

# Approche hydrochimique de la dégradation mécanique du versant instable de Séchilienne

C. Bertrand, A. Vallet & J. Mudry

UMR6249 Chrono-Environnement, CNRS - Université de Franche-Comté - 16 route de Gray - F-25030 Besançon cedex - France

**ABSTRACT:** 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. Pour cela, un suivi hydrogéochimique des eaux souterraines a été mis en place depuis 2010 sur le site de Séchilienne (France). La conductivité électrique est représentative du signal chimique engendré par la dégradation du massif. L'acquisition en continu de ce paramètre est pertinente pour le site de Séchilienne et peut se substituer au suivi chimique. 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 couteuse.

## INTRODUCTION

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 du versant.

Des mesures chimiques ont déjà été réalisées sur plusieurs versants instables. Par exemple, Binet (2006, Binet et al., 2009) a montré que la mesure des concentrations en sulfates permettait de localiser dans le temps et dans l'espace l'arrivée des eaux d'infiltration à l'origine des impulsions mécaniques du versant.

La mesure des concentrations en sulfates, dans le cadre du glissement de terrain de la Clapière répond donc bien aux critères d'un observable dans le cadre d'une mesure d'observatoire.

Néanmoins, il se pose le problème de l'acquisition en continu de ce paramètre ou de n'importe quel autre paramètre chimique corrélable aux mécanismes qui commandent les mouvements gravitaires. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'appareil qui permette une acquisition en continu, avec une bonne sélectivité et une bonne résolution de paramètres chimiques. Par contre, il est possible de faire une mesure indirecte, qui est celle de la conductivité électrique de l'eau, facilement mesurable en continu. Effectivement, la conductivité électrique est reliée à la minéralisation de l'eau notamment aux éléments majeurs. Il suffit de corrélérer la conductivité électrique avec la concentration en ion majeur.

Il est cependant nécessaire de faire des prélèvements pour réaliser des analyses chimiques complètes, afin de corrélérer dans le temps concentration de chaque observable chimique et conductivité électrique. Si sur le glissement de la Clapière, nous ne disposons pas pour le moment de chroniques de données physico-chimiques (conductivité électrique, température, pH et concentrations en ions majeurs) suffisantes ce n'est pas le cas pour Séchilienne où l'ensemble de ces paramètres sont mesurés en continu pour la conductivité électrique, et avec un pas de temps de 4 jours pour la chimie depuis 2010. Dans cette optique on se propose de définir des observables chimiques qui répondent à cet objectif en se servant de la chronique de données physico-chimiques sur trois points du versant le cadre de l'ANR SLAMS.

A terme la méthodologie développée intégrée sur tous les sites suivis actuellement par l'OMIV, l'objectif étant de mieux comprendre le rôle de l'altération chimique de la roche et de ses effets et d'utiliser cette altération comme marqueur de la déstabilisation des versants instables.

# 1 CONTEXTE ET METHODE

## 1.1 Localisation du réseau de surveillance

La sélection du réseau de surveillance s'est basée sur une campagne de traçage artificiel réalisé en 2002 par l'Université de Besançon. Malgré les contraintes du terrain (secteur fortement anthropisé sur le versant à l'est de l'instabilité et absence de sources actives sur le versant instable), trois points ont été identifiés (Fig. 1, points rouges) semblant encadrer au mieux les mécanismes d'écoulement de l'aquifère du versant de Séchilienne, dont le comportement hydrodynamique influence la déstabilisation.

Il s'agit de la source de Fonafrey, d'une sortie d'eau au droit d'une zone fissurée dans la galerie de reconnaissance G710 et de la source du Maniguet situé dans le parc du château de Vizille pour lesquelles une instrumentation a été mise en place.

Les autres points de sortie sont suivis périodiquement à raison d'un prélèvement tous les trois mois.

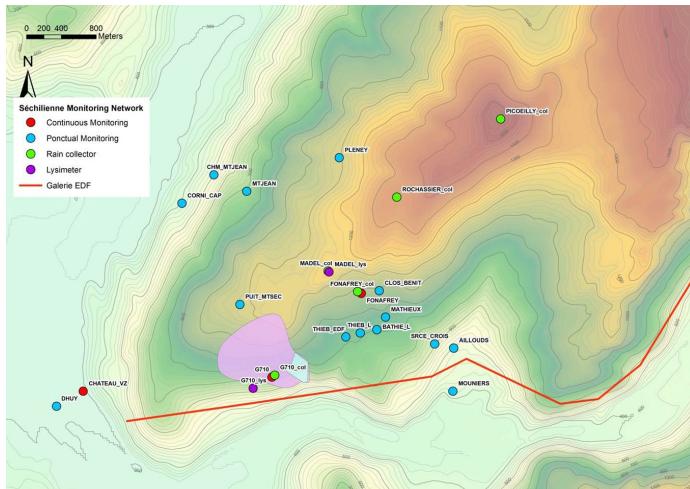


Figure 1 : Carte de localisation des points de mesure sur le versant de Séchilienne.

### 1.1 Suivi hydrochimique

#### 1.1.1 Mesures en continu

Un préleveur automatique (cations et anions majeurs), une sonde OTT (température, pression, conductivité), un seuil (débit) ont été installés pour chacun de ces trois points. Les mesures sont effectuées sur des pas de temps courts (4 jours pour le préleveur d'eau, de 5 minutes à 30 minutes pour les sondes) qui peuvent être modifiés pour être adaptés aux conditions de recharge de l'aquifère.

#### 1.1.2 Mesures ponctuelles

A chaque campagne de terrain (tous les trois mois), un échantillonnage de l'ensemble des sources, est réalisé sur lequel la chimie de l'eau est analysée. Les paramètres mesurés sont la température, la conductivité électrique, le pH ainsi que les cations et anions majeurs. Lors de ces campagnes les ions bicarbonates sont également analysés en laboratoire moins de 48 heures après le prélèvement des échantillons d'eau.

Les mesures ponctuelles de conductivité électrique réalisées sur les trois points sont comparées aux mesures faites par les sondes ce qui permet de vérifier la validité de la mesure faite en continu et d'effectuer une correction si nécessaire.

## 2 RESULTATS

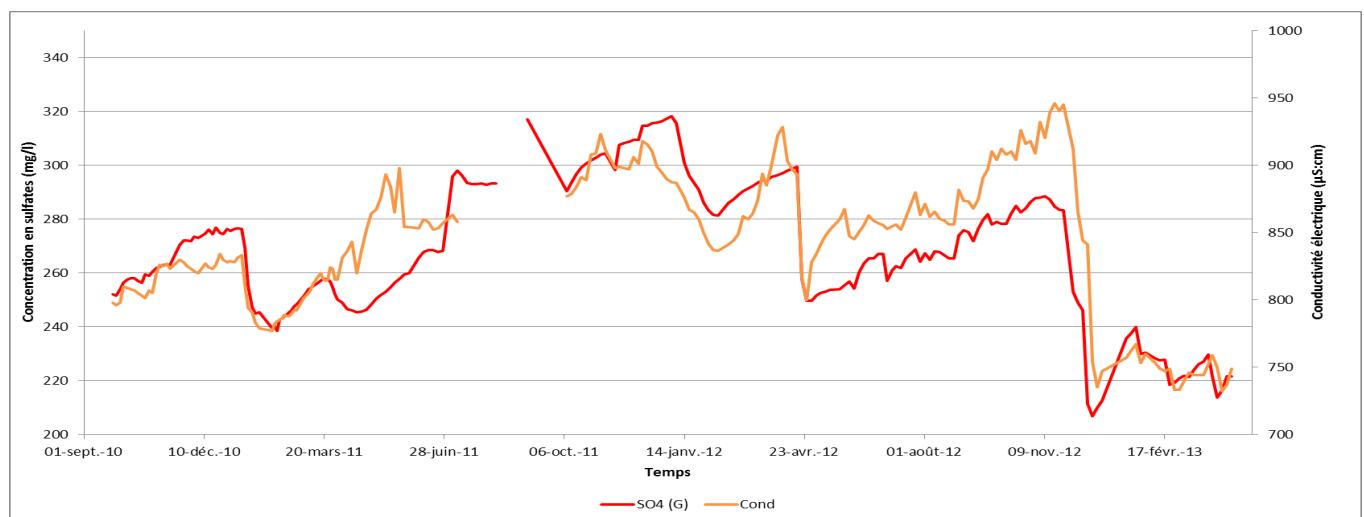
### 1.2 Relation chimie-conductivité électrique

La conductivité électrique traduit la minéralisation de l'eau. Une régression linéaire multiple a été réalisée afin de déterminer les ions majeurs qui contribuent le plus à la minéralisation de l'eau donc aux variations de la conductivité électrique (Tab. 1). Cette régression linéaire multiple a été faite à partir des données chimiques des treize campagnes ponctuelles réparties sur deux ans. Les coefficients de détermination sont significatifs pour le calcium ( $R^2= 0,671$ ), pour les sulfates ( $R^2=0,612$ ) et dans une moindre mesure pour le magnésium ( $R^2= 0,487$ ).

