

**RAPPORT**

**CETE de LYON**  
Centre d'Études  
Techniques  
de LYON

Département  
Laboratoire de Lyon

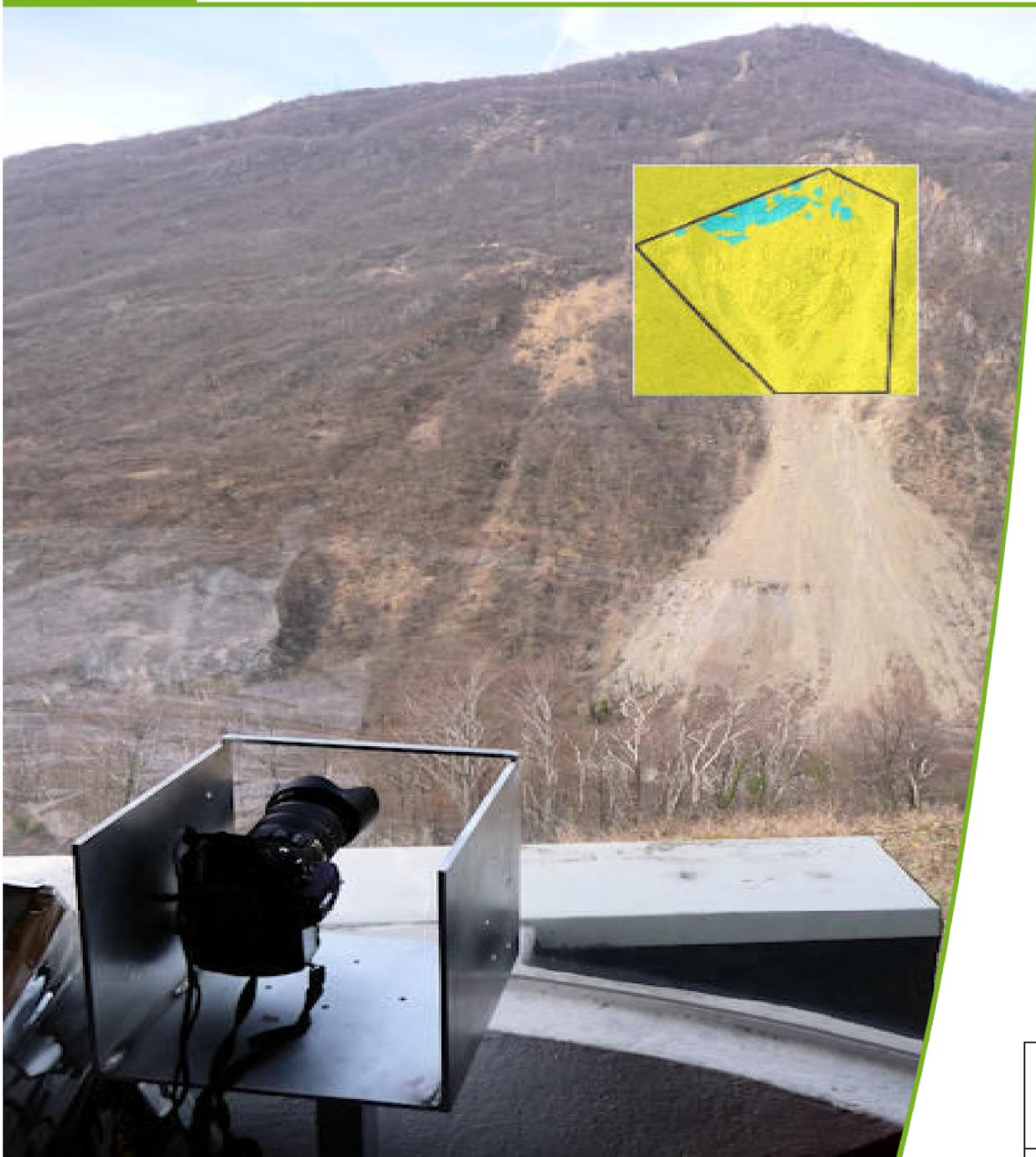
Affaire  
42261-1

Décembre 2012

Agence Nationale de la Recherche  
**ANR**

# **ANR SLAMS**

## **Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres : finalisation de la méthode automatique de traitement**



Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie



# ANR SLAMS

## Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres : finalisation de la méthode automatique de traitement

### Rapport

**Décembre 2012**

Date	Version	Commentaires
Novembre 2012	Rev0	Version rédigée par M-A Chanut
Novembre 2012	Rev1	Version relue par Jean-Paul Duranthon et Laurent Dubois
Décembre 2012	Rev2	Version validée par Geneviève Rul (David Daguillon par intérim)

CETE69\_R2\_DM\_Rapport\_Rev4



**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 : Céline Bourdeau  
IFSTAR  
Cité Descartes  
14 - 20 boulevard Newton  
77447 Champs-sur-Marne  
Marne-la-Vallée cedex 2

Objet de l'étude : FAER 11R093 - Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres : finalisation de la méthode automatique de traitement

Résumé de la commande : Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres : finalisation de la méthode automatique de traitement des photographies

Référence dossier : Affaire 42261-1

Diffusion/Archivage : Documentation CETE de Lyon

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

Mots Clés : Risque naturel, images, corrélation, Séchilienne

## Liste des destinataires

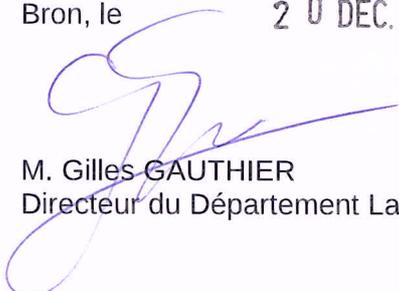
Contact	Adresse	Nombre - Type
Céline Bourdeau	IFSTAR Cité Descartes 14 - 20 boulevard Newton 77447 Champs-sur-Marne Marne-la-Vallée cedex 2	1 ex papier 1 numérique

## Conclusion – Résumé

Une méthode de détection automatique des déplacements entre deux photos a été développée et implémentée. On dispose donc maintenant d'un outil permettant de calculer en temps réel les déplacements entre la photo nouvellement acquise et une photo de référence.

Les techniques d'imagerie ne peuvent pas être utilisées pour le suivi opérationnel d'un site (site de Séchilienne par exemple) puisque la méthode est astreinte au beau temps et la précision obtenue n'est pas suffisante pour un suivi. Par contre, les méthodes d'imagerie s'avèrent complémentaires aux moyens de surveillance conventionnels : outre le calcul automatique des déplacements entre images, elle permet de localiser et de visualiser l'étendue des zones en mouvement ou éboulées.

Bron, le 20 DEC. 2012

  
M. Gilles GAUTHIER  
Directeur du Département Laboratoire de Lyon

# Sommaire

<b>Introduction.....</b>	<b><u>5</u></b>
Rappel des objectifs.....	<u>5</u>
Développements précédents.....	<u>5</u>
<b>Développements 2012.....</b>	<b><u>6</u></b>
Méthode automatique de traitement des photographies.....	<u>6</u>
Acquisition.....	<u>6</u>
Recalage des photos.....	<u>7</u>
Tri météorologique des photos.....	<u>7</u>
Détection de mouvements par corrélation d'images.....	<u>12</u>
Conclusion .....	<u>15</u>
<b>Tests effectués.....</b>	<b><u>16</u></b>
Batterie de test.....	<u>16</u>
Exemples.....	<u>16</u>
<b>Conclusions et perspectives.....</b>	<b><u>18</u></b>
Conclusions.....	<u>18</u>
Perspectives.....	<u>18</u>

## Introduction

---

**Rappel des objectifs** Depuis 2010, au sein de l'opération de recherche 11R093 de l'IFSTTAR, une action intitulée « Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres » a été engagée. Rappelons succinctement le contexte.

Certaines zones ne peuvent pas être instrumentées du fait de leur trop forte activité. Plusieurs techniques existent cependant pour fournir de l'information quant aux mouvements s'y produisant :

- le radar sur sol nu,
- le scanner-laser terrestre,
- l'imagerie de face.

L'objectif du travail mené est **de fournir une méthode efficace et peu onéreuse pour détecter des mouvements précurseurs d'éboulements dans des zones non instrumentées** basée sur l'**imagerie de face**.

En 2006, un éboulement de 40 000 m<sup>3</sup> a eu lieu dans une zone non instrumentée de la zone des Ruines du versant de Séchilienne. Il a été montré *a posteriori* que des déplacements de 3 à 4 m avant éboulement se sont produits. C'est dans ce cadre là que ces travaux se placent : la détection de signes précurseurs d'éboulements d'au moins quelques milliers de m<sup>3</sup>.

---

### Développements précédents

Les travaux ont débuté en 2010 avec l'installation d'un appareil photographique fixe à Montfalcon. En 2011, la première exploitation des photographies a été réalisée.

#### *Installation de l'appareil photographique en 2010*

En 2010, après la définition du type d'appareil photo, l'appareil a été installé à demeure dans le local de Montfalcon qui fait face au versant de Séchilienne. Le matériel installé et le fonctionnement du dispositif ont été décrits dans le rapport de Johan Kasperski de février 2011.

#### *Première exploitation des photographies en 2011*

En 2011, une première exploitation des photographies a été réalisée. Les développements ont concerné trois points :

- une analyse qualitative directe et visuelle par superposition de deux photographies,
- une analyse quantitative des valeurs déplacements par la méthode de corrélation d'images,
- l'élaboration d'une première méthode de sélection météorologique des photographies, première étape de la méthode complète de traitement automatique des photographies.

Ces travaux ont fait l'objet d'un rapport envoyé en novembre 2011 par Marie-Aurélien Chanut.

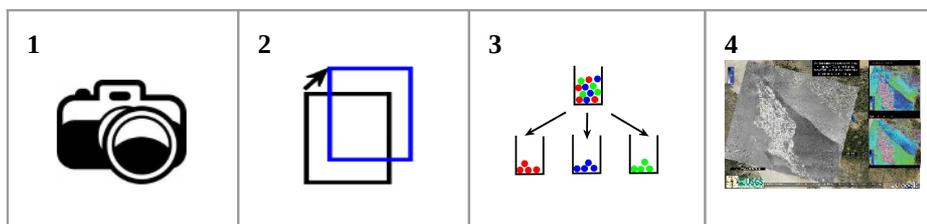
## Développements 2012

### Méthode automatique de traitement des photographies

L'enjeu des développements de l'année 2012 est de construire et finaliser la méthode automatique de traitement des photographies pour disposer d'un outil qui permet de calculer en temps réel les valeurs des déplacements entre la photographie qui vient d'être prise et une photographie de référence.

La méthode automatique se décompose en 4 étapes :

1. l'acquisition de la photo,
2. le recalage entre la photo prise et la photo de référence,
3. le tri « météorologique » des photographies,
4. la détection de mouvement par corrélation d'images.



Dans la suite, nous décrivons brièvement les nouveaux développements réalisés en 2012 pour chacune des 4 étapes. Des développements plus longs figurent dans le rapport réalisé par Vincent Dubois, stage de fin de Licence de l'institut Lassalle-Beauvais. Le rapport est joint en annexe.

### Acquisition

Depuis l'installation de l'appareil photo en 2010, l'étape d'acquisition est bien maîtrisée. Les photos sont prises à un intervalle de temps régulier qui est paramétrable.

## Développements 2012 (suite)

### Recalage des photos

L'étape de recalage des photos a été développée en 2012. L'appareil photographique est supposé fixe mais des décalages horizontaux ou verticaux de quelques pixels (au plus 2 ou 3 pixels) se produisent. Actuellement, nous supposons que ce sont les variations de température qui modifient légèrement la prise de vue.

Pour quantifier correctement des déplacements se produisant entre deux photographies, il est donc nécessaire de disposer de la même prise de vue pour les deux photos. Pour cela, nous appliquons la méthode de corrélation de phase (un rappel de la méthode sera fait dans le paragraphe « quantification des déplacements ») sur une zone supposée fixe de la photographie à savoir le pylône électrique situé en haut du Mont-Sec ( Figure 1).

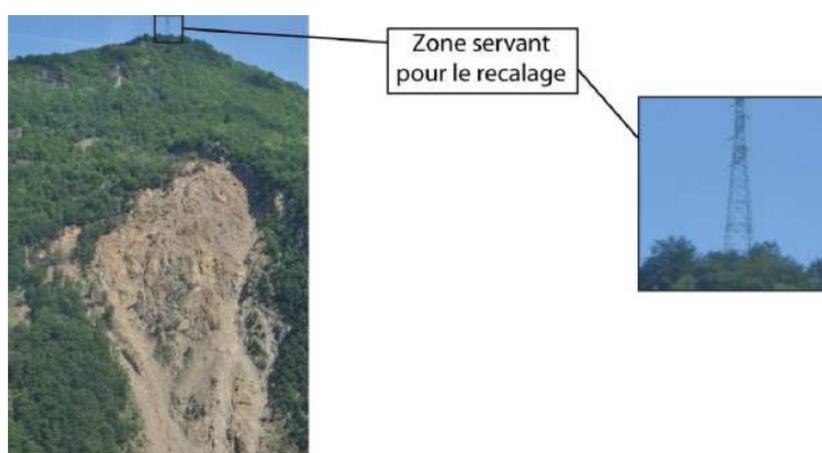


Figure 1 : zone utilisée pour effectuer le recalage

### Tri météorologique des photos

L'étape de tri météorologique est le point le plus délicat de la méthode de traitement automatique. L'enjeu est d'éliminer les photographies prises sous de mauvaises conditions climatiques (brouillard, neige, nuage ...) de façon à ce que le calcul de quantification des déplacements par corrélation de phase effectuée ensuite soit pertinent.

Les développements effectués en 2012 se sont appuyés sur la méthode proposée en 2011. Des tests plus nombreux ont permis de montrer que la méthode mise en place en 2011 n'était pas assez robuste : certaines photographies de mauvaise qualité n'étaient pas éliminées.

## Développements 2012 (suite)

### Tri météorologique des photos (suite)

En 2012, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes :

- les conditions d'éclairage sont très différentes entre hiver et été,
- il n'y a pas de méthode absolue pour discriminer les photos,
- l'algorithme proposé est basé sur l'application de trois méthodes :
  - méthode « luminosité »,
  - méthode « niveau de bleu »,
  - méthode « différence image ».
- l'image traitée est ensuite de bonne qualité météorologique si au moins deux des trois méthodes fournissent ce résultat. Sinon elle est de mauvaise qualité.

Le détail des trois méthodes est précisé dans le rapport de Vincent Dubois. Par contre, nous indiquons ici la philosophie commune des trois méthodes mises au point.

### Recadrage des photos

Dans un premier temps, on effectue un recadrage des photos (figure 2) sur la zone des Ruines de façon à s'affranchir des variations saisonnières de végétation. Les points à l'extérieur du pentagone sont affectés de la couleur blanche (figure 3).



Figure 2 : photographie prise par l'appareil photo



Figure 3 : photographie recadrée

## Développements 2012 (suite)

### Tri météorologique des photos (suite)

#### **Construction de l'image différence**

L'objectif du tri météorologique est de comparer la photographie nouvellement prise avec une photographie que l'on sait prise avec un bon éclairage et sous de bonnes conditions météorologiques. Nous construisons donc l'image différence entre les deux images et nous étudions cette image pour quantifier la différence entre les deux images.

L'image différence (figure 6) est construite de la façon suivante :

$$N_i(I_{diff}) = |N_i(I_{testée}) - N_i(I_{ref})| \text{ pour chaque pixel.}$$

On effectue ainsi la soustraction, pixel par pixel, des valeurs de chaque canal RVB (rouge, vert, bleu) des deux images (figures 4 et 5) et on prend la valeur absolue du résultat.

L'image obtenue (figure 6) est noire (RVB = 0, 0, 0) dans les zones où les pixels des deux images ont des valeurs identiques. Elle est plus claire jusqu'à blanche (RVB = 255,255,255) là où les valeurs radiométriques des deux images comparées sont très différentes.

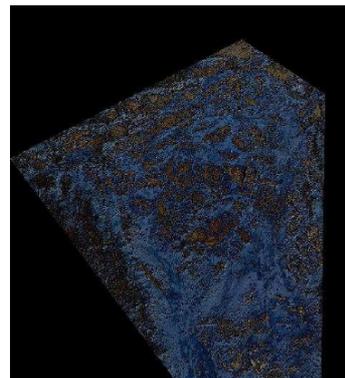


Figure 4 : calcul de l'image différence

Figure 5 : calcul de l'image différence

Figure 6 : calcul de l'image différence

## Développements 2012 (suite)

### Tri météorologique des photos (suite)

**Étude de l'histogramme de l'image différence**

Pour quantifier l'écart entre les deux images, on établit l'histogramme (figure 7) de l'image différence ce qui revient à dénombrer le nombre de pixels prenant les valeurs de 0 à 255 pour les trois canaux R, V et B. Seuls les pixels situés dans le pentagone sont comptabilisés.

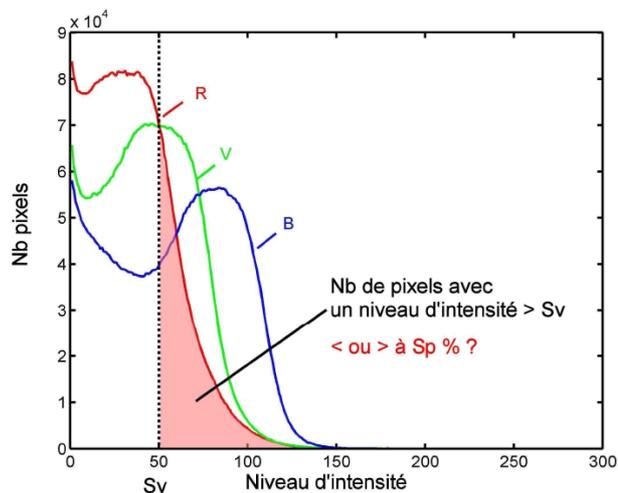


Figure 7 : histogramme de l'image différence

Deux valeurs seuils sont ensuite définies :

- **Sv** désigne le niveau d'intensité limite, valeur commune aux trois canaux pour l'instant. La valeur Sv a été choisie autour de 50 (sur 255) mais cette valeur peut et doit être adaptée au site photographié ;
- **Sp** indique, pour chaque canal, le pourcentage maximal de pixels avec un niveau d'intensité supérieur à la valeur Sv pour garantir une image de qualité. L'ordre de grandeur de Sp est de 10% avec une valeur à préciser en fonction du site et des images.

La sélection des photos acquises sous de bonnes conditions météorologiques est ensuite réalisée selon la procédure indiquée dans le tableau ci-dessous :

Si	Alors
Le % de pixels avec un niveau d'intensité au delà de Sv est inférieur à Sp pour les trois canaux RVB	Image traitée proche de l'image référence <b>bonne qualité</b>
Le % de pixels avec un niveau d'intensité au delà de Sv est supérieur à Sp pour au moins un des canaux RVB	Image traitée différente de l'image référence <b>mauvaise qualité</b>

## Développements 2012 (suite)

### Tri météorologique des photos (suite)

Il existe ainsi deux classes d'histogrammes :

- classe des photos prises sous de bonnes conditions climatiques (figure 8),
- classe des photos prises sous de mauvaises conditions climatiques (figure 9).

