



Monitoring multi-paramètres du mouvement de versant des *Ruines de Séchilienne* (Isère, 38)

C. Dünner, E. Klein & P. Bigarré

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Ecole des Mines de Nancy, Nancy, FRANCE

RESUME : Le mouvement de terrain des *Ruines de Séchilienne* (38) fait l'objet depuis 1985, d'une étude approfondie des mouvements observés et potentiels, ainsi que d'une surveillance continue par le CETE de Lyon. Les mécanismes de déformation et rupture en profondeur de ce versant restent encore mal connus, du fait de leur complexité et du manque de données permettant de les appréhender. Pour progresser dans la compréhension de ces mécanismes, l'INERIS contribue depuis 2009 aux investigations menées par forages profonds sur le site. Ainsi, un système d'observation multi-paramètres a été installé en bordure Ouest de la zone active, faisant appel à une plateforme technologique intégrée qui combine des mesures microsismiques, géotechniques, hydrologiques, météorologiques et des mesures de déplacement tridimensionnel. Le bilan des mesures fournit des enseignements complémentaires sur les mouvements et déformations en profondeur. Dans la zone d'étude, ceux-ci présentent des orientations différentes de celles observées en surface : les mesures de déplacement en surface (GPS-RTK) indiquent un mouvement vers le Sud-est, alors qu'à 40 et 80 m de profondeur, les mesures d'inclinaison montrent un mouvement vers le Nord-Ouest. Le réseau d'écoute microsismique est par ailleurs capable de détecter des événements de faible énergie à plusieurs centaines de mètres de distance, avec près de 600 événements attribués à l'évolution du versant enregistrés depuis novembre 2009. Deux pics d'activité en novembre 2010 et juillet 2011 coïncident avec une accélération des déplacements de surface et des périodes de précipitations soutenues.

1 INTRODUCTION

Le mouvement de *Séchilienne* (Isère, 38), localisé sur le versant Sud du *Mont Sec* à l'extrémité Sud-ouest du massif cristallin de *Belledonne*, fait l'objet d'une surveillance, depuis 1985, par le CETE de Lyon (Durville et al. 2004). Le dispositif de surveillance qui a beaucoup évolué depuis son démarrage, repose principalement sur des mesures de déplacements de surface acquises selon différentes techniques (extensométrie, tachéométrie, clinométrie, radar ULB, photo-vidéo) qui visent à fournir une résolution temporelle et spatiale permettant de quantifier au mieux la cinématique 3D des mouvements (Duranthon 2006).

Depuis 2007, le laboratoire ISTERre assure le suivi d'un réseau d'auscultation sismique de surface (Helmstetter et al. 2010). Ce réseau présente de fait une grande sensibilité aux sources de bruits et de vibrations naturelles, permanentes ou récurrentes de surface (vent, pluie, foudre, etc.). L'état général de fracturation et de déconsolidation avancées des couches superficielles dans lesquelles sont positionnées les sondes atténue en outre fortement la propagation des ondes, ce qui complique la détection des signaux, ainsi que le traitement et l'analyse des données.

Les données ainsi collectées, bien que couplées à des campagnes de reconnaissance géophysique pour évaluer les limites et les volumes du mouvement de terrain, n'ont pas permis à ce stade de bien appréhender le mécanisme et la cinématique de déformation en profondeur de ce versant. Aussi, pour progresser sur ce sujet, 4 forages de profondeurs comprises entre 80 et 150 m ont été réalisés en 2009 et 2010 en bordure Ouest de la zone active, pour à la fois :

- étudier la réponse en profondeur aux sollicitations hydrodynamiques ;
- progresser dans la localisation des zones actives en rupture et déformation.

Dans ce contexte, l'INERIS a instrumenté 2 des 4 forages disponibles pour la mesure hydrologique et clinométrique, ainsi que pour l'écoute microsismique en profondeur (Dünner et al. 2010). Cette action, menée en collaboration avec le CETE de Lyon et avec le soutien du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, s'inscrit dans le cadre des programmes EAT-DRS06 et ANR SLAMS.

