



INTERREG III - RiskHydrogeo
*Risques hydro-géologiques en
montagne : parades et surveillance*
8 juin 2005



Apport de l'imagerie multi-sources à la compréhension de la dynamique des mouvements de versants

Etudiant en thèse : J. Kasperski*
Encadré par : C. Delacourt, P. Allemand (*Université Claude Bernard, Lyon I*)
P. Potherat, J.-L. Durville (*Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon*)[†]

Contexte et objectifs

Les mouvements affectant certains versants rocheux, comme celui de Séchilienne (Isère) par exemple, sont le résultat de mécanismes complexes encore mal compris. Les techniques habituellement utilisées pour la surveillance d'un site instable, bien que constituant une solution efficace pour la gestion des risques au quotidien, ne sont pas optimisées pour une compréhension générale des mécanismes de contrôle. En effet, ces techniques ne donnent pas d'information sur les mécanismes de rupture dont la compréhension repose sur l'analyse des interactions entre les différents compartiments composant le site actif.

L'application de nouveaux procédés d'acquisition et de traitement d'images permet la visualisation et la quantification des déformations : cette démarche demande à être testée et validée ainsi que son couplage avec l'élaboration de modèles de comportement basés sur la connaissance géologique et structurale du versant. L'objectif final réside en la construction d'outils opérationnels de gestion du risque intégrant différentes dimensions temporelles.

1. Les méthodes actuelles de suivi des mouvements de terrain

Les méthodes conventionnelles de suivi et de surveillance des mouvements de versants reposent sur l'utilisation de capteurs qui renseignent ponctuellement sur la déformation, les déplacements du massif (extensomètres, fissuromètres, géodésie classique ou spatiale) ou la rotation (inclinomètres). Certains capteurs demandent pour certains l'intervention humaine sur le terrain afin de recueillir les données, d'autres sont sensibles aux conditions météorologiques : ils ne permettent pas toujours un suivi continu de l'évolution du massif. Cette discontinuité dans la surveillance ne permet pas d'optimiser la prévention, la protection et la gestion à court terme des mouvements rapides de massifs rocheux. Afin de pallier cet inconvénient, depuis quelques années un prototype de radar sol-sol, qui permet de suivre les déplacements de réflecteurs, est installé sur le site de Séchilienne et fonctionne de façon satisfaisante.

Ces méthodes (*Cf. Fig. 1*) sont donc bien adaptées à la surveillance et au suivi opérationnel des mouvements rocheux. Cependant, bien que livrant de précieuses indications sur la cinématique des mouvements, elles ne permettent pas d'accéder à la cartographie du champ de déplacement global en planimétrie et en altimétrie car elles ne livrent que des mesures ponctuelles. D'autre part, les méthodes conventionnelles sont classiquement mises en œuvre *a posteriori*, une fois les mouvements détectés sur le terrain et sur les secteurs les plus mobiles des mouvements de terrain actifs et sur des périodes limitées. Il n'est pas toujours possible d'accéder aux vitesses de déplacement sur différentes échelles de temps. Ainsi, il est difficile de comprendre les mouvements dans leurs globalités de même que la

* Contact : 04 72 14 32 75 ou 04 72 44 62 40.

Mailto : johan.kasperski@equipement.gouv.fr (J. Kasperski).

[†] Ce projet s'intègre dans l'opération « Risques Rocheux » du programme de recherche du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) « Risques naturels, vulnérabilité des ouvrages et des réseaux ».



Figure 1 - Dispositifs d'auscultation classique. Exemple de Séchilienne

manière dont ils interfèrent entre eux spatialement. Les échelles de temps (sur les moyen et long termes) ne peuvent être prises en compte avec ces méthodes puisque par exemple pour le site de Séchilienne l'auscultation conventionnelle du site n'a été mise en place qu'à partir de 1985.

L'imagerie est une technique complémentaire car elle autorise une perception synoptique avec différentes échelles de temps (des archives sont parfois disponibles) et d'espace.

2. L'imagerie multi-sources pour l'étude des massifs rocheux

La compréhension des mécanismes qui contrôlent les mouvements de terrain passe par la mesure et le suivi précis de la morphologie, de la topographie, de leurs évolutions et des transferts de matière des zones instables. Si le mouvement étudié est complexe dans son mécanisme, une approche multi-échelles est nécessaire afin d'adopter différents points de vue spatiaux et temporels pour en comprendre les différents aspects.