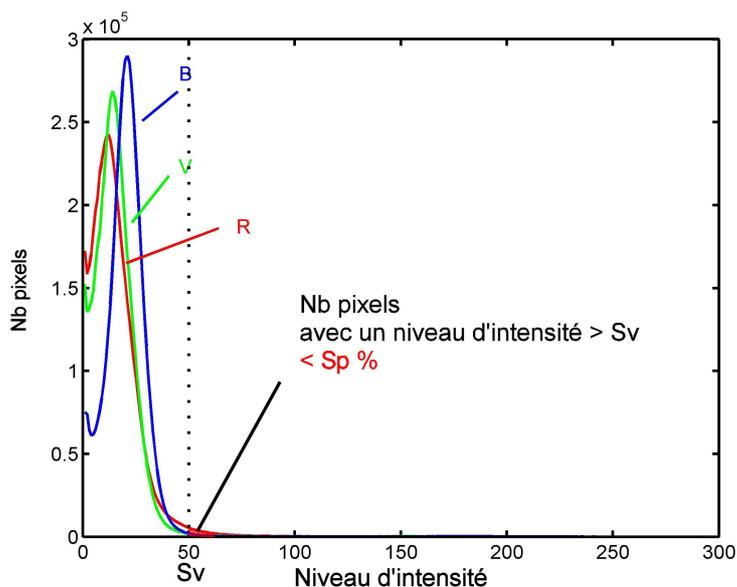


Figure 8 : classe d'histogramme de photos prises sous de bonnes conditions climatiques

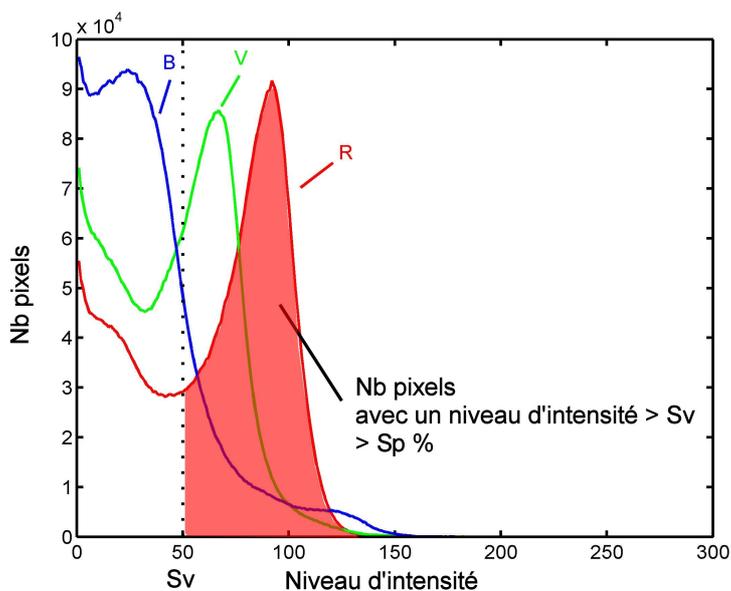


Figure 9 : classe d'histogramme de photos prises sous de mauvaises conditions climatiques

## Développements 2012 (suite)

### Détection de mouvements par corrélation d'images

L'étape de détection de mouvements par corrélation d'images vise à quantifier les déplacements qui se sont produits entre deux prises de vues. Si l'image est jugée de bonne qualité, le mouvement entre cette image et l'image de référence est alors calculé par la méthode de corrélation d'images. Les tests effectués en 2011 avaient montré que la méthode était pertinente pour déterminer les déplacements qui se sont produits entre deux clichés.

En 2012, les développements ont porté sur :

- le post-traitement des cartes de déplacements bruts obtenues après calcul par corrélation de phase,
- le développement d'un algorithme propre de corrélation de phase « simple » mais rapide.

#### Rappel : méthode de corrélation de phase

La corrélation d'images consiste à retrouver de manière automatique pour chaque pixel d'une image de base, la position du pixel représentant le même objet sur une deuxième image. Comme un détail de l'image n'est reconnaissable que grâce aux variations de la radiométrie dans une fenêtre centrée sur ce détail, il s'agit de définir l'indice de ressemblance radiométrique d'une fenêtre par rapport à une autre, en définissant une fonction de corrélation (figure 10). Deux images à corréler (Image1 et Image2) comportent un pixel identique (P1 et P2) dont on s'attache à déterminer le déplacement. Une fenêtre de corrélation centrée sur P1 est définie (ici 9 x 9 pixels) et le pixel P2 le plus ressemblant à P1 est recherché à l'intérieur de la même fenêtre au sein de l'image 2.

Dans le domaine cartésien, la corrélation s'apparente à un calcul de covariance aux temps de calculs prohibitifs. Dans le domaine fréquentiel, la transformée de Fourier est appliquée aux signaux issus des lignes et des colonnes des images pour calculer les décalages avec un net gain de temps de calcul. Les calculs sont donc réalisés dans le domaine fréquentiel.

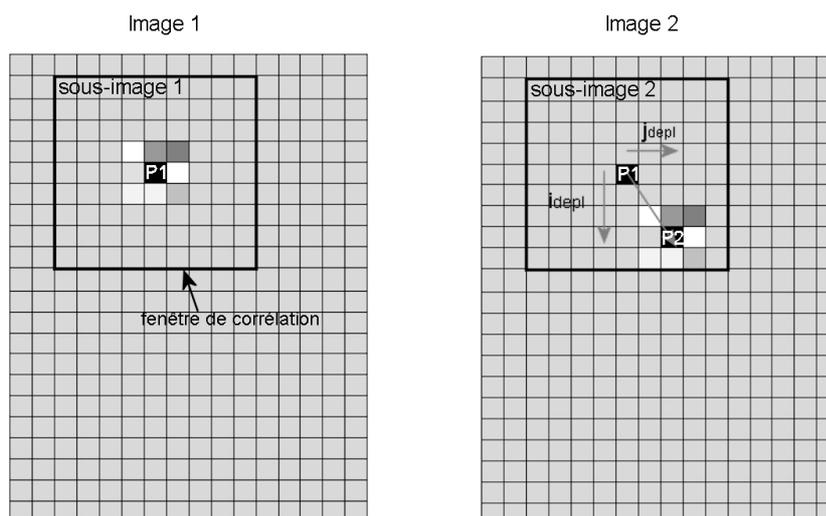


Figure 10 : Schématisation de la détermination du déplacement d'un pixel entre deux images.

## Développements 2012 (suite)

### Détection de mouvements par corrélation d'images (suite)

Le pic de corrélation (maximum de la fonction de corrélation) indique les coordonnées du pixel P2 et les valeurs de déplacements du pixel P1 entre les deux images (figure 11) : déplacement « haut-bas » ( $i_{depl}$ ) et « gauche-droite » ( $j_{depl}$ ). Ce calcul de corrélation peut être mené pour tous les pixels de l'image ou sur un sous-échantillonnage (1 pixel sur 4 par exemple) pour obtenir une matrice des déplacements « haut-bas » et « gauche-droite » (figure 12).

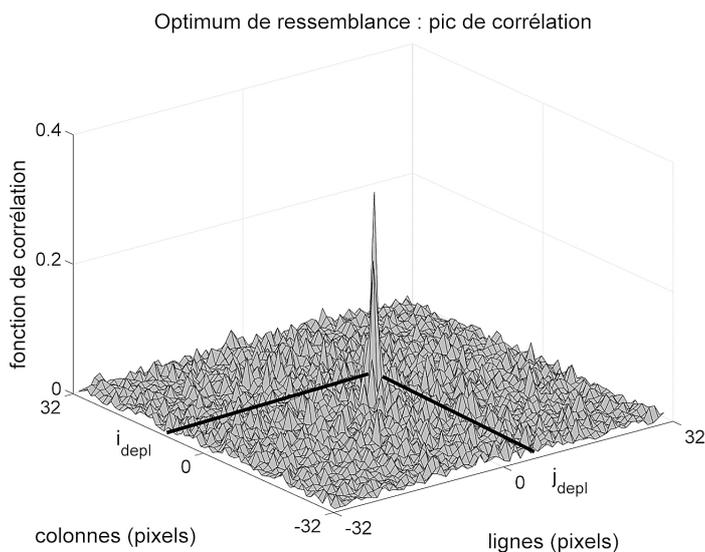


Figure 11 : Pic de corrélation associé au maximum de ressemblance

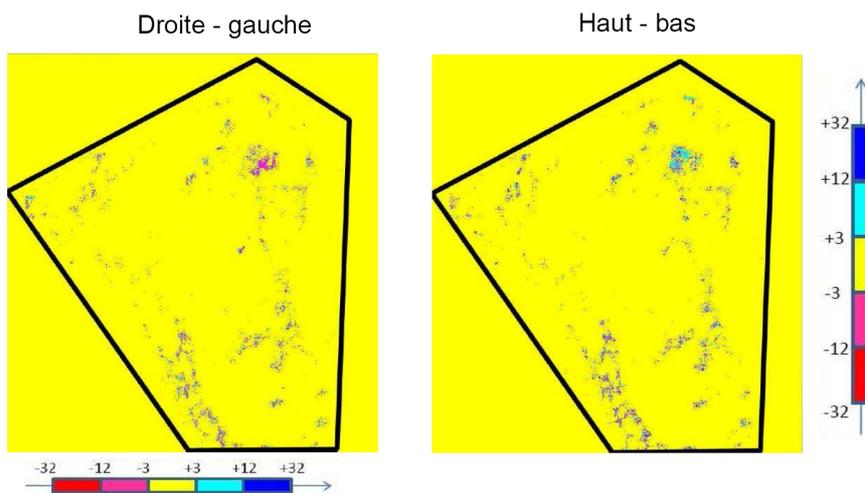


Figure 12 : cartes des déplacements bruts (droite-gauche et haut-bas)

## Développements 2012 (suite)

### Détection de mouvements par corrélation d'images

(suite)

#### **Post-traitement des cartes résultats**

Les cartes de déplacements de la figure 12 mettent en évidence les zones où des déplacements se sont produits. Notre œil fait une très bonne synthèse qu'il nous faut automatiser si nous voulons disposer d'une méthode de traitement des photos complètement automatique.

Le post-traitement mis en place comporte deux parties :

- pour chaque carte de déplacements (haut-bas et gauche-droite) et pour chaque pixel, on effectue la moyenne des déplacements sur un disque de rayon à fixer. Ceci permet de faire disparaître les zones pixelisées qui correspondent à des zones de gain ou de perte de matériau qu'on ne peut pas retrouver sur la deuxième photo.
- ensuite on calcule le vecteur vitesse moyen de chaque pixel.

La carte de synthèse (figure 13) rend compte du déplacement moyen en tout point. On considère ensuite qu'il se produit un grand déplacement si la valeur du déplacement moyen dépasse en certains points la valeur seuil fixée à 4 ou 5 pixels soit 50-60 cm pour l'étude de la zone frontale du versant des Ruines de Séchilienne. Cette valeur seuil est à préciser et à paramétrer en fonction du site et de son évolution.

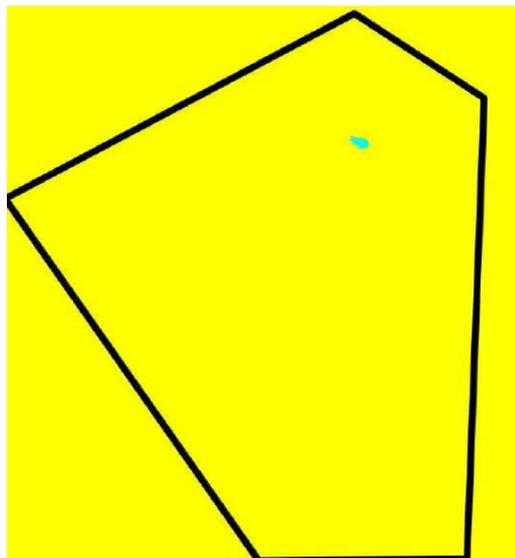


Figure 13: carte de synthèse issue du post-traitement des deux cartes brutes, résultat de la corrélation d'images avec mise en place d'un seuil de grand déplacement

## Développements 2012 (suite)

---

### Détection de mouvements par corrélation d'images

(suite)

#### **Algorithme « propre » de corrélation de phase**

En 2011, nous avons utilisé l'algorithme de corrélation d'image Cosi-Corr\*, très performant qui permet de réaliser une corrélation d'image avec une précision sous-pixels. Le temps de calcul des deux cartes de déplacements pour les photographies prises avec notre appareil depuis MontFalcon était de plus d'une heure.

Deux raisons nous ont conduit à développer notre propre module de calcul de corrélation de phase :

- il n'est pas possible d'intégrer le module Cosi-Corr dans notre chaîne automatique de traitement de photos (il faut charger dans le logiciel Cosi-Corr les photos à traiter et saisir les paramètres de calcul tels que la dimension des fenêtres de corrélation),
- le temps de calcul n'est pas compatible avec une analyse en temps réel notamment en cas d'éboulement imminent.

Nous avons donc développé un module de calcul des déplacements par corrélation de phase en C++. Il fournit le déplacement entre deux photos au pixel près.

---

### Conclusion

Les 4 étapes de la méthode complète de traitement ont été mises au point pour certaines, et finalisées pour d'autres, dans le cadre du stage de Vincent Dubois en 2012.

Il a fallu ensuite agréger les différentes étapes et les interfacier pour construire la méthode complète et automatique. L'ensemble de la méthode a été codée en C++. Nous disposons donc d'un outil de calcul complètement automatique qui permet de traiter une photographie en 5-6 minutes.

Un seul point reste manuel : la définition des photos de référence. Ce point est très délicat et il est essentiel que les photos de référence soient bien choisies. Il faut donc, tous les mois ou tous les deux mois, mettre à jour les photos de référence. Il est nécessaire de disposer de photos récentes du mois précédent :

- pour des raisons d'éclairage et de luminosité,
- suite à des éboulements éventuels et au manque de matériau associé.

\*

---

\*CosiCorr : Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation, logiciel développé par Sébastien Leprince, California Institute of Technology, 1200 East California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA

## Tests effectués

### Batterie de test

En 2012, nous avons procédé à des tests plus nombreux que ceux effectués en 2011. Environ 400 photos ont été traitées : 100 photos par saison ont été choisies. L'objectif de ces tests était de :

- valider la méthode de tri météorologique des photos qui est le point le plus difficile et le plus délicat du traitement complet,
- valider le principe du post-traitement des cartes brutes.

Le travail s'est fait de façon itérative : la méthode de tri météorologique a été améliorée et optimisée en fonction des résultats des tests. La méthode de tri finalisée permet d'éliminer les photos de mauvaise qualité avec une marge d'erreur inférieure à 5 %.

### Exemples

Dans ce paragraphe, nous proposons de montrer les résultats de la méthode mise en place sur deux exemples :

- éboulement du 21 juillet 2011,
- déplacement de la partie haute de la zone frontale à l'échelle d'une année.

#### **Éboulement du 21 juillet 2011**

Le 21 juillet 2011, un volume estimé à 100 m<sup>3</sup> s'est éboulé. Nous avons appliqué la méthode pour voir si des déplacements notables s'étaient produits avant éboulement. La carte de synthèse (à droite) montre qu'effectivement la zone a pu être identifiée avec un déplacement avant éboulement de l'ordre de 50 cm. Le déplacement avant éboulement est faible mais est à mettre en relation avec le volume éboulé (100 m<sup>3</sup>). La méthode fonctionne donc et il est vraisemblable que pour des volumes plus importants, les déplacements précurseurs devraient être plus élevés et sur une zone plus étendue.

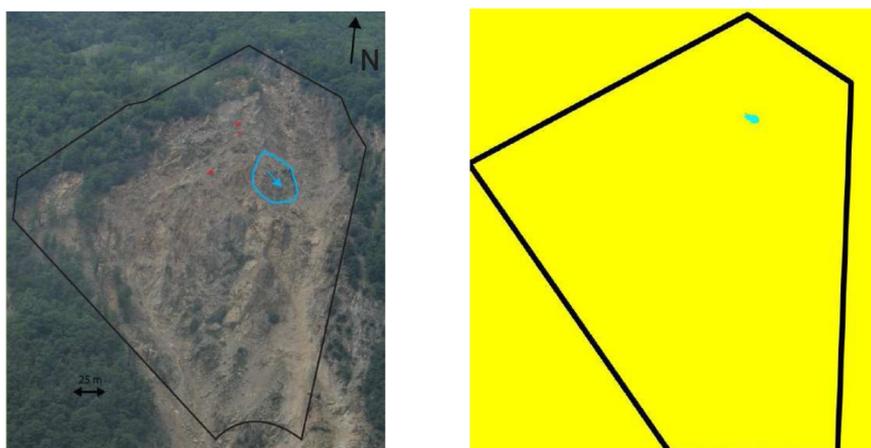


Figure 14 : détection de l'éboulement du 21 juillet 2011

## Tests effectués (suite)

### Exemples (suite)

**Déplacement sur une année** Afin de montrer que la méthode mise en place est capable de détecter des grands déplacements, nous avons pris deux photos distantes d'une année entre décembre 2010 et décembre 2011 et nous avons appliqué la méthode. La carte des déplacements (figure 15) montre toute la zone en mouvement affectée par des déplacements entre 1,5 m et 2 m, valeurs corroborées par le dispositif de surveillance du site (extensomètres, géodésie et radar).

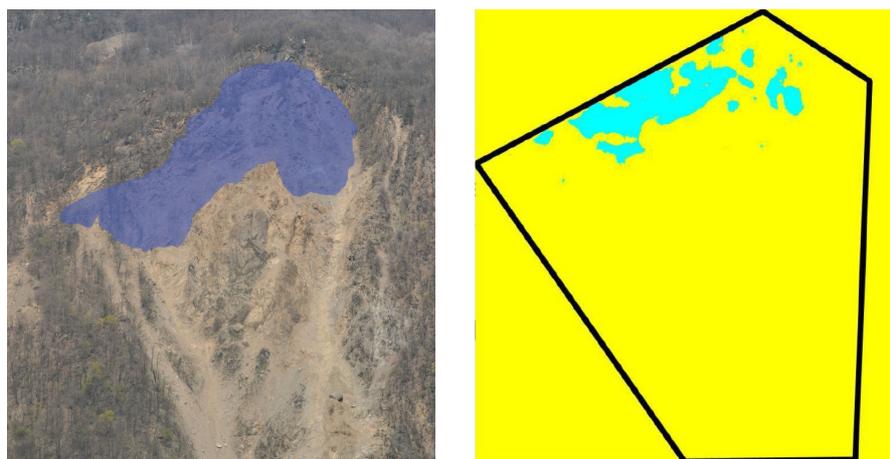


Figure 15 : détection du déplacement sur une année. Sur la figure de gauche, la zone en mouvement est en bleu. Sur la figure de droite, sont représentés les déplacements moyens. Le bleu est utilisé pour des valeurs > 50 cm.

## Conclusions et perspectives

### Conclusions

La méthode de détection automatique des déplacements entre deux photos a été développée et implémentée. On dispose donc maintenant d'un outil permettant de calculer en temps réel les déplacements entre la photo nouvellement acquise et une photo de référence.

L'imagerie de face s'avère ainsi complémentaire aux moyens de surveillance conventionnels : outre le calcul automatique des déplacements entre images, elle permet de localiser et de visualiser l'étendue des zones en mouvement ou éboulées.

**Intérêt** La méthode d'imagerie mise au point présente plusieurs intérêts :

- faible coût,
- information pour les zones non instrumentées ou non instrumentables,
- coût de calcul (5 min) compatible avec une analyse en temps réel,
- quantification des mouvements : la valeur des déplacements calculés est du même ordre de grandeur que les déplacements mesurés par le radar ou l'extensométrie.

**Limites** La méthode mise en place ne peut pas être utilisée pour le suivi opérationnel d'un site : la méthode est astreinte au beau temps et la précision obtenue n'est pas suffisante pour un suivi.

Mais ces techniques d'imagerie de face ont vocation à répondre à une utilisation peu onéreuse pour détecter les mouvements précurseurs avant éboulement. L'objectif est le suivi de l'évolution à court terme avant éboulement sous réserve d'avoir des déplacements notables.

