

Mouvement de versant de Séchilienne : relations entre précipitations et déplacements

Marie-Aurélie Chanut¹, Laurent Dubois¹, Jean-Paul Duranthon¹, Jean-Louis Durville²

¹Centre d'études techniques de l'équipement (Cete) de Lyon, Bron, France
marie-aurelie.chanut@developpement-durable.gouv.fr

²Conseil général de l'environnement et du développement durable, Paris
jean-louis.durville@developpement-durable.gouv.fr

Abstract. The main road RD 1091 has been threatened for about thirty years by a huge rock toppling, located 20 km south-east of Grenoble (France). If several million cubic meters of rock were to fall down, the debris would dam the valley and the failure of the dam by overtopping and rapid erosion would result in a catastrophic flood. The paper presents a brief description of the unstable slope, the extensive monitoring that has been carried out for 25 years and the main features of the kinematics. The general trend has shown a progressive acceleration and the cumulative displacement in the most active area is today over 16 m. Tentative relationships between the water input (rain- and snowfall) and the surface velocities have been looked for. The best statistical fitting between water input and displacements was obtained when taking account of the evapotranspiration and using a tank model. A multiplicative effect of the water input on the fluctuations (apart from the general trend) has been displayed.

Keywords: Séchilienne, landslide, rainfall, surface velocities, tank model

1 Présentation du site de Séchilienne

Le mouvement de versant de Séchilienne, identifié en 1984 suite à des chutes de blocs sur la route départementale RD 1091 reliant Grenoble à Briançon, est situé dans la basse vallée de la Romanche, à une vingtaine de kilomètres de Grenoble (Figure 1.a). 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 progression sont supérieures au mètre par an : la zone des « Ruines » (Figure 1.b). Le cône d'éboulis issu de ce secteur est d'ailleurs bien visible depuis la route. L'éboulement potentiel de la zone des « Ruines », d'un volume d'environ 3 millions de m³, est aujourd'hui considéré comme la principale menace. Les principaux risques en cas d'éboulement sont la coupure de la RD 1091, l'obstruction de la Romanche puis la rupture du barrage naturel ainsi constitué et l'inondation de la vallée à l'aval. Cette communication fait le point sur l'évolution du phénomène, sur l'instrumentation du site mise en place à des fins de surveillance opérationnelle et sur les relations entre précipitations et déplacements.

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. Trois types de mesures (extensométrie, distancemétrie infra-rouge et distancemétrie radar) permettent de quantifier les mouvements de surface sur l'ensemble du versant sud du Mont Sec. Ces mesures sont automatisées avec une fréquence d'acquisition paramétrable. En période de crise, les mesures peuvent être réalisées en continu (Effendiantz et Duranthon, 2004). L'ensemble des données sont regroupées puis rapatriées de manière redondante aux deux terminaux sur site ainsi qu'au terminal de télésurveillance du Centre d'Études Techniques (Cete) de Lyon.

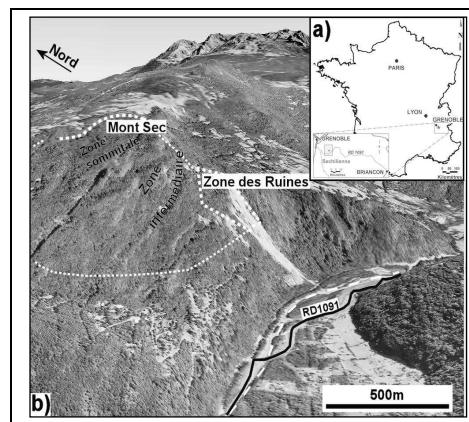


Figure.1. Localisation générale du mouvement de Séchilienne (a). Vue en trois dimensions du versant du Mont Sec, de la « zone des Ruines » et de la Romanche (b).