▪ Techniques émergentes

La télédétection pallie les problèmes de mesures ponctuelles et d'intervention sur le site d'opérateurs. Les nouvelles techniques de traitement d'images (corrélation optique, interférométrie) qui sont utilisées depuis plus de dix ans, permettent la comparaison des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Ces nouveaux procédés utilisent le traitement d'images multi-sources (images numériques, images satellites haute résolution, balayage laser associé à une image numérique...) pour visualiser et quantifier les déformations et déplacements des massifs rocheux instables. Puisqu'ils permettent la visualisation des interactions entre les différents compartiments composant le site actif, ils peuvent permettre d'accéder à la compréhension des mécanismes mis en jeu. Combinées à l'étude géologique et aux mesures sur site, les informations recueillies sur le champ de déformation à différentes échelles de temps et d'espace peuvent ainsi entrer dans l'élaboration de modèles de comportement du massif, apportant une meilleure couverture spatiale et temporelle des mouvements, ce qui est le but recherché.

▪ La problématique temporelle et les différents moyens d'acquisition d'images

L'utilisation de la télédétection pour la détection et la quantification des mouvements se heurte à trois principales difficultés : la résolution spatiale, la résolution temporelle et l'historique des données disponibles. Chaque moyen d'acquisition présente ses avantages et ses inconvénients mais aucun ne constitue l'unique réponse pour un suivi quantitatif ET historique des mouvements de versants.

➤ Les images satellites

Alors que les images satellites optiques permettent une évaluation antérieure des mouvements, leur résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de mètres les limite à un rôle de détection de mouvements plutôt qualitatif que quantitatif.

Au contraire depuis 1999, les nouveaux satellites IKONOS et QUICKBIRD ne sont en service que depuis quelques années mais ils fournissent des images de résolution métrique ou inframétrique adaptées aux suivis morphologique et cinématique des zones instables :

✓ Satellite IKONOS

Le satellite IKONOS, lancé en septembre 1999, acquiert des images Noir et Blanc à 1 mètre de résolution et des images couleurs (4 bandes : RGB et proche infrarouge) à 4 mètres de résolution. Les images couvrent une surface de 11 km par 11 km et le satellite étant programmable et l'instrument de prise de vue orientable, la revisite d'un même site peut être réalisée en moins de trois jours.

✓ Satellite QUICKBIRD

Le satellite QUICKBIRD, lancé en octobre 2001, acquiert des images Noir et Blanc à 60 centimètres de résolution et des images couleurs (4 bandes) à 2.4 mètres de résolution. Les images couvrent une surface de 16.5 km par 16.5 km.

✓ Satellite SPOT 5

Le satellite SPOT 5 représente un compromis : lancé en mai 2002, il acquiert des images Noir et Blanc à 2 mètres de résolution en mode panchromatique[‡] et des images couleurs (4 bandes) à 10 mètres de résolution. Son cycle orbital est connu et est de l'ordre de quelques dizaines de jours ce qui assure une bonne répétitivité. La prise de vue stéréoscopique avant-arrière facilite les réalisations de Modèles Numériques de Terrain (MNT) puisque les différences entre les deux clichés stéréoscopiques sont minimales contrairement à deux clichés pris à des jours différents.

➤ Les images aériennes (type IGN)

Les images acquises par l'IGN (Institut Géographique National) sont adaptées au suivi des mouvements de versant de par leur résolution spatiales de l'ordre du mètre et surtout de par leur répétitivité temporelle de cinq ans environ. Ces images stéréoscopiques permettent d'avoir accès à l'état des versants auscultés depuis une cinquantaine d'années.

➤ Les missions aériennes spécifiques

Le développement des caméras numériques et des nouveaux vecteurs d'acquisition permettent d'adapter les échelles et les fréquences d'acquisitions des prises de vues. L'utilisation d'un hélicoptère équipé d'un appareil photographique numérique couplé à des gyroscopes et à un récepteur GPS (Global Positioning System) permet de situer les prises de vues dans l'espace et en facilite l'exploitation. Ce même dispositif peut être envisagé avec d'autres vecteurs tels que les drones ou encore les hélicoptères téléguidés.

➤ Les prises de vues au sol

Les prises de vues au sol offrent l'avantage d'être plus faciles à mettre en œuvre bien que n'ayant pas le même champ de visibilité que les prises de vues aériennes et la fréquence d'acquisition est modulable.

Le laser photogrammétrique permet un gain technologique important : disparition de la prise de vue, de la restitution photogrammétrique et indifférence aux conditions d'éclairage. Le capteur numérique acquiert un nuage de plusieurs millions de points en trois dimensions avec une densité pouvant aller jusqu'à plusieurs points au millimètre carré (dépendant de la distance d'acquisition). Ses limites principales sont la portée du télémètre (deux kilomètres sans réflecteurs selon les appareils) et l'angle d'incidence de l'axe de visée par rapport à la surface.

[‡] *Panchromatique* : désigne un instrument ou un mode de prise de vue sensible sur l'ensemble du rayonnement visible, c'est-à-dire à toutes les couleurs. Sur Spot, ce mode est utilisé pour obtenir des images en noir et blanc.