### Perspectives

**Test de la méthode en temps réel** L'algorithme de la méthode complète a été installé sur l'ordinateur sur lequel sont enregistrées les photographies et permettra prochainement de traiter en temps réel les nouvelles photographies.

**Test sur d'autres sites** Il est envisagé de tester la méthode mise au point sur d'autres sites. Il ne sera pas possible d'installer à demeure un appareil photographique sur d'autres sites mais des clichés réguliers peuvent être effectués et la méthode automatique élaborée appliquée.

Rédigé, le 03/12/2012

La chargée d'Affaire



Marie-Aurélié CHANUT

Vu et approuvé, le

La responsable du groupe  
Risques Rocheux et Mouvements de Sols



Geneviève RUL

# Annexe

---

## Annexe A- Rapport de stage de Vincent Dubois

Rapport de stage

**Développement d'une méthode automatique de  
détection de grands déplacements avant  
éboulements par imagerie de face**



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat  
Prévention des risques  
Développement durable  
Infrastructures, transports et mer

**Présent  
pour  
l'avenir**

## Sommaire

Sommaire .....	1
Introduction .....	2
I. Généralités sur les Ruines de Séchilienne .....	3
1. Géographie du secteur d'étude .....	3
2. Contexte géologique .....	4
3. Instrumentation du site .....	6
4. Rappels sur les travaux précédents sur l'imagerie de face et définition des objectifs.....	7
II. Méthode de détection automatique de grands déplacement.....	8
1. Analyse manuelle de photographie .....	8
2. Justification de l'intérêt d'une méthode de détection .....	11
3. Corrélation de phase à l'aide du logiciel Envi .....	11
4. Description rapide de la méthode envisagée .....	15
III. Quantification des déplacements par la corrélation de phase .....	16
1. Test de corrélation prise à des heures différentes .....	16
2. Test pour des conditions météorologiques différentes .....	18
3. Conclusion sur les conditions nécessaires pour la réalisation de corrélation .....	22
IV. Le tri .....	23
1. Rappel sur la méthode primaire de tri précédemment élaboré .....	23
2. Optimisation de la méthode de tri et proposition d'une méthode de tri sophistiquée .....	24
V. Le recalage.....	28
VI. L'analyse des résultats obtenus.....	29
VII. Les limites de cette méthode de détection .....	30
Conclusion et perspective d'étude .....	31
Remerciement.....	31
Bibliographie .....	32
Liste des Figures .....	33

## **Introduction**

Le site des Ruines de Séchilienne se situe dans la vallée de la Romanche, à 15 km de Grenoble et le mouvement du versant concerne une superficie de plus de 70 ha. La partie susceptible de s'effondrer à court terme représente un volume de plus de trois millions de mètres cubes. Suite à la réactivation du versant de Séchilienne en 1985, le site a été mis sous la surveillance du CETE de Lyon. Cela a ainsi permis la mise en place de nombreux dispositifs de surveillance pour étudier l'évolution du versant.

En 2009, un appareil photographique a été installé dans le but de développer une méthode de détection des éboulements par imagerie de face. Cet appareil permet la récupération de photo en continue et l'étude par imagerie de face de telles images a montré la présence de mouvements significatives avant éboulements. Le but de la méthode de détection est donc, à partir des photographies, d'arriver à détecter les mouvements qui seraient précurseurs aux éboulements.

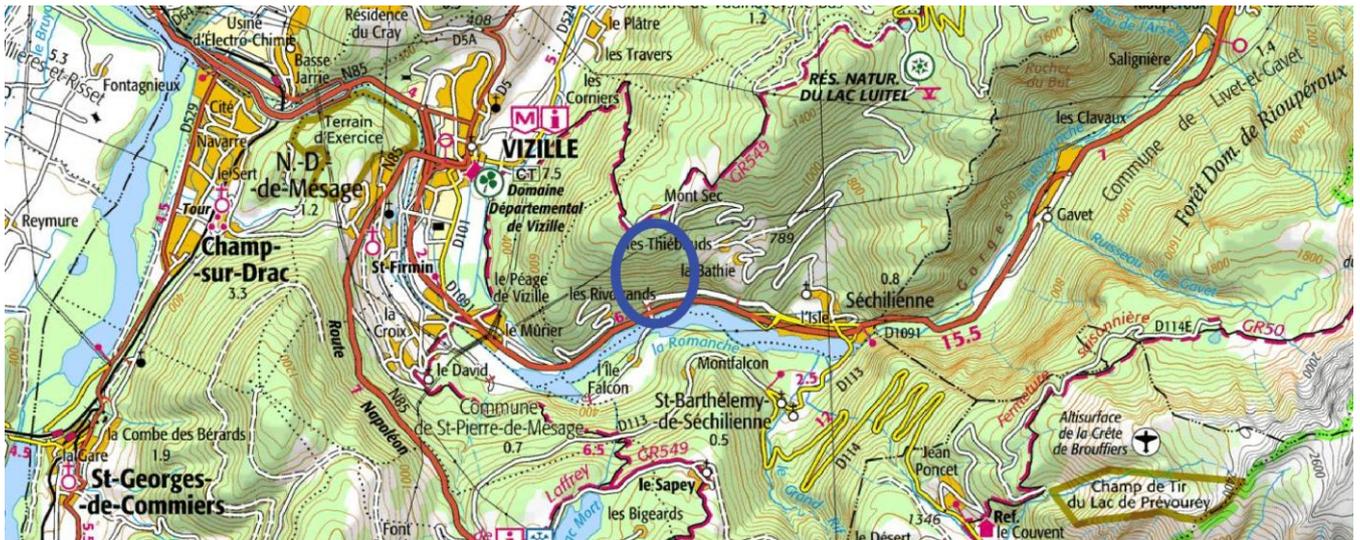
Les débuts de recherche sur cette méthode ont déjà été commencés l'année dernière par Virginie Barthelet et il s'agit ici de compléter les travaux déjà existants notamment par la mise en place des différentes étapes qui constitueront la méthode final.

Après une présentation du site des Ruines de Séchilienne, les différentes étapes de la méthode seront exposées dans leur ensemble et chacune de ces étapes sera ensuite abordée séparément. Enfin, une dernière partie abordera les limites concernant l'application de cette méthode.

# I. Généralités sur les Ruines de Séchilienne

## 1. Géographie du secteur d'étude

Le versant instable des Ruines de Séchilienne se situe dans l'Isère, à 15 kilomètres au Sud-Est de Grenoble. Le site se situe dans la basse vallée de la Romanche, à 2,5 km du village de Séchilienne. Il se trouve sur la rive droite de la Romanche et surplombe la route nationale RD 1091 qui relie Grenoble à Briançon. Les Ruines de Séchilienne se trouvent sur le versant sud de la montagne du Mont-Sec, au Sud de la chaîne de Belledonne.



Echelle :



Zone des Ruines de Séchilienne



Figure 1 : Carte de localisation des ruines de Séchilienne (carte IGN).

## 2. Contexte géologique

D'un point de vue géologique, le secteur d'étude se situe dans le rameau externe de la chaîne de Belledonne, qui est de nature cristalline. Cette zone interne du massif est également appelée « série satinée » et est constituée de micaschistes. Cette série correspond au métamorphisme d'une ancienne série grésopélitiques de type flysch dans les conditions de formations des schistes verts (Pothérat et Alfonsi, 2001). L'ensemble de cette zone est bordé à l'Ouest par l'accident de Vizille et à l'Est par l'accident médian de Belledonne.

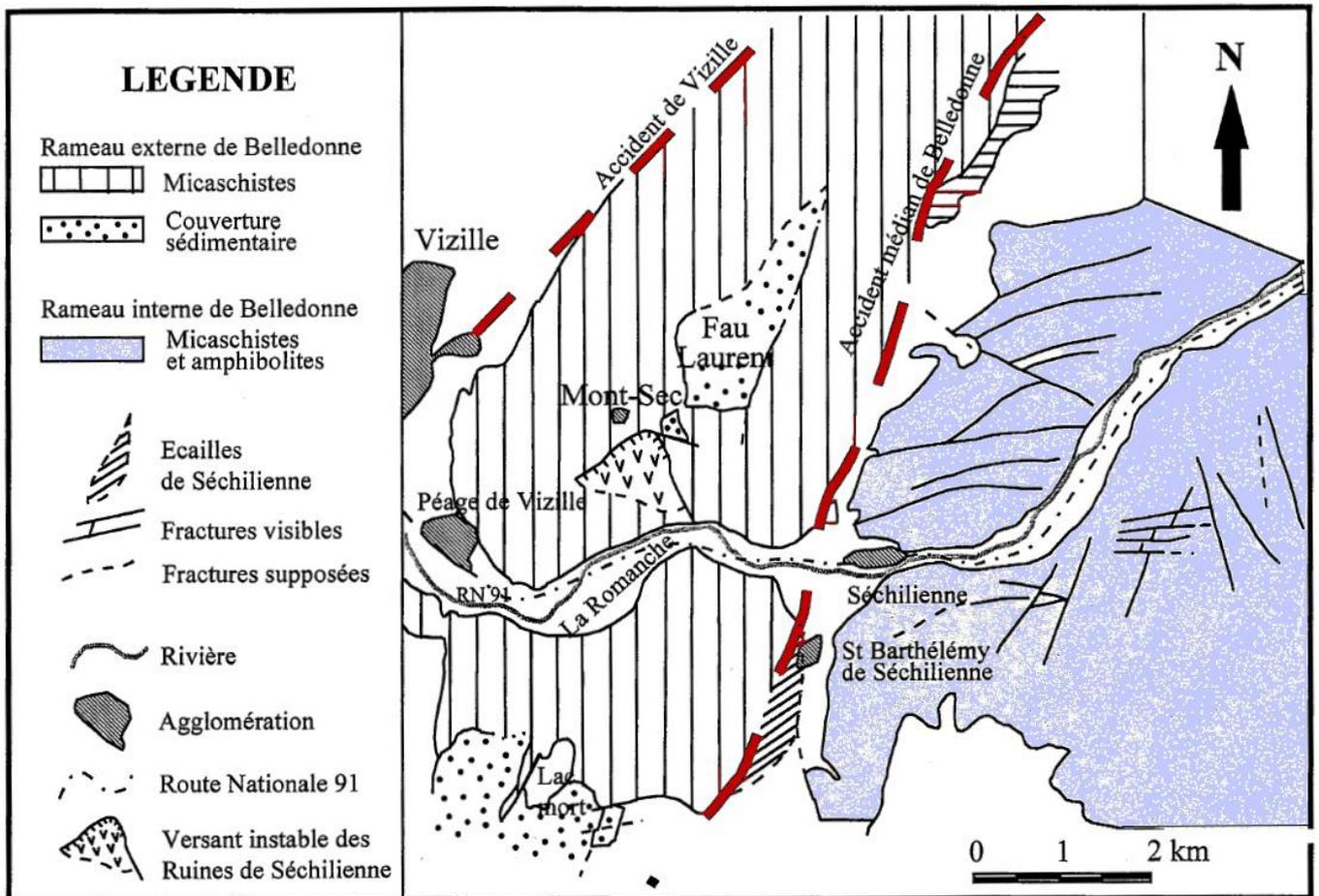


Figure 2 : Carte structurale de la zone de Séchilienne (Antoine *et al*, 1998).

Comme le montre la figure 3, le versant est composé de différents compartiments séparés par des failles majeurs.

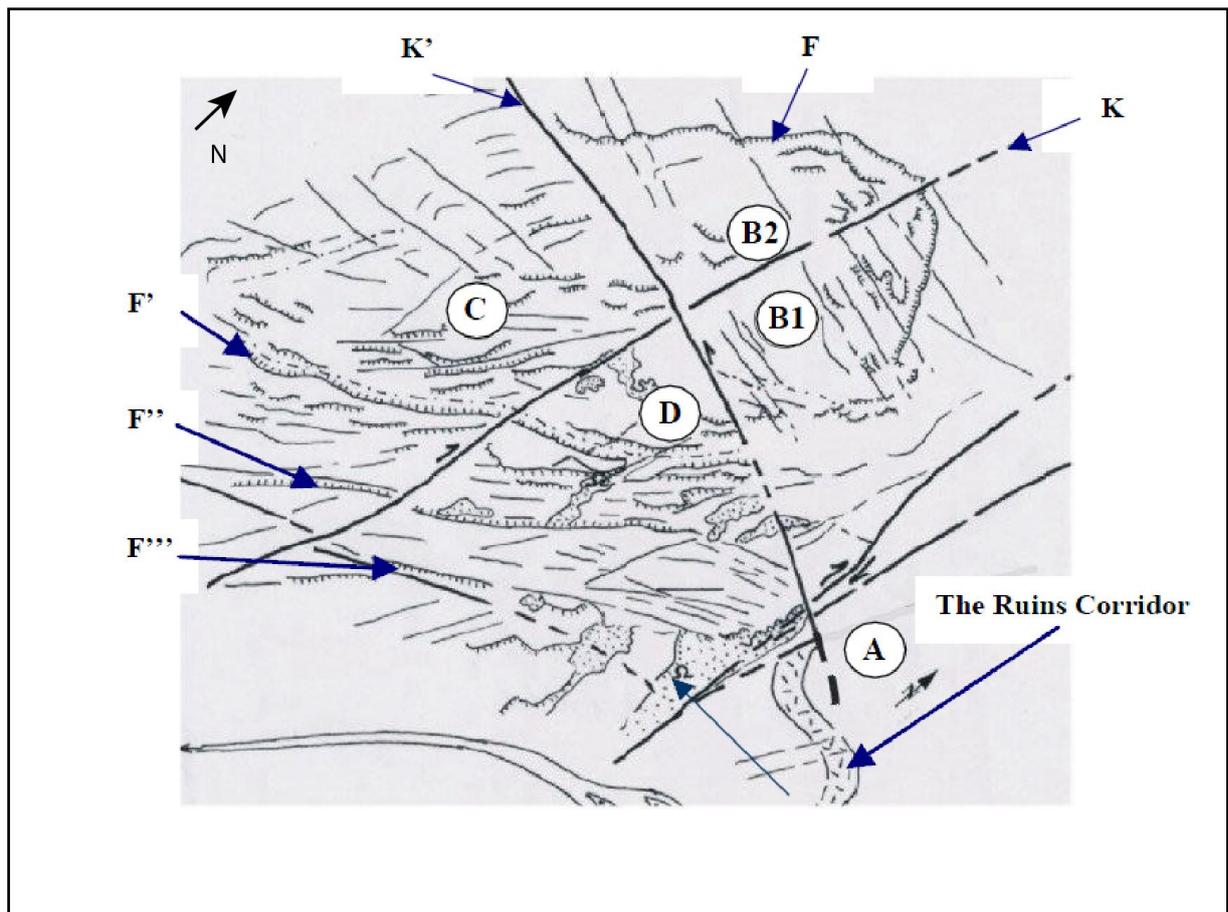


Figure 3 : Configuration structurale des Ruines de Séchilienne d'après Potherat et Alfonsi (2001).

- Le compartiment A, à l'Est du couloir des Ruines, a une fracturation peu dense. Ce compartiment est assez stable
- Les compartiments B1 et B2, situés au Nord du versant, sont découpés en lanières par des accidents de direction N140. La séparation entre les compartiments B1 et B2 se fait par un accident majeur de direction N30.
- Le compartiment C, à l'Ouest des Ruines, présentent de nombreuses discontinuités de direction N30 et N140.
- Les compartiments D1 et D2 possèdent des accidents orientés N20 et N70 à N90. Le compartiment D2, dont la zone frontale est en dislocation, est celui qui contient la zone des Ruines.

Il existe également un accident senestre majeur d'importance régionale : la faille de la Romanche. Cet accident de direction N110 passe au pied du couloir des ruines.

La structure actuelle de ce massif résulte de plusieurs phases de déformation qui se sont déroulées successivement. En tout, cinq phases ont pu être mises en évidence (Pothérat et Alfonsi, 2001):

- Une première phase ante-carbonifère qui correspond à la mise en place de la foliation. Elle est subverticale et perpendiculaire au versant ;
- Une phase durant l'orogénèse hercynienne qui provoque le chevauchement de plusieurs unités. Cet ensemble formé correspond au complexe de Belledonne qui est caractérisé par des plis dissymétriques à axe horizontal de direction N50-80 et des accidents conjugués N20-50 et N120-140 avec des décrochements respectivement senestre et dextre.
- Une phase de déformation tardy-hercynienne qui entraîne la création d'un grand pli sommital d'axe N120 et de plongement N45, ainsi que la mise en place d'un champ filonien plomb-zinc exploité au début du siècle dernier.
- Une phase durant la période alpine où le massif de Belledonne plonge vers l'Ouest/Nord-Ouest et où se forme des plis, d'axes N0 à N20 plongeant vers le N, et des décrochements conjugués N20 et N140.
- Une dernière phase marquée par l'activité de la faille de la Romanche, accident tectonique senestre de direction N110 passant au pied du couloir des Ruines. Son activité est assez récente car elle affecte le cône de déjection du torrent du grand Serre.

### **3. Instrumentation du site**

Dans le but d'améliorer la surveillance du site, le versant de Séchilienne a progressivement été instrumenté. Les dispositifs en place en surface sont :

-des extensomètres manuels et automatiques placés au niveau des fractures et des blocs en mouvements. Ce dispositif est néanmoins vulnérable aux chutes de blocs.

-des mesures de distancemétrie infra-rouge réalisé à l'aide de points géodésiques disposé sur tout le secteur des ruines et d'une station géodésique placé au niveau d'un local sur le promontoire de Montfalcon. Des mesures sont prises toutes les heures mais la prise de mesure est impossible en cas de mauvais temps.

-des mesures de distancemétrie radar depuis le local de Montfalcon. Il s'agit d'un radar terrestre de distancemétrie développé en 1999 par l'ONERA (l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales). Cet appareil d'excellente précision (meilleure que le millimètre) permet de compléter le suivi des données obtenu par géodésie. L'acquisition des données se fait sur trièdre et sur sol nu, quel que soit les conditions météorologiques.

-16 repères GPS

-une station météorologique (pluvio-nivomètre) installée au dessus du Mont-Sec en 1993.

L'ensemble des données mesurées est récupéré via des balises puis transféré vers les locaux des Thiebauds et de Montfalcon. L'ensemble de ces mesures est centralisé par le logiciel GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables) développé en 2000 (Duranthon et Effendiantz, 2004).

De plus, dans l'optique d'expérimenter de nouveaux dispositifs de surveillance, un appareil photographique a été installé en septembre 2009 dans le local de Montfalcon. Cet appareil (un Nikon D300) a été installé dans le but de tester l'intérêt de l'apport de l'imagerie de face dans l'analyse de mouvement de terrain (Kasperski, 2010). L'appareil photographique, fixe et orienté vers le site des Ruines, est programmé de façon à prendre des photographies à intervalles de temps réguliers et paramétrables.

#### **4. Rappels sur les travaux précédents sur l'imagerie de face et définition des objectifs**

Une première étude d'imagerie de face a été réalisée sur les Ruines de Séchilienne pour un des éboulements récents, celui du 23 novembre 2006 (Kasperski *et al*, 2010). A cette époque, les photos sont prises approximativement du même point de vue et avec parfois des appareils photographiques différents. Une comparaison entre des images pré- et post-éboulements avait ainsi permis d'estimer le volume d'éboulement à 30 000m<sup>3</sup> (même ordre de grandeur qui avait été évalué visuellement et par scanner laser). Une corrélation sur deux photos précédant l'éboulement avait également été effectuée à l'aide du logiciel MEDICIS. Cette corrélation avait permis de mettre en évidence un mouvement important de la zone touchée par l'éboulement (déplacement de un mètre en un jour). Ces travaux prometteurs ont conduit à mettre en place un dispositif fixe pour détecter et prévoir les grands déplacements précurseurs de l'éboulement. C'est dans cette optique qu'a été installé un appareil photographique dans le local de Montfalcon. Celui-ci a été programmé pour prendre des photos durant la journée

Le début des recherches sur la méthode de détection de grand déplacement a été fait par Virginie Barthelet en 2011, dans le cadre de son stage au sein du CETE. Deux points ont été étudiés :

-Il a été montré l'importance d'une automatisation d'une méthode de détection (travail long et minutieux) à l'aide du logiciel ENVI.