2 DESCRIPTION DU SYSTEME DE SURVEILLANCE INTEGRE

La contribution de l'INERIS aux investigations sur le versant de *Séchilienne* vise à mettre à profit les ouvrages souterrains disponibles (à savoir : la galerie de reconnaissance et les forages sub-verticaux SD et SP, positionnés au niveau de la piste d'accès) pour :

- localiser par écoute microsismique les zones de rupture et déformation actives en filtrant largement les artefacts inhérents à des mesures de surface et en s'approchant des zones d'intérêt supposées ;
- étudier la réponse interne du massif aux sollicitations hydrodynamiques qui, par actions répétées, peuvent modifier les contraintes effectives et contribuer à l'instabilité du versant.

Cette contribution s'appuie ainsi sur un dispositif de mesure multi-paramètres intégré, installé courant 2009 et qui comprend 2 stations de mesure (Figure 1) : GALERIE (opérationnelle depuis le 16/10/09) et PISTE (opérationnelle depuis le 20/11/09).

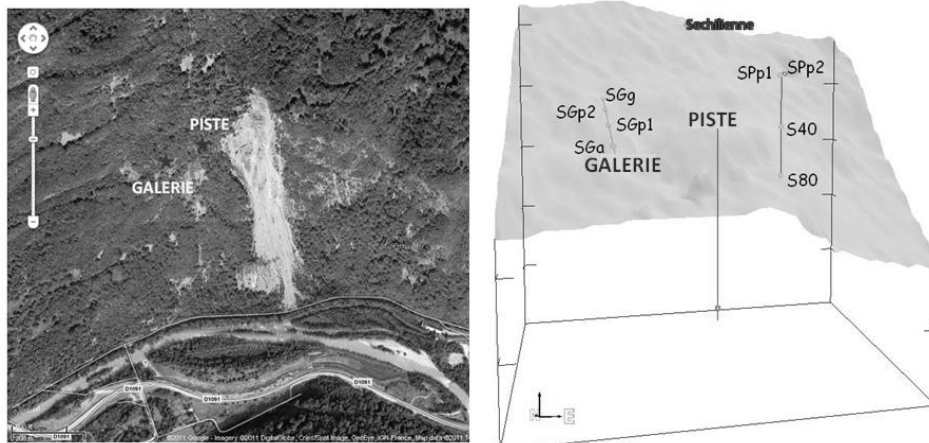


Figure 1. A gauche : photographie du mouvement de terrain de *Séchilienne* (source Google®) et localisation des stations de mesure GALERIE et PISTE. A droite : modèle numérique de terrain du versant de *Séchilienne* et localisation des capteurs dans la galerie de reconnaissance et les forages SD et SP.

Le dispositif est alimenté par panneaux solaires, il intègre (Tableau 1) :

- 8 sondes microsismiques dont 4 sondes tridirectionnelles (équipées chacune d'un inclinomètre biaxial et d'une centrale d'orientation) positionnées de manière à présenter une géométrie 3D, plus favorable à la localisation des foyers microsismiques qu'une géométrie 1D ;
- 1 piézomètre et 1 sonde de conductivité / température placés dans le forage SP dédié aux mesures hydro-géologiques ;
- un ensemble de balises de mesures géodésiques GPS-RTK (2 balises de mesure et 1 de référence), ainsi qu'une station météorologique pour tester la technologie des stations modulaires SYTGEM-*vlp* en contexte d'éboulement rocheux.

Tableau 1. Equipements de mesure installés aux stations GALERIE et PISTE.

Station	Sonde	Type de sonde	Capteur(s)	Installation
GALERIE	SGa	3D	Accéléromètre, Inclinomètre	Forage court
	SGp1	1D	Géophone 28 Hz	Paroi
	SGp2	1D	Géophone 28 Hz	Paroi
	SGg	3D	Géophone 28 Hz, Inclinomètre	Forage court
PISTE	S80	3D	Géophone 28 Hz, Inclinomètre	Forage SD
	S40	3D	Géophone 28 Hz, Inclinomètre	Forage SD
	SPp1	1D	Géophone 28 Hz	Paroi
	SPp2	1D	Géophone 28 Hz	Paroi
	Piezo	-	Pression, Conductivité, Température	Forage SP
	GPS n°1	-	GPS RTK	Piste d'accès
	GPS n°2	-	GPS RTK	Zone active
Météo	-	Pluviomètre, Température, Pression	Mont Falcon	

La détection et l'acquisition des signaux transitoires s'effectuent sur des critères de dépassement de seuil en amplitude. La numérisation en 16 bits est faite avec une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz ; le gain est paramétré à 50 dB pour l'ensemble des voies de mesure. L'implantation en profondeur des sondes équipées de

géophones se traduit par un niveau de bruit faible (inférieur à $3.10^{-4} \text{ mm.s}^{-1}$), l'étendue de mesure (hors saturation) étant de $\pm 2 \text{ mm.s}^{-1}$. La sonde équipée d'accéléromètres est intrinsèquement plus sensible et donc plus bruitée car dédiée à l'enregistrement de mouvements de forte amplitude.

