

Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres

Emmanuelle Klein, Yves Gueniffey, Stella Coccia, Pascal Bigarre

► To cite this version:

Emmanuelle Klein, Yves Gueniffey, Stella Coccia, Pascal Bigarre. Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres. Colloque "Stabilité des versants rocheux. Rock Slope Stability" (RSS 2014), Apr 2014, Marrakech, Maroc. pp.369-378. ineris-01862253

HAL Id: ineris-01862253

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01862253>

Submitted on 27 Aug 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dynamique de mouvements de versant : mécanismes de déformation complexes et analyse de données multi-paramètres

Klein Emmanuelle⁽¹⁾, Gueniffey Yves⁽²⁾, Coccia Stella⁽¹⁾, Bigarré Pascal⁽¹⁾

*⁽¹⁾Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Ecole des Mines de Nancy, Campus ARTEM, Nancy, France
(✉ Emmanuelle.Klein@ineris.fr)*

⁽²⁾Laboratoire Georesources, Ecole des Mines de Nancy, Campus ARTEM, Nancy, France

RÉSUMÉ. Dans cette communication nous présentons une solution de surveillance instrumentale déployée sur le mouvement de versant de Séchilienne depuis quatre ans. Cette solution fournit des mesures de surface ainsi que des mesures en profondeur mises à profit pour tenter 1- de mieux comprendre la réponse du versant aux sollicitations hydro-climatiques, 2- de mieux appréhender la cinématique 3D des déformations et 3- d'identifier les zones actives de rupture en profondeur. A ce stade, le retour d'expérience confirme le caractère auto-accélérateur des mécanismes de déformation et leur complexité. En effet, l'élaboration d'un modèle prédictif à partir de méthodes statistiques classiques est difficile sans modélisation des phénomènes physiques en jeu. De même, la localisation des ruptures microsismiques est délicate car les sismogrammes présentent des signatures complexes avec des arrivées d'ondes émergentes.

ABSTRACT. In this paper, we present an integrated monitoring solution that has been installed on the Sechilienne rock slope for four years. This solution provides surface measurements as well as in-depth measurements used to 1- better understand the response of the slope to hydro-climatic stresses, 2- better quantify the 3-D kinematics of the movements and 3- identify active in-depth failure zones. At this stage, the feedback confirms the existence of self-accelerating deformation mechanisms and their complex nature. Indeed, the development of a predictive model from conventional statistical methods is difficult without modelling of the physical phenomena involved. Similarly, the location of microseismic sources is difficult due to the complex signatures observed in seismograms.

MOTS-CLÉS : versant instable, système de surveillance multi-paramètres, analyse statistique, microsismicité, déplacement.

KEY WORDS: unstable rock slope, multi-parameter monitoring system, statistical analysis, microseismicity, displacement.

1. Introduction

La prévention des risques des mouvements de versants et pentes instables est problématique du fait de la complexité et de la multiplicité des mécanismes en jeu. Leur évolution est régie par des caractéristiques intrinsèques (morphologie, géologie, état de fracturation, etc.) et par des forçages extérieurs (précipitations, sismicité, etc.) ce qui complique les études et les observations en conditions réelles [HAR 96, LOL 06] ainsi que l'élaboration de modèles prédictifs. Aussi, pour faire face à la diversité et à la complexité des situations d'aléas gravitaires, la mise en œuvre de systèmes d'alerte précoce se développe de plus en plus, notamment grâce aux évolutions technologiques récentes [BIG 11]. Il est aujourd'hui courant de suivre de manière combinée, l'ensemble des interactions physiques susceptibles de précéder et déclencher le phénomène redouté [ORN 07, KLE 08].

Ces approches se heurtent toutefois à deux limites importantes. D'une part, les systèmes d'alerte précoce se limitent souvent à des observations et des mesures de surface pour le suivi des déplacements (par GPS, tachéométrie ou extensométrie) et les forçages d'ordre météorologique. Peu de systèmes permettent d'appréhender de manière continue l'évolution du massif en profondeur. Aussi, l'intégration dans les systèmes d'alerte précoce de l'écoute microsismique des ruptures de compartiments rocheux constitue une méthode prometteuse [SEN 03] bien que son apport dans ce contexte des grands mouvements de versant n'ait pas encore été clairement établi. D'autre part, peu de systèmes exploitent automatiquement les séries chronologiques pour établir des lois probabilistes d'occurrence de l'aléa redouté ou assurer une détection fiable des situations à risque. Les différentes techniques de mesures sont rarement couplées en temps réel ce qui rend la gestion des données très complexe. De plus, la mise en œuvre de méthodes d'analyse statistique exige une préparation rigoureuse des données [KLE 13].

