

Quantification de la dégradation mécanique et chimique d'un versant instable : approche géologique, hydromécanique et hydrochimique

Etude du versant instable de Séchilienne, Isère (38)

Journées Aléa Gravitaire 17-18 Septembre 2013 à Grenoble.

C. Baudement, UMR6249 Chrono-Environnement, OSU THETA - Université de Franche-Comté - 16 route de Gray -F-25030 Besançon cedex – France

C. Bertrand, CNRS: UMR6249 Chrono-Environnement - Université de Franche-Comté

Y. Guglielmi, CEREGE 'UMR7330 Aix-Marseille Université, CNRS – 3 place Victor Hugo – 13331 Marseille – France.

S. Viseur, CEREGE 'UMR7330 Aix-Marseille Université, CNRS

A. Vallet, CNRS: UMR6249 Chrono-Environnement - Université de Franche-Comté

F. Cappa, Geoazur (UMR7329), Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS, Observatoire de la Côte d'Azur, 250 rue Albert Einstein, 06560 Sophia Antipolis, France.

RESUME :

La déstabilisation du versant instable de Séchilienne est très sensible aux événements pluviométriques. La compréhension de la circulation des fluides dans le versant ainsi que les effets hydromécaniques associés est primordiale pour caractériser les mécanismes de déformation. L'objectif de cette étude est de déterminer (i) l'influence des fluides sur les processus de déstabilisation du versant instable, ainsi que (ii) la relation entre la chimie des eaux et la déformation de ce versant.

1. Introduction

L'infiltration des eaux souterraines est un phénomène aggravant pour la stabilité du versant de Séchilienne. La compréhension de la circulation des fluides dans le versant ainsi que les effets hydromécaniques associés est primordiale pour caractériser les mécanismes de déformation.

Cette étude porte sur la zone instable se situant dans le rameau externe du massif de Belledonne (Paléozoïque) qui est composé essentiellement de micaschistes (Barféty et Bordet, 1972). Les failles cartographiées appartiennent à plusieurs familles : les failles de direction N20-30, les failles N120-140 ainsi que les failles N70 au niveau des Ruines qui découpent le versant en « lanières ».

Plusieurs unités d'écoulements sont présentes sur le schéma conceptuel (Fig 1). Un aquifère perché s'écoule dans la couverture sédimentaire à haute altitude vers un aquifère se situant dans la zone instable. Cet aquifère est drainé verticalement vers un aquifère profond à la base du massif. L'eau s'écoule ainsi jusqu'à la nappe alluviale de la rivière de la Romanche.

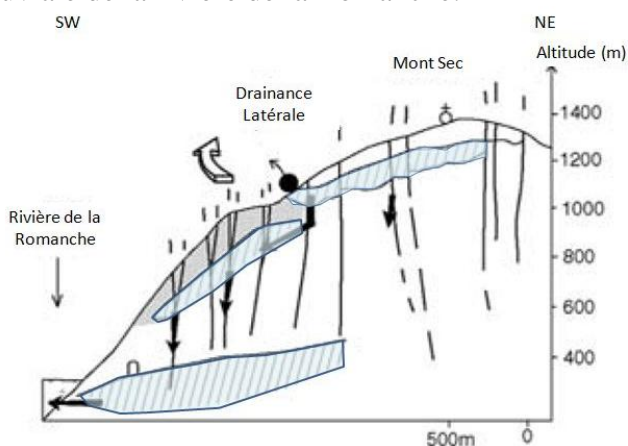


Figure 1 Schéma conceptuel hydrogéologique du versant instable (Guglielmi et al, 2002)

Un système de surveillance des sources a été mis en place afin de suivre les paramètres physiques et chimiques de certaines sources qui représentent les exutoires de ces aquifères (Fig 2). Leur localisation est due à la complexité du massif : présence de failles ou fractures, géologie, aquifères perchés.

