

# Caractérisation du système d'écoulement à grande échelle des eaux souterraines dans des versants instables de marnes par observation et modélisation hydrochimique

V. Marc<sup>1</sup>, F. Cervi<sup>2</sup>, C. Bertrand<sup>3</sup> & J.-P. Malet<sup>4</sup>

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

2. Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italy

3. UMR 6249 Chrono-Environnement, Université de Franche Comté, 16 route de Gray, F-25030 Besançon Cedex

4. Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Institut de Physique du Globe de Strasbourg, 5 rue

**ABSTRACT:** Des prélèvements d'eau souterraine et de surface ont été réalisés sur 2 versants marneux instables des alpes du sud afin de préciser l'origine des eaux par les moyens de la géochimie. Sur le grand glissement de Super-Sauze, une série d'éléments convergents montre l'intervention dans la recharge de la nappe d'une eau additionnelle profonde révélant ainsi une interaction complexe entre le système hydrogéologique local et superficiel et un système profond régional. Sur le site de Draix, la chimie de l'eau indique que l'alimentation des petites nappes de versant est exclusivement locale. Cependant, une anomalie en sodium, détectée dans les eaux superficielles, pourrait indiquer, comme à Super-Sauze, une origine profonde de l'eau à l'échelle du bassin. Ces résultats montrent les fortes contraintes imposées aux réservoirs hydrogéologiques par les pentes, la diversité des formations géologiques et la tectonique dans les secteurs de montagne où se développent ces glissements. En conséquence, les sources d'eau peuvent être diverses et les processus d'écoulement variés. L'investigation hydrochimique spatio-temporelle se révèle un outil complémentaire efficace pour préciser le schéma conceptuel de ces hydrosystèmes complexes.

## INTRODUCTION

Dans les problèmes d'instabilités de versant à contrôle hydrologique, les questions de l'origine de l'eau et les modalités de la recharge sont primordiales. Sur le glissement de Super-Sauze, la recharge locale par la pluie ou la fonte des neiges ainsi que les mécanismes d'infiltrations préférentielles ont été bien identifiés et décrits (Malet et al., 2005 ; Debieche et al., 2011 ; Cervi et al., 2011 ; Krzeminska et al., 2012). Cependant des investigations hydrochimiques (Montety et al., 2007) et de nouvelles approches de modélisation (Travelletti, 2011) ont montré que les processus de recharge devaient probablement intégrer d'autres sources d'eau.

De nouvelles campagnes de prélèvement des eaux et des sols sur le glissement de Super-Sauze ont été réalisées dans le but de (1) compléter la connaissance par l'acquisition d'informations à une plus grande fréquence temporelle et (2) utiliser un modèle géochimique permettant de valider les hypothèses sur l'origine de l'eau et de la minéralisation. Un versant en mouvement dans les mêmes matériaux marneux sur le bassin de Draix (nappe de Digne) a également été étudié à titre de comparaison.

## 1 STRATEGIE DE COLLECTE ET D'ANALYSE

De juin 2010 à Mai 2011, une campagne mensuelle de prélèvements des eaux a été entreprise sur le site de Super-Sauze et sur le site de Draix. Des échantillons du régolithe de marne ont également été collectés sur les 2 sites. A Super-Sauze, les eaux collectées provenaient de la nappe superficielle via les piézomètres implantés sur les différents transects géomorphologiques (de A à D, voir figure 1). Les matériaux marneux ont été pris d'amont en aval en respectant ces transects. Sur le site de Draix, l'échantillonnage a concerné les eaux de la nappe de versant mais également les eaux superficielles, au droit de la coulée et à l'aval du bassin versant. Le régolithe de marne a été échantillonné en 2 endroits, sur la partie aval de la coulée.

En tout, 75 échantillons d'eau ont été destinés à une analyse des ions majeurs. Les 5 échantillons de sol marneux ont subi des tests de lixiviation et des analyses hydrochimiques ont été réalisées sur les lixiviats à différents moments du processus.

