme du mouvement de terrain                                          |                            | x                       | x                  |                                      |                                  |                                     |             |
| Analyse spatiale du mouvement                                              |                            |                         | x                  |                                      |                                  |                                     |             |
| Direction du mouvement                                                     | x                          | x                       | x                  |                                      |                                  | x                                   |             |
| Déplacement qualitatif                                                     | x                          |                         |                    |                                      |                                  |                                     | x           |
| Déplacement quantitatif                                                    |                            |                         | x                  |                                      |                                  | x                                   | x           |
| Morphologie de la surface et son évolution                                 |                            |                         |                    |                                      |                                  | x                                   |             |
| Identification des zones éboulées                                          | x                          | x                       |                    |                                      |                                  |                                     | x           |
| Volumes des zones éboulées                                                 |                            |                         |                    |                                      |                                  |                                     |             |

Tableau 5 : Synthèse des informations fournies par les différents outils testés

## Conclusions (suite)

### Méthodes d'exploitation des MNT et apport quant à l'analyse d'un mouvement de terrain (suite)

**Intérêts** Quel que soit le support ou la représentation (MNT, orthophotos), un outil efficace est l'animation par superposition qui permet :

- d'identifier rapidement les zones en mouvement et la tendance d'évolution (extension, régression),
- de visualiser qualitativement les déplacements (directions et valeurs),
- de détecter des zones éboulées.

Pour cela, les outils sont redondants (tableau 5) et permettent de réaliser rapidement une première analyse.

En complément, des outils spécifiques permettent de pousser l'analyse et d'affiner les conclusions :

- identification des mécanismes (Séries MNT – surface 3D et profils),
- analyse spatiale du mouvement (Séries MNT - profils),
- quantification des déplacements (Séries MNT - profils ou corrélation des orthophotos),
- identification de l'état de la surface et éventuellement de l'évolution de sa déstructuration (pentes).

**Limites** Des limites ont été toutefois identifiées au fil des développements :

- la taille des données (MNT ou orthophotos) peut être une limite dans leur exploitation dans le sens où la résolution augmentant et la zone couverte restant constante, les fichiers de données sont de plus en plus volumineux, longs à charger et à traiter.
- la compatibilité des orthophotos. Pour des raisons liées à la végétation et à la luminosité, il est recommandé d'effectuer des acquisitions à la même période de l'année et sensiblement à la même heure.
- la fréquence d'acquisition. Une acquisition Lidar reste encore onéreuse. Il n'est donc pas possible de scanner régulièrement ou après des épisodes d'éboulements afin d'estimer les volumes éboulés. Cette information de volumes éboulés est en effet accessible si on dispose de deux acquisitions rapprochées dans le temps pour lesquels les déplacements sont négligeables par rapport aux volumes éboulés. Mais dans notre cas, les deux vues sont espacées de plus d'un an, deux phénomènes se compensent (mouvement de basculement et éboulement), il n'est pas possible d'estimer les volumes éboulés.

## Conclusions (suite)

### Méthodes d'exploitation des MNT et apport quant à l'analyse d'un mouvement de terrain (suite)

**Conclusion** Les données MNT et orthophotos générées à partir d'acquisitions Lidar permettent le développement de différents outils d'exploitation, d'analyse des mouvements de terrains. La richesse de l'analyse réside dans la complémentarité des outils qui permettent d'aller du général au spécifique. Les différentes représentations possibles permettent également de mettre en avant visuellement tel élément plutôt que tel autre.

Les éléments requis pour effectuer l'analyse d'un mouvement de terrain sont donc accessibles à partir des MNT : il faut ensuite acquérir les données en fonction des objectifs d'analyse.

En conclusion, les traitements des données Lidar sont donc multiples, complémentaires et riches en informations pour l'analyse des mouvements de terrain.