Les mesures hydrogéologiques, météorologiques et clinométriques sont réalisées 4 fois par jour avec une précision de numérisation de 15 bits ; la mesure GPS-RTK est effectuée 2 fois par jour selon des cycles de mesure de 30 minutes basés sur des comparaisons en temps réel des phases du signal. Elle ne nécessite donc pas de traitement a posteriori.

Les données de mesure et variables d'état de fonctionnement sont transmises via le réseau mobile haut débit, au Centre de Surveillance de l'INERIS à Nancy, pour traitement, analyse et hébergement en base de données.

3 BILAN DES DONNEES DE MESURES SUR LA PERIODE

3.1 Catalogue des sismogrammes

Depuis la mise en route du dispositif de mesure fin 2009, près de 600 signaux transitoires ont été détectés. Outre les artefacts déclenchés principalement à la station GALERIE et liés aux bruits générés par la grille d'accès à la galerie de reconnaissance (vibrations en cas d'épisodes venteux), ainsi que les enregistrements liés à des interventions sur le site, les signaux transitoires se répartissent selon 2 familles principales : les séismes locaux et les enregistrements associés à l'évolution du versant.

Concernant les séismes locaux : 4 séismes ont été enregistrés par les 2 stations de mesure sur la période d'étude. Les sismogrammes associés présentent plusieurs caractéristiques particulières, notamment des arrivées d'ondes P et S distinctes séparées de quelques dixièmes de secondes, une durée totale de quelques secondes, ainsi qu'un contenu fréquentiel faible (entre 10 et 20 Hz).

Les enregistrements associés à l'évolution du versant présentent pour leur part une variabilité de signatures qui s'explique par la multiplicité des mécanismes en jeu. 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, etc. Cela se traduit par des différences importantes, notamment en termes de formes d'ondes, de contenu fréquentiel, d'amplitude et de durée. On observe par ailleurs que ces signaux ne présentent pas d'ondes S. Ainsi, l'approche mise en œuvre a consisté à élaborer, sur la base de critères simples, un catalogue des principales signatures rencontrées. Trois groupes se distinguent (Tableau 2) :

- des signaux transitoires de très courte durée détectés exclusivement au fond de la galerie de reconnaissance. A ce stade de l'étude, il n'est pas possible d'établir si ces événements résultent du vieillissement naturel des parois de la galerie ou d'un mécanisme de déformation en grand de l'encaissant de cette galerie. Néanmoins, les inclinomètres intégrés aux sondes microsismiques 3D indiquent un mouvement de rotation du fond de la galerie vers le cœur du versant (axe Nord-sud), alors qu'aucune évolution particulière n'est mesurée selon l'axe Est-ouest, ce qui est confirmé par les données du CETE ;

- des signaux de type « tremors » enregistrés majoritairement à la station PISTE (Figure 2). Ces signaux sont détectés par l'une ou l'autre des stations, voire les 2 simultanément. Un examen systématique du contenu fréquentiel de ces tremors devrait permettre de définir s'ils résultent de l'occurrence d'événements microsismiques multiples successifs, d'un mouvement de masse d'ampleur, ou si au contraire ils relèvent d'un mécanisme initiateur particulier à préciser ;

- des événements isolés de durées plus courtes avec une arrivée d'ondes plutôt impulsive (Figure 3). La plupart sont enregistrés par la station PISTE mais quelques uns sont communs aux 2 stations.