Les extensomètres permettent de mesurer les ouvertures des fractures. Leur précision est meilleure que 0,3 mm mais ces dispositifs rencontrent des dysfonctionnements lors des épisodes neigeux et venteux. Le distancemètre optique est basé sur la mesure du temps de parcours de l'onde électromagnétique entre des prismes (réflecteurs infra-rouge) répartis sur le versant instable et le tachéomètre situé de l'autre côté de la vallée dans le terminal de Montfalcon. Sa précision est d'environ 3 millimètres ; les mesures sont interrompues lors des épisodes pluvieux, neigeux ou brumeux. Le distancemètre radar (Lemaître *et al.*, 2004) s'affranchit des problèmes météorologiques. Il est basé, comme le distancemètre optique, sur la mesure de temps de propagation, les réflecteurs étant constitués de trièdres d'un minimum de 40 cm de côté. Ce système permet une mesure de distance sur le site avec une précision meilleure que 0,5 mm. Récemment, des applications sur sol nu - sans réflecteur - ont été testées, avec une résolution de l'ordre de 1 à 2 mm à plus de 10 km de distance (Pothérat *et al.*, 2010).

Les différents systèmes de mesure sont installés sur le versant de manière complémentaire : 33 bases extensométriques télésurveillées, 64 prismes et 40 trièdres sont disséminés sur l'ensemble du versant (Figure 2).

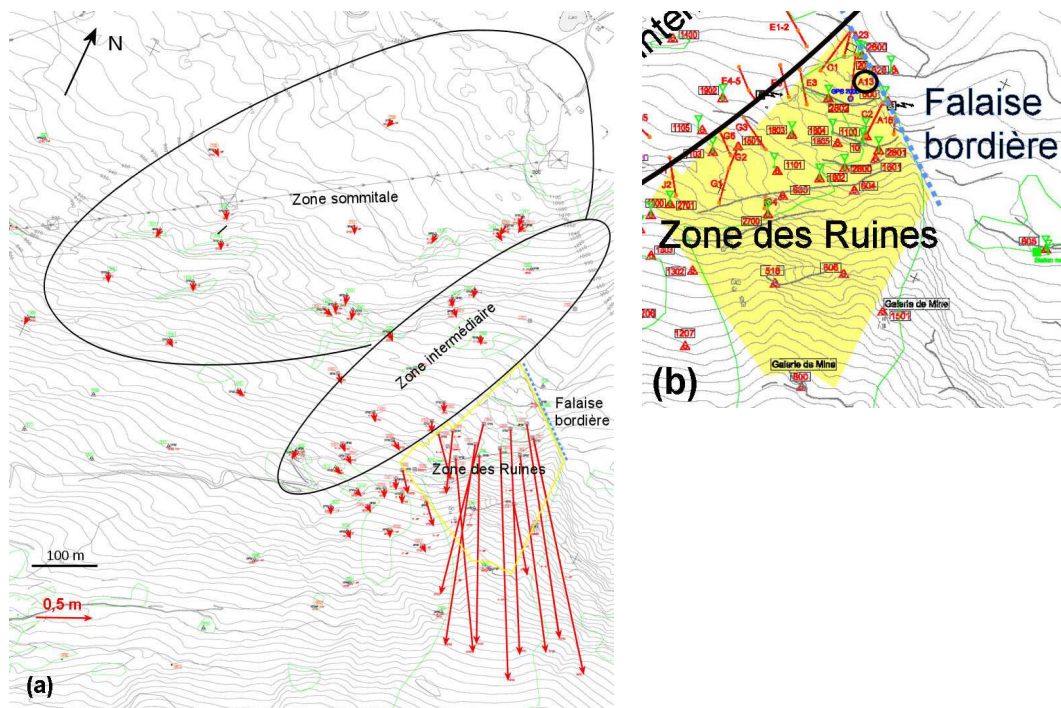


Figure.2. (a) Localisation des dispositifs de surveillance et déplacements planimétriques (novembre 2010 à novembre 2011), (b) Localisation de l'extensomètre A13 dans la zone des Ruines

De plus, deux galeries horizontales permettent d'observer les mouvements jusqu'à 240 m de la surface, et deux sondages équipés de tubes inclinométriques ont atteint la profondeur de 150 m (Kasperski *et al.* 2010).