Dans cette communication, nous présentons un essai de surveillance instrumentale basé sur une infrastructure intégrée mise en œuvre sur le versant des Ruines de Séchilienne (France) et verrons dans quelle mesure celle-ci permet de s'affranchir des limites évoquées ci-avant. Pour ce faire, nous présenterons d'abord le site d'étude, le dispositif déployé ainsi que les séries chronologiques. Nous dresserons ensuite un bilan de cette action, notamment en termes d'analyse de la réponse du versant aux sollicitations hydro-climatiques. Enfin, nous discuterons des perspectives envisagées pour améliorer l'expertise des données et de l'aléa dans le contexte de Séchilienne.

2. Présentation du site et de l'infrastructure d'observations

2.1. Le mouvement de versant de Séchilienne

Le mouvement de versant de Séchilienne (Isère, 38) se situe sur le versant Sud du Mont Sec à l'extrémité Sud-ouest du massif cristallin de Belledonne dans les Alpes occidentales. La zone en mouvement concerne une surface de l'ordre de 70 hectares et s'étend sur 900 m de dénivelé. Elle comprend un secteur particulièrement instable (la zone dite des Ruines) d'une surface estimée à 4 hectares, pour un volume de l'ordre de 3 millions de m³. Le massif est constitué de grès et micaschistes fracturés

et instables – en raison de leur histoire tectonique polyphasée et complexe –. Le mouvement s'apparente à une déformation profonde du versant ; il se traduit par un phénomène irréversible et continu de désagrégation et désorganisation du massif avec l'ouverture de discontinuités et fractures majeures, des phénomènes de basculement ou fauchage de compartiments rocheux et la décompression du sommet qui s'affaisse [POT 09].

L'accroissement des éboulements observés sur le site dans les années 1980 a conduit à la mise en œuvre d'un dispositif de surveillance et d'alerte. Celui-ci est opéré depuis 1985 par le CEREMA de Lyon (anciennement CETE) ; il repose principalement sur des mesures de déplacements de surface [CHA 13] acquises selon différentes techniques (extensométrie, distancemétrie radar et distancemétrie infrarouge, photo-vidéo) qui visent à fournir une résolution temporelle et spatiale permettant de quantifier la cinématique 3D des mouvements. La tendance pluriannuelle est à l'augmentation progressive des vitesses de déplacement ; elles sont comprises entre $0,15 \text{ m.an}^{-1}$ et 4 m.an^{-1} selon les secteurs.

2.2. Le système multi-paramètres intégré

2.2.1. Configuration et types de mesures produites

En 2009, un programme de reconnaissance par forages profonds a été lancé pour améliorer les connaissances sur l'hydrologie du site et les mécanismes de déformations en profondeur. C'est dans ce contexte que l'INERIS a mis en œuvre un dispositif d'observations multi-paramètres en bordure Ouest de la zone des Ruines (Figure 1) avec le soutien du CEREMA et du MEDDE.



Figure 1. *Vue aérienne du versant de Séchilienne (fond de carte ©Google) et positions des équipements : capteurs microsismiques dans la galerie (ronds rouges), balises GPS-RTK (triangles oranges) et forages pour mesures hydrologiques (diamant bleu) et microsismiques (losange rouge).*

Ce dispositif, basé sur la plateforme intégrée e.cenaris, collecte des mesures de surface et des mesures en profondeur dans le massif (via deux sondages verticaux de 80 et 150 m de profondeur et une galerie de reconnaissance subhorizontale de 240 m de longueur, dite galerie de reconnaissance). Il fournit [DUN 10] :