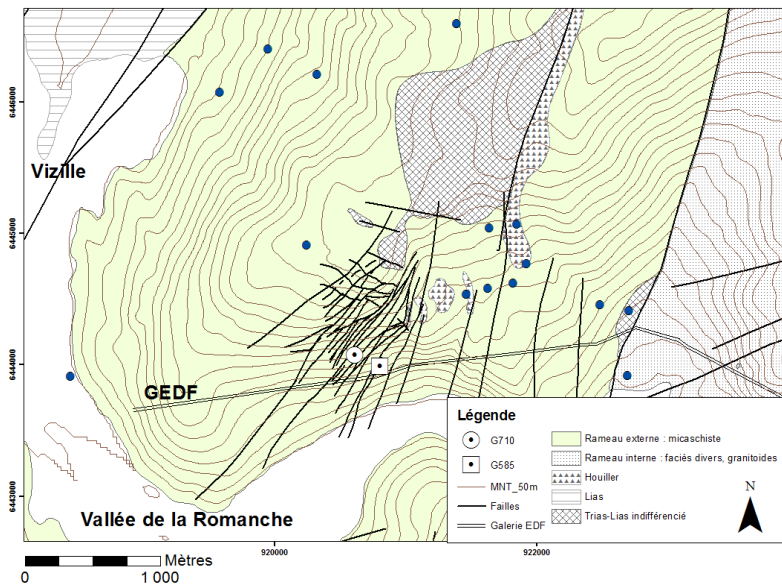


Figure 2 Localisation des exutoires des aquifères selon la géologie, des galeries de mine (G585) et de reconnaissance (G710) et de la galerie EDF.

Une galerie appartenant à Electricité De France (GEDF) se situe en bas du versant du Mont Sec à une altitude d'environ 425m. Elle traverse le massif rocheux directement sous la zone instable. Dans cette galerie des indices de fracturation ont été repérés ainsi que des venues d'eau. Des venues d'eau ponctuelles et de nombreux suintements sont identifiés dans cette galerie au sein de la zone instable.

A l'intérieur d'une galerie de reconnaissance située à l'altitude 710m NGF, au droit de la zone instable, le point de suivi nommé G710 représente deux venues d'eau. Une deuxième galerie, à la côte 585m NGF est caractérisée par des sources pérennes. En effet, un piézomètre installé à la côte 757m NGF (Lacombe, 2010) a indiqué le niveau naturel de l'eau (CETE, 2010) entre 590 et 602m d'altitude.

La déstabilisation du versant est due dans un premier temps au basculement de blocs rocheux vers la vallée de la Romanche sous l'effet de la gravité. Il n'y a pas de surface de rupture enveloppant la zone instable en profondeur. L'affaissement sommital du Mont Sec est également un des mécanismes de l'instabilité provoquant la poussée vers la vallée de la partie basse du versant.

Cette instabilité est progressive dans le temps et dépend de la géométrie du versant, des systèmes de failles et de fractures, du type de matériau en place et des conditions d'eau souterraine. En retour la déformation du versant provoque des modifications des propriétés hydrauliques des fractures. Selon la saturation en eau du massif et l'intensité des pluies qui atteignent la zone déstabilisée, la rupture est plus ou moins importante. Il a été montré que la présence de séismes profonds (Lacroix, 2011) peut provoquer des éboulements et déstabiliser le versant localement.

2. Problématiques et méthodologie

Les questions qui se posent lors de ce projet sont liées à la circulation des fluides dans le versant, leur accumulation, les effets hydromécaniques associés dans les zones faillées et les conséquences sur la chimie de l'eau. Cette étude du versant instable de Séchillienne, se déroule en trois étapes :

- Une représentation géologique en trois dimensions du versant est établie avec le géo-modéleur Gocad. Une synthèse des données géologiques et hydrogéologiques est effectuée grâce à ce modèle. Les failles cartographiées en surface sont extrapolées en profondeur. Des indices de fracturation répertoriés dans les galeries souterraines permettent de recalibrer l'emplacement de certaines failles. Ce modèle hydrogéologique confirme les écoulements d'eau à travers le massif.
- Une fois les plans de faille construits une analyse des états de contraintes sur les principales failles actives du versant est effectuée pour déterminer leur tendance au glissement ou à la dilatance. Le comportement hydromécanique des plans de failles est étudié en réalisant des simulations de variations des contraintes effectives. Cette analyse permet de localiser et de quantifier les surfaces

activées de ces plans de failles. En effet lors d'infiltration d'eau dans le massif, des zones de failles non-actives sont sollicitées. Des créations de surfaces actives surviennent en conséquence.

- Pour finir, une analyse de l'altération géochimique des surfaces actives précédemment estimées par un modèle géochimique 1D est effectuée. Ceci permet d'estimer les quantités dissoutes des éléments chimiques dans l'eau lors du glissement des failles et de comparer ces quantités à celles mesurées sur le terrain au niveau des sources du versant. Cette partie met en lien la déformation du versant par l'augmentation de surfaces actives des failles et les conséquences sur la chimie de l'eau. Si le versant se déstabilise, la chimie des sources du massif sera affectée.