3 Brève description du phénomène et de son évolution

3.1 Description sommaire de l'instabilité

Le mouvement de versant de Séchilienne se situe dans le massif externe cristallophyllien de Belledonne, dans les Alpes occidentales. Les terrains concernés sont principalement constitués de micaschistes affectés d'une tectonique polyphasée complexe (Giraud *et al.*, 1990). Le mouvement de versant est situé entre la faille N20°E de Belledonne passant à Vizille à l'ouest et un grand accident tectonique appelé « synclinal médian » d'orientation N20°E traversant la ville de Séchilienne à l'est.

Plusieurs familles de discontinuités sont présentes dans le versant : N20°E à N30°E, N120°E à N140°E, et N50°E à N70°E. Cette dernière famille, présente dans le secteur des « Ruines » et au-delà, découpe le massif en « lanières », plus ou moins parallèles à la vallée. La foliation est quasiment sub-verticale sur l'ensemble du versant sud du Mont Sec avec une direction N-S (Pothérat & Effendiantz, 2009).

L'ensemble des observations de terrain et des mesures, en surface et en profondeur, montrent qu'il ne s'agit pas d'un glissement sur une surface de rupture, mais d'un phénomène plus complexe, tridimensionnel, assimilable en première approximation à un fauchage ou basculement de versant. La déformation s'accroît depuis environ 80 m de profondeur jusqu'à la surface.

Au sein du versant s'est individualisée au fil des ans une zone très active, dite zone des « Ruines », caractérisée par des vitesses plus élevées (*cf.* figure 2-a) et une désorganisation très forte des terrains. Son volume est estimé autour de 3 millions de m³.

3.2 Evolution cinématique générale

Les datations par cosmonucléides montrent que la déstabilisation du versant des Ruines a commencé il y a quelque 10 000 ans, bien après le retrait des glaciers qui avaient creusé la vallée (Le Roux *et al.*, 2009). Les photos aériennes des années 1940 montrent clairement l'escarpement du Mont Sec (indiqué sur la figure 2).

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 2 mètres par an. 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.

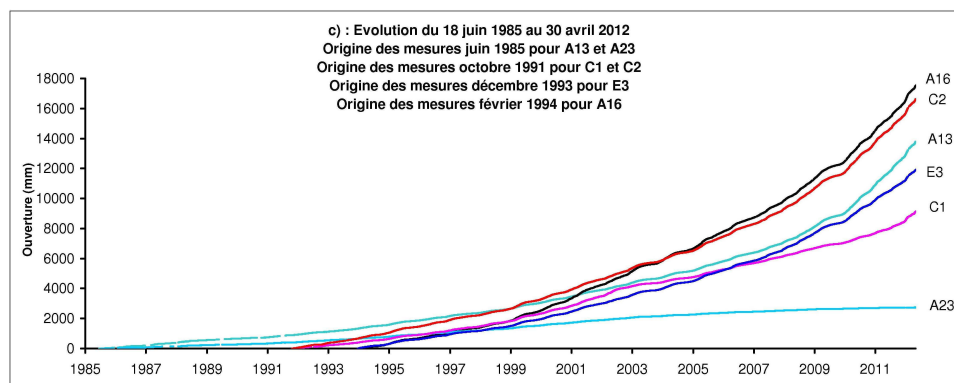


Figure.3. Mesures extensométriques dans la zone des Ruines depuis 1985

4. Relations entre précipitations et mouvements de surface

La recherche d'une relation entre précipitations et déplacements dans la zone des « Ruines » répond à un double but : mieux comprendre le processus qui engendre les fluctuations saisonnières et participer à la définition d'un critère d'alerte.