- des enregistrements microsismiques (par les sondes équipées en majorité de géophones) sur la base de critères de dépassement de seuils en amplitude, sachant que le niveau de bruit est faible (inférieur à $3.10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$) et que l'étendue de mesure (hors saturation) est de $\pm 2 \text{ mm.s}^{-1}$,
- des mesures effectuées 2 à 4 fois par jour de la piézométrie naturelle de la nappe du versant ainsi que des mesures de conductivité-température à l'aide de capteurs positionnés à ~147 m de profondeur,
- des mesures inclinométriques effectuées 2 à 4 fois par jour par les inclinomètres bi-axiaux (précision $\pm 0,003^\circ$) intégrées aux sondes microsismiques trois composantes positionnées en entrée et fond de galerie ainsi qu'en forage vertical,
- des mesures de déplacements par GPS différentiel précis (RTK) effectuées 2 à 4 fois par jour selon des cycles de mesure de 30 minutes avec une précision de $\pm 10 \text{ mm}$ dans les trois directions et ce sans traitement a posteriori. La convention de signe est telle qu'une variation positive en latitude indique un déplacement vers le Nord, une variation positive en longitude un sens de mouvement vers l'Est,
- des mesures météorologiques (précipitations, températures de l'air et du sol, pression atmosphérique) relevées 4 fois par jour à la station météorologique positionnée sur le versant opposé (au Mt Falcon).

2.2.2. Tests, réglages et calibrage du dispositif

L'ensemble du dispositif a fait l'objet de tests et réglages préliminaires durant une période de quelques semaines après l'installation, pour valider le bon fonctionnement de la chaîne de mesure et procéder à des ajustements sur les paramètres d'acquisition. Excepté pour les données microsismiques, la validation des données durant cette phase a été rapide car leur lecture et analyse sont quasi-immédiates. La cohérence avec les mesures du CEREMA a aussi pu être vérifiée.

Le bon fonctionnement des sondes microsismiques a été vérifié d'abord par des sollicitations manuelles par coup de masse puis à l'aide de données de calibrage collectées lors de la réalisation de profils sismiques haute-résolution sur le site [DUN 10]. Ces données ont permis de confirmer le bon couplage des sondes avec le terrain, ainsi que leur capacité à détecter des événements de faible énergie à plus de 240 m de distance. Elles ont également permis de mettre en évidence des contrastes de vitesse sismique importants avec la profondeur (vitesse des ondes de compression $V_p \sim 1400 \text{ m.s}^{-1}$ en surface ; $V_p \sim 4000 \text{ m.s}^{-1}$ au-delà de 40 m de profondeur) mais peu de variabilité latérale de vitesse. Ces résultats, également confirmés par l'analyse des profils sismiques, ont conduit à l'élaboration d'un modèle de vitesse d'ondes

sismiques permettant de relocaliser les tirs avec une erreur acceptable, de l'ordre de 50 m dans le plan horizontal et de 45 m dans le plan vertical [DUN 10].

2.2.3. Partage en temps réel des données, métadonnées et résultats

Les données enregistrées sur site sont automatiquement transmises par modem 3G au centre de surveillance de l'INERIS à Nancy, qui dispose d'une infrastructure d'hébergement, de stockage et d'exploitation de base de données multi-paramètres. Celle-ci intègre un outil de web-monitoring qui garantit un accès continu et un partage contrôlé des données et métadonnées de manière à permettre le suivi d'expertise en routine ainsi qu'en situation de pré-alerte et de gestion de crise. Cet outil s'appuie sur des fonctionnalités d'édition simple et efficace des données et résultats avancés de traitement et analyse : la restitution est réalisée sous formes de graphes, tableaux de données ou cartes adaptés à chaque projet d'observation ou de surveillance. Dès 2010, il a été ouvert aux partenaires de l'INERIS dans ce projet.

3. Bilan fonctionnel et bilan des données

3.1. Bilan fonctionnel

D'un point de vue métrologique et fonctionnel, le retour d'expérience des quatre premières années d'observation (du 16 octobre 2009 au 30 juin 2013) est positif. Le taux de fonctionnement du dispositif est de 93%. Les mesures GPS-RTK et les mesures d'inclinométrie ne nécessitent pas de traitement a posteriori ce qui présente un avantage certain pour le suivi en quasi-temps réel des mouvements et des déplacements. En outre, à chaque mesure GPS sont associés les paramètres suivants : le nombre de satellites ainsi qu'un indicateur caractéristique de leur positionnement (le D.O.P.), le nombre de mesures et le nombre de corrections. Ils permettent d'identifier et d'écarter en phase d'analyse les éventuelles mesures dont l'incertitude et le bruit sont de qualité moindre.

