

Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre déplacements de surface et apports hydriques – analyse statistique

Séchilienne unstable slope : relationships between surface velocities and water input – statistical approach

Marie-Aurélié Chanut¹, Aurélien Vallet², Laurent Dubois¹, Jean-Paul Duranthon¹

¹ CETE de Lyon, Bron, France

² CNRS – UMR6249 Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, France

RESUME: L'article présente rapidement le site de Séchilienne, l'instrumentation mise en place et l'évolution cinématique du mouvement. Ensuite, des relations entre déplacements de surface et apports d'eau sont recherchés dans un double but : mieux comprendre le processus qui engendre les fluctuations saisonnières des déplacements et participer à la définition d'un critère d'alerte de la rupture. Un modèle simple de vidange réservoir établi à partir de la pluie efficace a été mis en place et reste valable sur une période d'une dizaine d'années : il montre l'influence des apports d'eau efficaces sur les variations de déplacements autour de la tendance.

1 INTRODUCTION

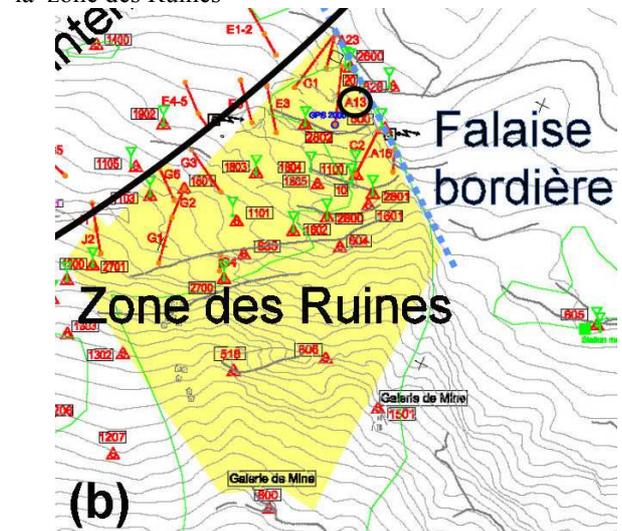
1.1 Présentation du site de Séchilienne

Le mouvement de versant de Séchilienne (Isère), identifié en 1984 suite à des chutes de blocs sur la route RN91/RD 1091 reliant Grenoble à Briançon, est situé dans la basse vallée de la Romanche, à une vingtaine de kilomètres de Grenoble (Figure 1). L'ensemble du versant sud du Mont Sec est concerné par l'instabilité, entre 600 m et 1180 m d'altitude. La superficie en mouvement représente environ 70 ha et comprend une zone très instable dont les vitesses de déplacement sont supérieures au mètre par an : la zone des « Ruines » (Figures 1 et 2). Le cône d'éboulis issu de ce secteur est d'ailleurs bien visible depuis la route. L'éboulement potentiel polyphasé de la zone des « Ruines », d'un volume d'environ 3 millions de m³, est aujourd'hui considéré comme la principale menace.