## 2 TESTS DE LIXIVIATION SUR LES MATERIAUX MARNEUX

### 2.1 Objectifs et protocole

Les tests de lixiviation sur les régolites collectés sur le terrain avaient pour objectifs de (1) vérifier la cohérence entre la nature géochimique des matériaux et la chimie des eaux et (2) valider un modèle géochimique transposable ensuite sur les données hydrochimiques in situ. Le protocole suivi est celui de Hageman (2007) Il consiste à mélanger 50 g de sol séché et tamisé à 2 mm avec 1 l d'eau distillée. Le mélange a été réalisé de manière continue par un agitateur magnétique avec une rotation constante de 200 rpm. Pour chaque sol, les expérimentations ont duré jusqu'à un maximum de 10 h.

### 2.2 Résultats

Les résultats de la lixiviation au bout de 10 h de mélange sont donnés dans le tableau 1. A l'issue des tests, toutes les eaux ont montré un faciès sulfaté calcique. La concentration en magnésium est également notable mais toujours très nettement inférieure à celle du calcium (- 30 à - 50 %). Les autres ions, et notamment le sodium, jouent un rôle totalement mineur dans la minéralisation totale.

Site	Nom	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>
Super-Sauze	BDsoil	0.52	0.74	0.35	0.05
	CPsoil	0.23	0.51	0.28	0.04
	DVsoil	0.10	0.32	0.22	0.02
Draix	RGC	0.25	0.49	0.36	0.03
	RDC	0.09	0.54	0.28	0.03

Tableau 1 : Hydrochimie des lixiviats après 10 h de lixiviation (en mmol.l<sup>-1</sup>)

L'analyse en diffraction RX a montré que la minéralogie des matériaux étudiés était en moyenne constituée de calcite pour 25 %, de quartz pour 20 %, de dolomite et d'autres phases pour 50 % incluant surtout des argiles mais également des feldspaths, du gypse et de la pyrite. Ces proportions sont assez constantes quelque soit la position du prélèvement sur chaque site et même d'un site à l'autre.

### 2.3 Modélisation géochimique

L'objectif de la modélisation sur les lixiviats était de confirmer les processus d'interaction eau-matrice évoqués précédemment et caler l'outil pour la simulation des processus in situ. L'exercice de modélisation a été réalisé avec le modèle PHREEQCI 2.17.4799 (Parkhurst and Appelo, 1999) associé à la base de données thermodynamique LLNL. Les simulations ont été conduites en mode cinétique (prise en compte de la vitesse de dissolution des minéraux)

Plusieurs paramètres demeurent mal connus et ont fait l'objet d'une procédure de calage. Il s'agit d'une part des proportions réelles des éléments appartenant aux autres phases dans l'analyse minéralogique (gypse, dolomite et pyrite principalement) et d'autre part de la surface spécifique réactive (Sp) des minéraux principaux. Par exemple, l'altération de la pyrite va se révéler déterminante pour produire des sulfates dans la phase liquide et le modèle est très sensible à la proportion de pyrite présente dans le matériau initial. Des simulations ont donc été conduites en faisant varier la proportion de pyrite de 0,1 % à 2 %. Cette gamme semble raisonnable dans la mesure où, si l'on retire les argiles, la proportion des minéraux des autres phases ne doit pas dépasser 5 % selon l'analyse minéralogique. Pour le calcul de la surface réactive des minéraux, nous avons utilisé le modèle de Murphy and Helgeson (1989) qui suppose une forme sphérique du grain. Cette estimation de Sp est évidemment entachée d'une erreur importante. Par ailleurs, la modification de Sp dans le modèle est une autre manière de moduler la proportion réelle des différents minéraux. En effet, les proportions annoncées dans l'analyse minéralogique surestiment les teneurs réellement altérables dans la mesure où une partie seulement du minéral est accessible à l'hydrolyse. En conséquence, la modélisation a été tentée en faisant varier les surfaces réactives de la calcite et de la dolomite dans de larges gammes. Finalement, les résultats les plus cohérents se trouvent situés dans des gammes plus resserrées : entre 10 à 30 % de la Sp initiale pour la calcite et entre 50 % et 150 % de la Sp initiale pour la dolomite. Cette situation doit exister pour tous les minéraux mais elle est plus sensible sur le résultat pour les minéraux les plus solubles.