S'agissant du suivi hydrologique, seuls les six premiers mois de mesure sont exploitables en raison du colmatage du sondage hydrologique à la suite de travaux de forage réalisés en avril 2010 à moins de cinq mètres de ce sondage [DUN 10]. Durant les six premiers mois de mesure, l'évolution piézométrique a montré que la réponse du versant aux sollicitations climatiques était typique d'un aquifère fracturé à double porosité (donc à double perméabilité) avec des recharges rapides de la nappe par les fractures majeures de surface et des décrues plus lentes en raison des discontinuités moins perméables en profondeur. Le manque de recul empêche cependant d'aller au-delà de ces constats.

3.2. Bilan des données

3.2.1. Principales signatures microsismiques

Les premiers mois d'écoute microsismique ont montré que l'implantation en profondeur des sondes microsismiques permet de s'affranchir des bruits et des artefacts de surface, et garantit de ce fait l'acquisition quasi-exclusive d'événements associés à l'évolution du versant [DUN 10] : les enregistrements microsismiques témoignent d'une activité détectable et quantifiable (voir Figure 2)

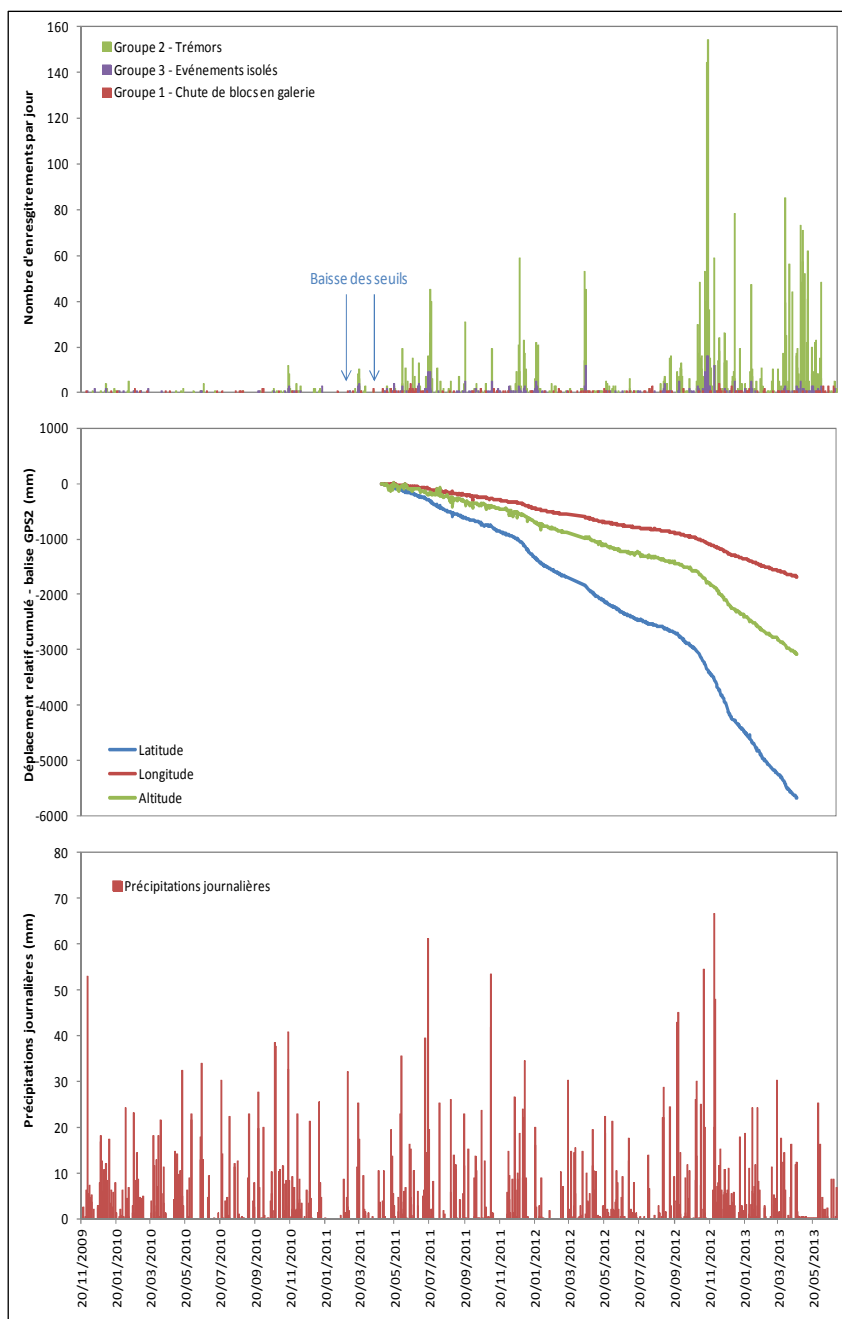


Figure 2. *Activité microsismique journalière - principales signatures (haut), déplacement cumulé à la balise GPS-RTK n°2 (milieu) et précipitations journalières (bas) du 20/11/2009 au 30/06/2013. La station GPS-RTK n°2 a été installée en avril 2011 et déplacée à un autre point de mesure en avril 2013.*

Le versant est à la fois l'objet de chutes et impacts de blocs en surface, d'ouvertures de fractures en sub-surface mais aussi de ruptures internes au massif. Dans les faits, trois principales signatures sont observées [DUN 10] : des chutes de blocs en galerie, des événements microsismiques et des tremors qui se différencient en termes de durée, formes d'ondes, fréquence, amplitude, etc. Cependant, dans la majorité des cas, les sismogrammes présentent des arrivées d'ondes émergentes, ce qui complique fortement la localisation des sources et l'interprétation des données. Ainsi, les méthodes classiques d'analyse mises en œuvre jusqu'à présent n'ont pas permis de localiser correctement les zones actives de rupture.

3.2.2. Principales séries chronologiques