Tableau 1 : valeur des paramètres de la régression linéaire multiple et de la matrice de corrélation basée sur les valeurs moyennes des 13 campagnes (13 observations, 8 variables) réalisées à partir des analyses chimique des eaux de la galerie G710

	SO4	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO3	
R <sup>2</sup>	0.612	0.671	0.487	0.012	0.021	0.062	0.004	
F	17.335	22.456	10.463	0.131	0.240	0.726	0.045	
Pr > F	0.002	0.001	0.008	0.724	0.634	0.412	0.836	
Cond_field	17.335	22.456	10.463	0.131	0.240	0.726	0.045	
	0.002	0.001	0.008	0.724	0.634	0.412	0.836	
Variables	Cond_field	SO4	Ca	Mg	Na	K	HCO3	
Cond_field	<b>1.000</b>	0.782	0.819	0.698	-0.109	0.146	-0.249	-0.064
SO4	0.782	<b>1.000</b>	0.636	0.915	-0.067	0.325	-0.249	-0.143
Ca	0.819	0.636	<b>1.000</b>	0.476	-0.220	0.029	-0.391	0.093
Mg	0.698	0.915	0.476	<b>1.000</b>	0.107	0.400	-0.224	0.043
Na	-0.109	-0.067	-0.220	0.107	<b>1.000</b>	0.330	0.052	0.357
K	0.146	0.325	0.029	0.400	0.330	<b>1.000</b>	0.056	0.529
Cl	-0.249	-0.249	-0.391	-0.224	0.052	0.056	<b>1.000</b>	-0.061
HCO3	-0.064	-0.143	0.093	0.043	0.357	0.529	-0.061	<b>1.000</b>

Dans le cas de la galerie 710 la conductivité électrique est corrélée aux ions Ca, SO4 et Mg (Tab. 1). Les variations temporelles de conductivité électrique traduisent bien les concentrations de ces éléments comme l'illustre la figure 2 pour les sulfates.



### 1.3 Relation chimie-précipitation

Sur la figure 3 sont représentées les concentrations en sulfates en fonction du temps des eaux issus de la galerie et de la source de Fonafrey. Sur ce graphique, la pluie efficace pondérée sur 30 jours est également représentée en fonction du temps. La RFU utilisée pour le calcul de la pluie efficace est de 130mm (Vallet et al. 2013).

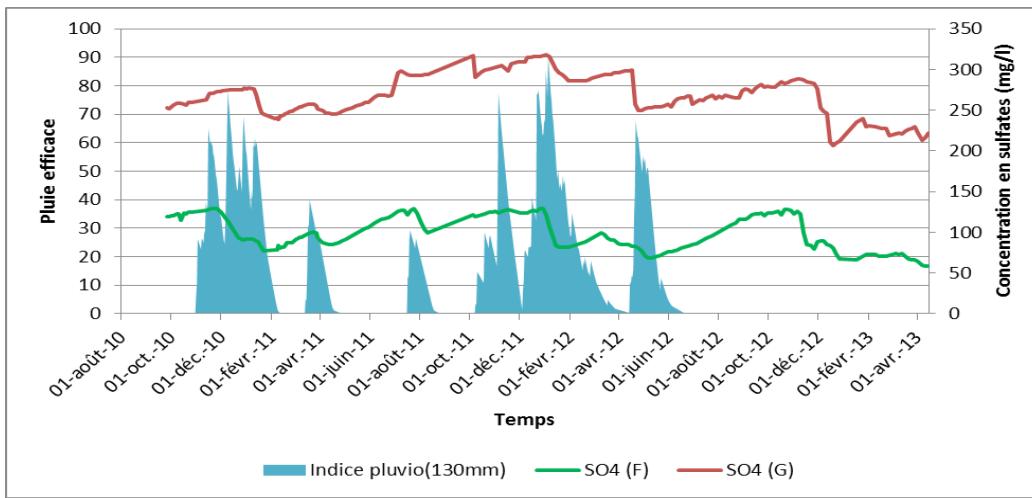


Figure 3 : Variation saisonnières des concentrations en sulfates issues des eaux de la galerie G710 et de la source de Fonafrey.

Les concentrations en sulfates varient de manière saisonnière. Les concentrations diminuent en période de pluie et augmentent en saison sèche (par exemple avril 2011 à aout 2011). Cette tendance est plus marquée pour les concentrations en sulfates issues de Fonafrey. Pour la galerie G710, les concentrations en sulfates ont tendance à augmenter malgré la saisonnalité de la variation. La source de Fonafrey draine des eaux à circulation rapide dans des zones de failles. Le milieu est très réactif et la chimie est bien influencée par la recharge qui est locale. Le versant instable quant à lui est alimenté par un vaste bassin versant même si la contribution des écoulements semble minoritaire par rapport à l'infiltration locale. Il existe une zone d'interconnexion entre le versant instable et la source de Fonafrey. La galerie G710 draine des eaux à circulation rapide dans des zones de failles (Vallet, 2012, Bertrand et al., 2013). Le fait que les concentrations en sulfates augmentent dans cette zone peut s'expliquer par un temps de transit de l'eau plus long (origine plus lointaine des eaux ? milieu moins bien connecté ?) ce qui permet à l'eau d'interagir avec les minéraux de la roche. La chimie de l'eau est donc marquée par une circulation plus ou moins rapide expliquant les variations saisonnières et l'interaction eau-roche avec le milieu déstructuré expliquant la tendance à l'augmentation des concentrations des éléments chimiques.

## 2.1 Relation chimie-dégradation du massif

Si les concentrations en sulfates mesurés à la source de Fonafrey sont influencées par la recharge et que les concentrations de ce même élément sont en plus influencées par l'interaction eau-roche au pont de sortie dans la galerie G710, alors la différence des deux signaux ne traduit que l'influence de l'altération de la roche.

Sur la figure 4 sont représentées la différence de concentration en sulfate mesurés à la galerie et celles mesurées à la source de Fonafrey en fonction du temps. Le déplacement mesuré depuis l'extensomètre A13 situé sur la partie active de l'instabilité est également représenté sur cette figure.

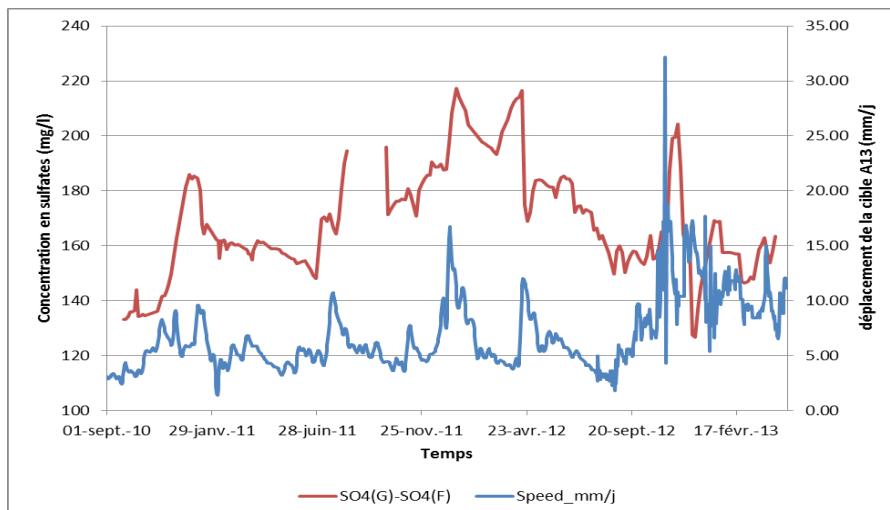


Figure 4 : Concentration en sulfate représentative de la dégradation du versant en fonction du temps

Le signal de déplacement est corrélé aux signaux de sulfate : à chaque augmentation du déplacement correspond une augmentation de la concentration des sulfates, qui succède à une diminution synchrone de ces deux paramètres.

Durant la période de faible activité du massif, les sulfates diminuent en fonction du temps. Lors de la réactivation du massif, les concentrations en sulfates augmentent, pour diminuer à nouveau. Ces variations de sulfates sont expliquées par leur origine, c'est-à-dire l'altération de la pyrite, minéral qui s'oxyde dans les conditions d'oxydo-réduction de surface. L'oxydation de la pyrite crée une surface « protectrice » qui ralentit son altération, d'où une diminution des concentrations en sulfates dans les eaux à surface de pyrite constante. Lors de la réactivation du mouvement, deux phénomènes peuvent se produire : soit le mouvement créé de nouvelles fissures au sein du massif, offrant ainsi de nouvelles surfaces de pyrite à l'altération, soit le mouvement crée des zones broyées qui contiennent la pyrite oxydée et remettent ainsi des minéraux plus petits mais avec des surfaces fraîches à l'altération.

### 3 LA CONDUCTIVITÉ EN TANT QU'OBSERVABLE FIABLE DE L'INSTABILITÉ DE VERSANT

La conductivité électrique mesurée à la galerie de reconnaissance G710 est corrélée aux ions calcium, magnésium et sulfate. La variation temporelle des concentrations de ces ions est dépendante de deux facteurs principaux : les conditions de circulation en milieu perméable qui favorise l'infiltration directe et l'interaction chimique eau-la roche. Il est également possible de relier les concentrations en sulfates à la dégradation du versant instable. Néanmoins, il se pose le problème de l'acquisition en continu de ce paramètre ou de n'importe quel autre paramètre chimique corrélé aux mécanismes qui commandent les mouvements gravitaires. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'appareil qui permette une acquisition en continu, avec une bonne sélectivité et une bonne résolution de paramètres chimiques.

Par contre, il est possible de faire une mesure indirecte, qui est celle de la conductivité électrique de l'eau, facilement mesurable en continu. Effectivement, la conductivité électrique est reliée à la minéralisation de l'eau notamment aux éléments majeurs

Sur la figure 5 est représentée la variation temporelle de la conductivité électrique mesurée à la galerie G710 ainsi que la variation temporelle du déplacement mesuré par l'extensomètre A13.

Les maximums des pics de conductivité et de déplacement sont également distingués par des traits respectivement rouges et bleus

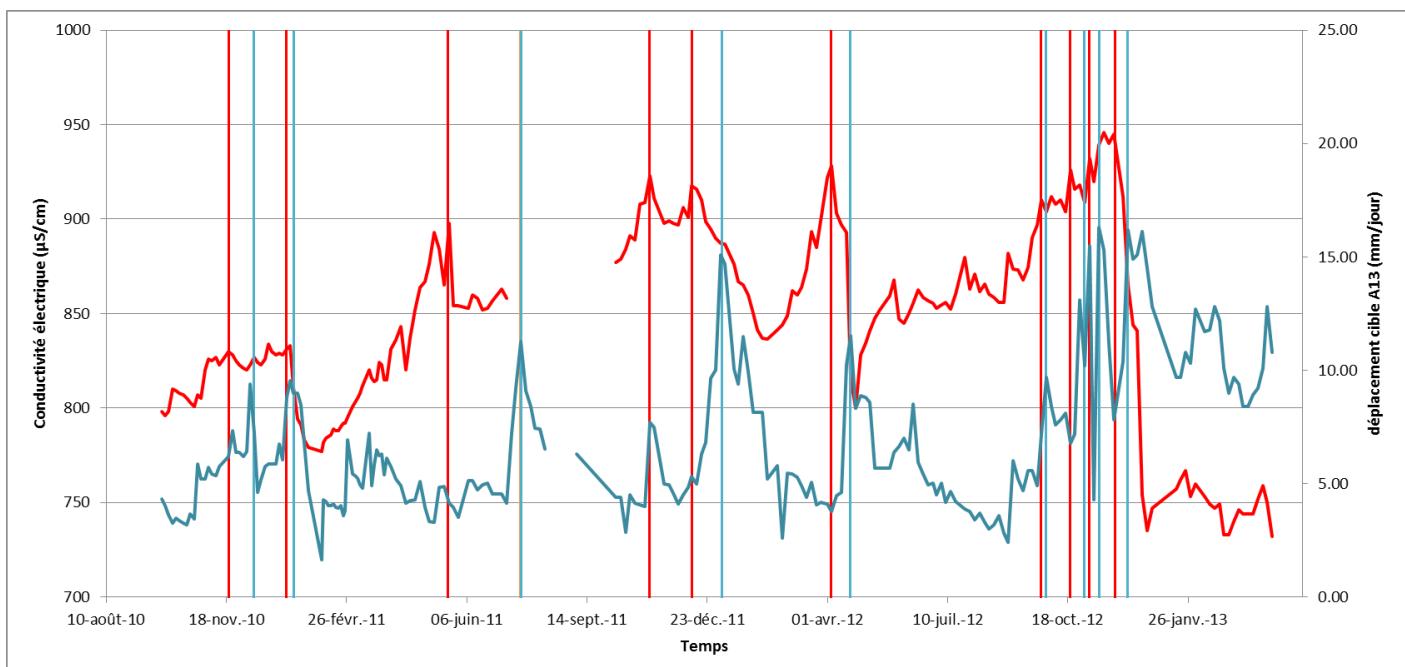


Figure 5 : Variations temporelles de la conductivité électrique mesurée à la galerie de reconnaissance et du déplacement mesuré par l'extensomètre A13. Courbe et trait rouge : conductivité électrique et maximum des pics de conductivité électrique ; Courbe et trait bleu : déplacement et maximum des pics de déplacement.

Les courbes de conductivité et de déplacement présentent la même allure, à savoir une augmentation de la conductivité lors d'une activité du versant instable et une diminution de celle-ci lorsque le versant n'est pas réactif.

Les pics maximum de conductivité et les pics maximum de déplacement, ne sont pas synchrones, ces derniers étant toujours postérieurs. Le manque de données de conductivité électrique pendant la période de juillet 2012 à octobre 2012 ne permet pas d'estimer un delta de manière fiable. Le delta entre ces pics varie entre 16 et 25 jours pendant la période du 1 septembre 2010 à avril 2012 puis entre 4 et 8 jours au-delà de cette période.

Cette diminution de delta 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 de l'enregistrement 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.

Ceci peut s'expliquer par le fait que la forte activité de déplacement de décembre 2012 a suffisamment endommager le versant instable pour changer les conditions hydrodynamiques du milieu ; C'est comme-ci le milieu était mieux interconnecté, augmentant ainsi le drainage autour du réseau faille autour le point dans la galerie. Malheureusement nous n'avons pas de mesures de débit qui pourrait conforter cette hypothèse. Nous nous trouvons limités aux conditions du terrain qui rend certaines mesures impossible à faire ou trop entachées d'erreurs.

## 4 CONCLUSION

L'objectif d'un observatoire est de fournir des observables qui permettent :

- d'identifier les processus physiques qui contrôlent les instabilités gravitaires,
- de modéliser les processus,
- d'extraire des observations de signaux caractérisant un changement de régime.

Dans cette optique, 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 du versant.

Les suivis chimiques mis en place par le laboratoire d'hydrogéologie de l'UMR Chrono-Environnement depuis 1998 sur Séchilienne, et qui s'inscrivent maintenant dans le cadre de l'OMIV ont permis dans les deux cas de relier le signal chimique, notamment les concentrations en sulfates à la déformation.

Néanmoins, il se pose le problème de l'acquisition en continu de ce paramètre ou de n'importe quel autre paramètre chimique corrélé aux mécanismes qui dirigent les mouvements gravitaires. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'appareil qui permette une acquisition en continu et avec une bonne résolution de paramètres chimiques

La conductivité mesurée est en partie expliquée par la concentration en sulfates. Les variations de ces concentrations en sulfates sont expliquées par l'altération de la pyrite : les pics des concentrations en sulfates sont dus à la réactivation de nouvelles surfaces minérales lors du déplacement du versant instable qui génère un endommagement de la roche. La diminution de ces concentrations est due au mécanisme même de l'altération de ce minéral : une couche d'oxyde de fer se forme à la surface lors de l'altération, isolant de l'eau les surfaces de la pyrite.

La conductivité électrique est représentative du signal chimique engendré par la dégradation du massif. 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 couteuse.

## 5 RÉFÉRENCES

- Bertrand, C., Marc V. Vallet A., Mudry J. & Schmitt A.D. 2013 *Apport de l'hydrogéochimie pour la caractérisation des mouvements gravitaires* Journées de Aléas Gravitaires, Grenoble.  
Binet S. 2006. *L'hydrochimie, marqueur de l'évolution à long terme des versants montagneux fracturés vers les grands mouvements de terrain.* Thèse de l'Université de Franche-Comté, 214p.

- Binet S., Spadini L., Bertrand C., Guglielmi Y., Mudry J. & Scavia C. 2009. Variability of groundwater sulfate concentration in fractured rock slope: a tool to identify active unstable areas. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13, 2315-2327*
- Vallet, A., 2012. Synthèse des deux premières années de thèse présentée devant le comité de pilotage.*
- 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), Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 10, 8945-8991, doi:10.5194/hessd-10-8945-2013, 2013*