Dans le cadre de ce travail de thèse, la société ATM 3D se charge des acquisitions au scanner laser. Elle utilise le scanner Riegl LMS Z420i (Cf. Fig. 2) équipé d'un appareil photographique numérique de 6 millions de pixels afin d'obtenir une image colorée de la représentation 3D obtenue par le semis de points. La portée maximale pratique constatée est de 500 mètres, le champ d'acquisition de 360° et la résolution angulaire maximale de 0.0025° (soit un point tous les 4 millimètres à 100 mètres de distance).



Figure 2 – Scanner Riegl LMS Z420i utilisé par la société ATM 3D.

3. Stratégie d'auscultation

▪ Problématique

Il n'existe pas de solution « toute faite » pour analyser et modéliser le comportement d'un versant : quelle(s) technique(s) d'imagerie utiliser pour quel type de versant ? Quelles sont leurs limites dans une perspective de modélisation ? Quelle est leur fiabilité ? Comment prendre en compte tous les paramètres, et ceci de manière *couplée* lors de la modélisation ?

Ainsi, l'un des buts intrinsèques de ce travail est d'arriver à proposer une méthodologie d'investigation pour la modélisation des mouvements de versant en fonction de conditions de site à définir.

▪ Objectifs

Plusieurs techniques de corrélation citées précédemment (images aériennes, spatiales, drone, laser photogrammétrique ou photos fixes) ont été testées au Laboratoire des Sciences de la Terre de Université Lyon I sur le glissement rocheux de la Clapière dans les Alpes-Maritimes (Cf. Casson, B.) offrant chacune avantages/inconvénients. La transposition et l'exploitation de ces techniques sur d'autres mouvements de versant rocheux doit permettre de mettre en valeur les apports et la complémentarité des méthodes de corrélations optiques par rapport aux techniques conventionnelles. Sur un plan plus opérationnel, leur capacité à livrer des informations en temps réel est à tester afin de déterminer si elles rendront les auscultations, considérées aujourd'hui comme conventionnelles, obsolètes dans le futur.

▪ Démarche

Puisque les nouvelles techniques de traitements d'images permettent d'obtenir le champ de déplacement à différentes échelles de temps et d'espace, l'idée réside dans leur couplage un à un en fonction des caractéristiques des sites étudiés.

Les données géométriques et cinématiques déduites, associées aux informations structurales acquises sur le terrain, fournissent de bonnes contraintes sur les paramètres internes des glissements de terrain pour leur modélisation et donc leur compréhension. La modélisation numérique en 2D et en 3D (au moyen par exemple des codes de calcul UDEC et/ou FLAC 3D) intégreront ces données afin d'analyser les effets de facteurs externes et de tester les modèles sur les mesures ponctuelles réalisées selon des moyens d'acquisition conventionnels.

La démarche de modélisation envisagée pour l'instant pourrait être :

- dans un premier temps, la géométrie de surface à un instant donné est reconstruite et la géométrie profonde maillée en se basant sur les données du modèle structural ;

- ensuite, les paramètres mesurés et estimés (rhéologique et structuraux), sans aucun doute entachés d'incertitudes, sont entrés dans le modèle et ajustés par une série didactique d'essais et d'erreurs. Ce calage sera fait à partir d'une période de temps sur laquelle les mouvements dans une zone à mécanisme « simple » sont bien contraints. Ceci de sorte que seuls les paramètres rhéologiques soient à caler ;

- enfin, les résultats sont comparés aux caractéristiques du mouvement en termes de vitesse et de géométrie finale, ceci sur plusieurs périodes de durées différentes et sur plusieurs zones, voire sur l'étendue complète du glissement.

Une fois le modèle calibré, des tests peuvent être réalisés sur le rôle de paramètres externes (hydrologiques, sismiques, anthropiques) afin d'évaluer leur effets sur le glissement. Ces tests pourront avoir valeur de prévision pour l'évolution du glissement et pour l'impact des aménagements dans le sens où une délimitation des zones menacées pourrait être approchée.

4. Les sites étudiés et leurs programmes d'investigation

Dans le cadre de ce travail, trois sites instables différents (Cf. Fig. 3) ont été pressentis pour mettre en œuvre les techniques évoquées précédemment. Ils diffèrent de par leurs tailles, de par les vitesses de déplacements, de par les auscultations réalisées et a priori de par les mécanismes qui les régissent.