-Un système de tris des photos pour supprimer les photos qui ne sont pas exploitables (neiges, brouillard, pluie) a été ébauché.

L'objectif de cette étude est de finaliser et tester la méthode automatique de détection des mouvements sur le versant des Ruines de Séchilienne.

## II. Méthode de détection automatique de grands déplacement

### 1. Analyse manuelle de photographie

Durant la période du 20 au 22 juillet 2011, des petits éboulements ont été enregistrés par les différents instruments et vus depuis la route RD 1091. Comme pour l'étude des photos précédentes, une comparaison manuelle des photos en les superposant a permis de déterminer les principales zones d'éboulement.

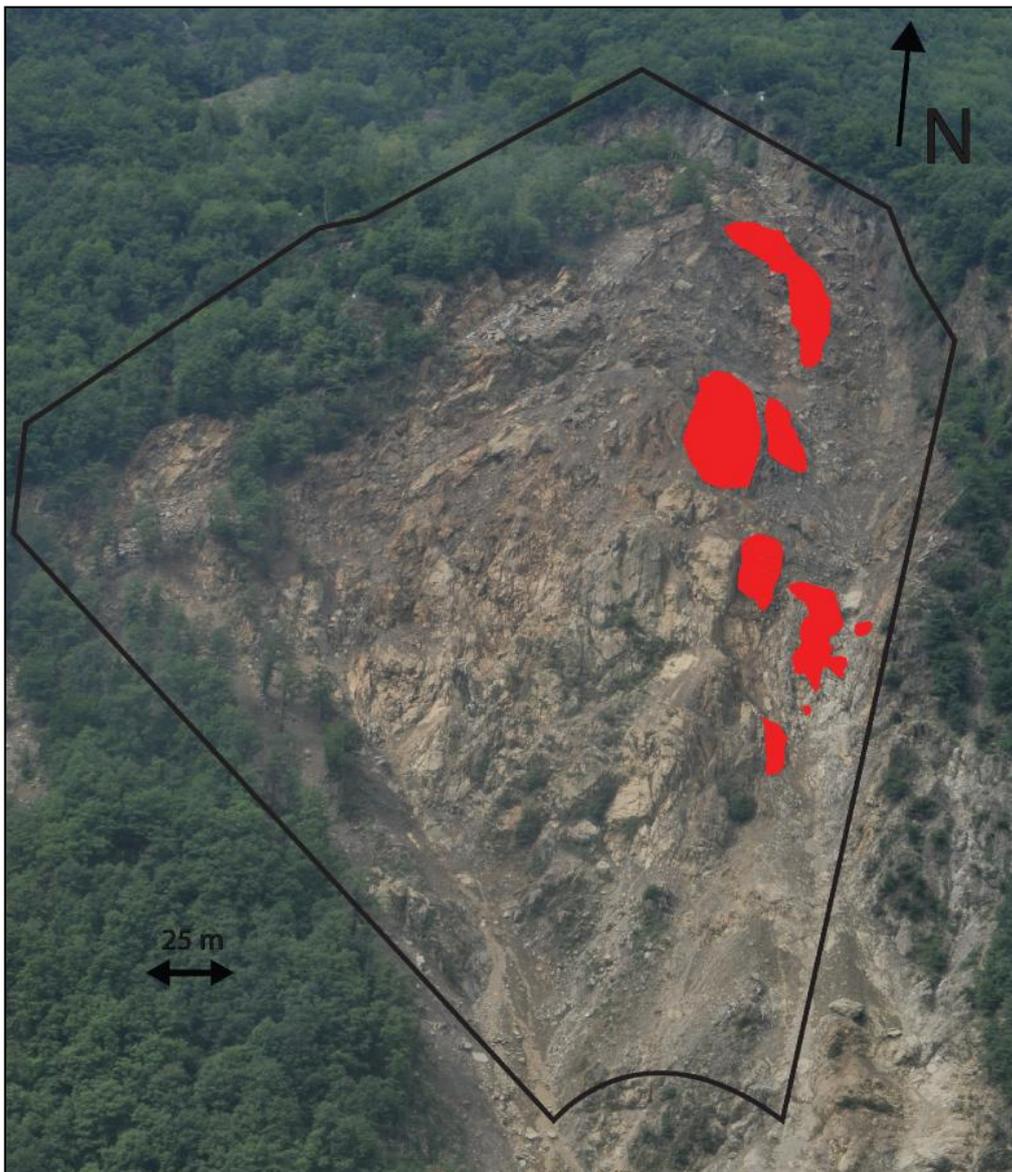


Figure 4 : Localisation des principaux éboulements du 21 juillet 2011.

Comme le montre la figure 4, l'essentiel des éboulements se situe à l'Est de la zone de glissement. Ils sont observables sur 100 m de long de la falaise. Cette série d'éboulement s'est déroulé en deux étapes, une première entre le 20 et le 21 juillet et une seconde entre le 21 et le 22 juillet, d'un volume un peu moins important que le précédent (cf. figure 5 et 6).

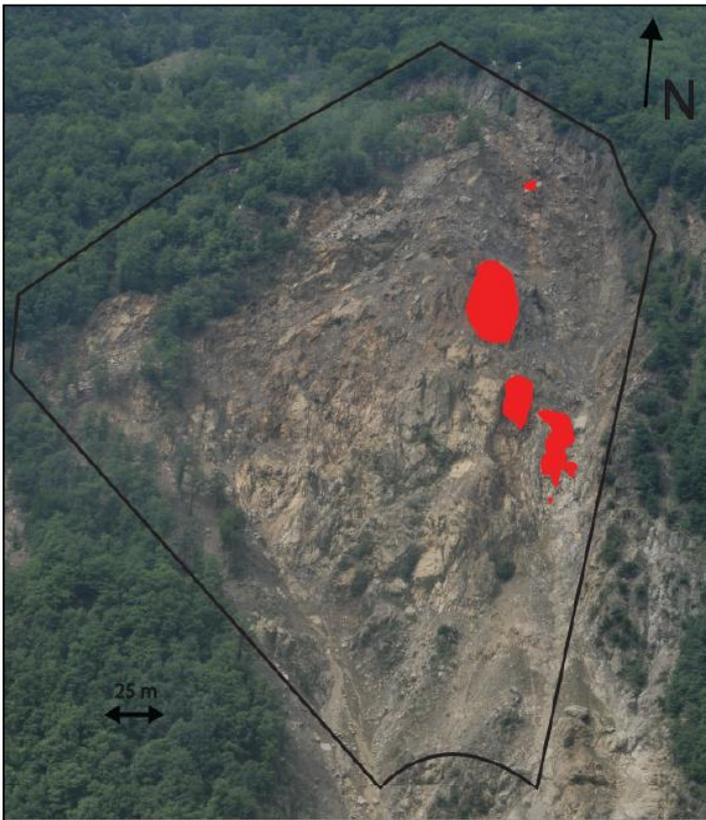


Figure 5 : Localisation des éboulements produits entre le 20 et le 21 juillet 2011.

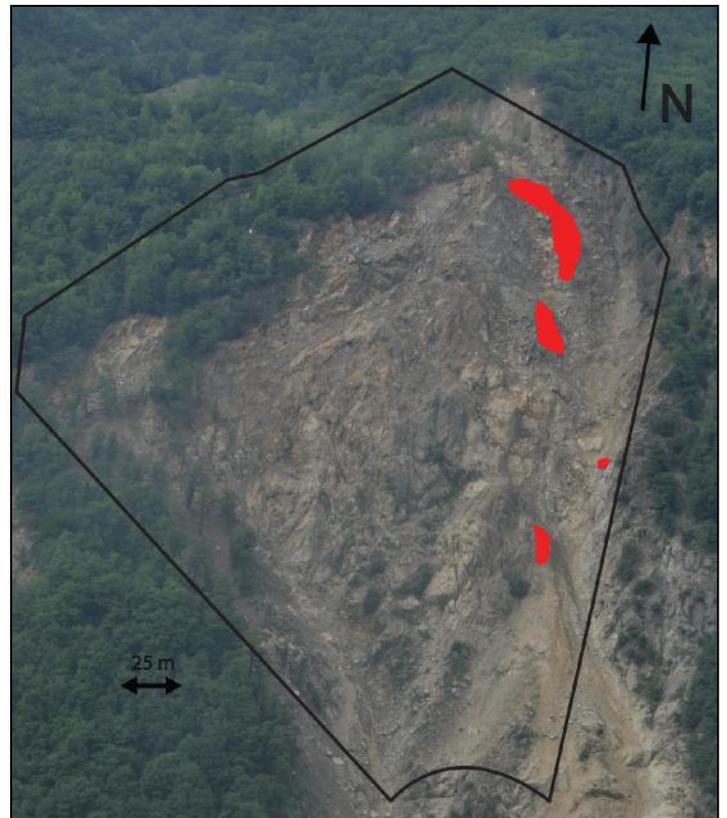


Figure 6 : Localisation des éboulements produits entre le 21 et le 22 juillet 2011.

De plus, quelques jours avant les premiers éboulements, une zone avec un mouvement relativement important a pu être mise en évidence. En effet, la zone délimitée en bleu sur la figure 7 s'est déplacé de presque 1 m entre le 16 et le 20 juillet.

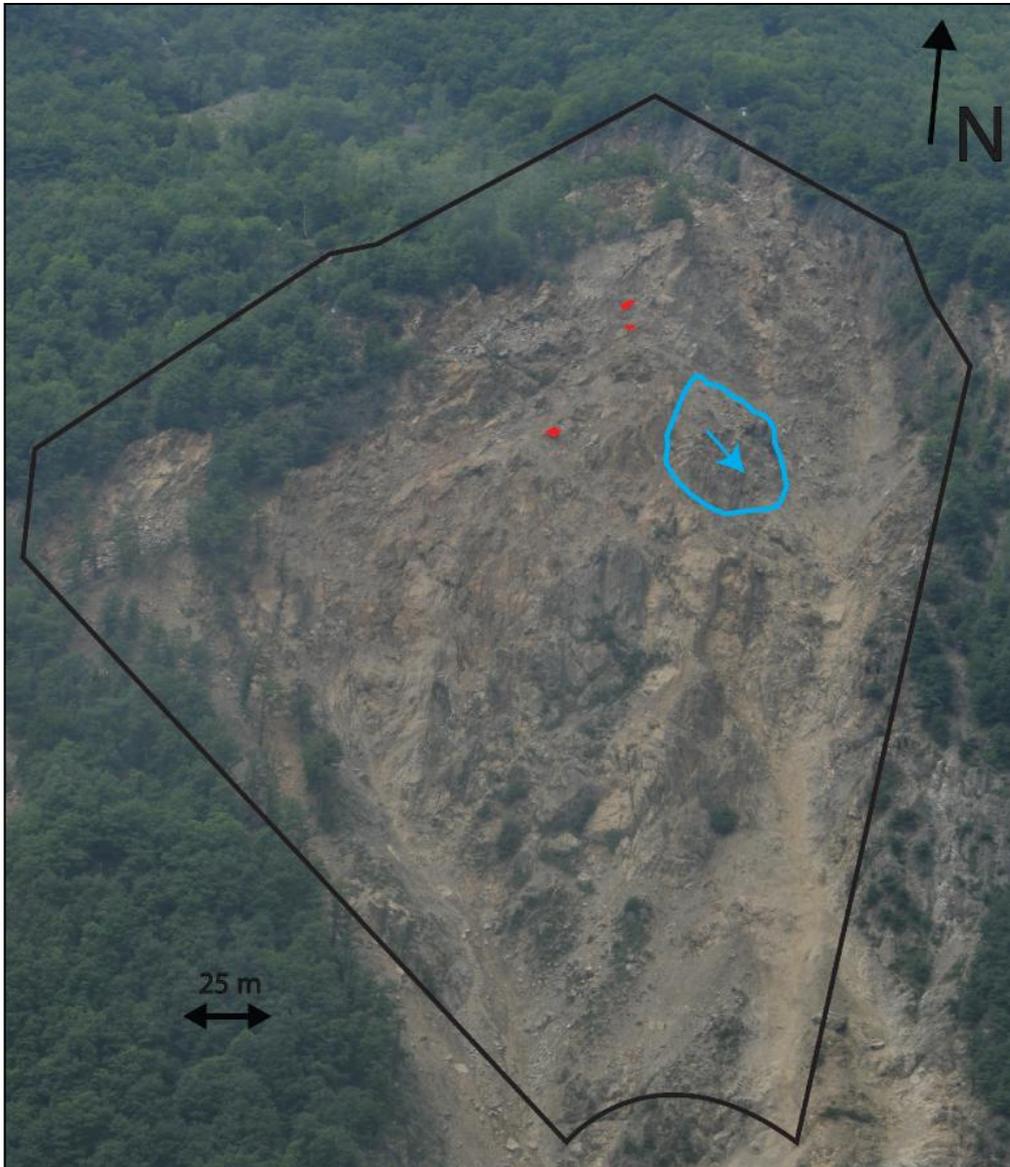


Figure 7 : Localisation de la zone de déplacement anormale entre le 16 et le 20 juillet 2011.

## **2. Justification de l'intérêt d'une méthode de détection**

D'après l'analyse des photographies des éboulements du 21 et 22 juillet 2011, il est donc intéressant de développer une méthode de détection. En effet, avant l'éboulement, on détecte une zone avec un mouvement anormalement rapide.

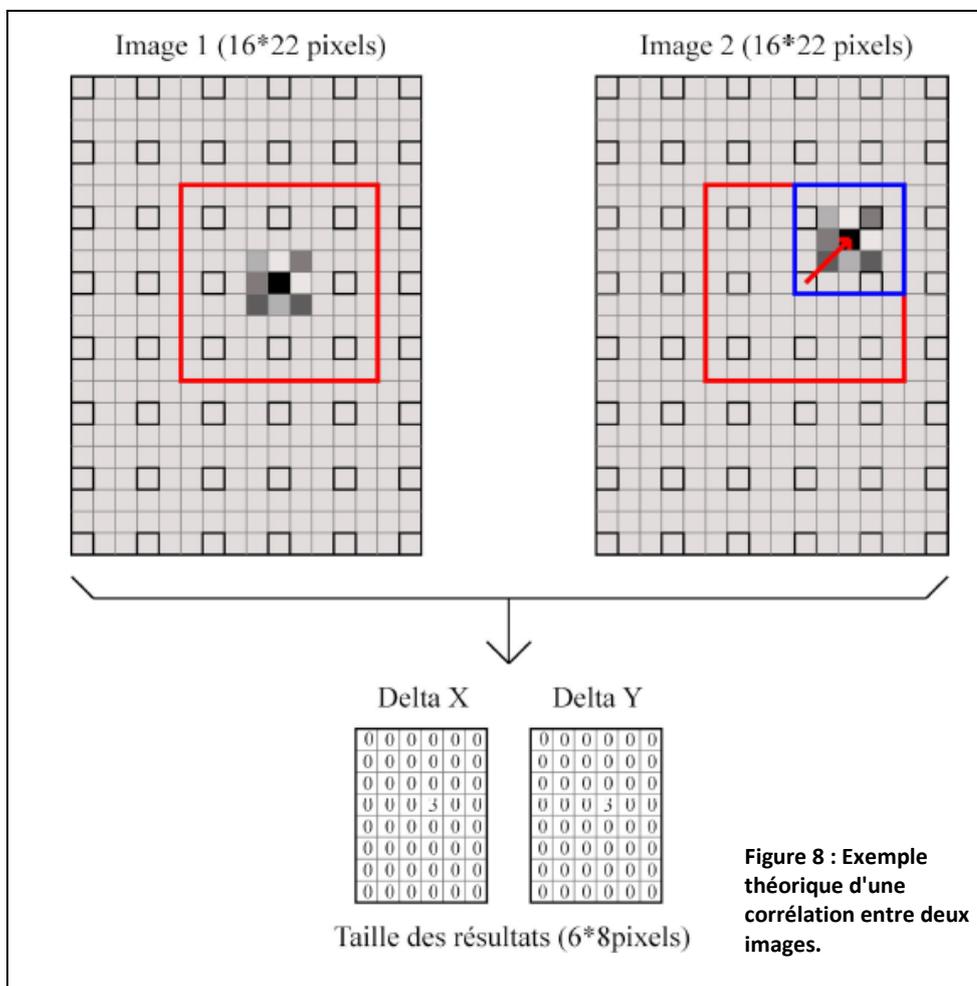
Les éboulements de juillet 2011 sont de petits volumes (100-200 m<sup>3</sup>) et les déplacements précurseurs associés à ces éboulements sont de valeurs faibles, mais en 2006, on a pu constater des déplacements de l'ordre de 3-4 m que l'on peut détecter avec une méthode automatique de détection.

## **3. Corrélation de phase à l'aide du logiciel Envi**

La corrélation d'images est un outil permettant de visualiser les déplacements entre deux images. Pour réaliser cette opération, il faut que les deux images aient la même résolution et qu'elles aient été recalées. Il existe deux types de corrélation : statique et fréquentielle, cette dernière étant plus précise. La corrélation fréquentielle (utilisé dans le cadre de cette étude) est basée sur l'application de la transformation de Fourier sur les lignes et sur les colonnes des images (Leprince *et al*, 2007).

La corrélation des photographies est faite à l'aide de la fonction Cosi-Corr du logiciel ENVI 4.2 (ENvironment for Visualizing Images). Pour chaque pixel de la première image, la zone la plus ressemblante est recherchée sur la seconde image, à l'intérieur d'une fenêtre de recherche. La taille de cette fenêtre peut être réglée par utilisateur et, dans le cadre de cette étude, elle dépendra de la durée qui sépare les deux photographies. Plus cette durée est importante, plus il est susceptible d'avoir eu un mouvement important entre les deux images et donc la taille de la fenêtre devra donc être plus grande pour permettre une meilleure corrélation.

De plus, pour des raisons de temps de travail du logiciel, seulement un pixel sur 4 a été traité.



Pour permettre de bien interpréter l'image obtenue, un code couleur a été mis en place (cf. tableau 1). En connaissant la résolution d'un pixel, il est possible de quantifier le déplacement obtenu. Pour cette étude, un pixel correspond à 12 cm en taille réelle (Barthelet, 2011).

Couleur du pixel	Déplacement en pixel	Déplacement en cm équivalent
Rouge	-16 à -12	-192 à -144
Magenta	-12 à -6	-144 à -72
Orange	-6 à -3	-72 à -36
Jaune	-3 à -1	-36 à -12
Mauve clair	-1 à 1	-12 à 12
Vert foncé	1 à 3	12 à 36
Vert clair	3 à 6	36 à 72
Cyan	6 à 12	72 à 144
Bleu	12 à 16	144 à 192

Tableau 1 : Code couleur utilisé pour la corrélation d'image.

Avant de faire la corrélation, il faut d'abord recaler les deux images entre elles en repérant et en superposant des points fixes entre eux. Ensuite, les images sont recadrées sur la zone des ruines, de façon à faire la corrélation que sur la zone d'étude (cf. figure 9). Cela permet ainsi de diminuer la durée de la corrélation.