La Figure 2 présente les principales séries chronologiques acquises sur la période (seules deux années de mesure sont disponibles pour la station GPS n°2 installée en avril 2011 et déplacée en avril 2013). Elles mettent en évidence le caractère auto-accélérateur des mécanismes de dégradation du mouvement de versant de Séchilienne. D'année en année, le nombre d'enregistrements microsismiques croît et les déplacements de surface accélèrent (par exemple +220% d'enregistrements microsismiques entre 2011 et 2012 ; +100% des déplacements d'une année à l'autre). La période de mesure est par ailleurs ponctuée de plusieurs crises microsismiques survenues en juillet 2011, fin décembre 2011, à la mi-avril 2012, en novembre 2012, qui est la plus importante de toutes à ce jour, et la plus récente en mars-avril 2013.

Sur cette figure, une concomitance apparaît entre les pics d'activité microsismique et les accélérations de déplacement en surface. Ces pics et accélérations interviennent par ailleurs souvent durant ou peu après des épisodes pluvieux ou neigeux importants. Par exemple, la crise microsismique majeure est observée en novembre 2012 qui est le mois le plus pluvieux de la période. C'est également à cette période que les vitesses de déplacement en surface sont les plus importantes (jusqu'à 3 cm/j en moyenne).

3.2.3. Influence des précipitations sur la réponse du versant

Pour rechercher s'il existe des corrélations entre la microsismicité, les déplacements de surface et les précipitations, nous avons utilisé l'approche proposée par [HIP 95] pour des données environnementales complexes. Cette approche présente l'avantage d'être basée uniquement sur les données (pas de modèle physique nécessaire) mais est de ce fait très exigeante sur la qualité et la complétude des données. Son utilisation requiert un important travail de préparation et conditionnement (voir [KLE 13] pour les détails). Pour modéliser la relation éventuelle entre une (des) série(s) chronologique(s) dites d'« entrée » sur une série chronologique dite de « sortie », elle consiste à établir un modèle ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) satisfaisant de la série d'entrée. Ce modèle est ensuite appliqué à la série de sortie puis le corrélogramme croisé des deux séries est élaboré. L'étude de ce corrélogramme permet d'identifier le retard éventuel (première corrélation significative) de l'action de la série d'entrée sur la série de sortie et la durée de cet effet (nombre de corrélations significatives contiguës).