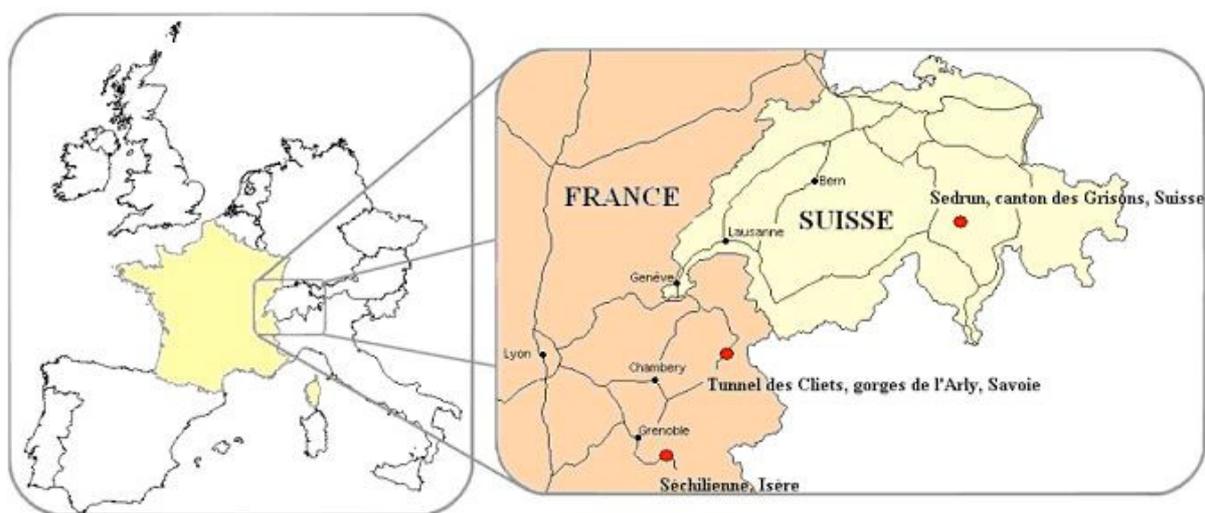


Figure 3 - Plan de situation des sites instables étudiés

▪ Le site du tunnel des Cliets, dans les gorges de l'Arly (Savoie, 73)

➤ Présentation et historique du site

Le secteur du tunnel des Cliets est situé en rive gauche de l'Arly à une dizaine de kilomètres au nord d'Ugine sur la RN 212 qui relie Ugine à Megève. Il est le siège de fréquents éboulements mettant en jeu des masses de l'ordre du millier de mètres cubes. Le dernier éboulement remonte au 8 octobre 2003 où 1500 m³ de rochers ont barré la route et bouché la tête amont du tunnel. Pareil phénomène s'était déjà produit en décembre 1996. Ce sont de tels évènements que l'on cherche à prévenir.

Suite à ces éboulements, une purge a été réalisée afin de sécuriser le site, ce qui a eu pour conséquence de rendre obsolètes les investigations réalisées depuis 1996 (extensomètres, géodésie), les capteurs ayant été détruits.

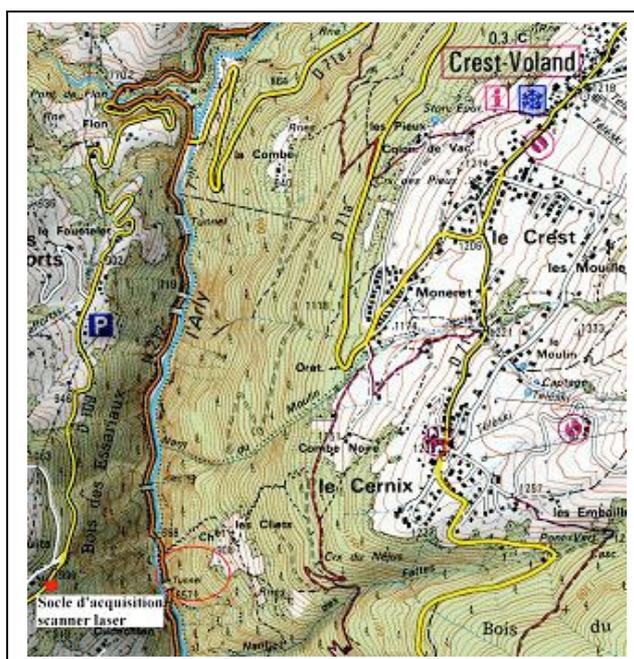


Figure 4 - Plan de situation du site du tunnel des Cliets (Savoie, 73).
Carte IGN 1/25000.

Deux missions géodésiques ont été menées après la purge début et fin septembre 2004 et laissent à penser un renouvellement des déplacements mensuels de l'ordre du centimètre en planimétrie, sous réserve du calage des mesures.

➤ Stratégie d'acquisition et d'exploitation de données

Ce site de taille modeste n'est pas adapté au suivi par imagerie spatiale car la zone active n'est pas assez large pour obtenir des résultats satisfaisants. Une mission photographique réalisée en 1997 au 1/750 autorise une vision stéréographique avant les éboulements mais aucune autre mission n'a été réalisée avant ces événements de sorte qu'on ne peut proposer d'étude à base d'imagerie avant la purge.