De nombreuses simulations ont été entreprises et comparées entre elles avec un critère de qualité quantifiant l'écart entre l'observation et la simulation. Dans le cas de l'échantillon BDSoil, la meilleure simulation (sim 9) est présentée dans le tableau 2. Elle correspond aux paramètres suivants :

- proportion de pyrite de 0,6 %
- surface spécifique de la calcite égale à 20 % de la surface du modèle initial
- surface spécifique de la dolomite égale à celle du modèle initial

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Lixiviat (mmol <sup>-1</sup> )	0.74	0.35	0.05	0.52
Simulation 9 (mmol <sup>-1</sup> )	0.7	0.35	0.001	0.54

Tableau 2 : résultats de la simulation 9

Des résultats comparables ont été obtenus avec les autres lixiviats en faisant varier de façon assez réduite les paramètres. Ces ajustements en fonction des échantillons témoignent surtout de la variabilité naturelle de la composition du régolithe.

### 3 INVESTIGATIONS DE TERRAIN

#### 3.1 Variations spatio-temporelles de la chimie de l'eau

Les campagnes de prélèvements des eaux sur le terrain ont montré que le faciès hydrochimique in situ était sulfaté calcique et magnésien à l'image des lixiviats. Mais contrairement aux eaux issues des lixiviations, on observe sur le terrain des eaux à tendance sodique. Sur Draix, par exemple, le faciès des eaux issues de la nappe de versant est identique à celui des lixiviats mais celui des eaux superficielles (drainage du bassin versant en amont de la coulée) est tiré vers le sodium. Sur Super-Sauze, la situation est encore plus spectaculaire car le faciès sodique s'observe dans les eaux de la nappe et il est d'autant plus marqué que l'on se trouve à l'amont de la coulée (figure 1). A l'amont du glissement (tranchet A), le sodium peut devenir un cation de même importance quantitative que le calcium ou le magnésium. D'un point de vue spatial, les eaux ont tendance à se concentrer dans le sens de l'écoulement de la nappe en réponse à une augmentation du temps de séjour de l'eau dans le sol. La figure 2 représente le cas typique des sulfates. Le cas inverse se produit cependant pour le sodium qui décroît vers l'aval.

