

Apport de l'hydrogéochemie pour la caractérisation des mouvements gravitaires

Journées 'Aléa Gravitaire' 2013

C. Bertrand, V. Marc² A. Vallet¹ J. Mudry¹ et A.D. Schmitt³

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

2- UMR 1114 EMMAH UAPV-INRA, 33 rue Louis Pasteur F-84000 Avignon

3- Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg, Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université de Strasbourg et CNRS, 1 rue Blessig, 67084 Strasbourg,

ABSTRACT Les travaux menés depuis plus d'une dizaine d'années sur différents massifs instables ont montré les potentialités des observations hydrogéochemiques (suivi à long-terme et expérimentations) pour une meilleure compréhension du comportement hydro-mécanique des instabilités de versant et potentiellement l'identification de précurseurs de la rupture ou d'accélération.

1 INTRODUCTION

L'eau joue un rôle majeur dans la déstructuration des versants instables. Il est donc nécessaire d'appréhender les circulations d'eau au sein de ces massifs. Par contre, la diversité des contextes lithologiques (milieu rocheux fracturé pour Séchilienne et La Clapière ; milieu argileux peu consolidé pour Super-Sauze et Avignonnet) et hydrogéologiques (écoulements en fracture, écoulements en matrice, zone non saturée d'épaisseur variable, milieux multi-couches) impose des stratégies d'observations différentes pour chaque site. Les méthodes hydrogéologiques classiques ne permettent pas toujours d'appréhender la circulation des fluides dans les massifs fissurés ou peu consolidés (problème de métrologie, durée de vie des appareils de mesures, écoulements lents). C'est pourquoi des méthodes indirectes ont été développées notamment l'hydrogéochemie qui donne des informations globales aussi bien sur les circulations d'eau à l'échelle de l'aquifère que sur le rôle de l'altération sur la déstructuration des massifs instables.

2 CONTEXTE : APPORT DE L'HYDROGEOCHIMIE POUR LA COMPREHENSION DES PROCESSUS GRAVITAIRES

Différentes études exploratoires ont été menées à ce jour. Ainsi Compagnon et al. (1997) et Guglielmi et al. (2000) ont étudié les circulations d'eau à La Clapière par des analyses chimiques et isotopiques. Ils ont notamment identifié la concentration en sulfates des eaux comme étant un traceur chimique de la dissolution de minéraux sulfureux présents dans le gneiss qui est fissuré et de gypse du Trias dont les dépôts ne sont que faiblement perméables. Leur étude met ainsi en avant que les différentes concentrations de sulfates analysées dans les eaux résultent de différents chemins d'infiltration et reflètent également une différence dans les temps de transfert liée à une anisotropie du matériel géologique entre le sommet et la partie centrale du terrain étudié. Différentes expérimentations, simulation hydromécaniques et méthodes hydrogéophysiques (Cappa et al., 2004 ; Guglielmi et al., 2005 ; Lebourg et al., 2005 ; Binet et al., 2007 ; Jomard et al., 2007 ; Pouya et al., 2007) ont également permis d'identifier la localisation et la quantité d'eau infiltrée et leurs effets sur l'instabilité du versant de La Clapière. De même, Bogaard et al. (2004) proposent que la concentration cationique de différentes masses d'eau permette de planifier la profondeur d'échantillonnage pour caractériser des modifications dans les masses d'eau. De Montety et al. (2007) combinent quant à eux l'analyse des concentrations de cations et d'anions sur le site de Super-Sauze et montrent que cela permet de prouver que la chimie des eaux n'est pas entièrement expliquée par la recharge avec les eaux de pluie ou un simple équilibre des eaux avec l'encaissant, mais qu'il faut invoquer une contribution d'eaux salines remontant via une faille située en profondeur. Leur approche hydrochimique leur a aussi permis de fixer les limites des hydrosystèmes étudiés. Plus récemment, Debieche et al. (2011) ont montré que la mesure de concentrations de cations et