Toutefois, le site peut être tout à fait se prêter à investigation au scanner laser depuis le versant opposé. Un premier levé a été réalisé avant les neiges de l'hiver 2004/2005 : il constitue le point zéro pour cette technique et pour ce versant (Cf. Fig. 5).

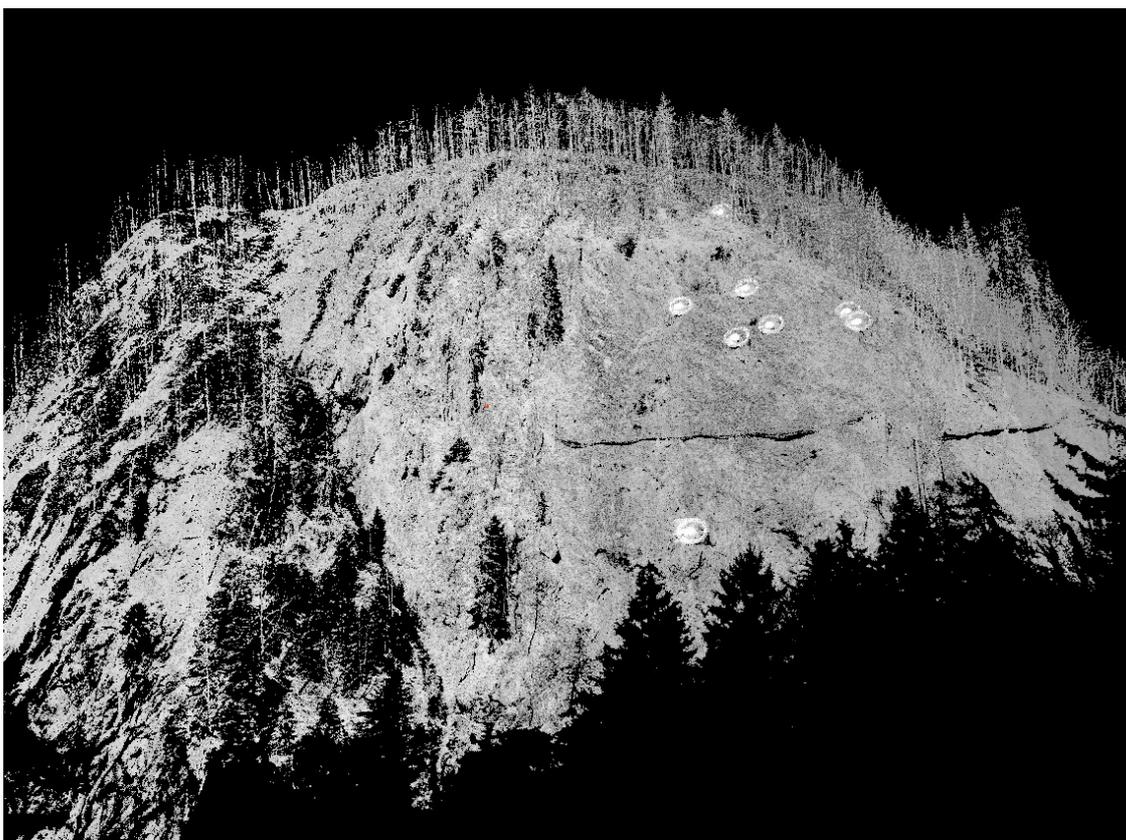


Figure 5 - Acquisition au scanner laser du site du tunnel des Cliets par ATM3D (Savoie, 73)

▪ **Le mouvement de versant de grande ampleur de Séchilienne (Isère, 38)**

➤ Présentation et historique du site

Situé dans le Nord des Alpes françaises, le site instable de la commune de Séchilienne est situé à 20 kilomètres au sud-est de Grenoble (Isère, 38) sur la route nationale 91 qui relie Grenoble à Briançon. Il affecte les pentes sud du Mont Sec (1180 mètres d'altitude) en aval de l'ancien verrou glaciaire des Thiébauds de la Romanche. Il s'étend sur 900 mètres de dénivelée pour atteindre la Romanche en rive droite. Les archives concernant ce site attestent de la connaissance de son instabilité et de son activité depuis 1720. En ce qui concerne l'activité visible : les chutes de blocs et de pierres dévalent le « couloir des Ruines ». A partir de l'hiver 1985, le versant a montré une recrudescence de son activité et c'est depuis cette date qu'il est surveillé en continu. Différents scénarios d'évolution ont été étudiés pour évaluer et prévenir les dommages : écroulements de différentes tailles pouvant entraîner : la formation d'un barrage, la rupture de ce barrage, des inondations, l'obstruction de la RN

91 qui constitue l'itinéraire principal d'accès au secteur de l'Oisans (ville de Bourg d'Oisans et deux importantes stations de ski : l'Alpe d'Huez et les Deux Alpes).