Un pluviomètre et un nivomètre sont implantés au-dessus 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 (ETP), définie mensuellement une fois pour toutes, et une évaluation journalière tenant compte de l'ETP et de la réserve utile du sol.

On considère que l'extensomètre A13 est représentatif du mouvement de la zone des « Ruines » du fait de sa position frontale non affectée d'épiphénomènes (figure 2-b). La donnée de base est l'extension journalière mesurée par cet extensomètre. Pour réduire les incertitudes des mesures, des valeurs cumulées sur plusieurs jours, avec ou sans pondération, ont été aussi utilisées.

4.1 Recherche de corrélations entre précipitations et déplacements

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). Des corrélations, satisfaisantes pendant des durées maximales de deux ou trois ans, peuvent être obtenues 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 4 montre les mesures d'extension du capteur A13, cumulées sur 15 jours (donc la vitesse moyennée sur 15 jours), en regard des apports d'eau mensuels SA_n , cumulés sur six mois de la façon suivante :

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

où A_{n-p} désigne les apports d'eau sur la période (15 jours) $n-p$ et α_p est le coefficient de pondération qui rend compte de l'influence décroissante des apports d'eau sur les six derniers mois. Le tableau ci-dessous indique les valeurs des coefficients de pondération de la période courante (n°0) à la période la plus antérieure (n°11 associée à moins 6 mois).

N° période	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Coefficient pondération	0,15	0,14	0,13	0,12	0,1	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03	0,01

Sur la figure 4, on observe des variations de vitesses de déplacement avec des périodes d'accélération suivies de ralentissements. On constate un bon parallélisme des courbes vitesses – apports d'eau, 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). De plus, la sensibilité croissante aux précipitations se manifeste par une augmentation des vitesses de déplacements alors que le niveau des précipitations reste approximativement constant. Cette augmentation de sensibilité peut être mise en relation avec une dégradation mécanique progressive du massif.

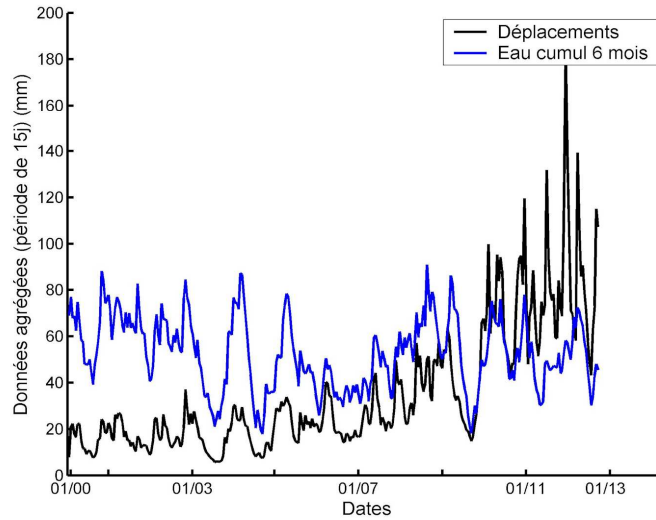


Figure.4. Apports d'eau (mm) cumulés et pondérés sur 6 mois ; ouverture de l'extensomètre A13 cumulée sur 15 jours.

4.2 Étude des fluctuations saisonnières par modèle à réservoir

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 (Chanut *et al.*, 2013). La tendance a été déterminée comme la moyenne mobile centrée sur un an des valeurs mesurées (figure 5a).

