

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)

Chemical and isotopic natural tracing of seepage waters in an important landslide: example from La Clapière landslide (Alpes-Maritimes, France)

Franck COMPAGNON¹, Yves GUGLIELMI^{1*}, Jacques MUDRY¹, Jean-Paul FOLLACCI² et Jean-PierreIVALDI³

¹ Jeune équipe - contraintes, déformations, écoulements -, Faculté des sciences, place Leclerc, 25030 Besançon cedex ;

² Centre d'études techniques de l'équipement, 56, bd Stalingrad, 06300 Nice ;

³ Centre de recherche de géologie méditerranéenne, Université de Nice-Sophia-Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice cedex 2, France

RÉSUMÉ

Le fonctionnement hydrologique pluvio-nival du glissement de la Clapière est abordé par l'analyse isotopique et l'analyse chimique des eaux des sources du versant. Selon la saison, l'infiltration se répartit différemment en altitude (1 567 à 1 780 m \pm 150 m d'altitude moyenne) sur l'impluvium, qui est plus étendu que la zone en mouvement. Des compositions chimiques différenciées et variables révèlent des transits et des régimes multiples. En particulier, l'enrichissement en ions sulfates de haut en bas du versant (10 mg/L au sommet pour 800 mg/L à la base), prouve l'existence de gypse sous ou à proximité du glissement. Ce gypse est à rechercher dans le Trias, localement conservé en bordure orientale du couloir décrochevauchant dextre N140°E de la Tinée et/ou dans des amas précipités dans le socle avant le décollement alpin de sa couverture sédimentaire. L'infiltration se fait lentement jusqu'à la partie inférieure du glissement où les eaux bicarbonaté-calciques peu minéralisées du socle acquièrent un faciès sulfaté-magnésien très accusé, par dissolution d'évaporites triasiques. L'existence éventuelle de ces évaporites sous le glissement de la Clapière peut avoir favorisé les mouvements gravitaires.

Mots clés : Chimie des eaux, ¹⁸O, Socle, Évaporites, Glissement de terrain

ABSTRACT

Groundwater flowpaths of La Clapière landslide are studied by chemical and isotopic water analysis of the versant springs. Seepage appends on a recharge area larger than the sliding area (average altitude from 1 567 to 1 780 m \pm 150 m). Vertical evolution of springs chemistry, marked by sulfate ion downwards enrichment (10 mg/L from top of the versant to 800 mg/L at the base), shows gypseous occurrence under or close by the landslide. One hypothesis is that gypsum could originate from evaporites of Triassic synclines pinched into the basement of the Argentera-Mercantour Massif along the dextral strike-slip N 140°E fault corridor of the Tinée valley. Another hypothesis is that gypsum could originate from sulfated masses percolated into the basement before the alpine sliding of its Mesozoic and Cenozoic sedimentary cover.

Note présentée par Georges Pédro

Note remise le 6 janvier 1997, acceptée après révision le 28 avril 1997

* Correspondance et tirés à part

Infiltration slowly reaches the lower part of the landslide where low content bicarbonated and calcic type basement waters acquire a strong sulphate and magnesian type by dissolving triassic evaporites. Contingent existence of these evaporites underneath the Clapière landslide might have promoted gravity movements.

Keywords: Water chemistry, ^{18}O , Metamorphic basement, Evaporites, Landslide

Abridged version (see p. 570)

I. Introduction

Le glissement de la Clapière affecte, en rive gauche de la Tinée, la bordure sud-ouest du massif cristallin externe de l'Argentera-Mercantour. Il fait, depuis 1982, l'objet d'un suivi topométrique précis et les vitesses de glissement observées se corrélient de façon significative avec les précipitations locales et la fonte des neiges (Follacci, 1987).

L'hydrogéologie du site demeure mal connue, en raison de l'absence de piézométrie et de l'émergence souterraine, dans les alluvions de la Tinée, de la majeure partie des eaux d'infiltration. Dans ces conditions, l'analyse chimique et isotopique des eaux des sources du versant a été entreprise, afin de déterminer l'altitude de recharge et les modalités du transit de l'infiltration dans le glissement. Deux gradients isotopiques ont été établis en décembre 1995 et avril-mai 1996. De février à juin 1996, durant un épisode de forte infiltration, un suivi chimique a été réalisé sur les sources émergeant au pied du glissement et dans son proche environnement.

II. Hydrogéologie du glissement

L'interfluve entre la Tinée (N 140°E) et son affluent rive gauche, le Rabuons (N 70°E), comprend, dans ce secteur, deux faciès métamorphiques (gneiss plagioclasiques et métadiorite) structurés par une foliation varisque de direction moyenne NW-SE (figure 1A). Sur cet interfluve, les foliations qui pendent normalement de 55° à 85° vers le nord-est ont été basculées à l'horizontale. Une schistosité alpine, associée au fonctionnement de couloirs de cisaillement N140°E dextres, recoupe la foliation, localement en oblique (Follacci et al., 1988).

La fracturation, organisée autour de directions N05-30°E, N50°E, N90°E, N140°E et N160°E, s'inscrit dans le système décrochevauchant N120-140°E qui oriente la vallée de la Tinée. Ce linéament correspond à un paléograbén permien dont la bordure est a été reprise en faille inverse décrochante pendant l'orogénèse alpine (Ivaldi et al., 1991). Il pince localement dans le socle, des synclinaux triasiques qui affleurent en partie basse du versant de Cascaï au sud de la Clapière. Sur le versant et au fond du vallon de Rabuons, le socle est partiellement recouvert par des éboulis et d'épais placages fluvio-glaciaires.

Le glissement s'inscrit actuellement, entre 1 100 et 1 800 m d'altitude, dans la zone basculée qui culmine à

2 000 m environ. Son pied avance sur les alluvions récentes du fond de la vallée de la Tinée, dont l'épaisseur excède 70 m.

Le glissement est drainé à sa base par un groupe de sources pérennes (débit total estimé en moyenne à 0,5 L/s) et certainement, de façon occulte, directement dans les alluvions de la Tinée.

Sur ses bordures et dans le vallon de Rabuons, des sources émergent en limite de la zone basculée (débit total de 4-5 L/s). Les eaux sourdent directement du socle, préférentiellement au droit de fractures N10-30°E, N90°E, N110-140°E, et indirectement au travers des placages fluvio-glaciaires. Les débits des émergences sont faibles par rapport au volume des précipitations susceptible de s'infiltrer. Ces faibles débits s'expliquent par le caractère diffus des exutoires principaux, par la faible perméabilité locale du massif et, très vraisemblablement, par l'importance des eaux dérivées vers les alluvions.

Des débits de crue de 5 à 6 L/s sont néanmoins observables sur des sources situées dans des zones très fracturées du secteur. L'écoulement de surface s'effectue dans plusieurs vallons à écoulements pérennes qui prennent leur source en altitude et dont le principal est celui de Rabuons. Des pertes totales de vallons de l'ordre de 1 à 2 L/s ont été observées dans le Trias pincé au droit du décrochevauchement du versant de Cascaï.

III. Aire de recharge de l'aquifère du glissement

Compte tenu des fortes variations de teneurs en ^{18}O des eaux, dues au caractère pluvio-nival de la recharge en pays montagneux alpin (Razafindrakoto, 1988), nous avons estimé l'altitude de recharge du glissement à partir de deux gradients isotopiques établis :

- en décembre 1995, lors d'une période de début de fonte des neiges de basses altitudes au terme d'un long été ;
- en avril-mai 1996, en crue de fonte de neige (figure 2).

Les gradients sont définis localement à partir de sources dont l'altitude moyenne de l'impluvium est connue, étagées depuis la vallée de la Tinée (alt. 1 100 m) jusqu'aux cirques glaciaires perchés à 2 500 m d'altitude (Compagnon, 1996). Les conditions d'enneigement du site n'ont pas permis de prélever certains points lors des deux périodes et les deux gradients sont donc calculés à partir de points différents. Il apparaît un décalage d'environ 0,5 ‰ entre les deux périodes :

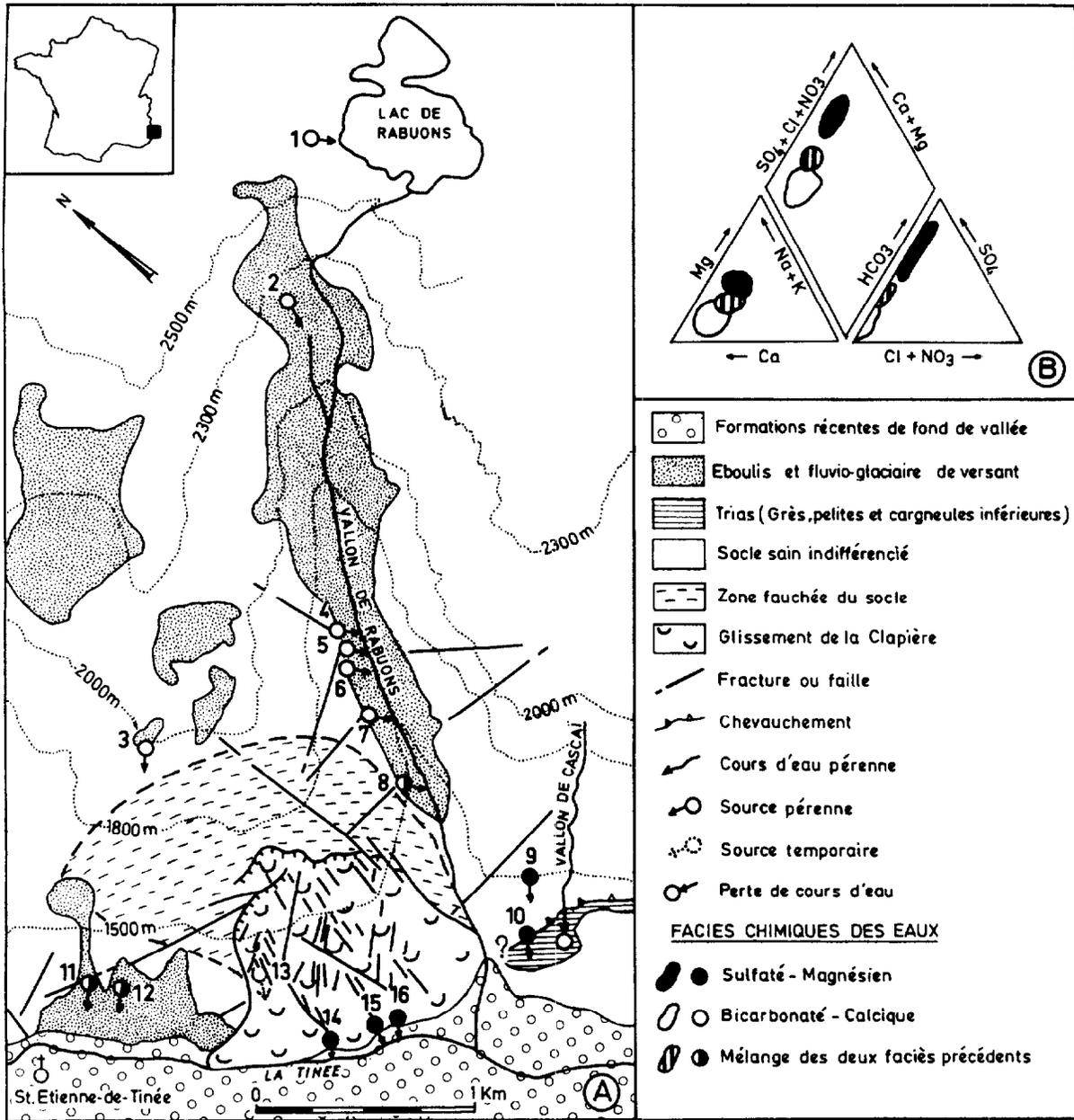


Figure 1. Hydrogéologie du versant de la Clapière : A. Contexte hydrogéologique simplifié. B. Représentation de Piper des prélèvements 04/96.

Hydrogeology of La Clapière versant: A. Hydrogeologic context. B. Piper graph of 04/96 samplings.

– $\delta^{18}\text{O} = -2,10 * \ln(\text{altitude}) + 4,18$ ($r = 0,989$) en décembre 1995 ;

– $\delta^{18}\text{O} = -2,92 * \ln(\text{altitude}) + 10,69$ ($r = 0,988$) en avril-juin 1996.

Ce décalage traduit, soit la variabilité liée à l'état de la recharge (part de la pluie et de la neige), soit un artefact dû au faible nombre de sources de référence. Dans ces conditions, nous estimons l'altitude d'impluvium des différentes sources du versant à partir d'un gradient moyen (moyenne arithmétique des deux gradients mesurés). L'écart entre cette valeur et celles déduites des gradients de décembre 1995 et d'avril-juin 1996, de l'ordre de 150 m, tient lieu de précision.

Les eaux des sources du pied du glissement (14, 15 et 16) présentent de faibles variations de teneurs, quelle que soit la période (– 10,84 à – 10,97 ‰), traduisant une altitude moyenne d'infiltration comprise entre 1 570 m ± 150 m en fin d'été et 1 780 m ± 150 m en crue de fonte de neige. Ainsi, en fin d'été, l'infiltration des pluies concernerait surtout la partie supérieure de la zone glissée, tandis qu'en période de fonte de neige, la surface d'infiltration principalement active s'étendrait largement vers le haut du versant, dans la zone basculée, et au-delà. Les eaux de la source 11, située à mi-hauteur sur le versant (altitude 1 215 m) sur une direction de fracturation importante dans le socle, présentent une augmentation des

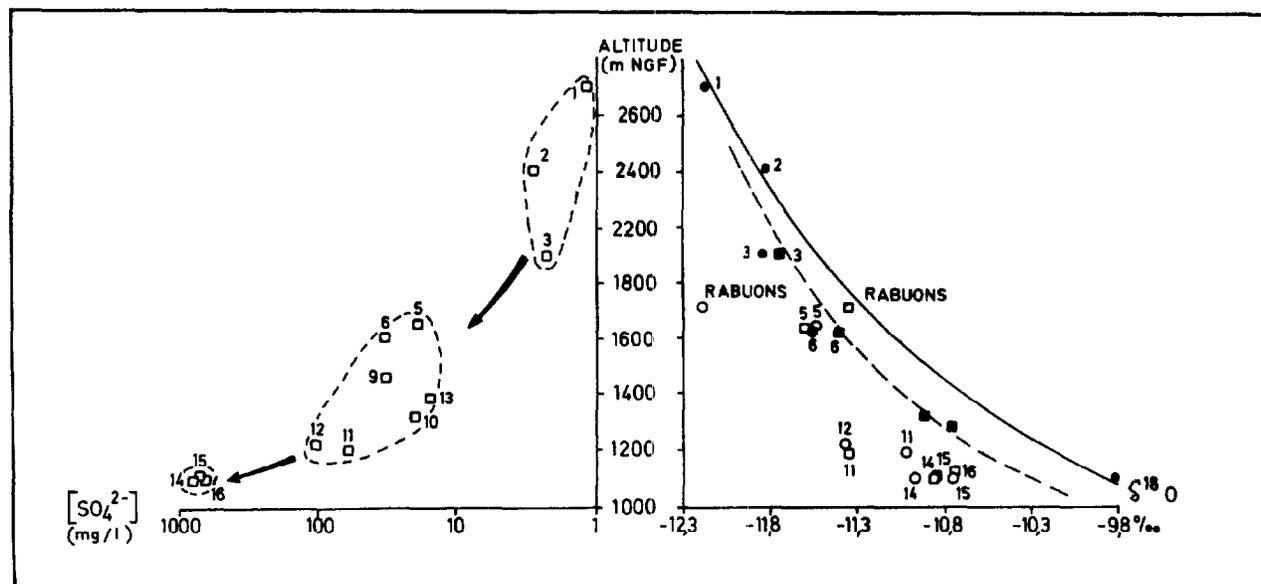


Figure 2. Relation teneurs en $^{18}\text{O}/\text{SO}_4^{2-}$ -altitude des sources (points ronds pour les prélèvements du 04/96, points carrés pour les prélèvements du 12/95, points noirs pour les points de calcul des gradients isotopiques, gradient du 04/96 en traits pleins et gradient du 12/95 en tiretés).

Relationship between ^{18}O and SO_4^{2-} contents versus elevation (circles for 04/96 samplings, squares for 12/95 samplings, black squares or circles used for isotopic gradients calculation, 04/96 gradient figured with a continuous line and 12/95 gradient figured with a dashed line).

teneurs de $-11,35$ à $-11,03$ ‰ entre l'étiage et la crue (la source 12 située dans un même contexte d'émergence montre une teneur également appauvrie par rapport aux sources de pied de glissement, figure 2). Les eaux d'infiltration proviennent donc d'altitudes plus élevées que la zone glissée, variables selon la saison de 1780 à 1570 ± 150 m. L'impluvium de ces sources de mi-versant serait équivalent à celui des sources du vallon de Rabuons (5 et 6).

Les eaux de surface du vallon de Rabuons (ruisseau prélevé à 1650 m d'altitude) montrent une diminution des teneurs de $-11,34$ à $-12,17$ ‰, qui traduit une augmentation de l'altitude de recharge, réglée par une élévation progressive des aires de fonte des neiges en altitude. Dans le détail, cette évolution est compliquée par l'influence des apports d'eau du lac de Rabuons, situé à 2500 m d'altitude, qui subissent une évaporation estivale marquée par une élévation des teneurs en ^{18}O en début de cycle. De plus, le point de prélèvement choisi inclut le drainage de placages d'éboulis et de fluvio-glaciaire, qui font augmenter la teneur en ^{18}O des eaux du vallon.

En rapportant ces résultats au régime cinématique observé depuis 14 ans, on peut penser que selon la saison, le mode de précipitation et les températures, l'infiltration doit intéresser préférentiellement des tranches d'altitudes différentes. Ainsi, l'infiltration quasi immédiate des pluies d'automne serait répartie sur tout l'impluvium ; l'infiltration, peu différée après les chutes de neige hivernales, resterait cantonnée aux parties basses ; au printemps, après un hiver neigeux et froid, l'infiltration massive des eaux de fonte intéresserait, dans les parties hautes seulement, des altitudes croissant avec le temps et le réchauffement.

IV. Rôle de la structure dans l'acquisition de la chimie des eaux

La chimie des eaux des différentes sources a été analysée lors de la période de crue de fonte de neige d'avril-mai 1996. Les faciès chimiques des eaux des sources (figure 1B) se répartissent en trois groupes principaux, géographiquement bien distincts sur le versant (figure 1A et 2) :

- un faciès bicarbonaté-calcique et magnésien, qui regroupe toutes les sources de la partie haute du versant ;
- un faciès fortement sulfaté-magnésien à calcique d'eaux, dont la minéralisation ne peut avoir été acquise que par circulation au contact d'évaporites ($[\text{SO}_4^{2-}] = 700$ à 800 mg/L ; $[\text{Ca}^{2+}] = 110$ à 210 mg/L). Ce faciès caractérise la plupart des sources du pied du glissement, mais aussi les sources qui avoisinent le contact chevauchant N114°E du socle sur le Trias au sud-est du secteur. La teneur en ion sulfate des eaux de ces sources est relativement faible, mais les points se situent, comme ceux du pied de glissement, au pôle sulfaté-magnésien du diagramme de Piper ;
- un faciès chimique intermédiaire – teneurs en sulfates de 40 à 110 mg/L – traduisant un mélange des eaux très sulfatées basales avec les eaux peu minéralisées du socle du haut du versant. Ces sources émergent à proximité d'accidents de direction N90°E et N110°E à N140°E dans la partie intermédiaire du versant (source 13, temporaire) et à la limite de la zone fauchée et du socle sain.

Les teneurs en sulfates des deux derniers groupes ne peuvent être attribuées à l'oxydation de sulfures (pyrite par exemple) présents dans les roches, étant donné le pH de

7-8 des eaux (zone de stabilité de la pyrite en milieu oxydant ; Garrels et Christ, 1965). Elles ne peuvent s'expliquer que par le lessivage de gypses et posent le problème de leur présence dans le versant, ou à proximité.

La lithologie et la structure du Trias conduisent à envisager plusieurs hypothèses.

La partie inférieure de la couverture sédimentaire du socle de l'Argentera-Mercantour est constituée, au-dessus d'un Permien détritique irrégulièrement représenté :

- de conglomérats, arkoses, grès et pélites rapportés au Buntsandstein ;
- de marnes, calcaires marneux, cargneules « inférieures », calcaires et dolomies du Muschelkalk ;
- de cargneules « supérieures », gypses et anhydrites, calcaires, argillites, dolomies et grès du Keuper.

Sur la bordure sud-ouest du massif de l'Argentera-Mercantour, comme partout ailleurs dans la zone alpine externe, la couverture sédimentaire est décollée au sein des cargneules « inférieures », en dessous des calcaires et dolomies du Muschelkalk. Les formations les plus récentes, conservées au cœur des synclinaux triasiques pincés dans le socle le long des couloirs de cisaillements, sont les cargneules « inférieures ».

Les gypses du Keuper, présents en masses lenticulaires dans les cargneules « supérieures » de la rive droite de la Tinée, ne peuvent donc pas être directement à l'origine des minéralisations sulfatées, magnésiennes et calciques.

Des masses sporadiques de gypses, qui pourraient être à l'origine des minéralisations, ont été signalées dans les cargneules « inférieures » (Faure-Muret, 1955). Nous ne les avons jamais retrouvées à l'affleurement, mais elles peuvent se situer dans le synclinal à cœur de cargneules inférieures de Cascaï, en rive gauche du vallon de Rabuons (figure 1A) ; dans ce dernier, mais également dans un autre synclinal situé dans l'interfluve Tinée-Rabuons, cette structure n'affleure pas, mais peut être masquée par un décrochement de socle analogue à celui de Cascaï, ou se refermer en surface, comme ailleurs dans le massif.

Si, sur le site, il n'existe pas de gypse massif dans les cargneules inférieures, il n'est pas exclu que ces dernières et/ou les marnes associées renferment des sels à l'état diffus.

ABRIDGED VERSION

Introduction

The study presented here concerns the La Clapière landslide which affects the southwestern border of the external part of the crystalline Argentera-Mercantour Massif, south of France. Since 1982, this landslide has been the subject of a precise topometric reappraisal, which points out that the sliding rates are significantly correlated with local rainfall and snow melting (Follacci, 1987). Chemical and isotopic analyses of slope springs were then performed in order to characterize the altitude of recharge and the processes by which seepage occurs in the landslide.

Enfin, le gypse à l'origine des minéralisations peut se situer dans le socle même, où nous l'avons déjà observé à l'état de placages et de filons dans les fissures : dans la galerie de dérivation de la Tinée creusée en rive droite sous la couverture sédimentaire, ainsi qu'à la cime de Sespoul au nord-ouest d'Isola 2000.

S'il est avéré qu'un synclinal triasique existe masqué par le socle chevauchant ou a existé, érodé par le glacier tinéen, sur l'interfluve Tinée-Rabuons, sa présence a pu jouer un rôle dans la déstabilisation par basculement, puis glissement du versant.

V. Conclusion

Cette première phase d'étude souligne la complexité et la spécificité de l'hydrogéologie du versant de la Clapière.

Les eaux en transit dans le versant proviennent d'un impluvium plus vaste que le glissement, s'étendant vers l'amont du versant et, vraisemblablement, latéralement. Les tranches d'altitude de cet impluvium sont différemment sollicitées selon les circonstances météorologiques. L'altitude moyenne de l'aire de recharge varie entre $1\,570 \pm 150$ et $1\,780 \pm 150$ m selon la saison.

L'infiltration se fait lentement jusqu'à la partie inférieure du glissement, où les eaux bicarbonatées-calciques peu minéralisées du socle acquièrent un faciès sulfaté-magnésien très accusé, par dissolution d'évaporites triasiques. L'existence éventuelle de ces évaporites sous le glissement de la Clapière peut avoir favorisé les mouvements gravitaires.

Le faciès intermédiaire de mélange entre des eaux de socle et des eaux contaminées par les sulfates, situé à mi-hauteur dans le glissement, permet une première estimation des mises en charge dans la masse en mouvement, qui seraient de l'ordre de 600 m.

Pendant la durée de l'étude, les concentrations des eaux des différentes sources, y compris en pied de glissement, ont varié dans le temps et dans l'espace. L'étude en cours de ces variations dans la durée, en relation avec les suivis hydrologique et cinématique, devrait fournir des informations utiles sur les modalités multiples du drainage des grands versants rocheux fracturés et mobiles.

Hydrogeology of the landslide

The interfluvium between the river Tinée (N 140° E) and its left-bank affluent, the Rabuons (N 70° E) shows two metamorphic formations (plagioclase-rich gneisses and metadiorites), structured by a Variscan foliation with mean NW-SE direction (figure 1A). On this interfluvium, the foliations usually dipping 55 to 85° NE were dumped to the horizontal. In this dumped area culminating near 2000m, situated between 1100 and 1800 m, is the landslide whose foot develops on the recent alluvial deposits of the Tinée valley floor; the latter is oriented by a N 120-140° thrusting strike-slip fault. South of La Clapière, some Triassic synclines crop out, which are pinched in the

basement. On the slope and on the Rabuons valley floor, the basement is partially covered by screes and thick fluvio-glacial coverings.

In its lower part, the landslide is drained by a group of perennial springs (total discharge estimated at 0,5 L/s) probably directly into the Tinée alluvial deposits. On its borders and in the Rabuons valley, spring outlets are observed on the edge of the dumped area (total discharge of 4–5 L/s); they originate directly from the basement or indirectly through the fluvio-glacial coverings. As compared to rainfall values, emergence flows are low, which is related to the diffuse nature of the main outlets, the low local permeability of the massif and probably to the volumes of water diverted into the alluvial deposits. However, flood discharges between 5 to 6 L/s are observed in very fractured zones.

Recharge area of the landslide aquifer

The recharge altitude was estimated using two isotopic $\delta^{18}\text{O}$ gradients, locally defined, in December 1995 and April–May 1996, from springs whose mean annual elevation from the impluvium is well known. An average gradient (arithmetic mean of the two gradients measured) permits estimation of the impluvium elevation for the different springs of the slope (figures 1A and 2).

The main results are as follows.

On the landslide foot, spring waters (nr 14–16) show low variations (–10.84 to –10.97 ‰; which indicates a mean recharge altitude between 1 570 m \pm 150 m for low water level and 1 780 m \pm 150 m for flood during snow melting.

Half-way up the slope, on an important fracturation direction in the basement, spring waters (for instance nr11) are characterized by some variation from –11.35 to –11.03 ‰ between the periods of low water level and flood; this indicates that they originate from higher altitudes than those of the slipped area.

The surficial waters of the Rabuons valley show variations between –11.34 and –12.17 ‰, which can be explained by an increase of the recharge altitude governed by a progressive elevation of zones of snow melting.

On the basis of these results, taken in relation to the dynamics of the regime observed over 14 years, infiltration concerns preferential altitudinal compartments according to season, mode of precipitation and temperature.

RÉFÉRENCES

- Compagnon F. 1996. Approche hydrochimique des vitesses de déplacement d'un grand glissement de terrain : La Clapière (Alpes-Maritimes), *D.E.A. PAE35*, E.N.S.G. Nancy, 39 p.
- Faure-Muret A. 1955. Études géologiques sur le massif de l'Argentera-Mercantour et ses enveloppes sédimentaires, *Mém. Carte géol. France* Paris, 336 p.
- Follacci J.-P. 1987. Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes), *Bull. Liaison L.P.C.*, n° 150/151, 39-54
- Follacci J.-P., Guardia P. et Ivaldi J.-P. 1988. Le glissement de la

Role of structure in the acquisition of water composition

The chemical facies of spring waters (figure 1B) are distributed in three principal groups which are geographically quite distinct on the slope (figures 1A and 2):

- a calcic and magnesian-bicarbonated facies corresponding to all the springs of the upper part of the slope;
- a strong magnesian to calcic-sulphated facies, whose mineral composition acquisition has to be explained by contact with evaporites and which concerns almost all the springs of the landslide foot;
- an intermediate chemical facies which represents a mixture of strongly sulphated waters and low mineralized ones from the basement of the upper part of the slope; this facies corresponds to spring emergences in the intermediate part of the slope and at the bended zone/basement limit.

The downwards enrichment in sulphate ions (figure 2) (from 10 mg/L at the top to 800 mg/L at the foot of the slope) may be related to gypsum occurrences under or close by the landslide. Gypsum might originate from evaporites of the Triassic syncline pinched into the basement or from sulphated masses percolated into the basement before the alpine sliding of its Mesozoic and Cenozoic sedimentary cover.

Conclusions

The principal conclusions are as follows:

1. The seepage waters in the slope originate from an impluvium which is not limited to the landslide, extending to the upslope and probably laterally.
2. The altitude compartments of this impluvium are differentially concerned, according to meteorological factors. The average altitude of the recharge area varies between 1 570 + 150 m and 1 780 + 150 m according to the season.
3. Infiltration progresses slowly towards the lower part of the landslide where low mineralized calcic-bicarbonated waters acquire a high magnesian-sulphated facies which probably results from Triassic evaporites.
4. If, on the Tinée–Rabuons interfluvium, a Triassic syncline exists, being hidden by the overthrusting basement, or has existed and been eroded by the Tincan glacier, its presence could have played some role in the destabilization by means of dumping and in the sliding of the slope.

Clapière (Alpes-Maritimes, France) dans son cadre géodynamique, *C.R. V^e Symposium international sur les glissements de terrains*. Lausanne 1988. 1323-1327

Garrels R.M. et Christ C.L. 1965. *Solutions, minerals, and equilibria*, Harper and Row Éd., New York, 450 pp.

Ivaldi J.-P., Guardia P., Follacci J.-P. et Terramorsi S. 1991. Plis de couverture en échelon et failles de second ordre associés à un décrochement dextre de socle sur le bord nord-ouest de l'Argentera (Alpes-Maritimes, France), *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, série II, 361-368

Razafindrakoto S. 1988. Teneurs en isotopes stables des précipitations et des eaux souterraines et leurs variations en France, *Thèse 3^e cycle*, Univ. d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2 tomes