➤ Stratégie d'acquisition et d'exploitation de données

Le site est instrumenté depuis près de 20 ans : il est ainsi doté d'une banque de données très fournie sur la dynamique et la cinématique des mouvements. Ces données, outre une bonne connaissance de la géologie du site, rassemblent des mesures géodésiques (optiques, radar et GPS), extensométriques, couplées à des données météorologiques et de valeurs de débit de la Romanche.

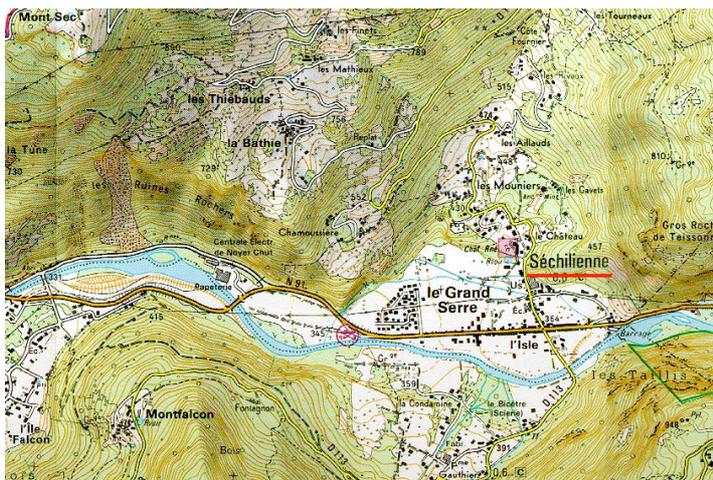


Figure 6 - Plan de situation des Ruines de Séglienne (Isère, 38). Carte IGN 1/25000.

Concernant l'investigation du site par les méthodes liées à l'imagerie, plusieurs axes sont développés afin d'avoir à disposition différentes échelles de temps et d'espace :

✓ Utilisation des images IGN

Les archives des photographies IGN permettent une vision du site depuis 1937. Même si la qualité des photographies les plus anciennes n'est pas la meilleure qui soit, ces photographies constituent précieux témoignage sur l'évolution à long terme du mouvement.

A partir de l'application d'une méthodologie (Casson, 2004) développée par le laboratoire de Sciences de la Terre (Université Claude Bernard - Lyon I), on peut générer automatiquement des MNT en se basant sur des images aériennes stéréoscopiques. Une fois ces MNT construits, l'extraction de données nécessaires à l'étude des glissements de terrain peut se faire par la génération d'images orthorectifiées.

✓ Utilisation d'images satellite Haute Résolution (HR)

L'utilisation des images satellites HR va permettre d'obtenir une vision des déplacements à l'échelle du site (et non plus dans de petites zones) avec une précision métrique. Ces images suivront le même traitement que les images IGN pour leur exploitation à ceci près que la méthodologie devra être adaptée au cas des images spatiales (différence de référentiel par rapport aux images aériennes, prises par des vecteurs aéroportés). Les commandes de ces images ont été lancées.

✓ Scanner laser dans la zone active

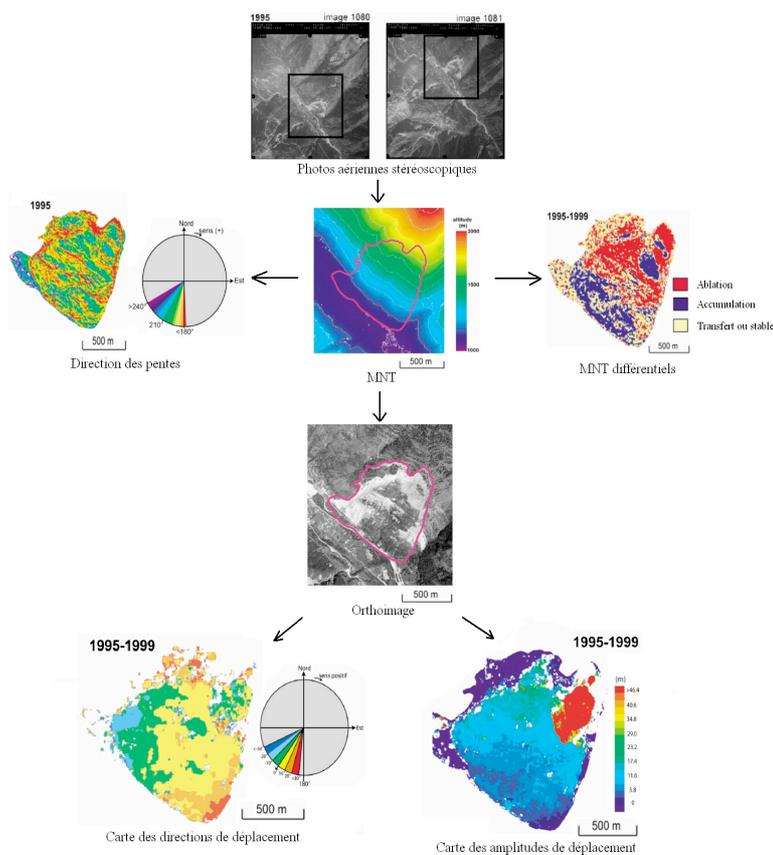
Deux sites d'acquisition ont été prévus pour mieux appréhender les mouvements dans la zone active du "couloir des Ruines". Le premier est situé de façon à visualiser le basculement des lanières dans le couloir. Le second est placée en partie supérieure du "couloir des Ruines" afin de quantifier le déplacement vertical dû au tassement.