Figure 1. Localisation et vue du site de Séchilienne



Figure 2. Localisation de l'extensomètre A13 au niveau de la zone des Ruines



1.2 L'instrumentation du site

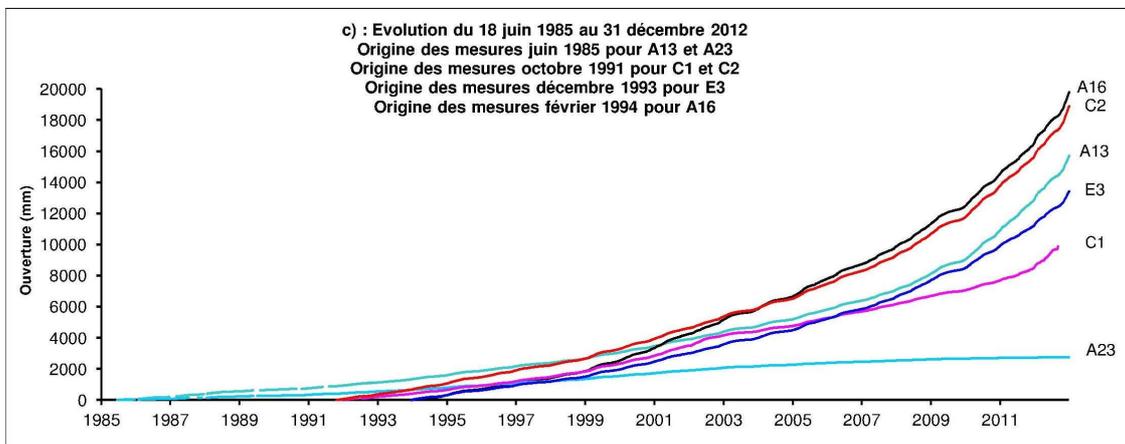
En tant que risque naturel majeur, le site de Séchilienne fait l'objet depuis 1985 d'une surveillance très développée (Effendiantz & Duranthon, 2004) dans un objectif opérationnel de sécurité civile. Trois types de mesures de déplacements (extensométrie, distancemétrie infra-rouge et distancemétrie radar) permettent de quantifier les mouvements de surface sur l'ensemble du versant sud du Mont Sec. Une station météo renseigne sur les apports d'eau locaux. L'ensemble des mesures est automatisé avec une fréquence d'acquisition paramétrable. Les données sont regroupées puis rapatriées au Centre d'Études Techniques (Cete) de Lyon.

De plus, deux galeries horizontales (côte 710 et 875) permettent d'observer les mouvements en profondeur et deux sondages de 150 m de profondeur sont équipés de tubes inclinométriques (Kasperski *et al.* 2010).

1.3 Évolution cinématique générale

Dans la zone des « Ruines », l'allure générale de l'évolution, depuis le début des mesures, est présentée dans la figure 3. On y observe une accélération progressive, perturbée par des fluctuations saisonnières. L'ouverture cumulée de certaines fractures depuis 1985 dépasse 18 m. Les vitesses d'ouverture de certaines fractures délimitant la zone des « Ruines » dépassent 3 mètres par an (en 2012 : 2.78 m et 3.22 m respectivement au niveau des capteurs extensométriques A13 et A16). Pour le reste du versant, l'évolution est globalement linéaire en fonction du temps avec des vitesses de l'ordre de 1 à 10 cm par an.