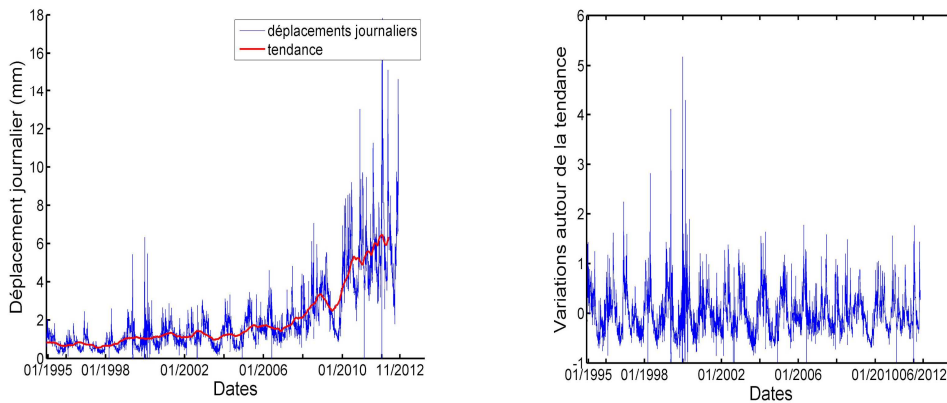


Figure.5. Décomposition des données cinématiques (mesures journalières de l'extensomètre A13) selon un modèle statistique multiplicatif : tendance (a) et variations autour de la tendance (b)

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 (figure 5b) que l'on cherche à relier aux précipitations.

La donnée de précipitations utilisée est la pluie efficace (Vallet *et al.*, 2013) qui se réfère à la part des apports bruts qui subsiste après évapotranspiration et remplissage de la réserve utile du sol. La pluie efficace correspond ainsi à la pluie qui s'infiltré dans le sol.

Nous avons utilisé un modèle à un réservoir : à partir de la pluie efficace, la hauteur H_t dans le réservoir est calculée quotidiennement selon une formule du type : $H_t = kH_{t-1} + aP_t$ et la grandeur cinématique (variation A_t autour de la tendance, *cf.* figure 5b) 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).

Le modèle a été calé sur la période de mai 2003 à décembre 2005 (figure 6). Le meilleur modèle (au sens de la minimisation de l'erreur moyenne quadratique) est obtenu pour les valeurs des paramètres $k = 0,974$ (ce qui correspond à une « mémoire » de 4 mois environ) et $a = 0,022$. L'erreur moyenne quadratique est égale à 0,3 et le coefficient de corrélation linéaire vaut 0,85 pour 1000 données ; la valeur est donc très significative.

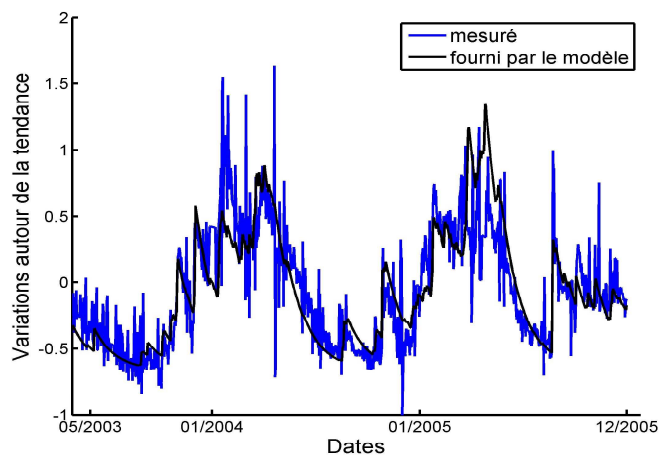


Figure.6 Variations des mesures de l'extensomètre A13 autour de la tendance et valeurs fournies par le modèle sur la période de calage (du 05/2003 au 12/2005)

Le modèle ainsi déterminé est ensuite extrapolé jusqu'à la fin de l'année 2011. La courbe obtenue (figure 7) montre une approximation satisfaisante des mesures par le modèle. 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 0,46 et le coefficient de corrélation linéaire est égal à 0,6. Cette valeur est encore très significative car elle est calculée sur un ensemble de 2000 données.