✓ Utilisation d'un hélicoptère téléguidé comme vecteur d'acquisition d'images

Une alternative consiste à utiliser un hélicoptère radiocommandé photogrammétrique. Il a l'avantage d'être facilement mis en oeuvre mais n'offre pas une vision globale des sites étudiés. Des tests sur son utilisation seront réalisés durant la thèse ici présentée.

Le laboratoire de Sciences de la Terre de Lyon I (Casson, 2004) a développé une méthodologie pour la génération automatique de MNT à partir d'images aériennes N&B, stéréoscopiques et acquises en prise de vue verticales. Elle a mis en place également une méthodologie d'extraction de données nécessaires à l'étude des glissements de terrain basé sur des images orthorectifiées sur les MNT construits par la méthodologie précédente.

A partir des photos aériennes stéréoscopiques, on obtient un Modèle Numérique de Terrain. De ce modèle, on obtient les pentes, leurs directions et la concavité/convexité des lieux. Si l'on dispose de plusieurs couples de photos aériennes à des instants différents, on peut obtenir des informations concernant l'évolution du glissement en réalisant des MNT différentiels (variation verticales, bilan de volume). De plus, puisque l'on dispose d'un MNT, l'orthorectification* des images peut être réalisée et ainsi que l'extraction d'autres informations concernant notamment les champs de déplacement globaux sur le site, les directions des déplacements, leurs amplitudes et leurs vitesses.



*orthorectification : une image orthorectifiée, ou orthoimage, est la projection d'une image brute dans le repère sol. Elle possède une échelle uniforme sur toute sa surface et elle est positionnée dans un repère métrique. De plus, si le MNT sur lequel elle a été déduite est orienté dans un repère sol cartographique absolu, l'image orthorectifiée l'est également).

Figure 7 - Développement de méthodologies pour l'exploitation des photographies aériennes (Casson, 2004) – Exemple de la Clapière (Alpes-Maritimes).

▪ **Le mouvement de grande ampleur de Sedrun (Canton des Grisons, Suisse)**

➤ Présentation du site

Les villages de Sedrun et Camischolas font partie de l'agglomération de Tujetsch dans la haute vallée du Rhin Antérieur (Grisons). Ils sont situés sur un vaste cône de déjection torrentiel entre 1400 mètre et 1450 mètres d'altitude. Ce cône possède la particularité d'être formé à la fois par la rivière Strem et par le Drun, torrent secondaire issu du Drun Tobel, ravin d'érosion très actif situé sous l'alpage du Cuolm da Vi, et qui traverse le centre de Sedrun dans un ravinement peu accentué, sur la partie Est du cône de déjection.

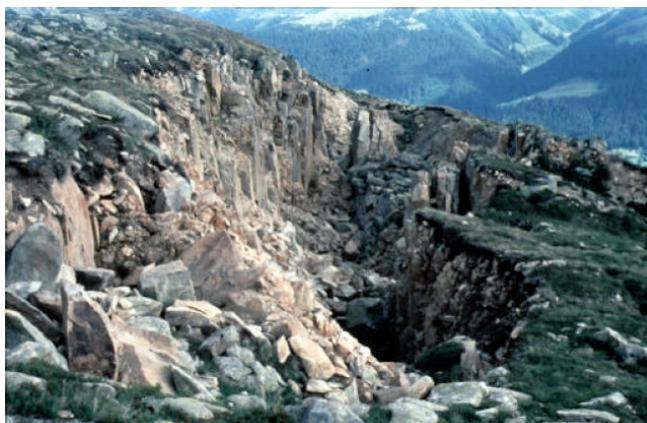


Figure 8 - Large ouverture près du sommet du Cuolm da Vi au Nord de Sedrun. Source Bonnard *et al.*, 2004.