d'anions apportait des informations sur la dynamique des eaux de nappe à Super-Sauze, sur un substratum marneux fortement hétérogène et fissuré, en réponse à des infiltrations d'eau de pluie. Ces travaux ont ainsi apporté des informations, concernant par exemple l'effet de la fissuration superficielle du substratum sur la recharge de la nappe ou encore l'effet de l'hétérogénéité du substratum sur la mise en place d'une circulation préférentielle des masses d'eau et de masses d'eau perchées. En ce sens, l'hydrogéochimie peut être utilisée comme outil d'investigation de l'architecture du réservoir hydrologique souterrain et comme outil d'analyse destiné à déterminer l'origine, les chemins et le temps de résidence des eaux (notamment grâce aux données isotopiques). Par exemple, l'hydrogéochimie, utilisée avec succès aussi bien dans les massifs rocheux que peu consolidés, permet de définir des familles d'eaux et d'identifier la participation des différents réservoirs à l'écoulement dans les versants en mouvement. D'autre part, ces méthodes peuvent également mettre en évidence l'existence de variations lithologiques ou de structures géologiques qui ne sont pas visibles à partir d'investigations géologiques classiques. Enfin, au-delà du rôle de traceur des sources d'eau, les caractéristiques hydrogéochimiques au sein d'un versant instable sont susceptibles de jouer un rôle sur l'altérabilité des matériaux et donc sur leur fragilisation mécanique

2.1 Hydrogéochimie: accès aux propriétés hydrogéologiques globales du versant.

Afin de caractériser précisément l'infiltration naturelle des eaux depuis les zones de recharge jusqu'aux exutoires, un suivi hydrochimique a été mis en place depuis 2010 sur le versant de Séchilienne dans le but de comprendre les écoulements dans un massif métamorphique à double perméabilité (transit rapide dans les failles vs. transit lent dans la roche fissurée).

L'analyse croisée des résultats de 10 campagnes d'échantillonnage d'eau des sources du Massif du Mont Sec, d'une campagne isotopique en $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, ainsi qu'une campagne de multi-traçage artificiel a permis de définir un schéma conceptuel d'écoulement à l'échelle du massif (Fig. 1). Les résultats mettent en évidence la dualité perméabilité de matrice/fracture des micaschistes avec des écoulements préférentiels, réactifs et rapides dans les zones fracturées contre des écoulements plus diffus, inertiels et lents dans la roche moins fracturée (Hydrogéochimie, traçage artificiel). Le versant instable est alimenté par un vaste bassin versant (traçage artificiel) même si la contribution des écoulements semble minoritaire par rapport à l'infiltration locale (O18). La campagne de multi-traçage a montré une zone d'interconnexion entre le versant instable et les sources de Fonafrey, Thiébaud, Clos Bénit et la Bathie. Enfin la zone d'alimentation des sources des Aillouds et Mouniers semble influencée par des eaux superficielles du Rif Bruyant (^{18}O , Conductivité). Finalement la galerie EDF, situé à la base du versant de l'instabilité, semble jouer le rôle de drain majeur vers le Château de Vizille.