3. Modèle hydrogéologique 3D du versant de Séchilienne

La partie modélisation géologique de ce projet intègre des données récoltées par différentes personnes intervenant dans l'étude du versant instable de Séchilienne. La complexité des écoulements de fluides et des structures de ce massif étant très importante, seules les structures cartographiées et les indices d'écoulement d'eau souterraine seront replacés en trois dimensions. Tout ceci afin d'élaborer les grands traits de l'hydrogéologie du versant. Le modèle hydrogéologique de Séchilienne en trois dimensions est réalisé avec le géo-modéleur Gocad, Geological Object Computer Aided Design, version 2009. Grâce à cet algorithme, des surfaces en trois dimensions sont obtenues en interpolant des structures comme des points ou des lignes. Ces plans de failles sont alors créés grâce aux traces en surface des failles cartographiées, puis les pendages sont modifiés grâce à des profils électriques (Leroux et al, 2011). Pour finir les galeries donnent des indices de fracturation qui sont des indices du passage des failles.

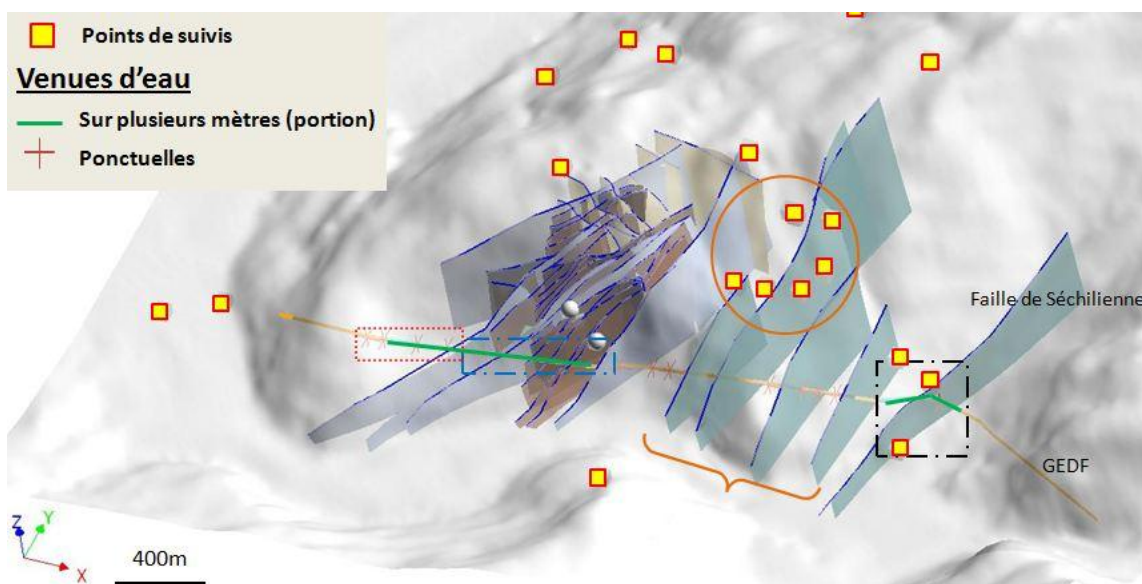


Figure 3 Réseau de failles en 3D réalisé sous Gocad, avec la localisation de la galerie EDF ainsi que les points de suivi hydrochimiques

Ce modèle géologique (Fig 3) établit une description en trois dimensions du système hydrogéologique avec les données connues. Les surfaces de cinquante failles ont été créées en profondeur grâce à une interpolation. Les hypothèses du système d'écoulement avancées par Vallet et al, 2012 sont confirmées grâce au positionnement des indices hydrogéologiques (sources, venues d'eau dans les galeries) dans l'espace. Ce modèle permet de mieux comprendre les écoulements de fluides et leur accumulation à travers le massif. Les plans de failles créés sont utilisés pour établir le comportement hydromécanique du versant instable.

4. Modèle hydromécanique 3D du versant de Séchilienne

Par la suite, les simulations hydromécaniques sont réalisées avec le logiciel 3Dstress (Southwest Research Institut, SwRI). Cet outil analyse les tendances des failles ou des fractures à glisser ou à se dilater selon un état de contraintes spécifié en trois dimensions. La tendance au glissement (slip tendency, T_s , en anglais)

selon le plan de faille correspond au rapport de la contrainte de cisaillement (τ) sur la contrainte normale (σ_n) appliquées sur une surface de faille selon l'équation 1 (Morris, 1996):

$$Ts = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (1)$$

L'étude hydromécanique a été menée en deux phases. Dans un premier temps, deux failles d'orientations représentatives des familles de failles N20-30° et N120° du versant ont été sélectionnées et étudiées séparément. Dans un second temps, l'ensemble des failles intégrées dans le modèle hydrogéologique a été considéré.