Figure 3. Mesures extensométriques dans la zone des Ruines depuis 1985

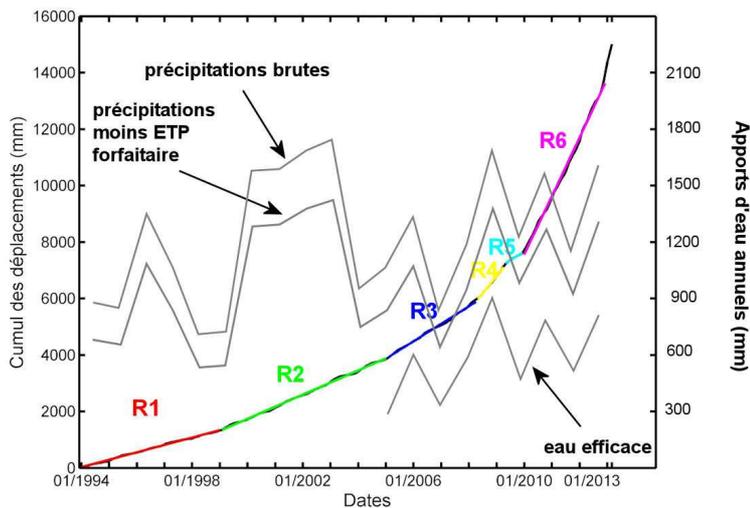


Sur la figure 4, on caractérise les régimes cinématiques observés au niveau de la zone des Ruines à l'aide des données mesurées au niveau de l'extensomètre A13 dont la position centrale dans cette zone est non affectée d'épiphénomènes et permet de rendre compte du comportement général. Six régimes cinématiques ont été identifiés depuis 1994 (un 7^{ème} semble en préparation mais le recul des données n'est pas suffisant pour l'affirmer) : ils sont désignés de R1 à R6 (tableau 1). Leur durée varie de 1 an à 5-6 ans. Excepté le régime R5 dénotant un ralentissement, on observe une succession de régimes linéaires aux pentes de plus en plus importantes. Le régime R1 est caractérisé par une vitesse de 2.2 cm/mois alors qu'actuellement le régime R6 est marqué par une vitesse de presque 18 cm/mois. Les vitesses ont été multipliées par un facteur 8 en une petite vingtaine d'années.

1.4 Objectifs

Cette communication vise à identifier les relations qualitative puis quantitative entre déplacements de surface et apports hydriques et à discuter de la faisabilité d'un outil de prévision basé sur l'identification d'un comportement déviant du comportement attendu d'après le modèle.

Figure 4. Régimes cinématiques depuis 1994 (extensomètre A13) et pré-Tableau 1. Vitesses moyennes associées à chaque régime cinématiques



Régime	Vitesse
R1	2.2 cm / mois
R2	3.6 cm / mois
R3	5.2 cm / mois
R4	10.0 cm / mois
R5	5.0 cm / mois
R6	17.7 cm / mois

2 RELATION QUALITATIVE ENTRE APPORTS HYDRIQUES ET MOUVEMENTS DE SURFACE

Un pluviomètre et un nivomètre permanents sont implantés sur le haut du versant instable. Ils fournissent les apports hydriques bruts journaliers (pluie et/ou neige fondue). Pour évaluer la quantité d'eau infiltrée, plusieurs méthodes ont été employées : une correction empirique d'évapotranspiration (ET), définie mensuellement une fois pour toutes, et une évaluation journalière tenant compte de l'ET, de la réserve utile du sol et du ruissellement (Vallet *et al.*, 2013). La figure 4 montre les écarts entre les valeurs annuelles des précipitations brutes, les apports d'eau après correction forfaitaire et les apports d'eau efficaces.

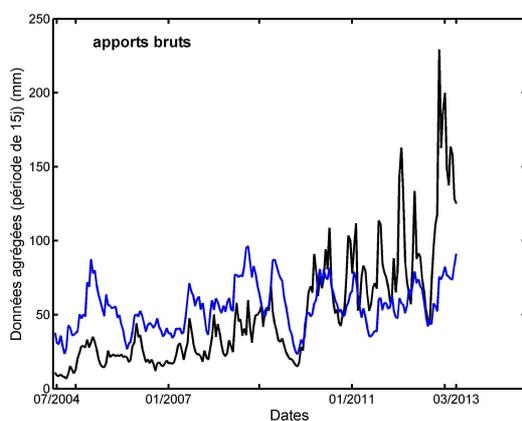
La recherche de corrélations entre précipitations et déplacements sur le site de Séchilienne a fait l'objet d'études depuis plusieurs années (Alfonsi, 1997, Durville *et al.*, 2009, Vallet *et al.*, 2013). Des corrélations, satisfaisantes pendant des durées maximales de deux ou trois ans, peuvent être observées en cumulant les précipitations pondérées sur des durées de deux à six mois et en lissant les mesures de déplacement sur deux à quatre semaines.