Rédigé, le 31 juillet 2013 par Marie-Aurélie CHANUT  
Relu par Jean-Paul DURANTHON et Laurent DUBOIS

# Annexes

## Annexe A - Étude de sensibilité de la direction des profils

### Profil Ps2

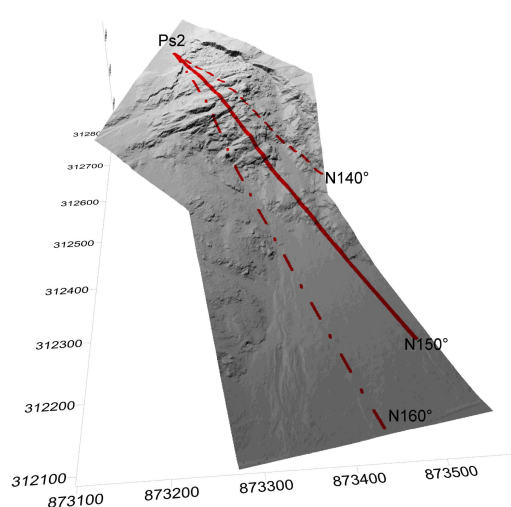


Figure A-1 : Profils d'étude autour de Ps2

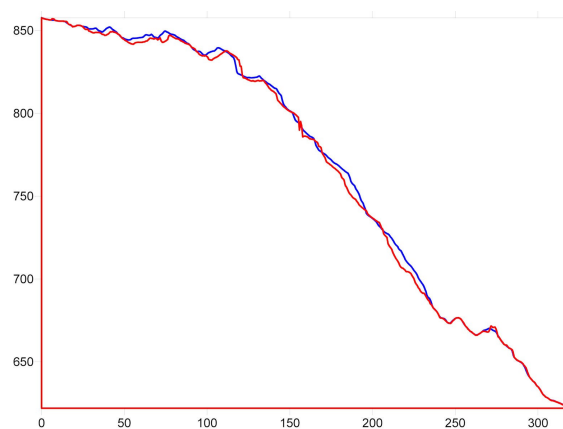


Figure A-2 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N140°

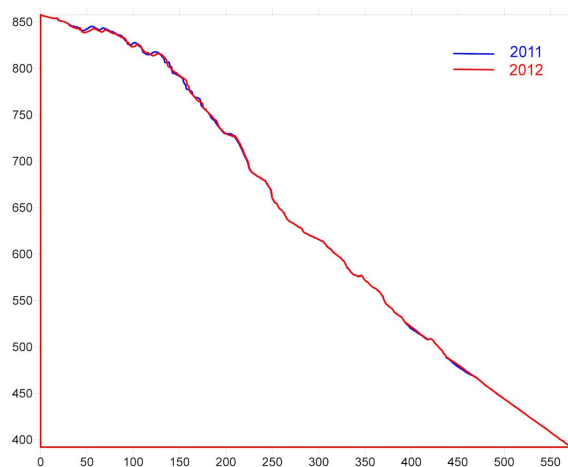


Figure A-3 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N150°

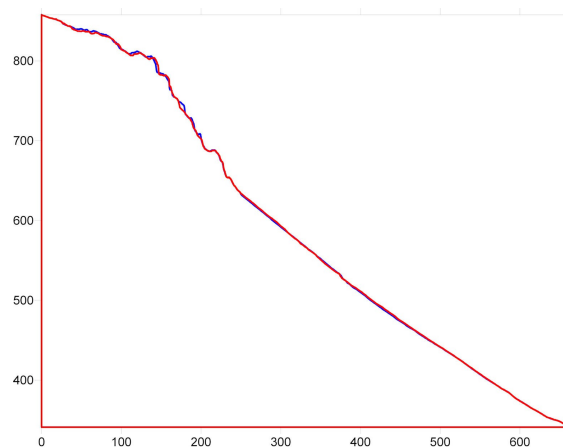


Figure A-4 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N160°

## Profil Ps3

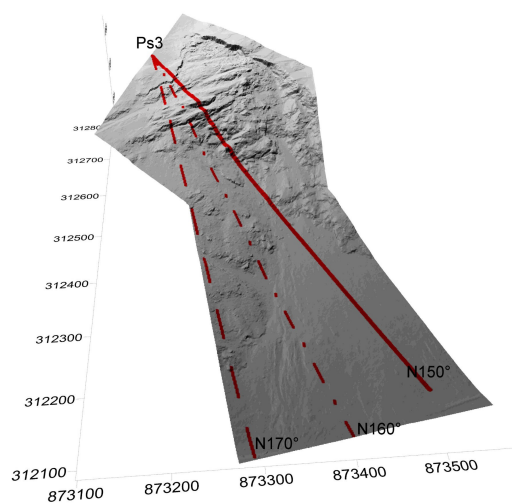


Figure A-5 : Profils d'étude autour de Ps3

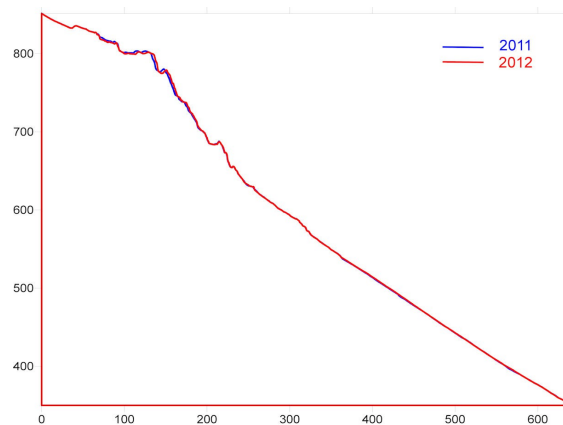