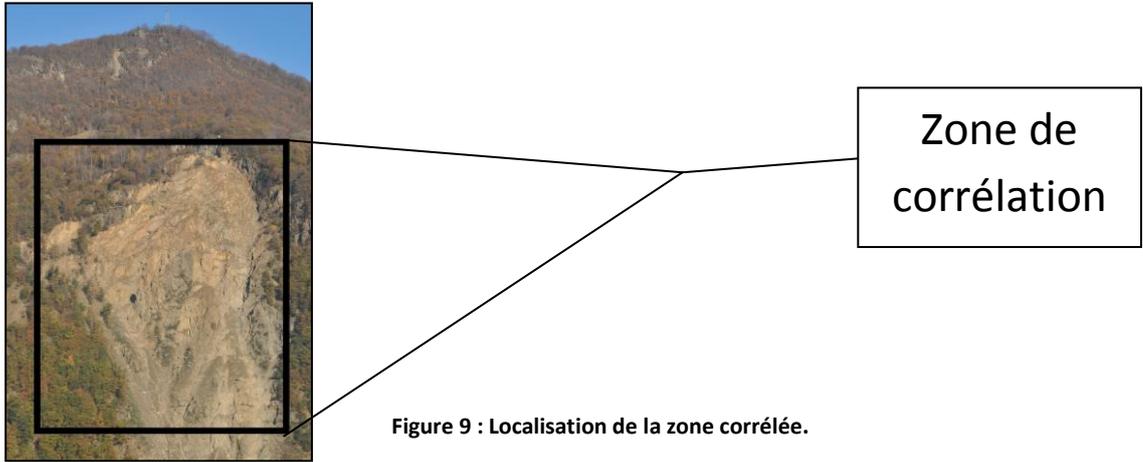


Figure 9 : Localisation de la zone corrélée.

Ainsi, la corrélation d'image a permis de quantifier le déplacement qu'il y a eu les jours précédant l'éboulement du 21-22 juillet (cf. les figures 10 et 11).

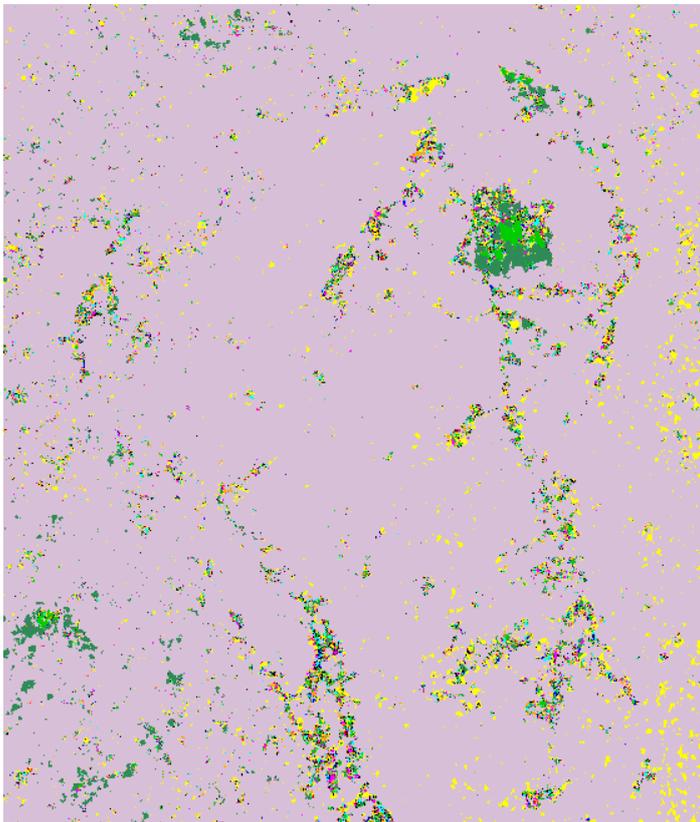


Figure 10 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 20 juillet 2011.

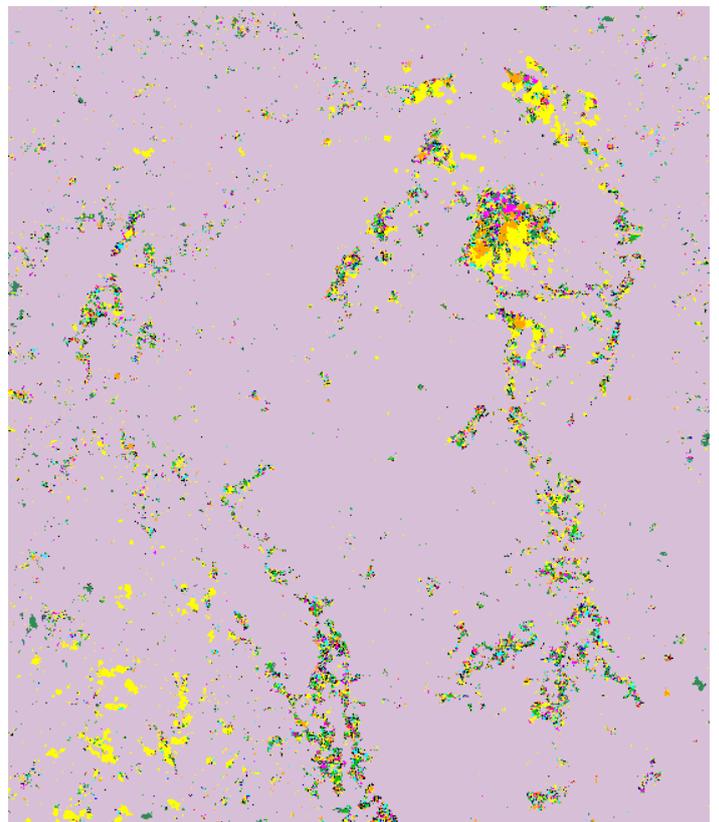


Figure 11 : Déplacement haut/bas entre le 16 et le 20 juillet 2011.

La zone en mouvement qui avait été observée avec l'analyse qualitative a été très clairement mise en évidence à l'aide de la corrélation. Les données obtenues en comparant les photos sont donc cohérentes avec les données obtenues par corrélation. Ainsi, cette zone a eu un mouvement horizontal orienté vers l'Est d'environ 35 cm et un mouvement vers le bas de 70 cm. Cela correspondrait à un mouvement moyen d'environ 80 cm en 4 jours.

On peut également remarquer la présence de zones en mouvement moins importante autour du principal ensemble.

Les figures 12 et 13 ont été obtenues en réalisant une corrélation entre des photographies du 20 et du 22 juillet 2011. Elles permettent de délimiter d'où proviennent les éboulements qui ont eu lieu pendant cette période.

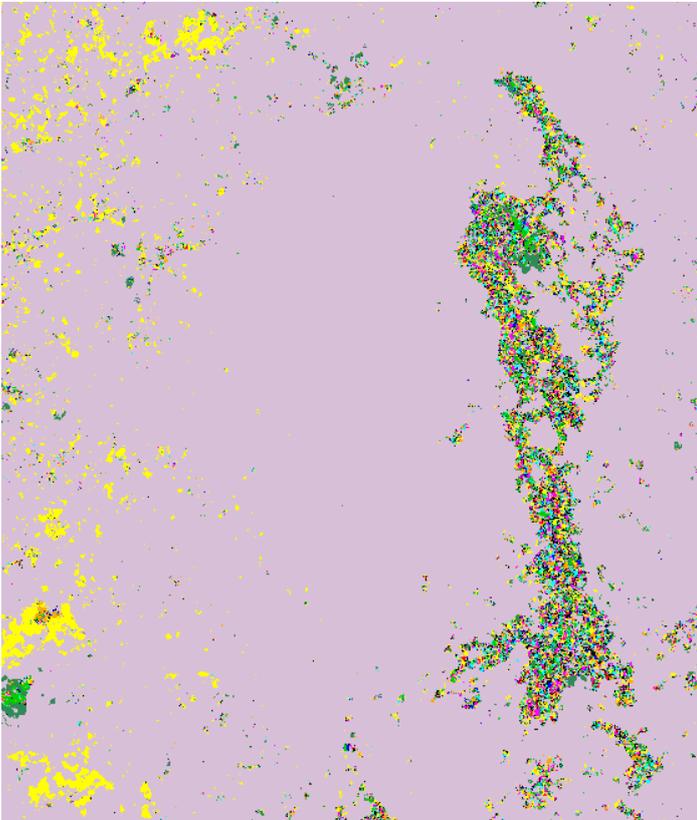


Figure 12 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet 2011.

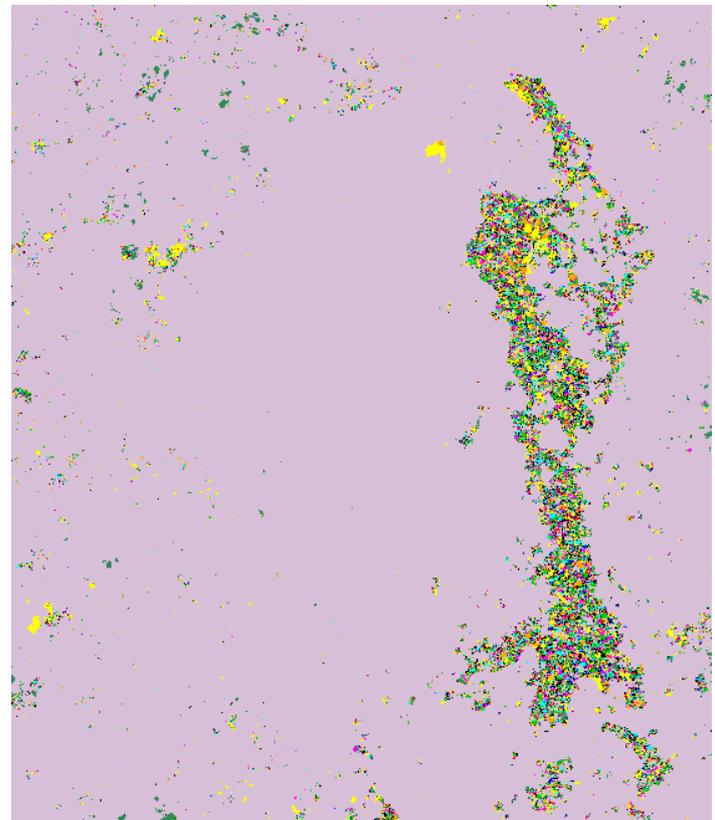


Figure 13 : Déplacement haut/bas entre le 20 et le 22 juillet 2011.

Les régions qui apparaissent en multicolore sur les figures 12 et 13 correspondent aux zones d'éboulement. En effet, comme le logiciel n'est pas capable de trouver deux zones semblables d'une image à l'autre au niveau de ces régions, le logiciel nous donne un résultat qui paraît incohérent. Ces zones correspondent assez bien avec ce qui a été trouvé lors de la comparaison manuelle des deux photos. De plus, on peut constater que des zones supplémentaires sont présentes. Ces dernières sont généralement situées en dessous des zones d'éboulements. Ces zones supplémentaires correspondent aux traces laissées lors de l'éboulement (celui-ci a tendance à emporter une partie des éléments situés en dessous de la zone source de l'éboulement).

#### 4. Description rapide de la méthode envisagée

L'analyse des photographies concernant l'éboulement de juillet 2011 a permis de définir les différentes étapes nécessaires pour la réalisation de la méthode de détection envisagée.

Déjà, avant de quantifier le déplacement par corrélation, il faut d'abord les recalcr entre elles, c'est-à-dire qu'il faut superposer les points fixes de chaque image entre eux (le panneau solaire juste au dessus de la zone des ruines, le pylône électrique au sommet de la photo, ...). Cette étape est très importante car, même si les photographies sont prises à des intervalles de temps très courts, un léger décalage (de l'ordre de un ou deux pixels) est très souvent observé. Un pixel d'une image correspondant environ à 12 cm, le recalage est donc important pour avoir la meilleure précision possible sur le calcul du déplacement.

De plus, pour éviter de faire des corrélations avec des images de mauvaises qualités, il faut au préalable trier les photos de façon à ne récupérer que les photos pour lesquelles il est intéressant d'effectuer une corrélation. Des tests pour définir une méthode de tri avaient été faits en 2011 par Virginie Barthelet et ils avaient permis de mettre en place une première version d'un programme de tri des images. L'ensemble des tests ont été réalisés à l'aide du logiciel de programmation MATLAB.

L'étape suivant le tri des images est donc la corrélation. Cette étape a également été abordée par Virginie Barthelet. Comme pour le tri des images, cette partie de la méthode a été réalisée sous MATLAB, en reprenant le principe de fonctionnement du modèle Cosi-corr de ENVI (cf. explication en II.3).

Enfin, la dernière partie de la méthode doit consister en une analyse de la corrélation, c'est-à-dire détecter si il y'a un mouvement et, si besoin, alerter le responsable de la surveillance.

En résumé, la méthode de détection se décompose en quatre étapes :

- Le recalage entre les deux images.
- Le tri pour supprimer les images de mauvaises qualités.
- La quantification des déplacements par corrélation.
- L'analyse des résultats obtenus et la prise de décision en conséquence (alerter ou non).

### III. Quantification des déplacements par la corrélation de phase

Au cœur de la méthode de déplacement se trouve le calcul de déplacement par corrélation de phase (cf. partie II.3). Le principe de calcul est validé mais nous devons préciser dans quelles conditions cette méthode peut être appliquée. Dans la suite, différents tests seront effectués :

- cas de photographies prises à des heures différentes.
- cas pour des conditions météorologiques différentes (ombre, nuage, éclairage différent, ...).

#### 1. Test de corrélation prise à des heures différentes

Dans le but de comprendre l'influence de l'heure à laquelle les photographies sont prises, différentes corrélations ont été effectuées à des heures différentes, permettant ainsi de voir l'influence de l'éclairage du soleil, des ombres, ... . Ainsi, pour l'étude de l'éboulement qui a eu lieu le 21 juillet 2011, des corrélations d'images ont été faites sur des photos à différentes horaires : 10h45, 13h45 et 16h45.

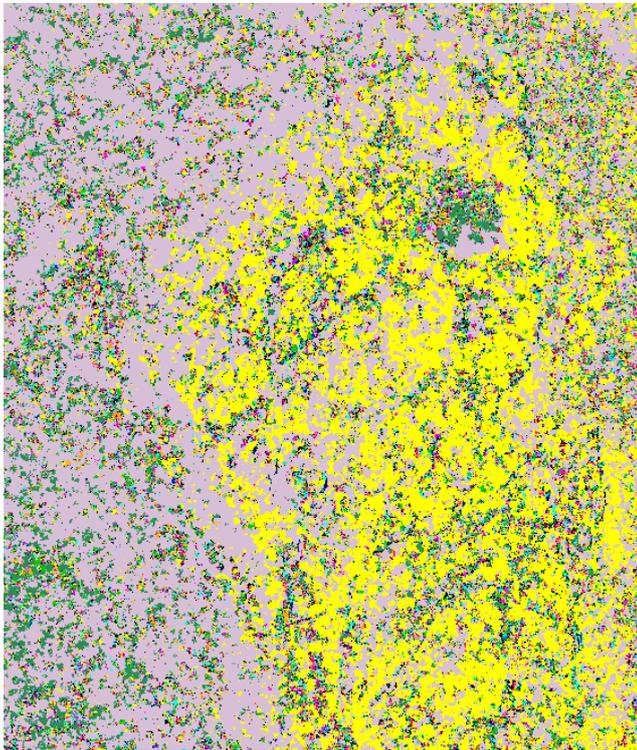


Figure 14 : Déplacement Est/Ouest obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à des horaires différents (10h45 et 13h45).

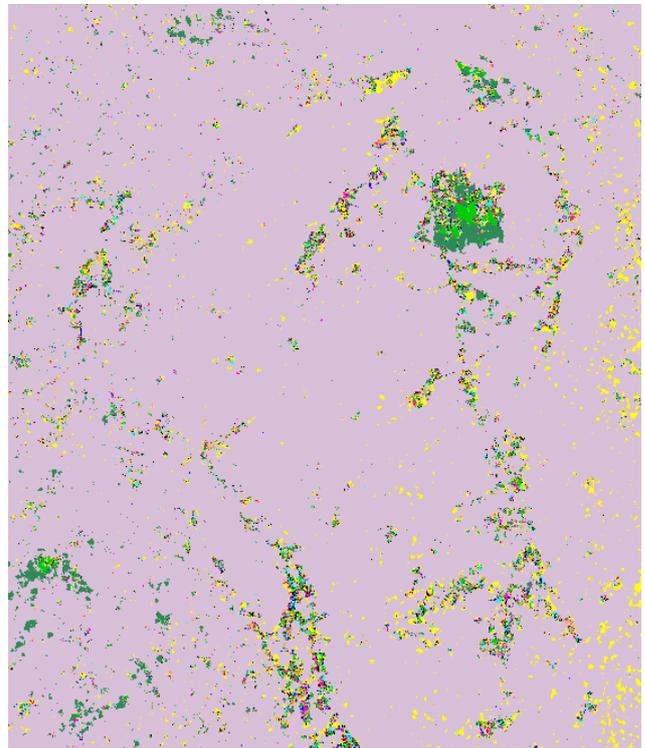
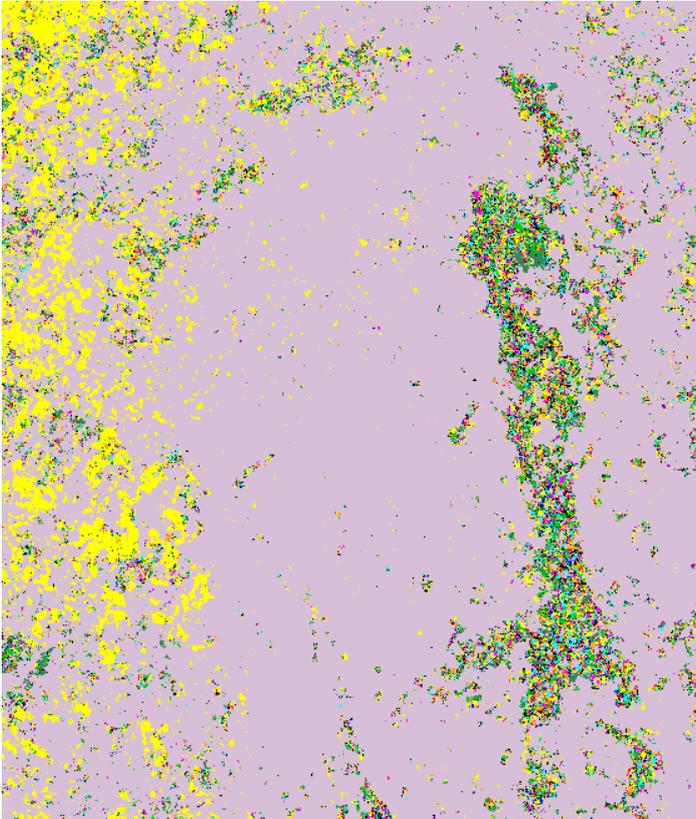
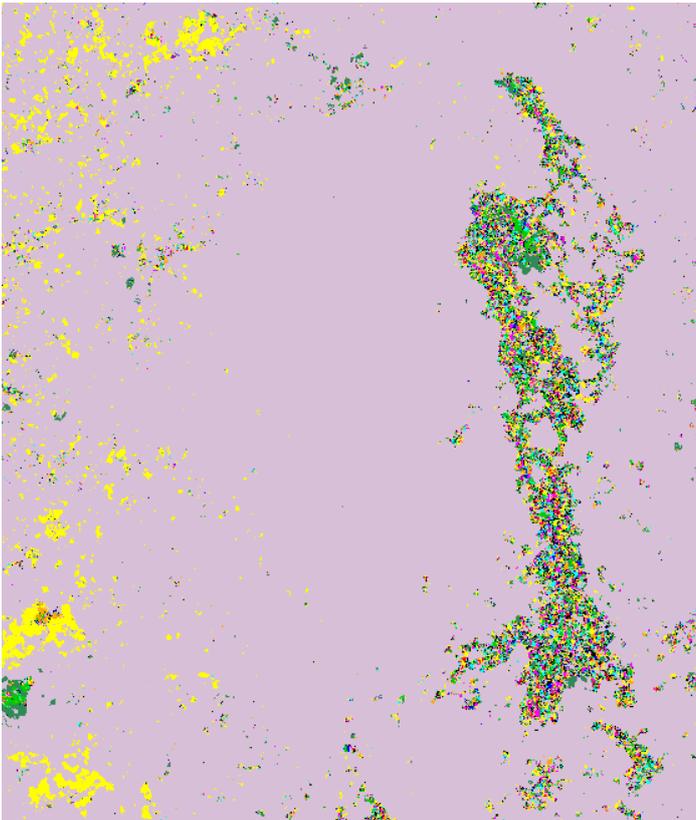


Figure 15 : Déplacement Est/Ouest obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à des horaires similaires (13h45).