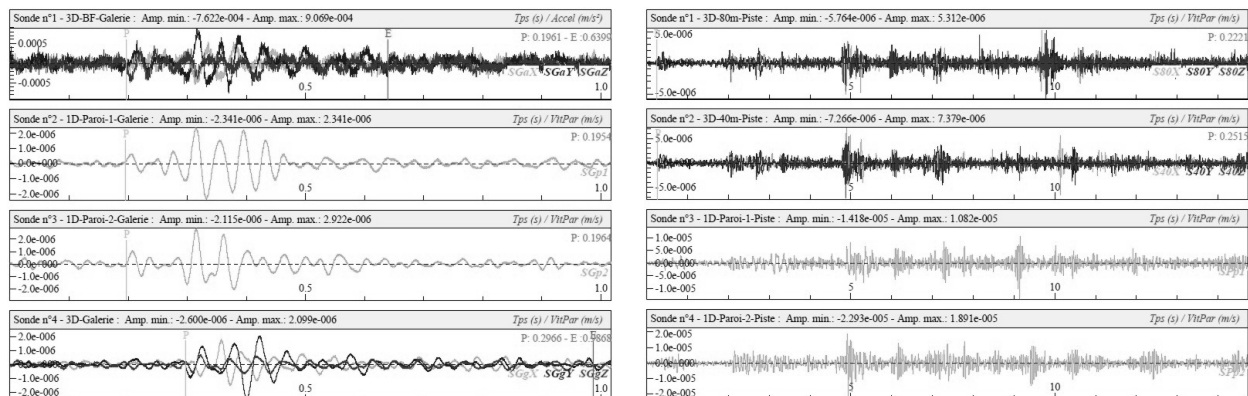


Figure 2. Exemple d'enregistrements de tremors à la station GALERIE (à gauche) et à la station PISTE (à droite), sismogrammes enregistrés le 29/11/2010.

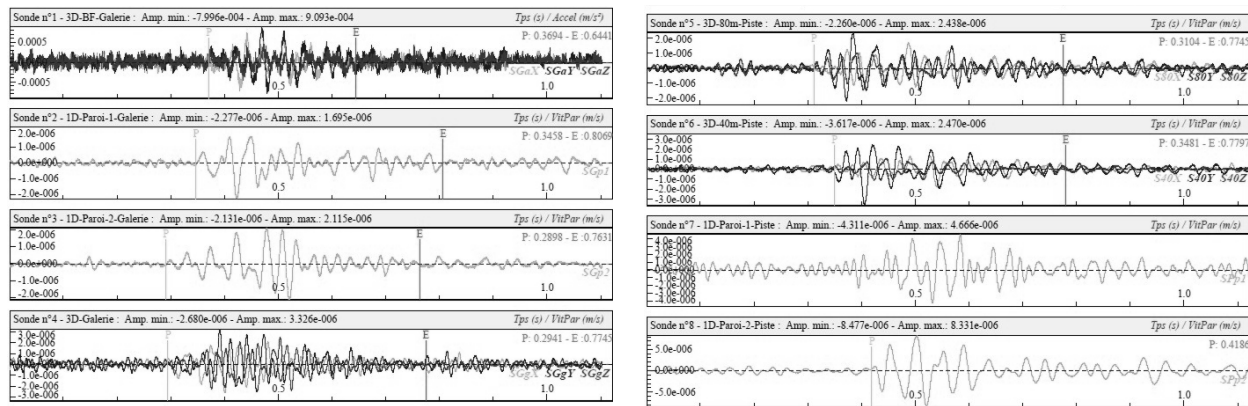


Figure 3. Exemple d'enregistrements d'événements isolés d'origine profonde aux stations GALERIE (à gauche) et PISTE (à droite), sismogrammes enregistrés le 11/07/2010.

Tableau 2. Caractéristiques des différents types de signaux transitoires associés à l'évolution du versant des *Ruines de Séchilienne*.

Type d'événements	%	Caractéristiques	
		Durée	Fréquence
Chutes de blocs à la galerie	13,5%	< 0,2 s	> 100 Hz
Trémors	62,9%	0,5 < t < 15 s	< 60 Hz
Isolés	23,7%	< 0,2 s	< 100 Hz

Ainsi, la configuration du dispositif d'écoute microsismique, avec des sondes implantées en profondeur dans le massif, permet de s'affranchir considérablement des bruits et des artefacts de surface. Elle est favorable à la détection d'événements de faible amplitude (de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Ces événements présentent quasi-uniquement des phases P mais comme ils sont généralement bien polarisés, les azimuts mesurés devraient permettre de les localiser avec une relative précision. D'une manière plus générale, on observe que l'activité microsismique du versant est assez régulière sur la période d'étude. Deux pics d'activité ont été mesurés mi-novembre 2010 et fin juillet 2011 ; ils coïncident avec une période d'accélération des déplacements en surface, ainsi qu'à des périodes de précipitations soutenues (supérieures à 40 mm/jour).