Les résultats obtenus (Tableau 1) ne mettent pas en évidence de corrélation forte entre les précipitations, la microsismicité et les déplacements. Le coefficient de

corrélation entre la microsismicité et les précipitations est faible (0,18 pour un seuil de significativité à 5% de 0,05). Elle est sans retard, ce qui signifie que l'apport en eau dans les terrains a un effet immédiat significatif sur l'activité microsismique. Le groupe d'événements qui est le mieux corrélé (coefficient de corrélation de 0,34) aux précipitations est le sous-groupe des événements isolés qui correspondent à des ruptures en profondeur dans les terrains. Les chutes de blocs en galerie en revanche ne présentent aucun lien avec les précipitations. De même, le groupe des trémors, le plus représentatif des enregistrements sur le site de Séchilienne (Figure 2) n'est que faiblement corrélé aux précipitations. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par [HEL 10]. Une corrélation avec un retard de deux jours est trouvée entre le déplacement cumulé en longitude et les précipitations : l'effet de l'apport en eau apparaît avec un retard de 2 jours. Le déplacement cumulé en latitude, qui domine pourtant le mouvement, n'est pour sa part pas corrélé aux précipitations. En revanche, le déplacement journalier en latitude est corrélé avec les précipitations avec un retard de deux jours. Dans le cas présent, la prise en compte de la pluie efficace qui rend mieux compte de l'apport en eau dans les terrains, calculée par [VAL 13] pour le site de Séchilienne sur la période d'étude, n'améliore pas les coefficients de corrélation [KLE 14].

Tableau 1. Résultats des corrélations avec les précipitations avec un modèle ARIMA MA2 [KLE 14] : le retard est mentionné quand la corrélation est statistiquement significative. Le niveau de significativité est donné par $1,96 / \sqrt{n}$ (où n est le nombre d'observations).

	Corrélation avec les précipitations	Coefficient de corrélation	Seuil de significativité à 5%
Microsismicité			
Tous	Oui, 0 jour	0,18	0,05
Chutes de blocs en galerie	Non	-	-
Trémors	Oui, 0 jour	0,15	0,05
Événements isolés – massif	Oui, 0 jour	0,34	0,05
Déplacement cumulé – Balise GPS-RTK n°2			
Longitude	Oui, 2 jours	0,20	0,07
Latitude	Non	-	-
Altitude	Non	-	-
Total	Non	-	-
Déplacement journalier – Balise GPS-RTK n°2			
Latitude	Oui, 2 jours	0,20	0,07

Cette absence de corrélation forte et directe entre les déplacements de surface et les précipitations est aussi constatée par [CHA 13]. Ces auteurs parviennent cependant à optimiser l'étude statistique, en mettant en œuvre un modèle de réservoir qui rend compte de la commande hydraulique qui s'exerce sur le mouvement de versant de Séchilienne. Ce modèle calé sur une période de 2,5 ans (entre mai 2003 et décembre 2005) et basé sur les précipitations efficaces permet de

mieux rendre compte (coefficient de corrélation de 0,6) des effets des apports en eau sur les déplacements de surface.

4. Synthèse et perspectives

Dans cette communication, nous faisons le bilan des quatre premières années d'un essai de surveillance sur le mouvement de versant de Séchilienne. Celui-ci repose sur une plateforme technologique intégrée dont le retour d'expérience est satisfaisant. Le taux de fonctionnement est élevé (93%) alors même que les conditions de terrains sont relativement difficiles. Le partage à l'ensemble des acteurs du projet et la disponibilité permanente des données et métadonnées d'observations par l'intermédiaire de l'infrastructure e.cenaris est un réel atout pour l'expertise, notamment en situation de crise.

Les données acquises depuis fin 2009 confirment le caractère auto-accélérateur des mécanismes de déformation du mouvement de versant de Séchilienne. Dans ce contexte, la méthode statistique de [HIP 95] pour analyser des données environnementales complexes ne permet pas de mettre en évidence des corrélations fortes entre les précipitations, la microsismicité et les déplacements mesurés en surface. Il n'est de ce fait pas possible de proposer un modèle prédictif de la microsismicité et des mouvements de surface à partir des précipitations enregistrées sur le site. Ce résultat traduit la difficulté à modéliser les séries chronologiques sur des périodes de temps courtes (2 à 3 ans) dans un contexte où les mécanismes de déformation sont complexes et auto-accélérateurs. Cela implique pour la suite des travaux d'analyse de données, de combiner l'approche statistique à une modélisation des phénomènes physiques en jeu.