Les figures 14 et 15 montrent les résultats de corrélation faites pour des images prises entre le 16 et le 20 juillet 2011. Pour la figure 14, la photo du 16 juillet était de 10h45 et la photo du 20 juillet était de 13h45 alors que pour la figure 15, les deux photos étaient prises à 13h45. On constate que la zone en mouvement mise en évidence en II.1 (cf. figure 7) apparaît moins bien sur la figure 14 que sur la figure 15. Pour obtenir un résultat qui soit interprétable, il faut donc que les photographies corrélées aient été prises à des heures proches. Sinon, l'image obtenue après corrélation est très bruitée et cela gêne grandement l'utilisateur pour déterminer quelles sont les zones à identifier.



**Figure 16 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à 10h45.**



**Figure 17 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à 16h45**

Les figures 16 et 17 montrent des déplacements qui ont eu lieu durant entre le 20 et le 22 juillet 2011. Pour les deux figures, les corrélations ont été faites à l'aide de photographies prises à des heures similaires. La zone d'éboulement qui avait été repérée en II.3 est toujours très bien visible.

La seule différence entre ces deux images est la présence d'une zone à l'Est de la figure 16 qui apparaît en mouvement. Cette différence n'est pas gênante pour l'interprétation de la figure car il s'agit d'une zone de végétation.

## 2. Test pour des conditions météorologiques différentes

Dans cette partie, nous étudions l'influence de plusieurs conditions météorologiques sur le calcul de déplacements par corrélation de phase :

- les ombres.
- la différence d'éclairage.
- la présence de nuage.

### a. Cas d'une corrélation avec une photo avec de l'ombre

La corrélation pour ce test a été faite à l'aide des photographies du 16 et 22 juillet 2011 à 10h45. Une partie de la photo du 22 juillet est sombre car elle est située sous l'ombre d'un nuage.



Figure 18 : Photographie du 16 juillet 2011 à 10h45.



Figure 19 : Photographie du 22 juillet 2011 à 10h45.

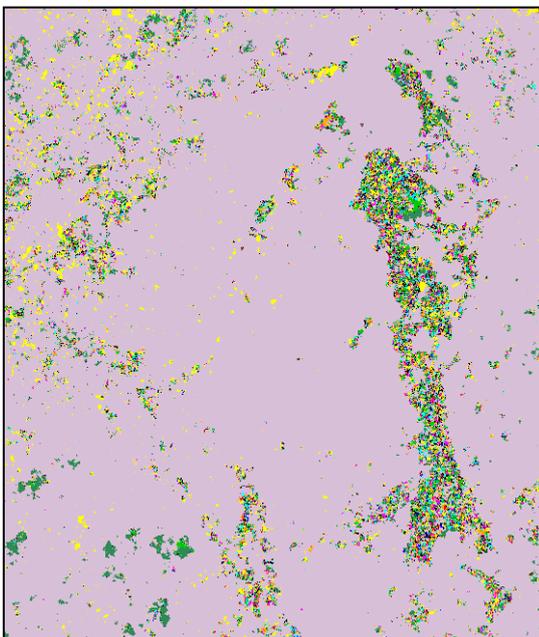


Figure 20 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 22 juillet.

Comme le montre les photographies ci-dessus, l'ombre sur la deuxième image entraîne la formation d'une zone sombre. Néanmoins, la figure 20 montre que cette zone n'empêche pas un calcul de corrélation correct entre les deux images.

La zone à l'ouest de la photo qui apparaît comme en étant « bruitée » est normale. Elle correspond à la trace des éboulements du 20 et 21 juillet (cf. partie II.3).

**b. Cas d'une corrélation pour deux photographies ayant des éclairages différents**

Les photographies utilisées pour ce test correspondent à celle du 14 et du 16 juillet 2011 à 10h45. La photo du 14 juillet a été prise alors qu'il n'y avait pas de soleil tandis que celle du 16 était bien éclairée.

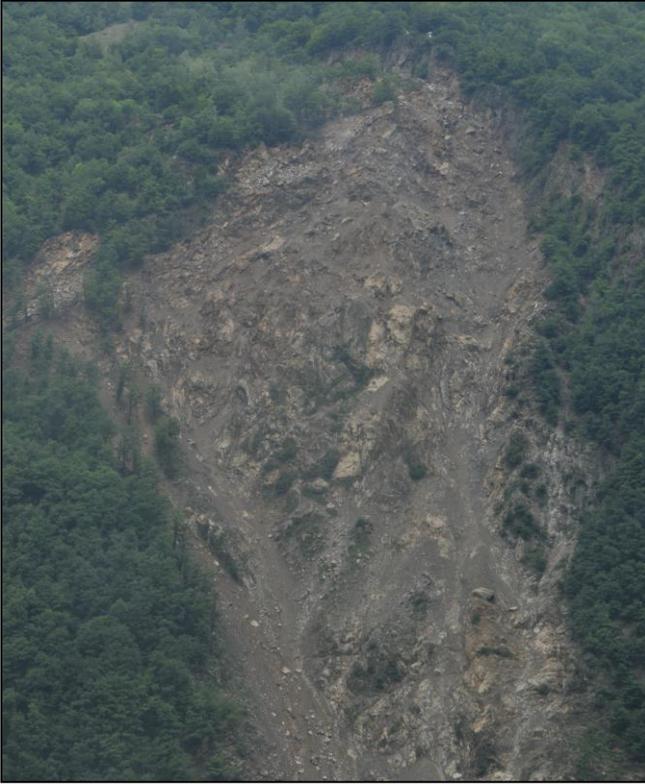


Figure 21 : Photographie du 14 juillet 2011 à 10h45.

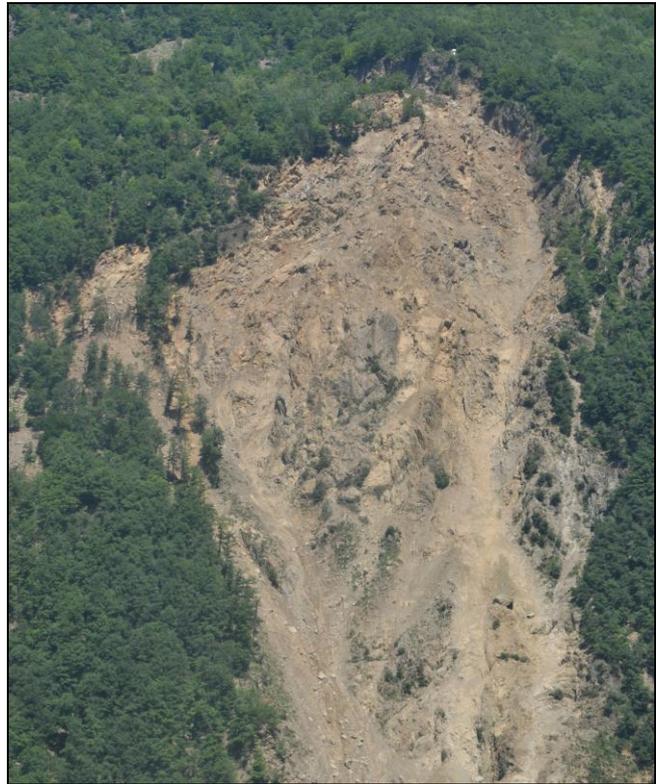


Figure 22 : Photographie du 16 juillet 2011 à 10h45.

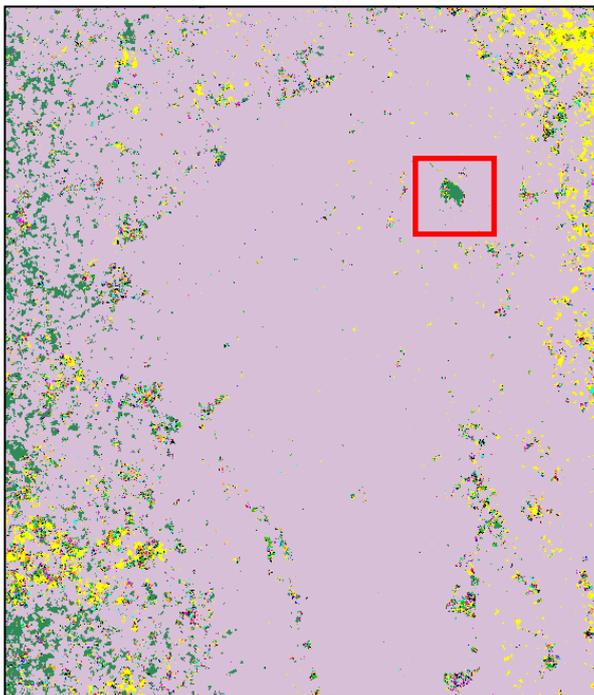


Figure 23 : Déplacement Est/Ouest entre le 14 et le 16 juillet.

La différence d'éclairage entre les deux photographies entraîne une différence de couleur. Ainsi, la photo du 14 juillet sera plus sombre que celle du 16 juillet. Néanmoins, le résultat de la corrélation n'est pas affecté par cette différence.

On distingue ainsi une zone en mouvement, en haut à droite, qui correspond au mouvement qu'il y a eu avant l'éboulement du 21 juillet.

**c. Cas d'une corrélation entre une photo avec nuage et une photo sans nuage**

On réalise le test des conséquences de la présence d'un nuage. Les photographies utilisées pour ce test sont celles du 16 et du 24 juillet 2011, à 13h45. La photo du 24 juillet est partiellement cachée par les traces d'un nuage.

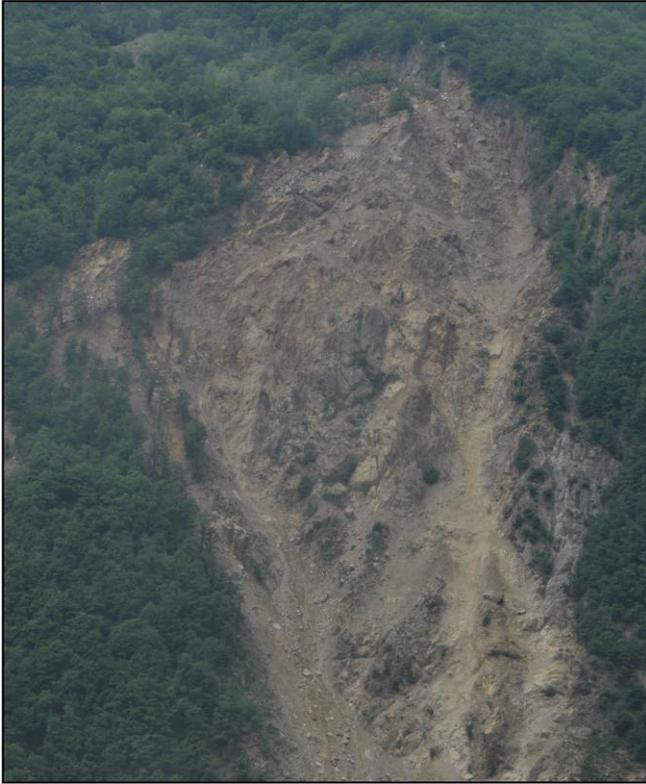


Figure 24 : Photographie du 16 juillet 2011 à 13h45.

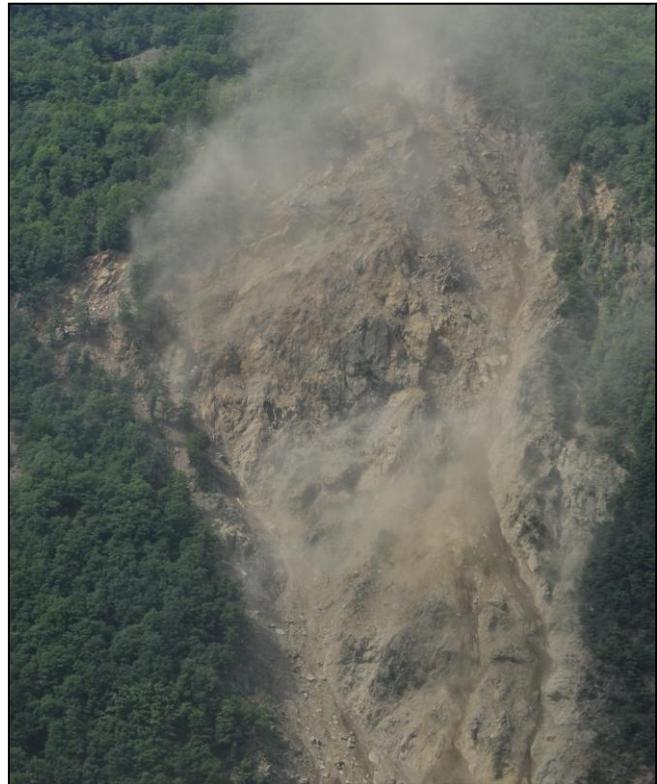


Figure 25 : Photographie du 24 juillet 2011 à 13h45.

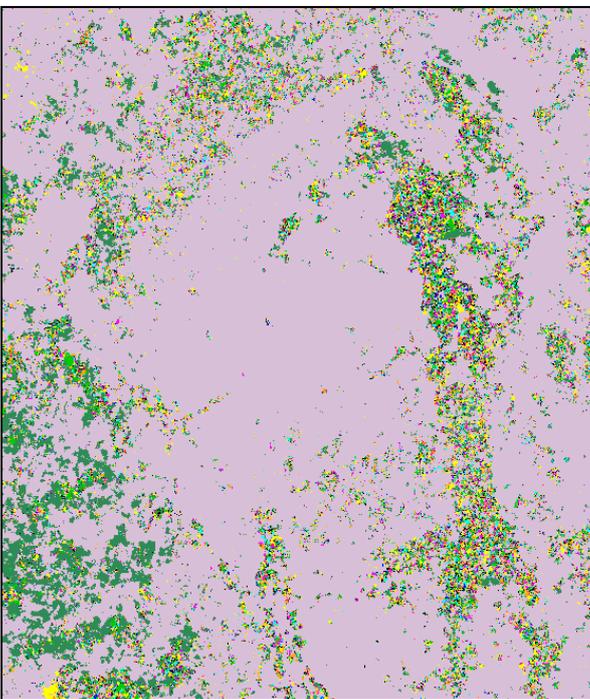


Figure 26 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 22 juillet.

Du fait de la présence du nuage, la zone des Ruines n'est pas parfaitement visible. Ces traces sont également identifiables sur le résultat de la corrélation. Le nuage observable en haut de l'image apparaît dans le résultat de la corrélation comme une zone très bruités. Il semble donc altérer la corrélation.

Les nuages doivent donc être évités dans les photos servant à faire des corrélations.

#### *d. Cas d'une corrélation entre deux photographies avec de la neige*

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la neige sur les résultats de la corrélation de deux images. Les photographies utilisées pour ce test sont celles du 31 janvier 2010 et celle du 21 février 2010. Sur la photo de janvier, il est possible de noter la présence de neige sur la partie supérieure et autour de la zone des Ruines.

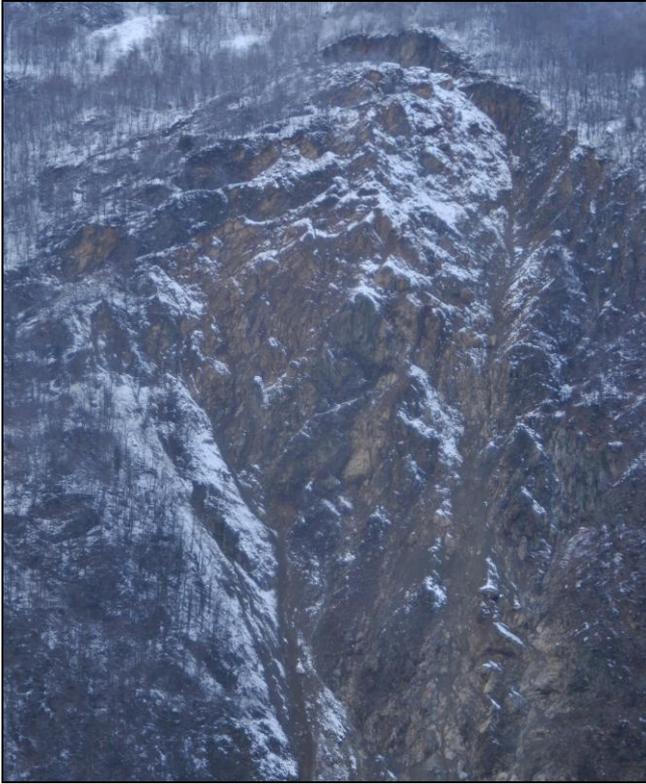


Figure 28 : Photographie du 30 janvier 2010 à 17h15.

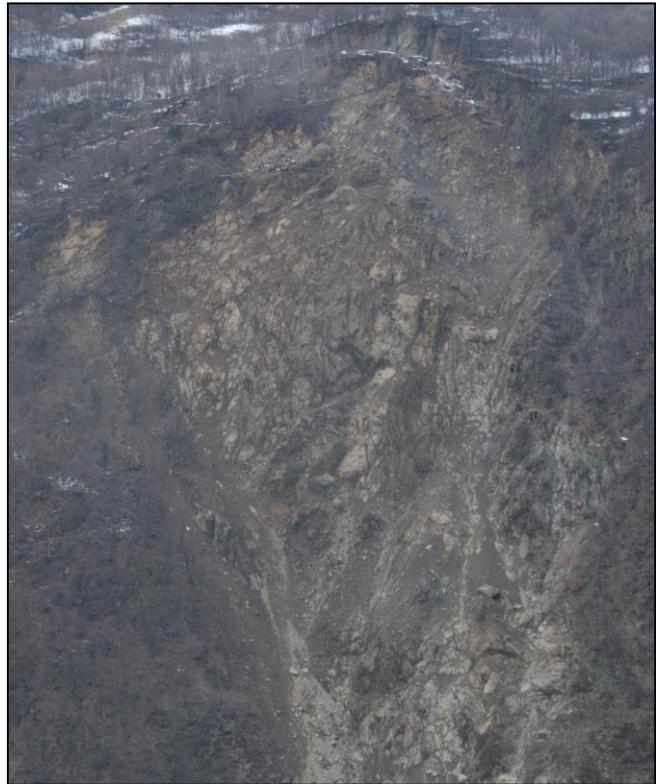


Figure 27 : Photographie du 17 février 2010 à 16h27.