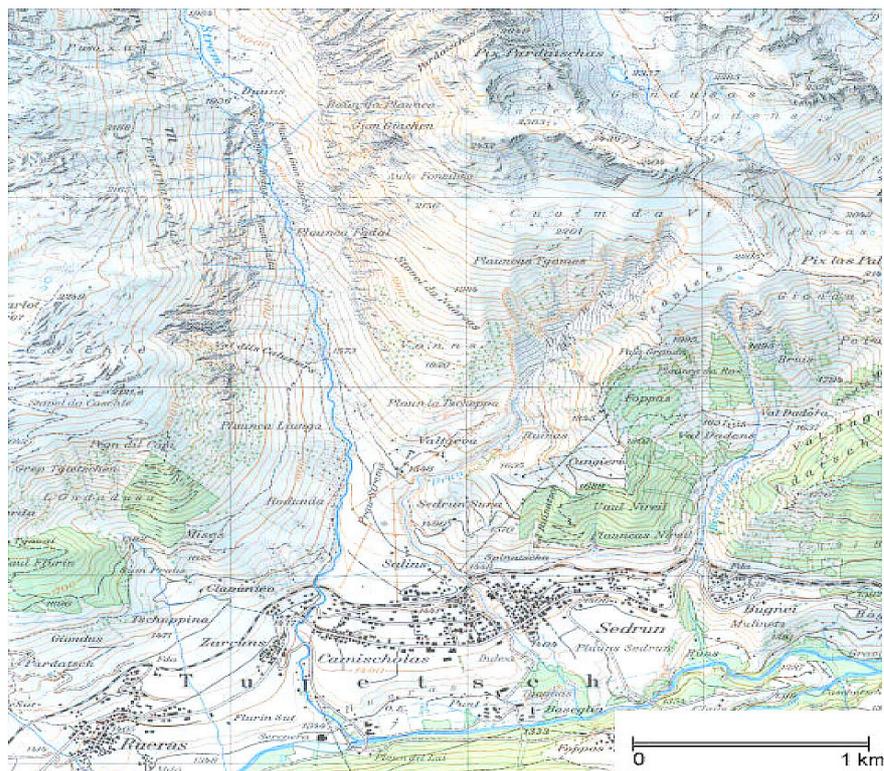


Figure 9 - Plan de situation du glissement de Sedrun. Carte SwissTopo 1/25000.

Le massif instable est situé entre 2200 mètres et 2300 mètres d'altitude et est constitué par une terrasse peu inclinée longue de 1 kilomètre. Cette terrasse est dominée par une courte crête reliant les points cotés 2458 m, 2436 m et 2404 m. Cette crête est séparée du Piz Pardatschas par un col et par la dépression de Parlets, qui constitue la limite Nord et amont du massif instable (Cf. Fig. 9)

Les études antérieures ont montré des vitesses annuelles décimétriques orientées de manière homogène plein Sud sur la majeure partie de la zone instable. Les vitesses les plus grandes ont été mesurées sur les flancs du sommet 2458m, puis sur la terrasse de Cuolm da Vi et sur les pentes entre 2000m et 2200m. Plus bas, les vitesses diminuent progressivement pour tomber à zéro vers 1700m. Elles sont presque nulles sur le versant du Val Strem et à l'est de la crevasse du Cuolm da Vi. Du fait de ces vitesses sur une zone en plateau, ce site montre des mouvements actifs spectaculaires avec des ouvertures plurimétriques (Cf. Fig. 8)

➤ Stratégie d'acquisition et d'exploitation de données

Le site a commencé à faire l'objet d'auscultations géodésiques en 1983. On dispose ainsi de données conventionnelles qui permettront de valider les investigations par télédétection.

Ce site ne possède pas de versant opposé proche, ce qui ne permet pas d'installer un dispositif tel que le scanner laser pour l'étude des mouvements.

Les images aériennes constituent là encore un bon compromis résolution spatiale – résolution temporelle.

Selon l'avancement de ces techniques, leurs validations, et l'intérêt porté par l'EPFL au site, des acquisitions au scanner laser embarqué dans un hélicoptère équipé d'une plate-forme inertielle et d'un GPS peuvent être envisagées (procédé en cours de tests à l'EPFL en Suisse).

▪ **Des compléments structuraux et géologiques**

Dans les trois cas, les modèles géologiques et structuraux seront complétés et affinés par des études sur le terrain en cours. La cohérence des résultats obtenus par ces procédés divers sera analysée et confrontée aux données instrumentales traditionnelles et aux données géologiques.

Références

- Antolin, P., 2003. Comparaison de modèles numériques de terrain. Analyse de la pertinence d'une méthode manuelle appliquée au site instable des Ruines de Séchilienne. Mémoire de DESS, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, 48 pp.
- Bonnard, C, Dewarrat, X., Noverraz, F, 2004. The Sedrun landslide. *IMIRILAND Project : Identification and mitigation of large landslide risks in Europe. Advances in risk assessment*. Balkema. pp. 227-252.
- Casson, B., 2004. Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain. Thèse, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, 280 pp.
- Vallet, J., 2002. Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des systèmes aéroportés. Thèse, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 171 pp.
- Vengeon, J.M., 1998. Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Thèse, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, Grenoble, 186 pp.