A titre d'exemple, la figure 5 montre l'ouverture de la fracture mesurée par l'extensomètre A13, cumulée sur 15 jours en regard des apports d'eau (bruts et efficaces) mensuels SA_n , cumulés sur six mois de la façon suivante :

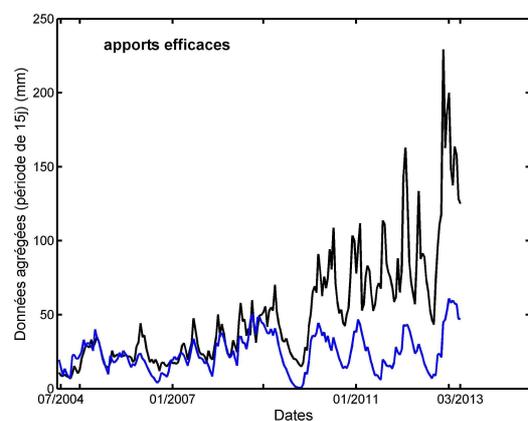
$$SA_n^{6\text{mois}} = \sum_{p=0}^{p=11} \frac{\alpha_p}{\alpha_0 + \dots + \alpha_{11}} A_{n-p} \text{ avec } \alpha_p = 1 - \frac{p}{12}$$

où A_{n-p} désigne les apports d'eau sur la période $n-p$ et α_p est le coefficient de pondération qui rend compte de l'influence décroissante des apports d'eau sur les six derniers mois. Les valeurs des coefficients de pondération des périodes sont indiquées dans (Chanut *et al.*, 2013).

Figure 5. Données agrégées sur 15 jours : apports d'eau (mm) pondérés sur 6 mois ; ouverture de l'extensomètre A13.



5a



5b

Sur la figure 5, on observe des variations de vitesses de déplacement avec des périodes d'accélération suivies de ralentissements. On constate (figure 5a) un bon parallélisme des courbes déplacements – apports d'eau bruts, avec des périodes où cette concordance est de bonne qualité (2003 à 2006) et d'autres périodes moins satisfaisantes (début 2009 : période très humide n'entraînant pas d'accélération). La mise en parallèle des déplacements avec les apports d'eau efficaces (figure 5b) est encore meilleure et ne fait plus apparaître les incohérences identifiées précédemment.

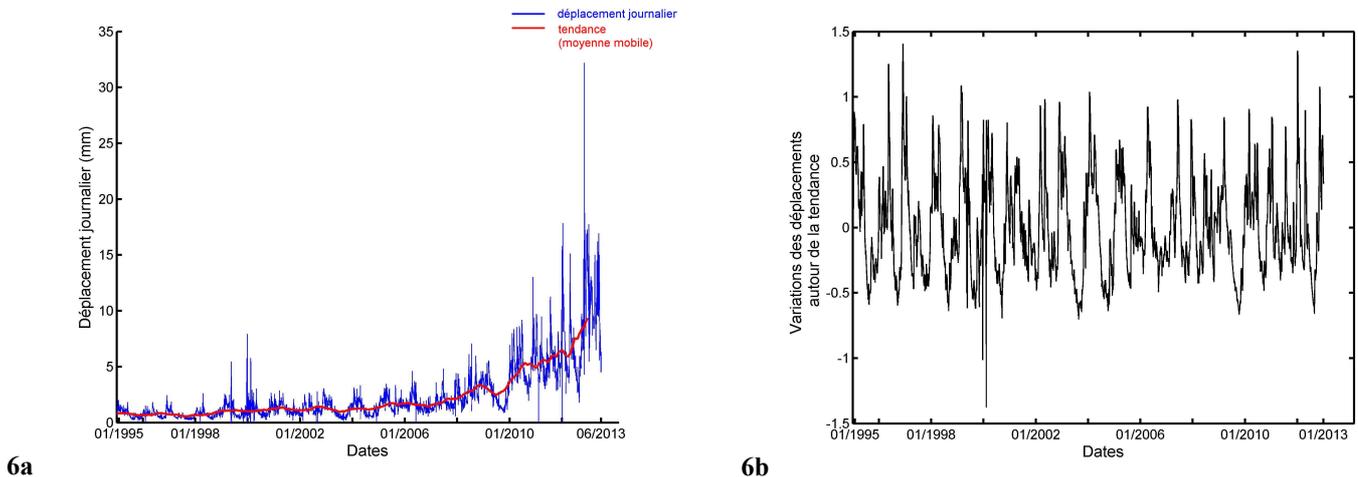
Par ailleurs, ces deux graphes montrent ce qui était déjà visible sur la figure 4 à savoir que malgré un niveau d'apports d'eau quasi-constant au cours des années, les vitesses de déplacements augmentent. Ceci indique une sensibilité croissante aux précipitations du massif qui augmente avec une dégradation mécanique progressive du massif.