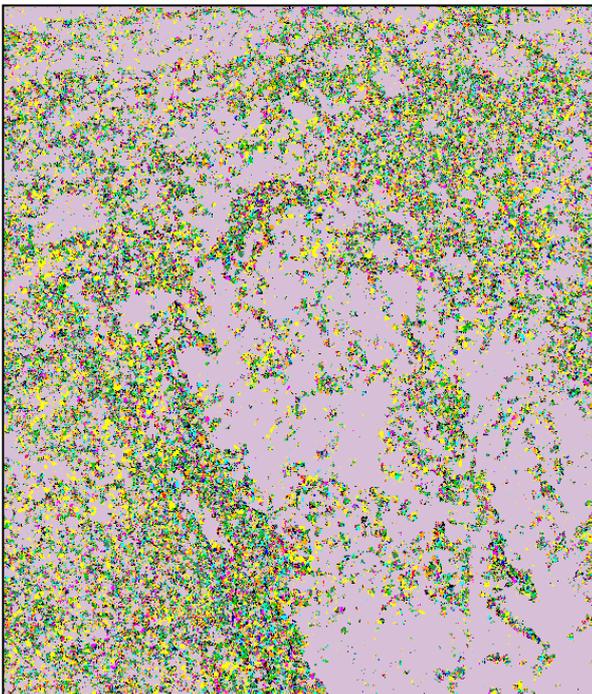


Figure 29 : Déplacement Est/Ouest entre le 30 janvier et le 17 février.

La neige présente sur la figure 28 change beaucoup l'aspect général de la photo. L'influence de la neige est également observable au niveau du résultat de la corrélation entre ces deux photographies. En effet, on constate que la figure 29 est très bruitée aux endroits où l'on peut observer de la neige.

Celle-ci a donc une très mauvaise influence sur les corrélations et les photos avec de la neige ne doivent pas être utilisées pour faire des corrélations.

### **3. Conclusion sur les conditions nécessaires pour la réalisation de corrélation**

Ainsi, une série de test de corrélation a permis la mise en place de critère pour la réalisation de corrélation de bonne qualité.

Le point le plus important est qu'il faut que les deux photographies utilisées pour la corrélation soit prise à la même heure ou à des heures assez proches. Cela permet de beaucoup mieux faire ressortir les zones intéressantes à mettre en évidence mais également de limiter le « bruit » qui pourrait affecter la corrélation.

Les conditions météorologiques qui influent le plus sur la qualité des corrélations ont également pu être mis en évidence. Ainsi, la présence de neige ou de nuage affecte grandement la qualité de la corrélation et doit être évitée pour faire le calcul du déplacement. A l'inverse, d'autres conditions telle que la présence d'ombre sur une partie de la zone des Ruines ou bien une différence d'éclairage entre les deux images n'influencent pas ou très peu le résultat des corrélations.

## IV. Le tri

### 1. Rappel sur la méthode primaire de tri précédemment élaboré

Tout d'abord, l'appareil photographique est programmé pour prendre des photos à intervalle de temps réguliers (qu'il est possible de modifier) et toutes les photos qui sont prises la nuit sont effacées. Ainsi, les photos témoignent des nombreuses conditions météorologiques pouvant affecter la zone d'étude comme la neige, le brouillard, la pluie, ... . Il faut donc un programme pour trier les photos suivant leur qualité de façon à ne pas travailler sur des images inexploitable. En effet, des photos prises par exemple avec du brouillard ne permettent pas d'obtenir des résultats intéressants (cf. partie III.2).

Pour répondre à ce besoin, une méthode de tri automatique a donc été imaginée en se basant sur l'étude entre les différences entre deux images. La première partie de cette méthode consiste à recadrer la photographie, de façon à ne pas observer les changements de végétation.

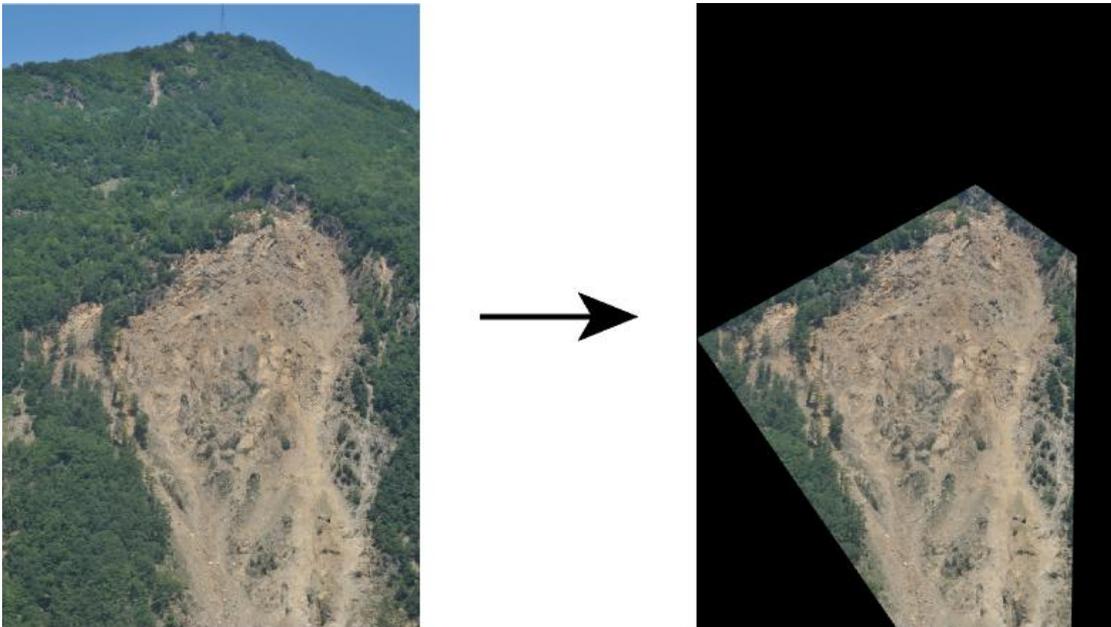


Figure 30 : Exemple de recadrage d'une photographie.

Une fois cette étape faite, il faut faire la différence entre les deux images, c'est-à-dire qu'il faut soustraire les valeurs des pixels (en RGB) de chaque image et récupérer la valeur absolue de cette différence. Cette étape implique donc d'avoir une photo de référence de bonne qualité pour pouvoir faire apparaître les différences avec les photos. Cette étape permet d'obtenir un histogramme montrant le nombre de pixel (en ordonnée) pour chaque valeur absolue de pixel obtenue en faisant la différence, pour chaque canal qui constitue l'image : rouge, vert et bleu.

Pour les « bonnes » images, c'est-à-dire de bonnes qualités, la majorité des pixels ont une valeur de différence inférieure à 50 % tandis que les « mauvaises » images dépassent les 50 %. Afin de pouvoir automatiser ce tri des images, des valeurs « seuils » ont été mises en place. Ainsi, si plus de 10 % des pixels ont une valeur de différence supérieure à 50 (quel que soit le canal), alors la qualité de l'image est considérée comme mauvaise et elle n'est pas retenue pour le reste de l'étude.

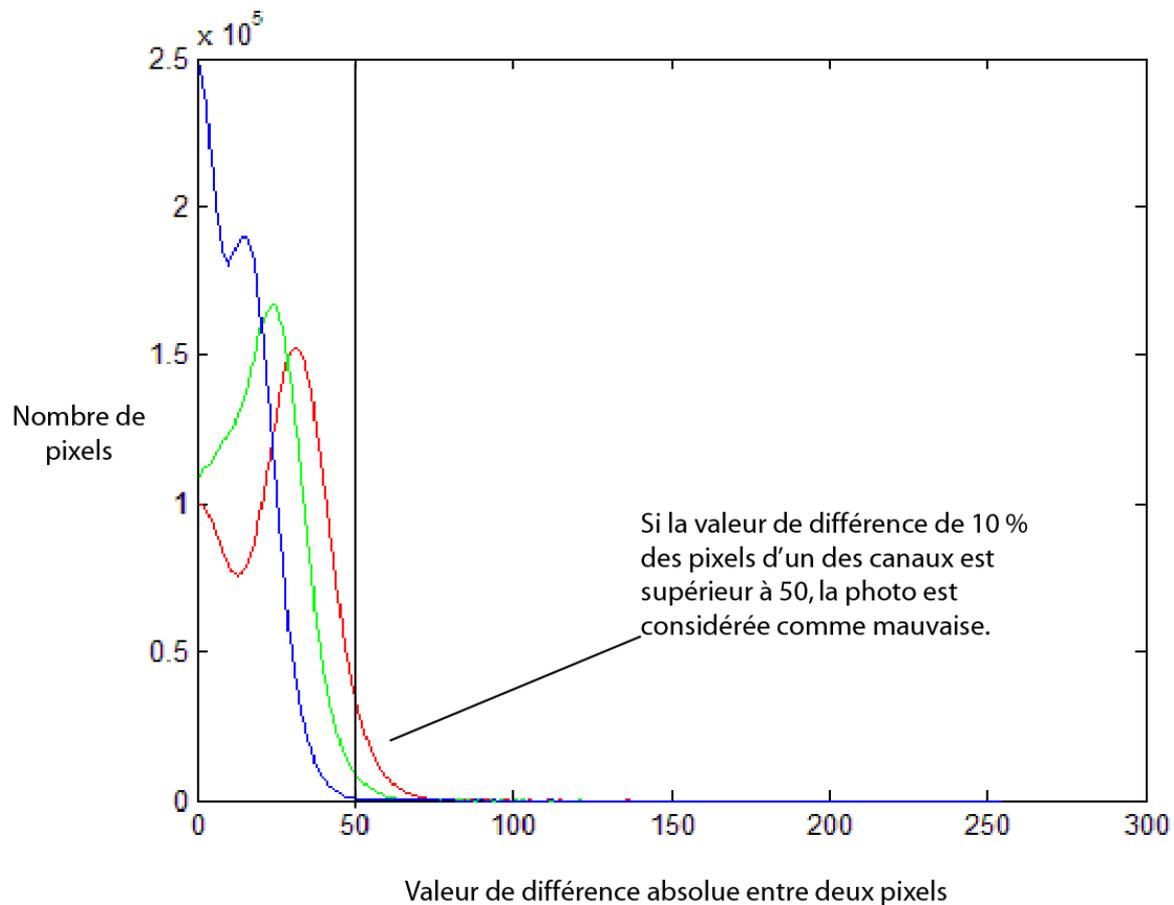


Figure 31 : Exemple d'un histogramme de différence absolue entre deux images.

## 2. Optimisation de la méthode de tri et proposition d'une méthode de tri sophistiquée

Après une série de test de l'algorithme présenté en IV.1 sur des photos concernant le mois de juillet 2011 et de l'hiver 2010-2011, il s'est avéré que certaines photos qui auraient du être retenu ne l'étaient pas et, à l'inverse, des photos qui n'auraient pas du être retenu l'étaient. Pour résoudre ce problème sans avoir modifié la méthode expliquée précédemment, il a été choisi d'améliorer le procédé en apportant des modifications aux images qui n'aurait pas été retenu à l'aide du tri, et de leur faire repasser le tri une seconde fois.

### **a. Méthode dite de luminosité**

Ainsi plusieurs types de modifications ont été faits sur les paramètres des images pour repérer qu'elles étaient les paramètres les plus intéressants à modifier. Pour ne pas trop « altérer » la qualité de l'image et pour ne pas trop complexifier la tâche de la programmation du tri, seules des modifications assez simples ont été faites concernant des paramètres comme la saturation ou la luminosité.

Déjà, des tests ont été réalisés en modifiant la saturation. Ainsi, il a été observé que en augmentant la saturation de l'image de référence et de l'image à vérifier, la différence entre les deux images avaient tendance à augmenter la différence entre les deux images et, à l'inverse cette différence diminuait si on diminuait la saturation. Si on choisit d'augmenter ou de diminuer la saturation que de la photo que l'on souhaite vérifier, la valeur de la différence varie mais pas de manière significative. Pour obtenir des changements de valeur intéressant avec cette méthode, il faut modifier de beaucoup la saturation de l'image (plus ou moins de 50 %) mais cela modifie trop l'image d'origine pour être utilisée dans notre étude. Les modifications avec la saturation n'ont donc pas été retenues.

Ensuite, les tests suivants ont porté sur la luminosité. Comme pour la saturation, les luminosités de l'image de référence et de l'image à vérifier ont été augmentées pour un premier test, puis diminuées pour un second. Il a ainsi été montré que la différence entre les deux images avait tendance à s'accroître quand on diminuait la luminosité des deux images. A l'inverse, la différence diminue quand on augmente la luminosité des deux images.

Il a donc été choisi de répéter la série de test sur le mois de juillet 2011 en reprenant le premier algorithme mais cette fois-ci en rajoutant une étape où l'on modifie les images qui n'ont pas été retenues en leur rajoutant 10 % de luminosité et en leur faisant repasser la méthode. Les résultats ainsi obtenus pour le mois de juillet sont relativement satisfaisants car plus de 90 % des photographies testées ont été correctement triées.

Ce même procédé a ensuite été appliqué à des photographies des mois de janvier à février 2010 pour voir s'il était applicable pour des conditions météorologiques différentes. Néanmoins, les résultats obtenus pour la période de janvier à février n'est pas aussi satisfaisante que pour celle de juillet. En effet, les images récupérées pendant l'hiver sont très différentes (plus de nuage ou de brouillard, parfois présence de nuage, un éclairage assez faible, ...).

### **b. Méthode dite de niveau de bleu**

L'un des problèmes majeurs avec ce test était que certaines photographies de très mauvaises qualités (présence de nuage au niveau de la zone d'éboulement, brouillard trop important pour permettre une bonne corrélation, image avec des éclairages très différents, ...). En observant les images et leurs histogrammes respectifs, il s'avère que la valeur de différence de pixel pour le bleu est beaucoup plus élevée que pour les images qui étaient prises en hiver. Un nouveau test a donc été imaginé, cette fois-ci basé sur la différence de bleu entre les deux images. De plus, pour trier les photos qui ont des éclairages différents, il a été choisi de d'abord comparer les photos à

trier avec une photo bien éclairé (plutôt claire) et ensuite, pour les photos qui ne seraient pas de bonne qualité avec une photo claire, de faire le test avec une photo peu éclairé (plutôt sombre).

Ainsi, pour cette méthode, les photos à trier sont d'abord comparé avec une photo « éclairé ». Si plus de 8 % des pixels ont un niveau de différence de bleu supérieur à 50 ou que plus de 10 % des pixels ont un niveau de différence de rouge ou de vert supérieur à 50, la photo n'est pas retenue. Les photo non retenues sont alors comparé à une photo plus sombre avec les mêmes tests que pour la photo « éclairé ».

En suivant ce modèle, les tests pour trier les photographies prises en hiver deviennent convenables mais, en revanche, les tests pour trier les photographies prises en été n'était pas assez bon (trop d'images de mauvaises qualités était récupéré).

### c. Méthode dite de « différence d'image »

Une autre solution a donc été envisagée pour trier les photos d'hiver. En observant les résultats des tests précédents, il a été constaté que de nombreuses images étaient considérées comme bonnes alors qu'elles avaient un nuage qui cachait en une grande partie de la photo. Une nouvelle méthode a donc été développée, toujours en effectuant la différence entre les deux images, mais cette fois-ci en récupérant la valeur réelle (et non absolue comme fait dans les tests précédents).

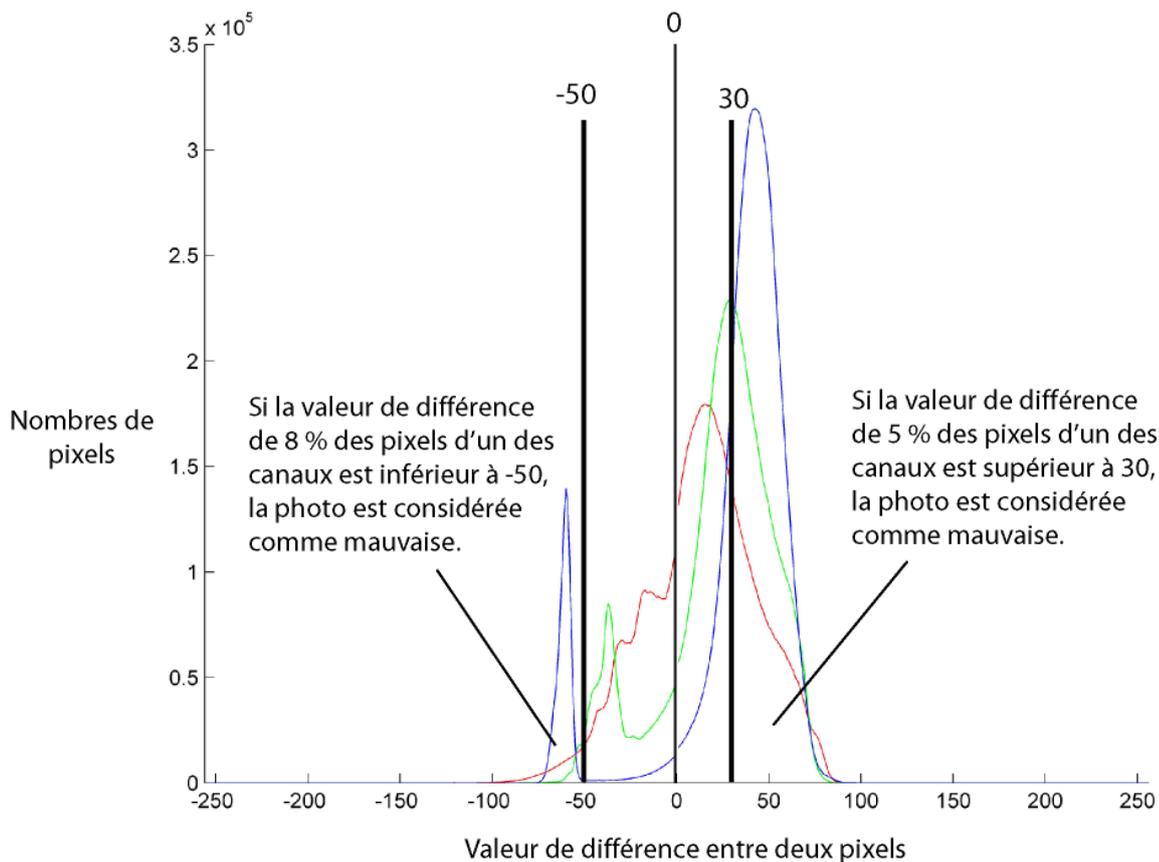


Figure 32 : Exemple d'un histogramme de différence entre deux images.

Cette fois-ci, une image est considérée comme de bonne qualité si moins de 5 % de ses pixels sont supérieurs à une valeur de différence de 30 et si moins de 8 % de ses pixels sont inférieurs à une valeur de différence de -50 (cf. figure 32). Après avoir réalisés des tests avec cette méthode, il a été observé que les photos avec des nuages n'étaient pas considérés comme bonnes mais que malgré tout, cette méthode ne suffisait pas à classer toutes les photos.

#### ***d. Présentation de l'algorithme retenue pour la méthode de tri automatique***

Pour tenir compte des spécificités des différentes saisons, il a été choisi de « combiner » les différentes méthodes exposées précédemment. L'algorithme de tri retenu pour la méthode de détection est donc le suivant :

-si au moins deux des trois méthodes indique que l'image est de bonne qualité, alors l'image est considéré comme de bonne qualité et est donc conservé pour le reste de la méthode de détection.

-si au moins deux des trois méthodes indique que l'image est de mauvaise qualité, alors l'image est considéré comme de mauvaise qualité et ne sera pas utilisé pour le reste de la méthode de détection.

Les tests correspondant à cet algorithme sont assez bon (moins de 5 % des photos étaient mal classés) et c'est donc celui-ci qui a été retenue pour la méthode de détection final.