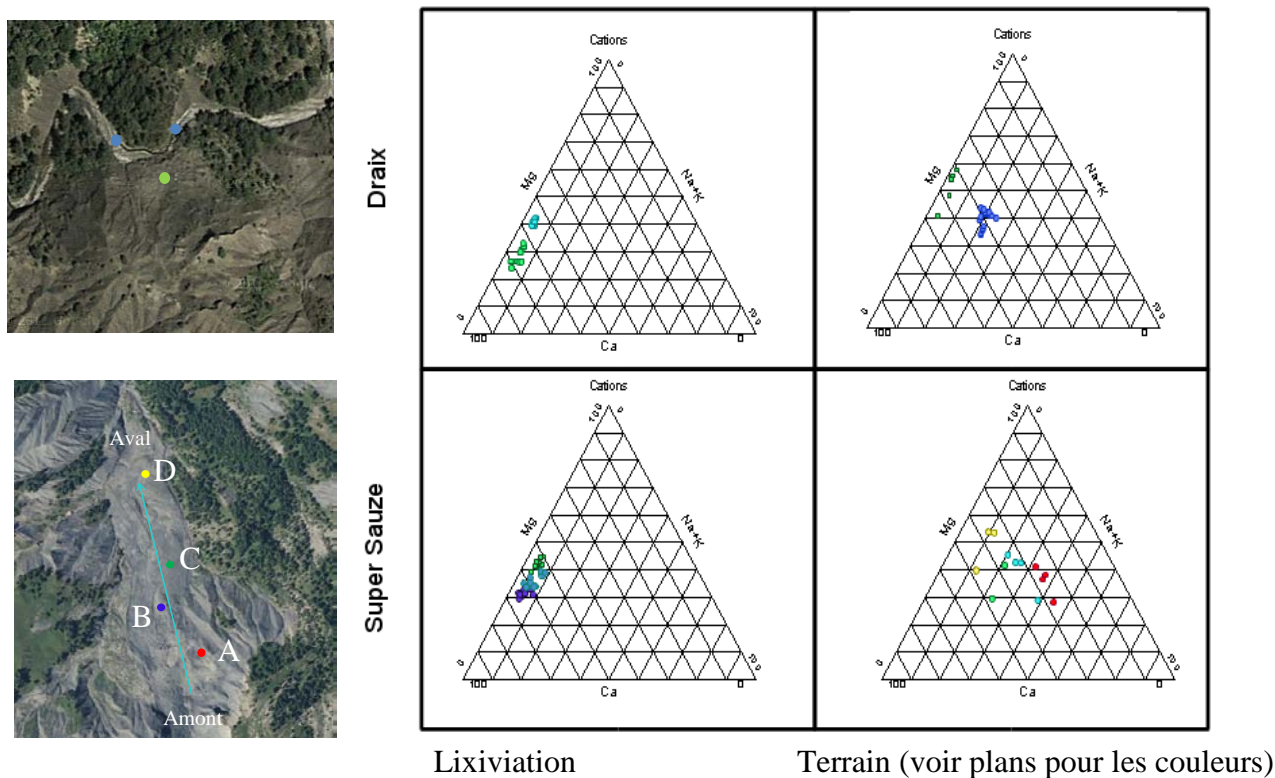


Figure 1 : Représentations du faciès chimique des eaux souterraines des glissements de Super-Sauze et de Draix, et comparaison avec le faciès des eaux lixiviées.

La concentration des eaux, et notamment en sodium, varie également en fonction du temps (figure 2). Pour les sulfates, cette variation saisonnière s'explique principalement par les effets de la recharge due à la fonte de la neige au printemps ou aux épisodes pluvieux (surtout automne et printemps). En effet, les concentrations minimales en chaque point se rencontrent habituellement en juin (effet de la dilution après la fonte du manteau neigeux). Cependant le sodium ne suit pas du tout cette logique et particulièrement dans les secteurs amont où il est en moyenne le plus représenté. Dans le secteur A, la concentration augmente progressivement entre l'été et l'automne tandis que dans le secteur B, la concentration est maximum en été et décroît en allant vers l'automne-hiver.

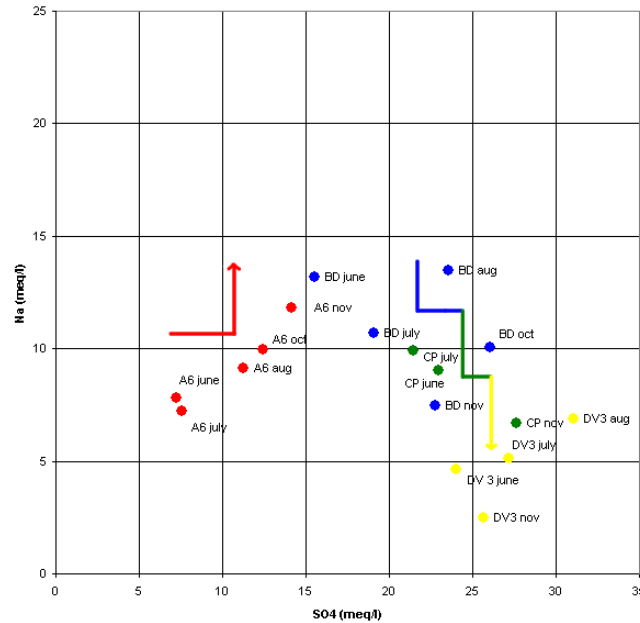


Figure 2 : Variation spatio-temporelle du sulfate et du sodium dans les eaux de la nappe de Super-Sauze

### 3.2 Modélisations hydrogéochimiques

Comme pour les eaux issues des lixiviations, le modèle Phreeqci a été utilisé pour simuler les concentrations mesurées dans les eaux des nappes in situ. Dans un premier temps, le modèle a été utilisé avec une eau initiale « pure » (eau de pluie) et avec les données géochimiques et minéralogiques mesurées en laboratoire sur les échantillons. La figure 7a montre les résultats du modèle pour  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  comparés aux concentrations mesurées sur le terrain à Super-Sauze dans la zone active du glissement et pour différentes dates. Comme déjà signalé, la variabilité dans le temps de la minéralisation de l'eau récoltée provient des changements de conditions de recharge (effets de dilution par les pluies ou fonte de la neige). Le contact eau-matrice provoque ensuite l'augmentation progressive des concentrations. Cette première simulation indique que le modèle sous estime la concentration en magnésium mesurée et surestime grandement la concentration en calcium.

Le modèle a ensuite été appliqué en respectant les résultats obtenus avec les simulations sur les lixiviats. Pour cette simulation, la proportion de pyrite a donc été de 0,6 % et la surface spécifique de la calcite a été réduite de 80 % par rapport à la surface calculée par le modèle de Murphy et Helgeson (1989). La surface spécifique (et donc la proportion) de dolomite est restée inchangée. La figure 7b montre que les simulations sont dans ce cas très nettement améliorées même si les concentrations en magnésium sont cette fois surestimées. Ce résultat convergent avec celui obtenu avec les lixiviats valide le choix des paramètres du modèle (proportions respectives en pyrite, calcite, dolomite). Il prouve que l'utilisation des données géochimiques et minéralogiques du laboratoire conduit à surestimer l'intensité des interactions eau-roche car une partie seulement des minéraux est accessible à l'altération.

Afin d'améliorer la simulation, un troisième groupe de tests a été réalisé en modifiant la nature de l'eau initiale. La figure 7c illustre les résultats des simulations dans le cas d'une eau initiale issue d'une source marneuse à l'amont du glissement. Cette source draine une partie du massif situé au dessus du glissement. Elle sort au sein d'une zone marneuse stable (probablement marne argovienne) mais le massif dans son ensemble comprend des faciès beaucoup divers avec notamment différentes séries de calcaires. Il faut aussi noter que cette eau est également riche en sodium. Des arrivées d'eau à l'amont ont également été reconnues dans les formations morainiques. Une partie de la recharge pourrait donc provenir de ces niveaux superficiels. La figure 7c illustre bien l'impact du choix de l'eau initiale dans les résultats de la modélisation. La bonne

adéquation entre le modèle et l'observation tend à prouver la diversité de l'origine de la recharge de la nappe du glissement.

Il faut également noter que, si on reste dans une gamme de paramétrage acceptable et quelque soient les hypothèses de travail, le modèle n'a jamais pu simuler les fortes concentrations en sodium observées sur le terrain, particulièrement dans la partie amont du glissement. La modélisation montre clairement que la nature du matériau marneux, tel qu'on le connaît sur le glissement, n'est pas en mesure de produire par altération les concentrations en sodium observées.