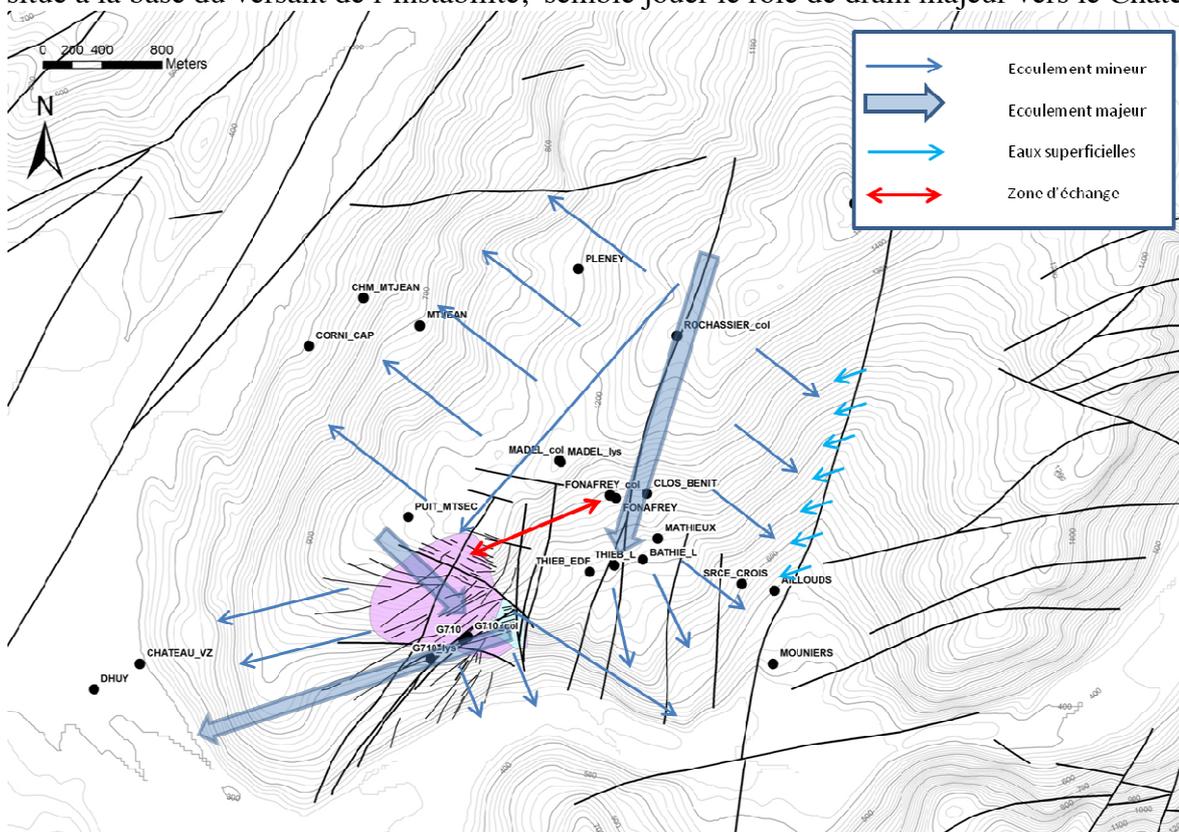


Figure 1 : Schéma d'écoulement établi à partir des données hydrochimiques sur le site de Séchilienne

2.2 Hydrogéochimie : Altération et déstabilisation

Les analyses chimiques réalisées sur les piezomètres ont la particularité d'avoir un signal chimique contrasté. Outre les conditions d'écoulement proprement dites (impact des écoulements préférentiels notamment), l'interaction eau-matrice et la nature chimique résultante des eaux revêtent une grande importance. L'hydrogéochimie et la géochimie permettent de renseigner indirectement sur l'écoulement des nappes dans le versant, et directement sur l'altération des roches.

L'ensemble des données hydrochimiques et isotopiques collectées sur le terrain ainsi que la modélisation géochimique entreprise sur les mesures in situ montrent que l'origine de l'eau de la nappe du glissement de Super-Sauze est complexe. L'analyse des données hydrogéochimiques tend à indiquer que l'origine de l'eau du système souterrain de Super-Sauze est à rechercher, au moins en partie, au-delà des limites topographiques du glissement. La forte concentration en sodium à l'amont pourrait même montrer qu'une origine évaporitique de l'eau de recharge existe par le lessivage des faciès triasiques à la base du klippe de Lan (Fig. 2).

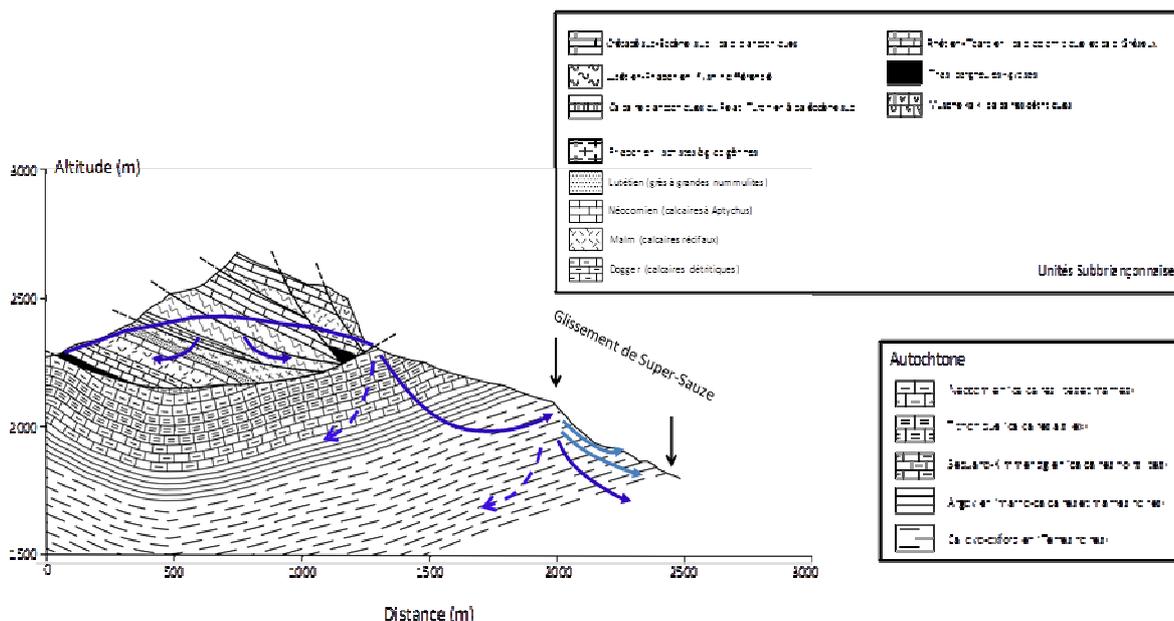


Figure 2 : Modèle conceptuel des systèmes hydrologiques du site de Super-Sauze

Un système hydrogéologique régional se développe à partir du klippe de Lan qui constitue une sorte de château d'eau dans le secteur. Le contact anormal des séries allochtones avec l'autochtone représente un contraste hydraulique favorable à la constitution d'un stock. C'est aussi à la base des séries allochtones que l'on trouve le trias et les faciès à l'origine probable d'une forte concentration des eaux (cargneules, gypse, argilites). Le drainage de ces eaux dans les séries autochtones est vraisemblablement favorisé par l'existence de faisceaux de failles méridiennes d'âge crétacé supérieur ayant rejoué au pliocène et recoupant toutes les unités autochtones dont les terres Noires. Ce processus complexe est supposé participer à l'alimentation du glissement dans la partie amont du système. Il se surimpose à un système hydrogéologique local alimenté par la pluie et la fonte des neiges sur l'aire d'extension du glissement. L'intervention du système régional profond est supposé relativement continue. Cette arrivée d'eau « par le bas » dans la partie amont joue probablement un rôle dans la déstabilisation mécanique et l'érosion chimique à la base du glissement. Les anomalies chimiques et isotopiques rencontrées dans les eaux de la coulée correspondent d'ailleurs aux secteurs où le glissement est le plus actif.

2.3 Hydrogéochimie : détermination de précurseur de l'instabilité gravitaire ?

La chimie des eaux est un signal très fin qui permet la localisation dans le temps et dans l'espace de l'arrivée des eaux d'infiltration à l'origine des impulsions mécaniques des instabilités de versant.

Il s'agit de comprendre comment s'organise la relation complexe entre altération chimique, modifications hydromécaniques et fragilisation/mouvements du versant rocheux instable.

À Séchillienne, le suivi hydrochimique a permis de démontrer que la conductivité mesurée est majoritairement expliquée par la concentration en sulfates. La conductivité électrique est ainsi représentative du signal chimique engendré par la dégradation du massif (Fig. 3)

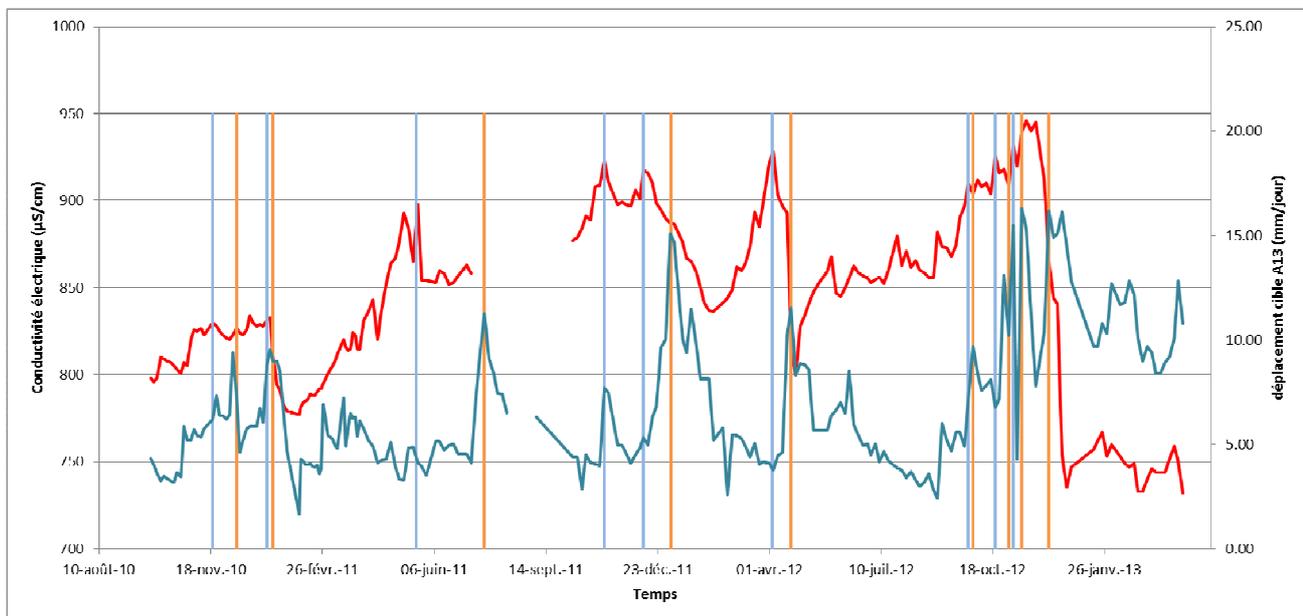


Figure «3 : Variations temporelles de la conductivité électrique mesurée à la galerie de reconnaissance et du déplacement mesuré par l'extensomètre A13. Trait bleu : maximum des pics de conductivité électrique ; trait orange : maximum des pics de déplacement.

Les pics correspondant aux maxima de conductivité et de déplacement, ne sont pas synchrones, ces derniers étant toujours postérieurs aux premiers. Le manque de données de conductivité électrique pendant la période de juillet 2012 à octobre 2012 ne permet pas d'estimer une amplitude de variation de manière fiable. L'écart entre ces pics varie entre 16 et 25 jours pendant la période s'étendant de septembre 2010 à avril 2012 puis entre 4 et 8 jours au-delà de cette période.

Cette diminution d'amplitude s'explique par le fait qu'à partir d'octobre 2012, la réactivité du versant instable s'accélère pour atteindre un paroxysme le 7 décembre 2012. Ce comportement se traduit par une forte hausse de la conductivité électrique qui atteint une valeur de $945 \mu\text{S}/\text{cm}$ le 26 novembre 2012, ce qui est la plus forte valeur enregistrée depuis septembre 2010 soit un décalage de 11 jours entre les deux signaux.

Par la suite, le signal de conductivité se stabilise autour d'une valeur moyenne de $730 \mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui représente par contre les valeurs les plus basses enregistrées depuis le début du suivi.

L'acquisition en continu de ce paramètre est pertinente pour le site de Séchilienne et peut se substituer au suivi chimique à partir du moment où le lien est établi entre conductivité-éléments chimiques-origine des éléments chimiques. L'avantage de l'acquisition de cette donnée est triple, ce qui peut en faire un outil pour la gestion du risque: mesures en temps réel, avec un pas de temps très fin et mise en œuvre peu coûteuse.

3 PROTOCOLE DE SURVEILLANCE HYDROCHIMIQUE DES INSTABILITES GRAVITAIRES.

En raison de l'hétérogénéité des milieux étudiés (matériaux remaniés et en mouvement, comportement rhéologique complexe, matériaux à faible perméabilité de pores, etc) et de difficultés métrologiques et expérimentales associées, il est difficile de mettre en place le même type de suivi hydrochimique sur tous les sites.

Le Tableau 1 synthétise l'ensemble des paramètres hydrogéochimiques suivis sur les sites du SNO-OMIV

Tableau 1 : Analyses hydrochimiques réalisées sur les différents sites

	Glissements visqueux		Versants rocheux	
	Super-Sauze	Avignonet	La Clapière	Séchilienne
Nombre de campagnes d'échantillonnage par an	4	1	3	3
Type de prélèvement	Piézomètres (prélèvements manuels + collecteur automatique sur courtes périodes)	Sources + piézomètres (prélèvements manuels)	Source (1 collecteur automatique + prélèvements manuels)	Sources (2 collecteurs automatiques + prélèvements manuels)
Nombre	20	7-8	50	91

d'échantillons par an				
Type d'analyses chimiques par échantillon	Majeurs (anions et cations), silice totale	Majeurs, traces	Majeurs (anions et cations), silice totale	Majeurs (anions et cations), silice totale
Mesures physique en continu			Cond électrique, Temp.	Cond électrique, Temp
Mesures physiques ponctuelles	Cond, Temp, pH	Cond, Temp, pH	Cond, Temp, pH	Cond, Temp, pH

3.1 Instrumentation sur roche molle

3.1.1 Super-sauze,

Aucune source n'étant visible sur le glissement-coulée de Super-Sauze, l'étude hydrochimique s'appuie sur l'analyse de l'eau d'une batterie de piézomètres répartis sur l'ensemble du glissement. Le réseau de surveillance piézométrique installés en juin 1996 comportait au départ 30 piézomètres; certains sont encore en place mais un grand nombre d'entre eux a été cisailé lors des déplacements du glissement ce qui rend difficile un suivi régulier et dans des conditions analogues d'une campagne sur l'autre. Les prélèvements se font par des campagnes d'échantillonnage 4 fois par an par prélèvement d'eau dans les piézomètres à l'aide d'une pompe immergée 12 V. Compte tenu des très faibles flux d'eau, les piézomètres sont préalablement vidés puis l'échantillonnage a lieu le lendemain après un nouveau remplissage des tubes.

Les conditions climatiques rendant impossible les études de terrain pendant l'hiver (couverture neigeuse importante), les campagnes de prélèvement s'échelonnent du printemps à l'automne.

3.1.2 Avignonet

Les prélèvements se font sur des sources, 1 fois par an au moment de la fonte des neiges (mars/avril, seule période de l'année où des sources existent sur le site). Les mesures de conductivité/température/pH sont effectuées en même temps (sonde WTW). 1 piézomètre est échantillonné pour comparaison. Au vu des très faibles flux, l'eau arrivant dans le piézomètre s'équilibre très rapidement avec l'atmosphère et ne peut pas être considérée comme représentative du sous-sol.

3.2 Instrumentation sur roche dure

Contrairement au cas précédent, les exutoires de (s) nappe (s) sont visibles ce qui rend possible un suivi en continu des paramètres physiques (température et conductivité électrique). Il est également possible de suivre la chimie de l'eau à un pas de temps très serré (par exemple : prélèvement tous les 4 jours à Séchilienne). Ce suivi nous permet de comprendre mieux les écoulements dans un massif métamorphique à double-perméabilité (transit rapide dans les failles vs. transit lent dans la roche fissurée).

3.2.1 La Clapière

Le suivi des paramètres physiques (température, hauteur d'eau et conductivité électrique) est réalisé sur deux sources (en pied et en marge) du glissement. Associé à ce suivi, des prélèvements d'eau sont réalisés sur la source de pied de glissement. Depuis juin 2012, il existe donc des données synchrones des paramètres physico-chimiques

3.2.2 Séchilienne

Un suivi de 4 sources (de septembre 2010 à septembre 2012, un prélèvement tous les 4 jours) a été réalisé dans le cadre d'un projet ANR (SLAMS). Depuis septembre 2012 le suivi de deux de ces sources a été pérennisé dans le cadre du réseau OMIV par le laboratoire Chrono-Environnement de l'Université de Franche-Comté. Le nombre de campagnes d'échantillonnage pour ces deux sites est de l'ordre de deux réparti sur l'année hydrologique plus une campagne lors de la fonte des neiges.

4 CONCLUSIONS

L'hydrogéochimie, utilisée avec succès aussi bien dans les massifs rocheux que peu consolidés, permet de définir des familles d'eaux et d'identifier la participation des différents réservoirs à l'écoulement dans les versants en mouvement. Le suivi de la chimie des sources, notamment des éléments majeurs (Ca, Mg, K, Na,

HCO₃, Cl, SO₄, SiO₂) couplée à des prélèvements ponctuels (isotopes de l'eau) permet de renseigner sur la recharge (mécanismes d'écoulement, temps de transit, inertie du système) ou l'étiage (origine et chemin de l'eau souterraine) du ou des aquifères. D'autre part, le suivi de traceurs naturels (variables selon les minéraux en contact avec l'eau) peut également mettre en évidence l'existence de variations lithologiques ou de structures géologiques qui ne sont pas visibles à partir d'investigations géologiques classiques. Enfin, le suivi de traceurs naturels, couplé à des suivis synchrones de la pluviométrie et des vitesses de déplacement, apporte une meilleure compréhension du comportement hydromécanique et potentiellement l'identification de précurseurs de la rupture ou d'accélération importante du massif.

Au-delà du rôle de traceur des sources d'eau, les caractéristiques hydrogéochimiques au sein d'un versant instable sont susceptibles de jouer un rôle sur l'altérabilité des matériaux et donc sur leur fragilisation mécanique. En effet, l'érosion chimique engendrée par les interactions eau-roche implique une perte de substance qui peut modifier les caractéristiques hydrodynamiques et rhéologiques des roches. Un autre exemple est la relation observée par certains auteurs entre la chimie de l'eau interstitielle et la stabilité physicochimique des minéraux argileux (par exemple, le rôle dispersif du sodium qui mène à une dégradation de la structure des sols argileux).

Tous ces éléments montrent que la chimie de l'eau est un paramètre pertinent pour l'étude des interactions entre l'eau et la matrice de sol dans les versants instables (processus d'écoulement et altérations). A l'image des variables plus classiquement étudiées dans ces milieux (hydrologie, déplacement, sismicité), elle a vocation à intégrer les réseaux de suivi à long terme mis en place dans le cadre des observatoires.

5 REFERENCES

- Binet S., Jomard H., Lebourg T., Guglielmi Y., Bertrand C., & Mudry J. 2007. Experimental analysis of groundwater flow through a landslide slip surface using natural and artificial water chemistry tracers. *Hydrol. Process.* 21: 3463-3472.
- Bogaard T.A., Guglielmi Y., Marc V., Emblanch Ch., Bertrand C., & Mudry J. 2007. Geo- and hydrochemical monitoring in landslide research: a review. *Bull. Soc. Geol. France*, 178: 113-126.
- Bogaard T.A., Buma J.T., & Klaver C.J.M. 2004. Testing the potential of geochemical techniques for identifying hydrological systems within landslides in partly weathered marls. *Geomorphology* 58: 323-338.
- Cappa F., Guglielmi Y., Soukatchoff V.M., Mudry J., Bertrand C., & Charmoille A. 2004. Hydromechanical modeling of a large moving rock slope inferred from slope leveling coupled to spring long-term hydrochemical monitoring: example of the La Clapière landslide (Southern Alps, France). *J. Hydr.* 291: 67-90.
- Compagnon F., Guglielmi Y., Mudry J., Follacci J.-P., & Ivaldi J.-P. 1997. Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand mouvement de terrain : exemple du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France). *C.R. Acad. Sci.* 325: 565-570.
- Debieche T.-H., Bogaard T.A., Marc V., Emblanch C., Krzeminska D.M., & Malet J.-P. (2011). Hydrological and hydrochemical processes observed during a large-scale infiltration experiment at the Super-Sauze mudslide (France). *Hydrol. Process.* DOI: 10.1002/hyp.7843.
- Guglielmi Y., Cappa F., & Binet S. 2005. Coupling between hydrology and deformation of mountainous rock slopes : insights from La Clapière area (southern Alps, France). *C.R. Geosciences* 337: 1104-1163.
- Guglielmi Y., Bertrand C., Compagnon F., Follacci J.P., & Mudry J. 2000. Acquisition of water chemistry in a mobile fissured basement massif : its role in the hydrological knowledge of the la Clapière landslide (Mercantour massif, southern Alps, France). *J. Hydrol.* 220: 138-148.
- Jomard H., Lebourg T., Binet S., Tric E., & Hernandez M. 2007. Characterisation of an internal slope movement structure by hydro geophysical surveying. *Terra Nova* 19: 48-57.
- Lebourg T., Binet S., Tric E., Jomard H., & El Bedoui S. 2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a Deep Seated Landslide. *Terra Nova* 17: 399-406.
- de Montety V., Marc V., Emblanch C., Malet J.-P., Bertrand C., Maquaire O., & Bogaard T.A. 2007. Identifying the origin of groundwater and flow processes in complex landslides affecting black marls: insights from a hydrochemical survey. *Earth Surf. Process. Landforms* 32: 32-48.
- Pouya A., Léonard Ch., & Alfonsi P. 2007. Modelling a viscous rock joint activated by rainfall: Application to the La Clapière landslide. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44: 120-124.