## V. Le recalage

Pour avoir une corrélation qui soit la plus précise possible, il est important de recalibrer les photos entre elles de façon à ne pas détecter de mouvement qui serait dû à un mauvais positionnement des images.

Pour recalibrer deux photos entre elles, il faut choisir un point fixe que l'on retrouve sur chaque image. Pour le cas de la zone de Séchilienne, il a été choisi d'utiliser le pylône électrique situé en haut de la photo, sur la zone stable. Le principe est de faire une corrélation sur la zone où se trouve le pylône, avec une fenêtre de corrélation très grande. Cela permet ainsi de faire la recherche d'une zone grande (ici, contenant le pylône) dans une zone réduite, et donc d'obtenir une seule valeur de déplacement de gauche à droite et une seule valeur de déplacement de bas en haut. Ces deux valeurs obtenues correspondent au décalage existant entre les deux photos, et sont donc les valeurs nécessaires pour recalibrer les deux images entre elles.

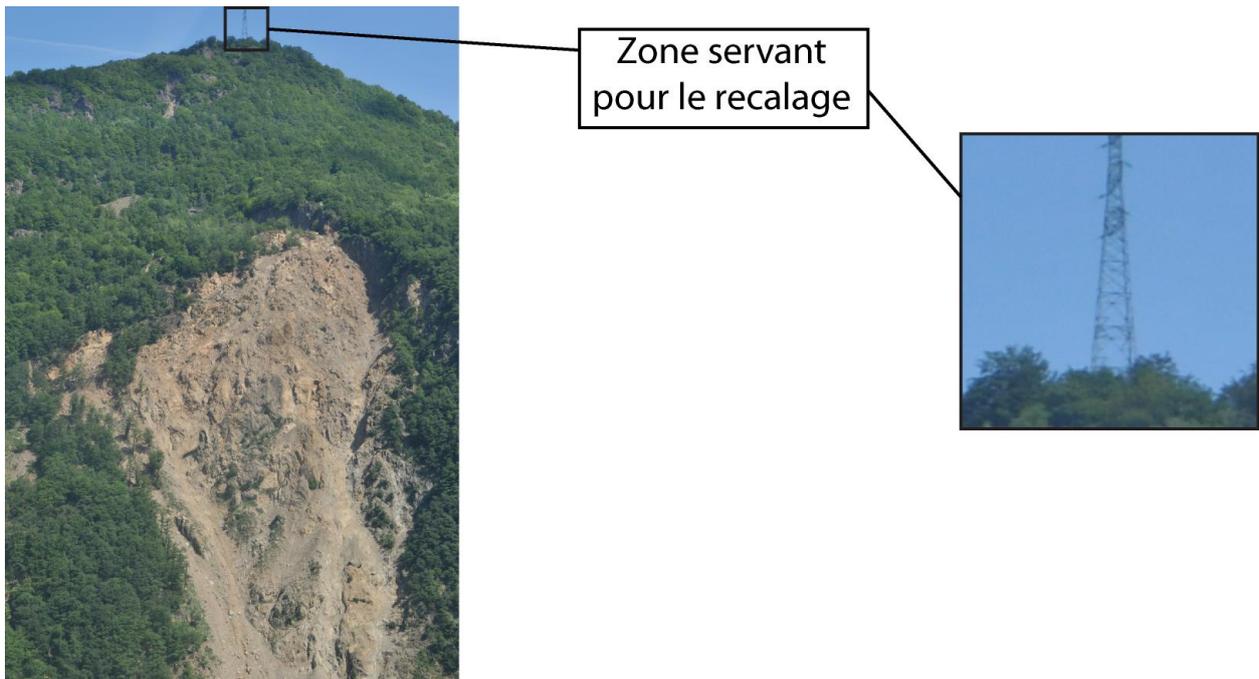


Figure 33 : Localisation de la zone utilisée pour faire le recalage.

L'ensemble des tests réalisés en utilisant ce procédé (appelé corrélation de phase) donne des valeurs de décalage qui correspondent très bien au décalage observé manuellement. La seule contrainte pour que la valeur de déplacement soit exploitable est qu'il faut que la zone fixe choisie pour le recalage soit bien visible. Par exemple, dans le cadre de l'étude de Séchilienne, cela implique que les photos où un nuage cache le pylône ne peuvent être recalées.

Pour résumer l'algorithme du recalage, d'abord, on fait la corrélation entre les deux images pour quantifier la distance nécessaire à recalibrer. Ensuite, on recalibrer les images entre elles. Si la distance obtenue est supérieure à 20 pixels, cela signifie que le recalage n'est pas possible entre les deux images. Cela n'empêche pas d'appliquer le reste de la méthode de détection mais il faut alors tenir compte que la précision obtenue sur le déplacement à la fin n'est pas la même (le mouvement peut être accentué ou au contraire diminuer par cette absence de recalage).

## VI. L'analyse des résultats obtenus

Une fois que la quantification des déplacements a pu être faite, il faut désormais passer à ce qui sera la dernière étape de la méthode de détection : l'analyse des résultats obtenus.

Avant de chercher à détecter les mouvements importants obtenus à l'aide de la corrélation, on réalise la moyenne des déplacements horizontaux et verticaux puis on en déduit le mouvement correspondant. Pour réaliser cette étape, les images correspondant aux résultats des corrélations (déplacements horizontaux et verticaux) sont parcourues par un algorithme qui, pour chaque pixel, va récupérer la valeur moyenne dans un cercle de rayon de 10 pixel. Ensuite, le mouvement réel correspondant est calculé à l'aide des valeurs de déplacement horizontales et verticales. Cette étape permet ainsi d'homogénéiser le résultat obtenu mais également de diminuer le bruit obtenu en récupérant des valeurs moyennes.

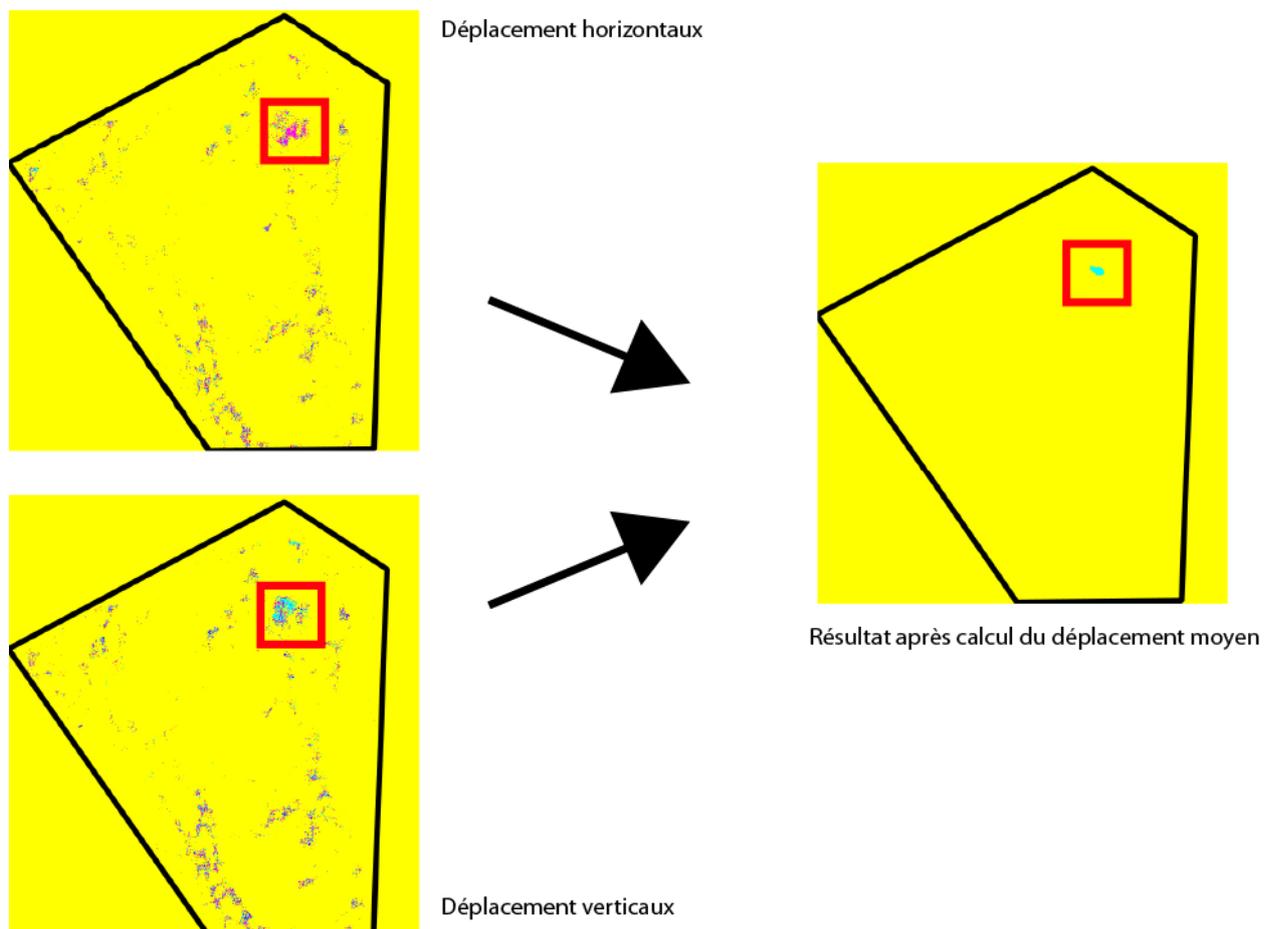


Figure 34 : Exemple de calcul du déplacement moyen à entre le 16 et le 20 juillet 2011.

La figure 34 montre ce le déplacement moyen qui aurait été observé pour le cas de l'éboulement en juillet 2011. Le zones en mouvement (encadrée en rouge) est toujours visible et aurait ainsi été détecté grâce à la méthode.

Après une série de test sur des photos, il a été décidé de considéré un mouvement important à partir de 4 pixel de déplacement (quand le recalage a été possible) ce qui correspond à environ 50 cm de déplacement réel.

## VII. Les limites de cette méthode de détection

Nous avons pu voir précédemment quelles sont les différentes étapes qui constitueront la méthode de détection finale ces dernières ont néanmoins certaines contraintes qui empêchent la méthode d'être optimal dans toutes les circonstances.

Par exemple, l'efficacité de la méthode dépend directement de la qualité des photos, qui elle-même dépend des conditions météorologiques lors de la prise de la photographie. Or, très souvent (en particulier dans le cas du versant de Séchilienne), les éboulements et mouvement de masse sont dus à une importante activité de la pluie. De même, le cas d'un éboulement majeur est envisagé dans les d'une forte précipitation étalé sur plusieurs jours (Panet, 2009). Les photos de mauvaises qualités étant retirées à l'aide du tri automatique (cf. partie IV), la méthode de détection ne pourra pas être appliqué aux photos dans de cas et donc il ne serait pas possible de détecter des mouvements produits dans ces conditions.

De même, une autre limite de cette méthode est qu'elle s'appuie en particulier sur la qualité de la photo de référence. En effet, pour trier les images ou quantifier les déplacements, il faut utiliser une photo qui est préalablement choisi par un utilisateur. Cette photo est choisie parmi les dernières photographies prises et elle doit être de bonne qualité pour ne pas dégrader les résultats de la méthode. Un problème se pose donc s'il est impossible des sélectionner une nouvelle photo (car de trop mauvaise qualité) et donc la méthode ne peut plus être appliqué.

Ensuite, cette méthode de détection ne peut détecter que les déplacements supérieurs à une valeur minimale. En effet, il n'est pas possible de choisir de détecter tous les mouvements car malgré le recalage, il est possible qu'il reste encore un très léger décalage (de l'ordre de 1 pixel) qui influencerait. De plus, il est possible que le recalage ne puisse être fait (quand la zone servant à faire le recalage n'est pas visible sur une des photos). Dans ce cas là, le calcul du déplacement par corrélation de phase est quand même effectué mais pour tenir compte de l'absence de recalage, il faut augmenter la valeur du déplacement minimale détectable pour ne pas être amené à détecter un mouvement qui au final ne serait pas important.

Une autre limite de ce programme est que la quantification des déplacements est faite à l'aide de photographie, c'est-à-dire avec une représentation en deux dimensions de la réalité. Ainsi, il est possible qu'il y est certains mouvements qui ne seraient pas détectable ou qui sembleraient beaucoup moins important que le mouvement réelle. Ce serait le cas de tous les mouvements orientés en direction de l'appareil photographique.

Enfin, malgré le tri et le recalage, il est possible que certain résultat ne soit pas correct à cause de problème externe à la méthode de détection. Par exemple, si un problème intervient directement au niveau de l'appareil photographique (décalage de l'appareil de sa position d'origine, problème lors du transfert des images vers l'ordinateur qui effectue la méthode, ...). De même, il n'existe pas encore de moyen de vérifier les résultats d'une corrélation. En effet, il est possible que le bruit soit tellement important sur le résultat final que cela fausse le déplacement calculé. Il est donc important que les résultats donnés par le programme puissent être vérifiés par une personne, et il faut donc conservé les images d'origine en plus du résultat final.

## **Conclusion et perspective d'étude**

Ce stage a permis de définir les différentes étapes de la méthode : le recalage, le tri des photographies, la quantification des déplacements et l'analyse des résultats obtenus. Ainsi, après assemblage de ces étapes, un dispositif fonctionnel de la méthode de détection a pu être mis en place. La méthode a ainsi pu être testée sur un échantillon de photographies prises entre décembre 2010 et novembre 2011 et les résultats obtenus sont assez bon. Il reste maintenant à tester cette méthode en situation réelle pour vérifier son efficacité et voir comment il serait possible de l'optimiser. En effet, certains points comme trouver une manière de définir la qualité d'une corrélation obtenue (c'est-à-dire comment mesurer le bruit obtenue) et ainsi « juger » de la pertinence de la corrélation.

## **Remerciement**

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé et qui m'ont permis d'effectuer ce stage dans les meilleures conditions possibles.

Je tiens à remercier plus particulièrement Jean-David Vernhes pour m'avoir aidé dans la recherche de ce stage, et Marie-Aurélien Chanut pour m'avoir proposé ce sujet et m'avoir accueilli et guidé durant ce stage.

## Bibliographie

- **Antoine P., Giraud A. et Vengeon J-M.** (1998), Le versant instable des ruines de Séchilienne, Rapport géologique, Université Joseph Fourier, L.C.P.C., 46 pages.
- **Barthelet V.** (2011), Contributions à l'analyse du mouvement du versant de Séchilienne par imagerie de face, Rapport de stage, CETE de Lyon, 26pages.
- **Duranthon J-P et Effendiantz L.** (2004), Le versant instable des « Ruines » de Séchilienne, Point sur l'activité du phénomène et présentation du nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon, 20pages.
- **Durville J., Kasperski J. et Duranthon J-P.** (2009), The Séchilienne landslide : monitoring and kinematics, 7pages.
- **Kasperski J.** (2010), Détection des mouvements de versant à partir d'images terrestres, CETE de Lyon, 36 pages.
- **Kasperski J.** (2008), Confrontation des données de terrain et de l'imagerie multi-sources pour la compréhension de la dynamique des mouvements de versants, thèse de doctorat : Université Lyon 1, 267 pages.
- **Leprince S., Ayoub F. et Keene L.** (2007), Cosisy (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation), California Institute of Technology.
- **Panet M., Bonnard C., Degoutte G., Desvarreux P., Durville J-L et Rochet L.** (2009), Scénarios d'évolution du versant des Ruines de Séchilienne - Rapport du collège d'experts, « Rapport Panet III », 17 pages.
- **Panet M., Bonnard C., Desvarreux P., Durville J-L. et Rochet L.** (2004), Versant instable des Ruines de Séchilienne – Rapport du collège d'experts, « Rapport Panet II », 13 pages.
- **Panet M., Bonnard C., Lunardi P. et Presbitero M.** (2000), Expertise relative aux risques d'éboulement du versant des ruines de Séchilienne – Rapport du collège d'experts, « Rapport Panet I », 24 pages.
- **Pothérat P.** (2009), Néotectonique et grands mouvements de versant, Le cas de Séchilienne, CETE de Lyon, 11 pages.
- **Pothérat P. et Alfonsi P.** (2001), Les mouvements de versant de Séchilienne (Isère), Prise en compte de l'héritage structural pour leur simulation numérique, Revue française de géotechnique, n° 95/96, 15 pages.

## Liste des Figures

Figure 1 : Carte de localisation des ruines de Séchillienne (carte IGN). .....	3
Figure 2 : Carte structurale de la zone de Séchillienne (Antoine <i>et al</i> , 1998). .....	4
Figure 3 : Configuration structurale des Ruines de Séchillienne d'après Potherat et Alfonsi (2001). .....	5
Figure 4 : Localisation des principaux éboulements du 21 juillet 2011. ....	8
Figure 5 : Localisation des éboulements produits entre le 20 et le 21 juillet 2011. ....	9
Figure 6 : Localisation des éboulements produits entre le 21 et le 22 juillet 2011. ....	9
Figure 7 : Localisation de la zone de déplacement anormale entre le 16 et le 20 juillet 2011. ....	10
Figure 8 : Exemple théorique d'une corrélation entre deux images. ....	12
Figure 9 : Localisation de la zone corrélée. ....	13
Figure 10 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 20 juillet 2011. ....	13
Figure 11 : Déplacement haut/bas entre le 16 et le 20 juillet 2011. ....	13
Figure 12 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet 2011. ....	14
Figure 13 : Déplacement haut/bas entre le 20 et le 22 juillet 2011. ....	14
Figure 14 : Déplacement Est/Ouest obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à des horaires différents (10h45 et 13h45). ....	16
Figure 15 : Déplacement Est/Ouest obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à des horaires similaires (13h45). ....	16
Figure 16 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à 10h45. ....	17
Figure 17 : Déplacement Est/Ouest entre le 20 et le 22 juillet obtenue à l'aide d'une corrélation faite entre deux images prises à 16h45. ....	17
Figure 18 : Photographie du 16 juillet 2011 à 10h45. ....	18
Figure 19 : Photographie du 22 juillet 2011 à 10h45. ....	18
Figure 20 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 22 juillet. ....	18
Figure 21 : Photographie du 14 juillet 2011 à 10h45. ....	19
Figure 22 : Photographie du 16 juillet 2011 à 10h45. ....	19
Figure 23 : Déplacement Est/Ouest entre le 14 et le 16 juillet. ....	19
Figure 24 : Photographie du 16 juillet 2011 à 13h45. ....	20
Figure 25 : Photographie du 24 juillet 2011 à 13h45. ....	20
Figure 26 : Déplacement Est/Ouest entre le 16 et le 22 juillet. ....	20
Figure 27 : Photographie du 17 février 2010 à 16h27. ....	21
Figure 28 : Photographie du 30 janvier 2010 à 17h15. ....	21
Figure 29 : Déplacement Est/Ouest entre le 30 janvier et le 17 février. ....	21
Figure 30 : Exemple de recadrage d'une photographie. ....	23
Figure 31 : Exemple d'un histogramme de différence absolue entre deux images. ....	24
Figure 32 : Exemple d'un histogramme de différence entre deux images. ....	26
Figure 33 : Localisation de la zone utilisée pour faire le recalage. ....	28
Figure 34 : Exemple de calcul du déplacement moyen à entre le 16 et le 20 juillet 2011. ....	29



**CETE de Lyon**  
25 avenue François Mitterrand  
Case n°1  
69674 BRON Cedex  
Tél. : 04 72 14 30 30  
Fax : 04 72 14 30 35  
[CETE-Lyon@developpement-durable.gouv.fr](mailto: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](mailto:dll.cete-lyon@developpement-durable.gouv.fr)