Le premier scénario (Fig 4 a)) testé sur les plans de failles est réalisé afin d'observer comment se comporte le versant instable sans eau avec comme unique pression, celle exercée par le poids du massif sous l'effet de la gravité. Un second scénario (Fig 4 b)) est réalisé avec la présence d'un niveau d'eau dans la roche à la cote 600m NGF pour prendre en compte la présence d'un aquifère profond dans le versant. Les fluides présents dans le massif jouent un rôle important dans le comportement des failles, pouvant entraîner leur ouverture ou leur glissement selon l'effet d'une variation de contrainte normale effective $\sigma'_n = \sigma_n - P_f$ avec σ_n la contrainte normale au plan de faille et P_f la pression d'eau dans la faille. Un niveau piézométrique a donc été inséré horizontalement sur les plans de failles pour simuler les effets des variations piézométriques de l'aquifère du versant sur leur activation. Pour finir, un troisième scénario (Fig 4 c)) simule une onde de pression transportée verticalement via les failles à travers le massif pour rejoindre le niveau piézométrique en profondeur. Une onde sera affectée dans un premier temps à 160m de profondeur, puis à 300m et enfin à 550m. La nappe augmente son niveau d'eau lors de cette infiltration. Cette infiltration sera considérée de 0.5MPa, cette valeur faible permet de visualiser le moindre changement de surface sur les failles étudiées.