3 RELATION QUANTITATIVE ENTRE APPORTS HYDRIQUES ET DEPLACEMENTS DE SURFACE

3.1 Données étudiées

Pour améliorer l'analyse de l'influence des précipitations, il est apparu nécessaire de séparer, dans les données cinématiques, les fluctuations et la tendance au sens statistique (Tenenhaus, 2007, Chanut *et al.*, 2013). La tendance a été déterminée comme la moyenne mobile centrée sur un an des valeurs mesurées (figure 6a).

Figure 6. Décomposition des données cinématiques (mesures journalières de l'extensomètre A13) selon un modèle statistique multiplicatif : tendance (a) et variations autour de la tendance (b)



Plus précisément, nous avons employé un modèle statistique multiplicatif, du type : $Y_t = T_t (1 + A_t)$, où Y_t désigne la série de mesures cinématiques, T_t la tendance et A_t représente le terme de variations autour de la tendance, grandeur sans dimension, (figure 6b) que l'on cherche à relier aux précipitations.

La donnée d'apports hydriques utilisée est la pluie efficace (Vallet *et al.*, 2013) qui se réfère à la part des apports bruts qui subsiste après évapotranspiration, remplissage de la réserve utile du sol et ruissellement. La pluie efficace correspond ainsi à la pluie qui s'infiltré dans le sol et alimente le mouvement. Elle semble être la donnée la plus pertinente d'après l'analyse qualitative précédente.

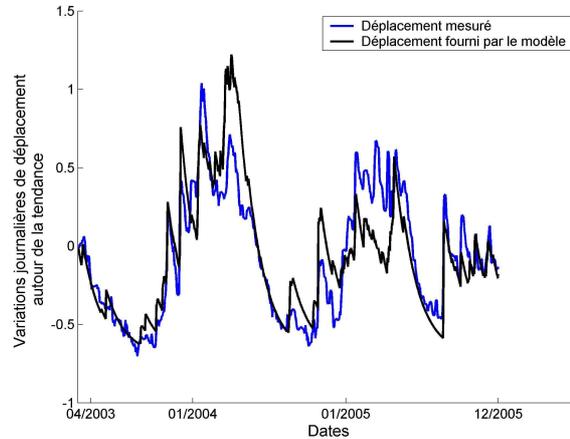
3.2 Choix du modèle de vidange réservoir

Nous avons opté pour un modèle simple de type boîte noire pour déterminer empiriquement une relation entre apports hydriques et déplacements de surface. En effet, n'ayant actuellement pas de données quant à la pression d'eau dans le sol, il n'est pas possible de caractériser la fonction de transfert dans le sol. Nous relierons donc directement les apports d'eau avec les déplacements à l'aide d'un modèle à un réservoir. A partir de la pluie efficace P_t , la hauteur H_t dans le réservoir est calculée journalièrement selon une formule du type : $H_t = kH_{t-1} + aP_t$. La grandeur cinématique (variation A_t autour de la tendance, cf. figure 6b) est déduite de la hauteur d'eau H_t de façon linéaire. Les paramètres k et a du modèle sont déterminés au sens des moindres carrés sur une période de calage (Alfonsi, 1997).

3.3 Calage du modèle

Le modèle a été calé sur la période de mai 2003 à décembre 2005 (figure 7). Le meilleur modèle (au sens de la minimisation de l'erreur moyenne quadratique) est obtenu pour les valeurs des paramètres $k = 0,978$ (qui traduit l'influence des apports d'eau antérieurs) et $a = 0,012$. L'erreur moyenne quadratique est égale à 0.55 et le coefficient de corrélation linéaire vaut 0,85 pour 1000 données ; cette valeur est donc très significative.