Figure A-6 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N150°

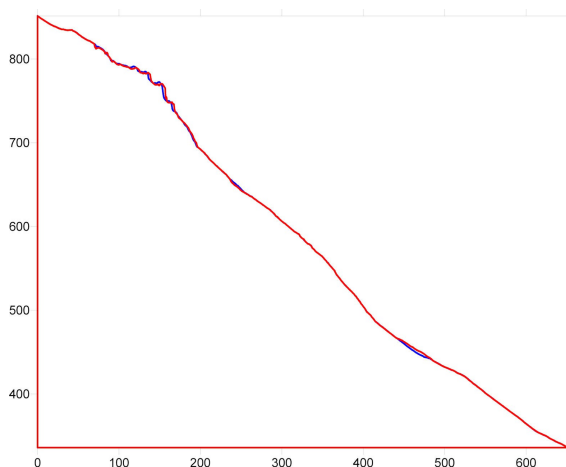


Figure A-7 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N160°

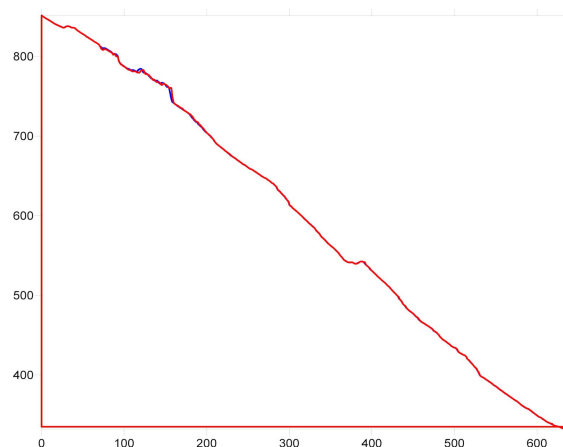


Figure A-8 : Superposition des topographies des MNT 2011 et 2012 le long du profil N170°



**CETE de Lyon**  
**25 avenue François Mitterrand**  
**CS 92803**  
**69674 BRON Cedex**  
**Tél. : 04 72 14 30 30**  
**Fax : 04 72 14 30 35**  
**CETE-Lyon@developpement-durable.gouv.fr**

Département Laboratoire de Lyon  
25, avenue François Mitterrand  
CS 92803  
69674 BRON CEDEX  
Tél. : +33 (0)4 72 14 33 00  
Fax : +33 (0)4 72 14 33 11  
dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr