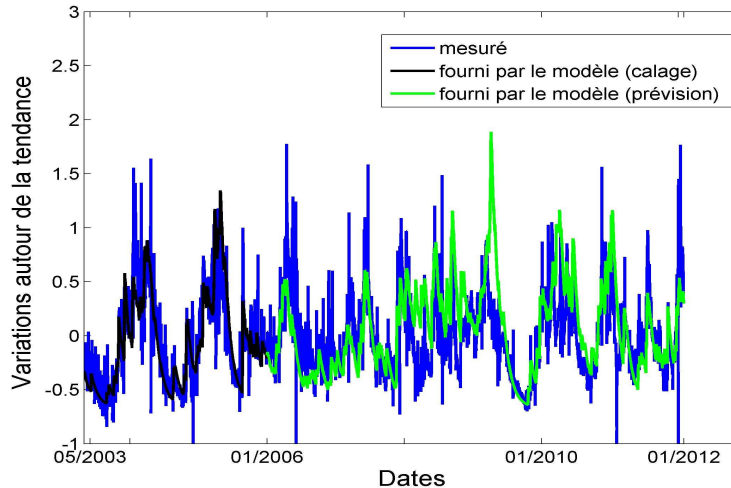


Figure.7. Extrapolation du modèle (calé sur la période 2003-2005) sur toute la période d'étude et comparaison des résultats avec les mesures. Valeurs journalières de l'extensomètre A13.

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 2011. Une relation quasi-constante dans le temps a donc été mise en évidence.

5. Conclusion

L'analyse des mesures d'extension du 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. Nous ne disposons cependant pas de données sur les pressions d'eau au sein de ce dernier.

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

Sur le plan de la surveillance opérationnelle, l'existence d'une prévision relativement fiable des mouvements en fonction des précipitations mesurées devrait permettre de mettre en évidence, par comparaison entre prévisions et observations, une évolution « anormale » pouvant prélude à une rupture.

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 et un bref ralentissement en fin 2009 ; cette tendance accélératrice serait principalement due à la dégradation mécanique du massif et au mécanisme (auto-accélérateur) de basculement ;

– des fluctuations de vitesse, liées aux précipitations et donc aux pressions de l'eau dans les discontinuités du massif, mais augmentant aussi avec la dégradation du massif. Cette interprétation devra encore être testée et affinée à l'aide d'autres séries de mesures.

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, Dubois L., Kasperski J., J-P. Duranthon, The Séchilienne landslide (France): kinematic analysis and relationships between water input and the surface velocities, *Natural Hazards and earth systems science*, à paraître.

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.

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.

Giraud A., Rochet L., Antoine P. (1990) Processes of slope failure in crystallophyllian formations, *Engineering Geology*, vol. 29(3), pp. 241-253.

Kasperski J., Pothérat P., Duranthon J.-P. (2010) Le mouvement de versant de Séchilienne (Isère) : nouveaux développements pour une meilleure connaissance cinématique, *Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG 2010)*, Grenoble, 7-9 juillet 2010.

Lemaitre F., Poussière J.-C., Duranthon J.-P., Effendiantz L., (2004), « Utilisation du radar sol pour la surveillance des mouvements de terrain », *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 49, p. 19-34.

Le Roux O, Schwartz S, Gamond J.-F., Jongmans D, Bourlès D, Braucher R, Mahaney W, Carcaillet J, Leanni L, (2009). Cosmic Ray Exposure dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 280, pp.236-245.

Pothérat P., Lemaitre F., Duranthon J.-P., Benoit A., (2010). La mesure à très longue distance. Un besoin. Un outil : le radar ULB, *Actes du Rock Slope Stability Symposium*, Paris.

Pothérat P., Effendiantz L. (2009). Néotectonique et grands mouvements de versants : le cas de Séchilienne (Isère, France). *Bull. Engineering Geology and the Environment*, vol. 68, n° 4, pp. 567-577.

Vallet A., Bertrand C., Mudry J., (2013). Effective rainfall : a significant parameter to improve understanding of deep-seated rainfall triggered landslides, *Natural Hazards and earth systems science*, soumis.