L'analyse des données microsismiques enfin doit encore être approfondie. De nouvelles approches basées sur l'analyse des formes d'ondes seront prochainement testées pour localiser les sources et tenter d'identifier des zones actives de rupture en profondeur.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie pour son appui et son soutien financier (via le programme Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-Sol) ainsi que l'Agence Nationale de la Recherche (via le projet SLAMS). Ils remercient également Marie-Aurélien Chanut (CEREMA) et Aurélien Vallet (Université de Franche Comté) qui ont partagé leur expérience ainsi que leurs données et apporté d'utiles conseils techniques et scientifiques à ces travaux.

6. Bibliographie

- [BIG 11] BIGARRÉ P., KLEIN E., GUENIFFEY Y., VERDEL T., Cloud monitoring: an innovative approach for the prevention of landslide risks. in: *The Second World Landslide Forum* Rome, 2011, Abstracts Book WLF2, L16, 475.
- [CHA 13] CHANUT M.A., DUBOIS L., DURANTHON J.P., DURVILLE J.L., Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre précipitations et déplacements. Acte de colloque, *1^{ère} conférence internationale sur les risques des mouvements de terrain*, Ain Draham (Tunisie), 14-16 mars 2013.
- [DUN 10] DÜNNER C., KLEIN E., CHARMOILLE A., BIGARRÉ P. Multi-parameter monitoring strategy applied to unstable rock slopes: the example of the Ruines de Séchilienne. *Rock Slope Stability Symposium*, 24-25 Novembre 2010, Paris, France.
- [HAR 96] HARP E., JIBSON R., Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, vol. 86, N° 1B, pp. 319-332.
- [HEL 10] HELMSTETTER A., GARAMBOIS S., Seismic monitoring of Séchilienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls, *J. Geophys. Res.*, 115, F03016, doi:10.1029/2009JF001532
- [HIP 95] HIPEL K.W., MCLEOD A.I., *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1995.
- [KLE 08] KLEIN E., NADIM C., BIGARRÉ P., DÜNNER C., Global monitoring strategy applied to ground failure hazards, Proc. of the *10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, ISL, 2008, Xi'an, Chine, pp. 1925-1931.
- [KLE 13] KLEIN E., DURENNE A., GUENIFFEY Y., L'analyse statistique de données appliquée à la surveillance multi-paramètres de versants instables. *Journées 'Aléa Gravitaire' 2013*, 17-18 septembre 2013, Grenoble.
- [KLE 14] KLEIN E., OCCHIENA C., DURENNE A., GUENIFFEY Y., PIRULLI M., Early warning systems and time series modelling: a new challenge for landslide risks prevention, *3rd World Landslide Forum*, China, 2014, accepté.
- [LOL 06] LOLLINO G., ARATTANO M., ALLASIA P., GIORDAN D., Time response of a landslide to meteorological events, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006, vol. 6, N°2, pp. 179-184.
- [ORN 07] ORNSTEIN P., DELEZE J.-Y., GUARDAVAL : Système de télésurveillance automatique de stations hydro-météo-extensométriques avec génération d'alarmes, *1^{ère} Rencontre Dangers Naturels*, 2007, Lausanne, Suisse.
- [POT 09] POTHERAT P., EFFENDIANTZ L., Néotectonique et grands mouvements de versant. Le cas de Séchilienne (Isère, France), *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 2009, pp 567-577.
- [SEN 03] SENFAUTE G., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., MOREL J., GOURRY J.-C., Microseismic monitoring applied to prediction of chalk sides collapses and contribution of numerical modelling, *Proc. of the Intern. Conf. on fast slope movements*, 11-13th May 2003, Naples, Italie.
- [VAL 13] VALLET A., BERTRAND C., MUDRY, J., Effective rainfall: a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggering landslide – a simple computation temperature based method applied to Séchilienne unstable slope (French Alps), *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945-8991, doi:10.5194/hessd-10-8945-2013.