Figure 7. Variations des mesures de l'extensomètre A13 autour de la tendance et valeurs fournies par le modèle sur la période de calage (du 05/2003 au 12/2005)

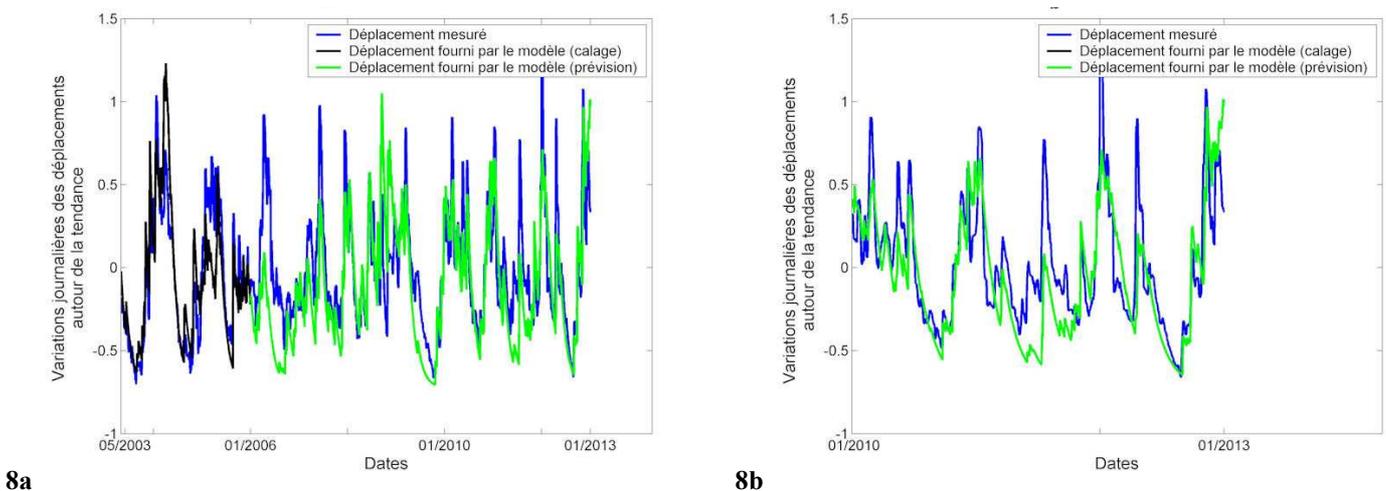


3.4 Validité du modèle

Le modèle vidange réservoir précédemment calé est ensuite extrapolé jusqu'à la fin de l'année 2012. La courbe obtenue (figure 8a) montre une approximation satisfaisante par le modèle des déplacements mesurés. Le modèle semble être valable sur toute la période à l'exception d'une ou deux périodes localisées (2009). L'erreur moyenne quadratique évaluée sur la période de prévision est égale à 0.67 et le coefficient de corrélation linéaire est égal à 0,71. Cette valeur est également très significative car elle est calculée sur un ensemble de 2500 données.

Un zoom est réalisé sur la période 2010-2012 (figure 8-b) : il permet de visualiser la bonne concordance des valeurs fournies par le modèle calé sur la période 2003-2005 avec les données de déplacements mesurés plusieurs années plus tard.

Figure 8. Extrapolation du modèle (calé sur la période 2003-2005) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures. Valeurs journalières de l'extensomètre A13.



Nous disposons donc d'un modèle capable de décrire les variations des mesures extensométriques autour de la tendance en fonction de la pluie efficace sur toute la période d'étude de 2003 à 2012. Une relation quasi-constante dans le temps a donc été mise en évidence.

4 CONCLUSION

L'analyse des mesures d'ouverture de la fracture mesurée par le capteur A13, situé dans la zone la plus active du versant de Séchilienne, a été effectuée en séparant la tendance et les fluctuations autour de cette dernière, attribuables essentiellement aux précipitations et à leur infiltration dans le massif rocheux.

Un modèle à un réservoir, très simple, permet donc de rendre compte de la commande hydraulique des déplacements qui intervient comme un facteur multiplicatif, et ceci de façon assez constante depuis une dizaine d'années.

Pour ce qui concerne la compréhension des causes du mouvement, l'analyse statistique réalisée pourrait conduire à séparer :

- un mouvement assez régulier (la tendance T_t), indépendant des pressions d'eau, présentant une accélération progressive, avec cependant une accélération assez brusque en 2007, un bref ralentissement en fin 2009 suivie d'une forte accélération depuis fin 2011; cette tendance accélératrice serait principalement due à la dégradation mécanique du massif et au mécanisme (auto-accélérateur) de basculement ;
- des fluctuations de vitesses (A_t) liées aux précipitations et donc aux pressions de l'eau dans les discontinuités du massif.

L'eau agit donc de façon directe sur les fluctuations de vitesses et indirecte sur la tendance du mouvement via les circulations d'eau qui jouent un rôle sur la dégradation mécanique du massif.

Cette interprétation devra encore être testée et affinée à l'aide d'autres séries de mesures.

5 PERSPECTIVES

Sur le plan de la surveillance opérationnelle du versant, l'existence d'une prévision relativement fiable des mouvements en fonction des précipitations mesurées devrait permettre de fournir des signes précurseurs de rupture lorsque les données de déplacements observées dévieront du comportement normal prévu par le modèle en fonction des apports d'eau. Un tel outil reste encore à développer avec la mise au point d'une méthode efficace de détermination de la tendance pour les valeurs récentes de déplacements.

6 REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de l'ANR SLAMS (Etudes Multidisciplinaires du mouvement de Séchilienne : aléa, risques associés et conséquences socio-économiques). Les auteurs de cet article remercient l'ANR et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques – Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) pour le financement de ces travaux. Les auteurs tiennent également à remercier Jean-Louis Durville, CGEDD, pour les échanges scientifiques sur le sujet et l'aide apportée à l'analyse du modèle et Geneviève Rul, CETE de Lyon, pour ces remarques avisées.

7 RÉFÉRENCES

- Alfonsi P., (1997), Relations entre les paramètres hydrologiques et la vitesse des glissements de terrain, exemples de la Clapière et de Séchilienne (France), *Revue Française de Géotechnique*, 79, pp. 3-12.
- Chanut M-A, Kasperski J, Bièvre G, Duranthon J-P, (2012), Analyse cinématique actuelle des Ruines de Séchilienne, Actes de Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, (JNGG 2012), Bordeaux 4-6 juillet 2012.
- Chanut M-A, Dubois L, Duranthon J-P, Durville J-L, (2013), Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre précipitations et déplacements, Actes de First International Conference on Landslides Risk, Tunisie, 14-16 mars 2013
- Durville J.-L., Kasperski J., Duranthon J.P. (2009) The Séchilienne landslide : monitoring and kinematics. *Rainfall induced landslides, 1st Italian Workshop on Landslides, Napoli*, vol. 1, pp. 174-180.
- Kasperski J, Pothérat P, Duranthon J-P, (2010), Le mouvement de versant de Séchilienne (Isère) : nouveaux développements pour une meilleure connaissance cinématique, Actes de Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, (JNGG 2010), Grenoble 7-9 juillet 2010.
- Effendiantz L., Duranthon, J.-P.(2004). Le versant instable des "Ruines" de Séchilienne. Point sur l'activité du phénomène et présentation du nouveau dispositif de gestion de la télésurveillance, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 252-253, pp. 29-48.
- Tenenhaus M., 2007, Statistique : méthode pour décrire, expliquer et prévoir 2ème édition, Dunod
- Vallet A., Bertrand C., Mudry J., (2013). 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), *Hydro. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 8945-8991, doi:10.5194/hessd-10-8945-2013