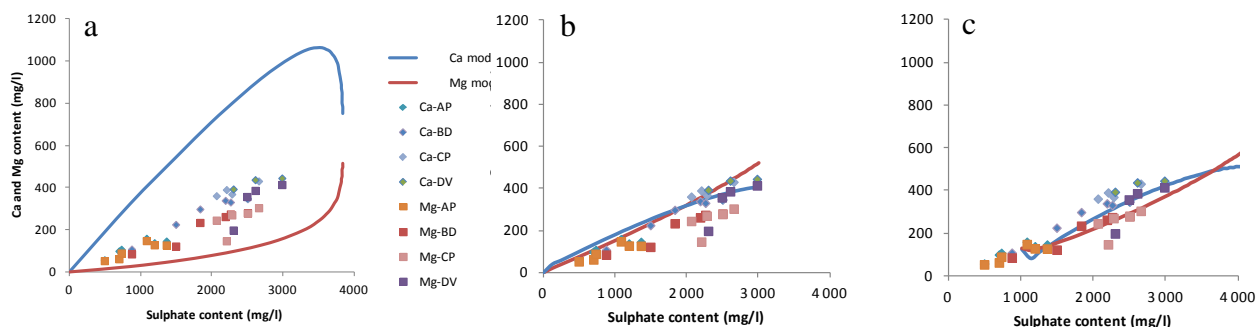


Figure 7 : Comparaison hydrochimique modèle/terrain sur le glissement de Super-Sauze (transect B) pour (a) une eau de pluie de départ et à partir de la base de données géochimiques et minéralogiques initiales, (b) pour une eau de pluie de départ et à partir des paramètres géochimiques et minéralogiques issus des lixiviations et (c) pour une eau initiale provenant d'une source marneuse amont et à partir des paramètres géochimiques et minéralogiques issus des lixiviations

Concernant Draix, la même méthodologie de simulation a été mise en place à savoir un premier test avec des conditions minéralogiques du laboratoire (2% de pyrite). La figure 8a montre les résultats des concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  simulés comparés aux valeurs de ces trois éléments mesurés sur le terrain. A nouveau, les concentrations en  $\text{Mg}^{2+}$  simulées sont sous estimées par rapport à celles mesurées à Draix, alors que le comportement inverse se produit pour les concentrations en calcium. Un deuxième test a été réalisé en faisant varier la proportion de pyrite et les surfaces spécifiques de la calcite et de la dolomite en respectant les résultats de la lixiviation. La proportion de pyrite utilisée est de 0.25% soit une diminution d'environ 80%. La surface spécifique de la calcite utilisée est de 3% tandis que la celle de la dolomite a été augmenté de 50% par rapport à la première simulation. La figure 8b montre une bonne corrélation entre les concentrations mesurées et simulées pour les deux éléments. Cependant, deux points qui correspondent aux concentrations en magnésium les plus élevées (environ 400 mg/l) se démarquent nettement de la courbe simulée alors que les concentrations en calcium correspondants sont bien calées sur la courbe théorique. Les valeurs élevées de magnésium correspondent aux prélèvements consécutifs du mois d'août et septembre 2010. Une hypothèse émise pour expliquer ces valeurs est la dissolution de sulfate de magnésium lors d'évènements pluvieux ponctuels (orages d'été). Effectivement, Cras (2005) a observé localement de la cristallisation de sulfate de magnésium en été. La chimie des eaux à Draix peut s'expliquer par l'interaction de la roche avec les précipitations. La recharge est donc essentiellement faite par celles-ci.

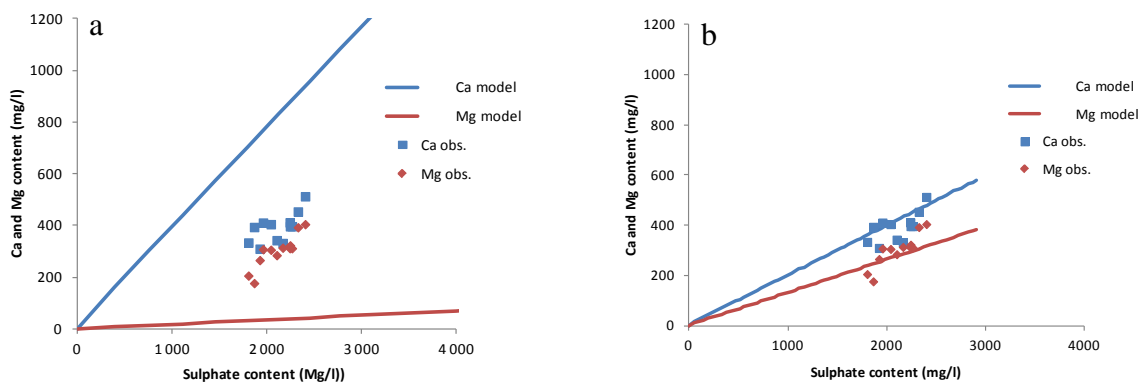


Figure 8 : Comparaison hydrochimique modèle/terrain sur le glissement du Laval (Draix) avec (a) les données géochimiques et minéralogiques initiales et (b) les paramètres géochimiques et minéralogiques issus des lixiviations.

## CONCLUSION

Sur le glissement de Super Sauze, l'étude de la variation spatio-temporelle de l'hydrochimie couplée à la modélisation indique que les eaux ont des origines diverses. La chimie des eaux peut être expliquée par les interactions eau-roche au sein du régolithe marneux mais ces interactions doivent se produire à partir d'une eau initiale (entrée du système) qui est plus chargée en moyenne que l'eau de pluie. L'intervention d'une eau additionnelle profonde révèle une interaction complexe entre le système hydrogéologique local et superficiel et un système profond régional.

Sur le bassin de Draix, il n'y a pas d'anomalie hydrochimique reconnue dans les eaux souterraines de versant. Nous pouvons conclure que l'alimentation des petites nappes de versant est exclusivement locale. Cependant, une anomalie en sodium, détectée dans les eaux superficielles, pourrait indiquer, comme à Super-Sauze, une origine profonde de l'eau à l'échelle du bassin. Pas plus que dans les marnes de Super-Sauze, nous trouvons dans les marnes de Draix les minéraux susceptibles d'expliquer les concentrations en sodium observées.

L'existence potentielle de flux d'eaux profondes a des conséquences attendues sur la déstabilisation mécanique à la base des glissements (l'eau agissant en profondeur comme une couche savon) et la dégradation de la marne en profondeur par altération chimique ou physico-chimique.

## REFERENCES

- Cervi, F., T. -H Debieche, D. M Krzeminska, V Marc, T.A. Bogaard, J.-P. Malet, 2011. Variable contributions of mixing end members during small-scale sprinkling experiments in partially weathered black marls. Presented at the Second Italian Workshop on Landslides (IWL2) - Large slow active slope movements and risk management, Naples, Italy.
- Cras, A., 2005. Etude des mécanismes de transfert d'eau et d'éléments sur bassins versants torrentiels marneux (BV de Draix, Alpes de Haute Provence). Apport du couplage des méthodes hydrométriques, de la géochimie isotopique et de la modélisation hydrologique, Ecole doctorale Sciences et Agronomie, Thèse de doctorat, Université d'Avignon.
- 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). *Hydrological Processes*.
- Guglielmi, Y., Bertrand, C., Compagnon, F., Follacci, J., Mudry, J., 2000. Acquisition of water chemistry in a mobile fissured basement massif: its role in the hydrogeological knowledge of the La Clapière landslide (Mercantour massif, southern Alps, France). *Journal of Hydrology* 229, 138–148.
- Hageman, P.L., 2007. U.S. Geological Survey field leach test for assessing water reactivity and leaching potential of mine wastes, soils, and other geologic and environmental materials: ( No. book 5, chap. D3), U.S. Geological Survey Techniques and Methods.
- Krzeminska, D.M., Bogaard, T.A., Van Asch, T.W.J., Van Beek, L.P.H., 2012. A conceptual model of the hydrological influence of fissures on landslide activity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 1561–1576.
- Lofi, J., Pezard, P., Loggia, D., Garel, E., Gautier, S., Merry, C., Bondabou, K., 2012. Geological discontinuities, main flow path and chemical alteration in a marly hill prone to slope instability: Assessment from petrophysical measurements and borehole image analysis. *Hydrological Processes* 26, 2071–2084.
- Malet, J.-P., Van Asch, T.W.J., Van Beek, R., Maquaire, O., 2005. Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Science* 5, 71–85.
- Montety, V. de, 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 Surface Processes and Landforms* 32, 32–48.
- Murphy, W.M., Helgeson, H.C., 1989. Thermodynamic and kinetic constraints on reaction rates among minerals and aqueous solutions: IV. Retrieval of rate constants and activation parameters for the hydrolysis of pyroxene, wollastonite, olivine, andalusite, quartz and nepheline. *Am. J. Sci* 289, 17–101.
- 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 ( No. 99-4259), U.S. Geological Survey Water-resources Investigations Report.
- Travelletti, J., 2011. Imagerie multi-paramètres et multi-résolutions pour l'observation et la caractérisation des mécanismes de glissements-coulées. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.