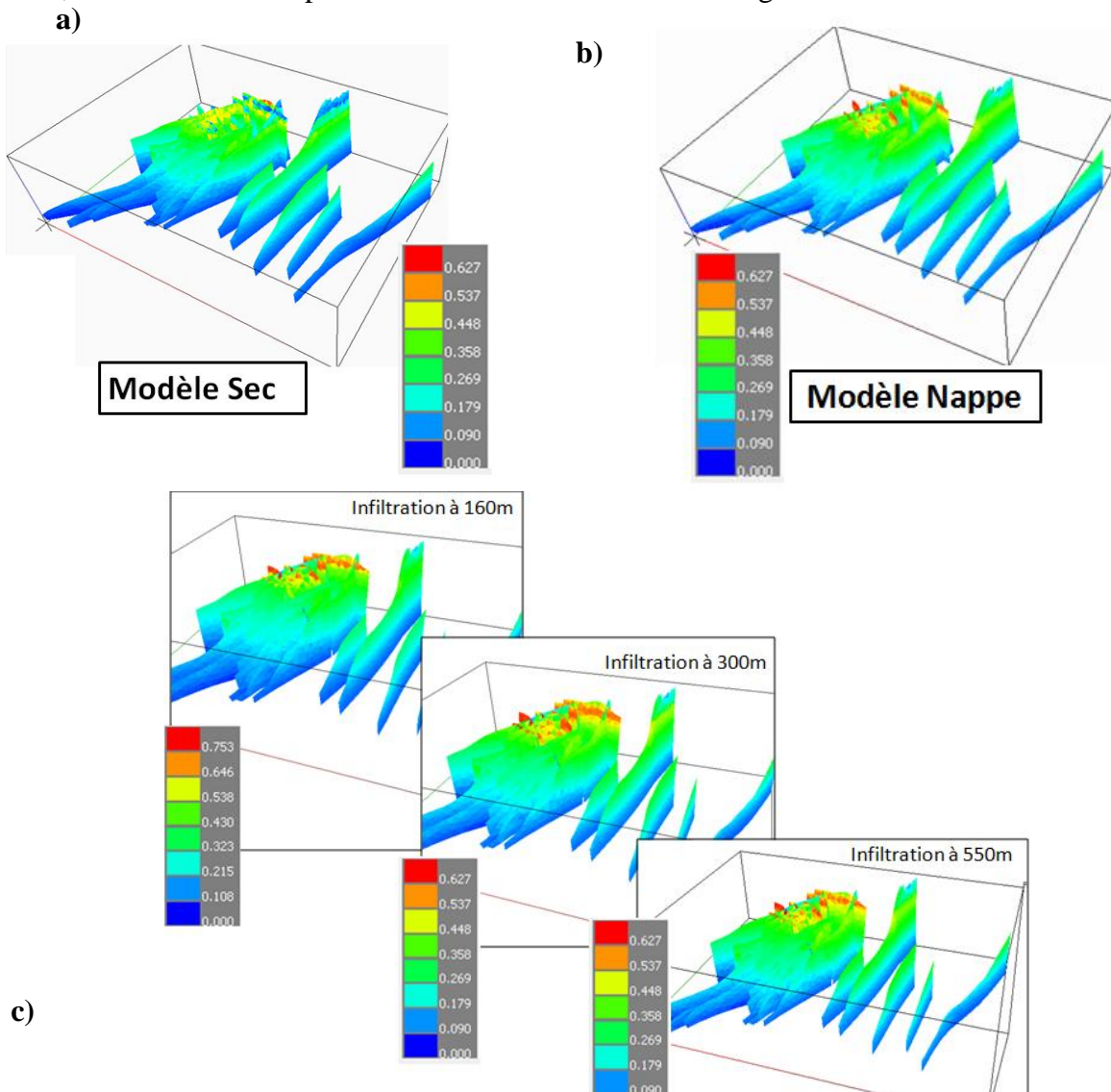


Figure 4 Réseau de failles a) Tendence au glissement dans le cas du modèle sec ; b) Tendence au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique ; c) Tendence au glissement selon la propagation de l'infiltration

Les comportements hydromécaniques des failles jouent un rôle majeur dans l'instabilité du versant rocheux de Séchilienne. La circulation des fluides le long de failles induisent ces comportements hydromécaniques. Les simulations indiquent un comportement cisailant des failles d'orientation N120 lors de la circulation d'eau. Les valeurs de la tendance au glissement sont élevées dans ce champ de contraintes appliquées. Une zone préférentielle d'activation des failles se situe entre 150m et 200m de profondeur et est très sensible aux événements d'infiltration d'eau. Lors de ces modélisations hydromécaniques, des surfaces de failles sont activées lors d'une circulation d'eau. Ces dernières sont identifiées et localisées au sein de la zone instable du versant. Le pourcentage d'augmentation de surface active entre le modèle avec la nappe et le modèle avec une infiltration (à 160m) est de +40%.

5. Analyse de l'impact des surfaces potentiellement réactivées mécaniquement sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines.

Le modèle de réaction géochimique Phreeqc (Parkhurst et Appelo, 1999) est utilisé afin de simuler la composition de l'eau pour différentes interactions de l'eau avec les micaschistes de Séchilienne. Les calculs donnent la quantité de phase détruite ou formée des minéraux par kilogramme de solution en fonction de la vitesse de réaction. A chaque étape du calcul, l'évolution de la composition chimique de l'eau et la répartition des éléments sont déterminés. La durée d'interaction entre la roche et l'eau caractérise la charge totale en éléments dissous de l'eau de sortie. Cette chimie de sortie est comparée aux données de terrain recueillies dans la galerie de reconnaissance G710 (Fig 5).

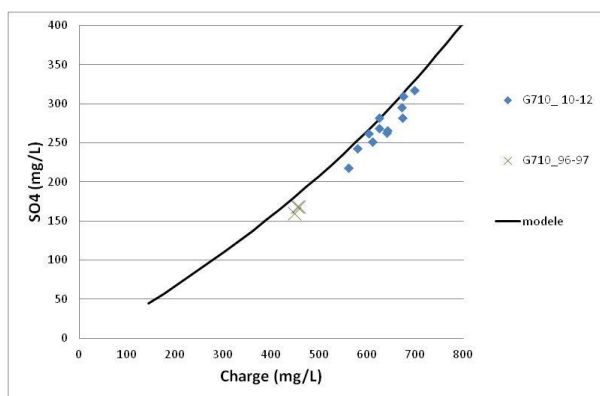


Figure 5 Simulation géochimique représentant la variation de sulfates (mg/L) en fonction de la charge dissoute (mg/L) pour le point G710 et les périodes 1996-1997/2010-2012

La première période de temps (1996-1997) est caractérisée par une faible interaction eau-roche alors que les données récentes (2010-2012) présentent une charge dissoute plus importante pour le même point étudié. La chimie des eaux enregistrées au même point mais à des périodes de temps différentes correspond également à un comportement mécanique différent du massif. Les mouvements de l'instabilité indiquent une augmentation de la déformation progressive du versant dans le temps qui accélère à partir de 2009 (Vallet et al, 2013).