3.2 Mesures de déplacement 3D par GPS-RTK

Deux mesures de déplacement 3D par mesure GPS-RTK sont réalisées : l'une au niveau du datalogger PISTE, l'autre en bordure Ouest de la zone active. Elles ne nécessitent aucun post-traitement car la balise de référence installée au *Mont Falcon* transmet en temps réel des corrections aux 2 balises de mesure équipées sur le versant. On observe (Figure 4) que les mesures d'altitude sont sensiblement plus bruitées que les mesures de latitude et longitude car intrinsèquement l'erreur verticale est 1,5 à 2 fois plus importante que l'erreur horizontale. Globalement, le déplacement cumulé sur la période d'étude (Tableau 3) est faible pour la balise n°1 (piste d'accès) et significatif pour la balise n°2 (zone active). Ces mesures sont cohérentes avec les déplacements observés par le CETE (Pothérat et al. 2009, Kasperski et al. 2010) : à la fois en termes d'ordres de grandeur et de direction du vecteur déplacement.

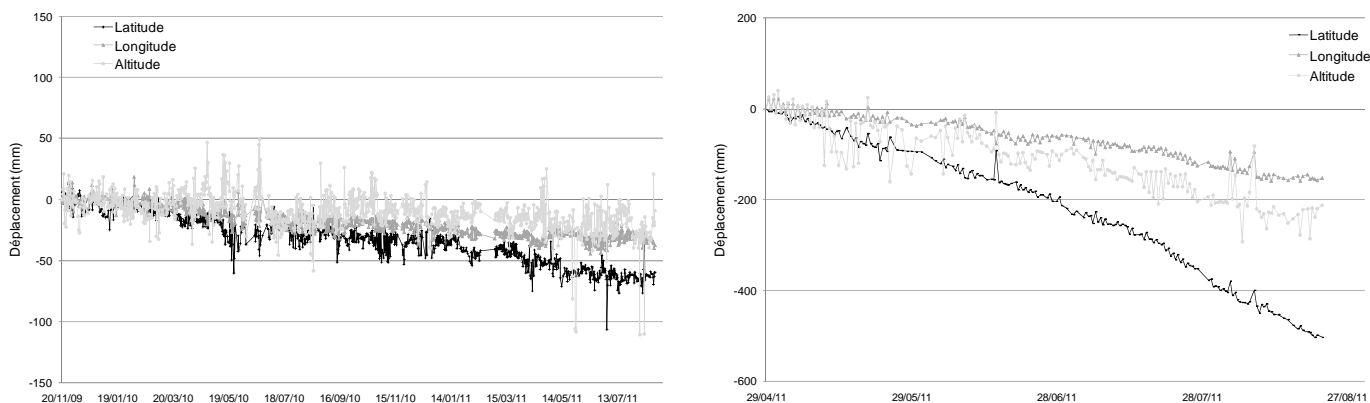


Figure 4. A gauche : variation de la position géographique de la station GPS n°1 (piste d'accès) entre le 20/11/09 et le 22/08/11. A droite : variation de la position géographique de la station GPS n°2 (zone active) entre le 29/04/11 et le 22/08/11.

Tableau 3. Déplacements cumulés mesurés sur le versant des *Ruines de Séchilienne* par les deux balises GPS-RTK.

Balise GPS	Latitude		Longitude		Altitude	Déplacement 3D absolu
	Mesure	Direction	Mesure	Direction		
N°1 Piste d'accès	-59,6 mm	Sud	-37,4 mm	Est	-9,3 mm	71,0 mm
N°2 Zone active	-502,6 mm	Sud	-152,2 mm	Est	-212,8 mm	566,6 mm

3.3 Mesures inclinométriques

A la station PISTE, les 2 inclinomètres (installés à 40 m et 80 m de profondeur) présentent une orientation quasi opposée (159°). Les mesures associées sont relativement peu bruitées (Figure 5) mais elles traduisent durant les premiers mois des effets de réajustements du forage qui s'achèvent courant février 2010. A partir de mars 2010, les mesures font état de mouvements de déformation au sein du massif. Ainsi, un mouvement lent est également observé en forage : durant les derniers mois le mouvement au fond est orienté Nord-ouest ; alors qu'en surface le mouvement est orienté Sud-est (cf. paragraphe 3.2). Comme ces mouvements présentent une amplitude très faible (quelques millièmes de degré sur plusieurs mois de mesure) avec des changements d'orientation, il est prématuré de s'étendre plus sur l'analyse de ces données. Celles-ci devront par ailleurs être confrontées aux relevés de fractures et/ou grand accidents géologiques mis en évidence sur le terrain par le CETE de Lyon.

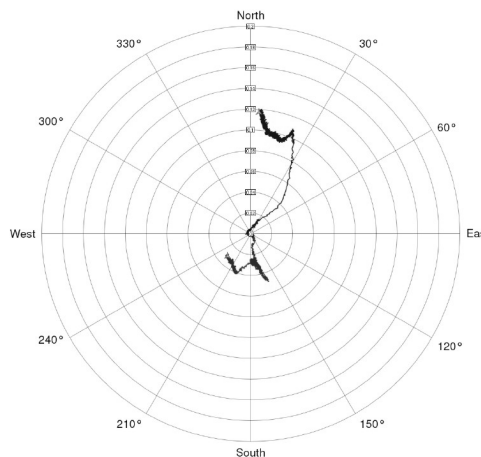


Figure 5. Mesures inclinométriques à la station PISTE en projection hémisphérique supérieure.

3.4 Mesures hydrologiques

Les mesures piézométriques sont réalisées dans le sondage SP dont la tête est à la cote NGF 735 m. Les mesures de pression enregistrées correspondent à la hauteur de colonne d'eau au-dessus du capteur (1 bar = 10 m). De fin novembre 2009 à début avril 2010, l'évolution piézométrique montre une tendance générale de recharge de la nappe qui se fait à l'occasion d'épisodes pluvieux successifs. Les 4 premiers épisodes majeurs de recharge ont provoqué une augmentation cumulée de la hauteur d'eau de la nappe de plus de 12 m. Ces épisodes de recharge se caractérisent par une augmentation rapide de la piézométrie, suivie d'une décrue plus lente. Il est intéressant de noter que l'aquifère ne retrouve pas son niveau initial après chaque épisode pluvieux ce qui indique une recharge de l'aquifère (Tableau 4).

Tableau 4. Niveau d'eau de la nappe atteint après les différentes recharges entre novembre 2009 et mars 2010 (Dünner et al. 2010).

Niveau initial	Niveau max. 1 ^{ère} recharge	Niveau max. 2 ^{ème} recharge	Niveau max. 3 ^{ème} recharge	Niveau max. 4 ^{ème} recharge
20/11/2009 1,3 m	08/01/2010 2,1 m	29/01/2010 2,7 m	12/02/2010 9,0 m	24/02/2010 12,3 m

La réponse de l'aquifère face à ces recharges est typique d'un aquifère fracturé à perméabilité double : les fractures nombreuses et importantes en surface contribuent à l'augmentation rapide du niveau piézométrique

tandis que les réseaux de discontinuités en profondeur, moins développés et moins perméables jouent un rôle capacitif de stockage en restituant l'eau de manière différée, ralentissant ainsi la baisse du niveau piézométrique en période d'étiage.

Par ailleurs, le temps de réponse de l'aquifère vis-à-vis des événements hydro-climatiques semble évoluer au cours du temps et des épisodes pluvieux. Le délai entre les épisodes pluvieux et l'augmentation du niveau piézométrique se réduit. Ce comportement serait cohérent avec une recharge de l'aquifère qui rend ce dernier plus réactif face aux épisodes d'infiltrations. Cependant, ce temps de réponse ne peut être estimé précisément compte tenu du manque de données. Le site étant localisé en zone montagneuse, le manteau neigeux joue probablement un rôle important dans l'évolution du temps de réaction de l'aquifère (phase d'infiltration) face aux précipitations.

A partir de la mi-avril 2010, les mesures piézométriques sont perturbées suite à la réalisation d'un forage à proximité du sondage SP. Le système ne réagit plus aux sollicitations hydromécaniques : le niveau d'eau reste stable et les mesures de conductivité indiquent une minéralisation croissante de l'eau avec la profondeur et dans le temps. Il est donc très probable que ces travaux de forages, qui se sont accompagnés d'une injection massive d'eau dans les terrains, ont colmaté les fractures et les discontinuités au voisinage du sondage SP.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le dispositif de mesure multi-paramètres intégré, installé en 2009 à titre expérimental en bordure Ouest du mouvement des *Ruines de Séchilienne*, est opérationnel. Le bilan de mesure fournit des données pertinentes, de bonne qualité, ainsi que des enseignements nouveaux sur les mouvements et déformations en profondeur :

- les mesures géodésiques traduisent un affaissement vers la vallée, accompagné d'un déplacement vers l'Est ; alors qu'à 40 et 80 m de profondeur, les mesures d'inclinaison montrent un mouvement vers le Nord-ouest ;

- l'écoute microsismique confirme clairement que le versant de *Séchilienne* est source d'une activité microsismique détectable et quantifiable. Près de 600 événements attribués à l'évolution du versant ont ainsi été enregistrés depuis fin novembre 2009. Les sismogrammes présentent une grande variabilité en termes de formes d'ondes, de contenu fréquentiel, d'amplitude et de durée. Rappelons que 2 pics d'activité microsismique ont été enregistrés en novembre 2010 et juillet 2011 et qu'ils coïncident avec une accélération des déplacements de surface et des précipitations soutenues ;

- les mesures hydrologiques montrent, durant les premiers mois, que la réponse du versant aux sollicitations hydro-climatiques, avec une alternance de cycles de charge / décharge au gré des épisodes pluvieux, est typique d'un aquifère fracturé. Les mesures sont malheureusement perturbées à partir du mois d'avril 2010, avec la réalisation d'un forage supplémentaire à proximité du forage SP. Depuis, il n'y a plus de renouvellement d'eau indiquant que le forage est colmaté. Il apparaît donc essentiel d'évaluer, en lien avec le CETE de Lyon, les possibilités de restaurer la réponse de ce forage.

Les données collectées au travers de cette expérimentation devraient donc contribuer à améliorer la compréhension du comportement du versant en profondeur. Le travail de traitement et d'analyse des données nécessite cependant d'être approfondi. En particulier, le traitement des données microsismiques devra être affiné de manière à permettre une analyse de la répartition spatio-temporelle des événements microsismiques avec, si nécessaire, la poursuite des travaux de calibrage du réseau microsismique et l'élaboration d'un modèle de vitesse représentatif de la géologie rencontrée. L'accent sera également porté sur l'analyse croisée des données pour corriger les chroniques temporelles d'éventuels effets de saisonnalité et mettre en évidence les co-variations.

5 REFERENCES

- Dünner C., Klein E., Charmoille A. et Bigarre P. 2010. Multi-parameter monitoring strategy applied to unstable rock slopes: the example of the Ruines de Séchilienne (Isère, 38). Symposium Rock Slope Stability Symposium (RSS), 2010, Paris, France, p.13.
- Duranthon J.-P. 2006. Le mouvement de versant rocheux de grande ampleur des Ruines de Séchilienne – Surveillance Instrumentation. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG), 2006, Lyon, France.
- Durville J.-L., Effendiantz L., Pothérat P. 2004. The Séchilienne landslide, Identification and mitigation of large landslide risks in Europe, Advances in risk assessment. Ch. Bonnard, F. Forlati et C. Scavia – Editors, Balkema Publisher, 2004, pp. 253-269.
- Helmstetter A. et Garambois S. 2010. Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. Journal of Geophysical Research, 2010, Vol. 115, F03016.
- Kasperski J., Pothérat P. et Duranthon J.-P. 2010. Le mouvement de versant de Séchilienne : point sur l'activité du phénomène. Symposium Rock Slope Stability Symposium (RSS), 2010, Paris, France, p.35.
- Pothérat P. et Effendiantz L. 2009. Néotectonique et grands mouvements de versant. Le cas de Séchilienne (Isère, France). Bulletin of Engineering Geology and Environment, 2009, pp. 567-577.