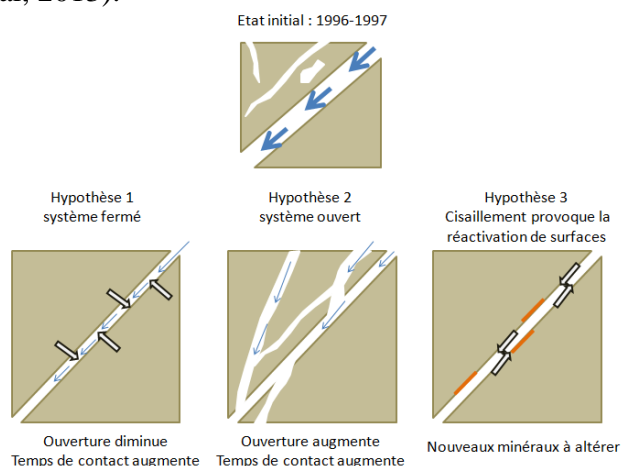


Figure 6 Trois hypothèses de la déformation du versant entraînant des modifications de la chimie des eaux.

Plusieurs hypothèses sont émises et résumées quant à cette variation de quantité de matière (Fig 6).

- Hypothèse 1 : en raison de la dégradation du massif, les failles drainant l'eau se sont refermées, le temps de contact de l'eau avec la roche a augmenté et la charge dissoute de la solution augmente en conséquence.
- Hypothèse 2 : l'ouverture de nouvelles fractures augmente les surfaces de contact de l'eau avec la roche. L'eau emprunte des chemins différents dans le réseau de fractures et interagit avec de nouvelles surfaces de contact.
- Hypothèse 3 : le comportement cisailant de la faille apporte la réactivation de nouvelles surfaces. Des minéraux fortement altérés peuvent présenter une couche d'oxyde. L'eau ne possédait plus d'interaction avec ces minéraux oxydés. Le cisaillement permet la réactivation de ces surfaces de contact et l'eau peut être à nouveau agressive vis-à-vis de la pyrite d'où l'augmentation de la charge dissoute.

•

6. Conclusion

L'objectif de cette étude était de comprendre les circulations d'eau et les effets associés sur le comportement hydromécanique des plans de faille ainsi que les conséquences sur la chimie des exutoires des aquifères du versant instable. La représentation géologique en trois dimensions a permis de créer les plans de failles en profondeur contraints par les indices de fracturations dans les galeries. Ainsi une zone préférentielle d'activation des failles est identifiée entre 150m et 200m de profondeur. La circulation des fluides le long de failles induisent ces comportements hydromécaniques de cisaillement. Des simulations géochimiques sont réalisées afin de comprendre les interactions eau-roche qui se sont produites lors de l'écoulement de l'eau dans le massif. La dégradation progressive du massif est identifiée au sein de la chimie des eaux. Dans la suite de l'étude, la zone activée des failles (étude hydromécanique) sera mise en relation avec la surface spécifique des minéraux.

Bibliographie

- Barféty J.C., Bordet P., Carme F., Debelmas J., Meloux M., Montjuvent G., Mouterde R. et Sarrot Reynauld J. 1972. Carte géologique détaillée de la France (1/50000) n°797 Vizille, Editions du BRGM, 38p.
- Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de Lyon (CETE), 2010, Ruines de Séchilienne, Rapport annuel de suivi du site, Avril 2009-Mars 2010.
- Guglielmi, Y., Vengeon, J.M., Bertrand, C., Mudry, J., Follacci, J.P., Giraud, A. 2002. Hydrogeochemistry: an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides). Bull. Eng. Geol. Environ. 61, 311–324.
- Lacombe J.Y., 2010, Rapport de sondages, Ruines de Séchilienne, Geotec, 176p.
- Le Roux O., Jongmans D., Kaperski O., Schwartz S., Potherat P., Lebruc V., Lagabrielle R., Méric O. 201. Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (western Alps, France) and calibration with geological data. Engineering Geology. vol. 120, pp.18-31.
- Morris A., Ferrill D. A., Brent Henderson D., 1996, Slip tendency analysis and fault reactivation, Geology, p275-278.
- Parkhurst D. L., & Appelo C. A. J., 1999, User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. United States geological survey, water resources investigations report 99–4259 (p. 326). Washington DC: Unites States Geological Survey.
- Vallet A., Bertrand C., Mudry J., 2012, Mouvements de fluides et processus de déstabilisation des versants alpins, ANR SLAM
- Vengeon J.M., 1998, Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble.