

Glissement de la Frasse

1 Contexte

1.1 Introduction

Le glissement de la Frasse (Figure 1) est l'un des plus importants des Alpes. Son volume actif estimé est de 40 millions de m³. Long de 2'000 m et large de 500 à 800 m, il est bordé latéralement par la rivière de la Bonne Eau et en pied par la Grande Eau dont le pouvoir érosif joue un rôle déterminant dans l'entretien du mouvement.

Avant de réaliser une galerie pour conforter le glissement en 2007, on distinguait 2 entités principales dans la zone active du glissement :

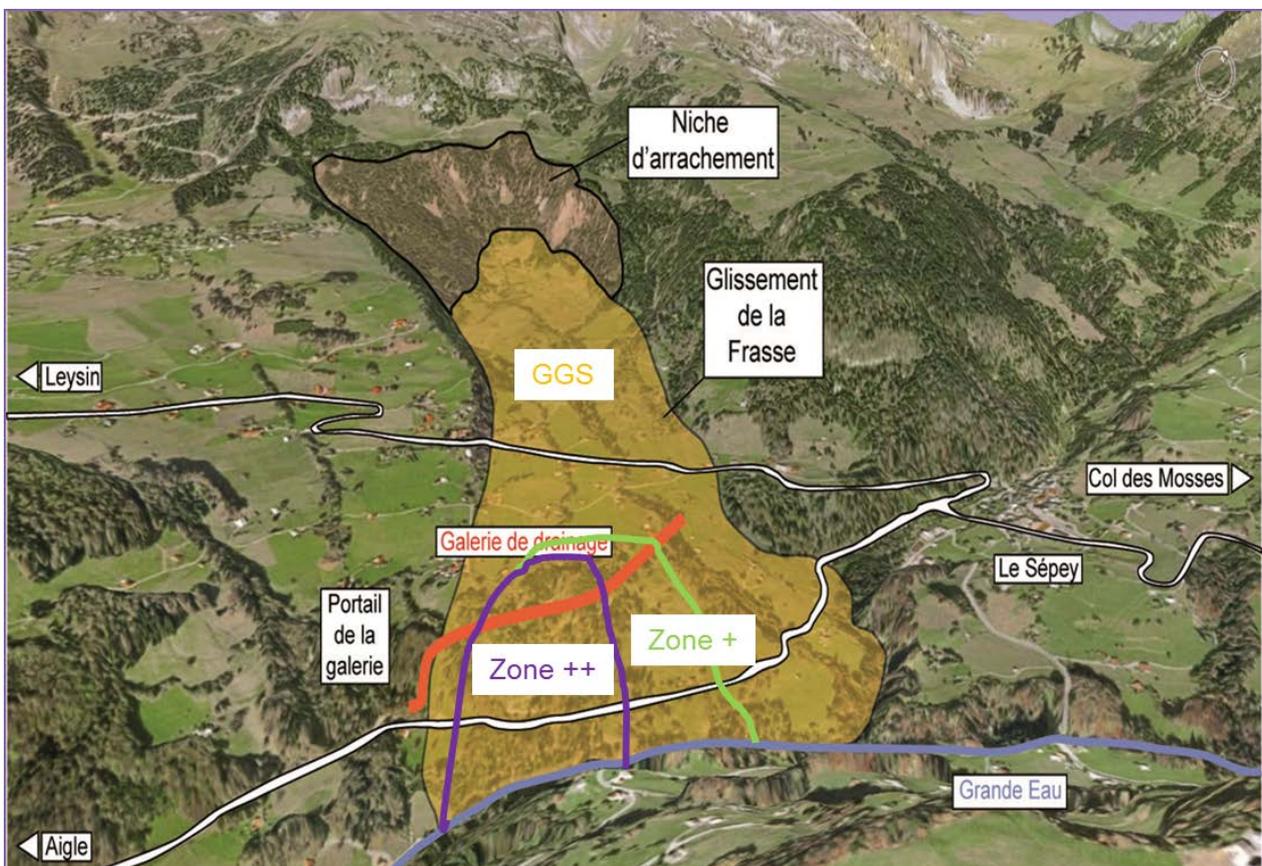
- le grand glissement supérieur (GGS), d'une profondeur maximale de 80 m, qui présente des vitesses modérées, < 5-20 cm/an.
- la partie inférieure, moins épaisse (environ 30 m), qui comporte une zone très active entre 2 lobes plus lents.

La zone active se subdivise à son tour entre la zone dite + et la zone dite ++ dont les vitesses moyennes sont respectivement de 20 à 40 cm/an et de 40 à 60 cm/an.

La route reliant Aigle à Le Sépey traverse le glissement de la Frasse dans sa zone la plus active ce qui conduit à des frais d'entretien non négligeables.

A noter qu'historiquement, ce glissement est très bien documenté avec des premières indications sur les mouvements de la route dès 1863 [1-2].

Figure 1 : Situation du glissement de la Frasse



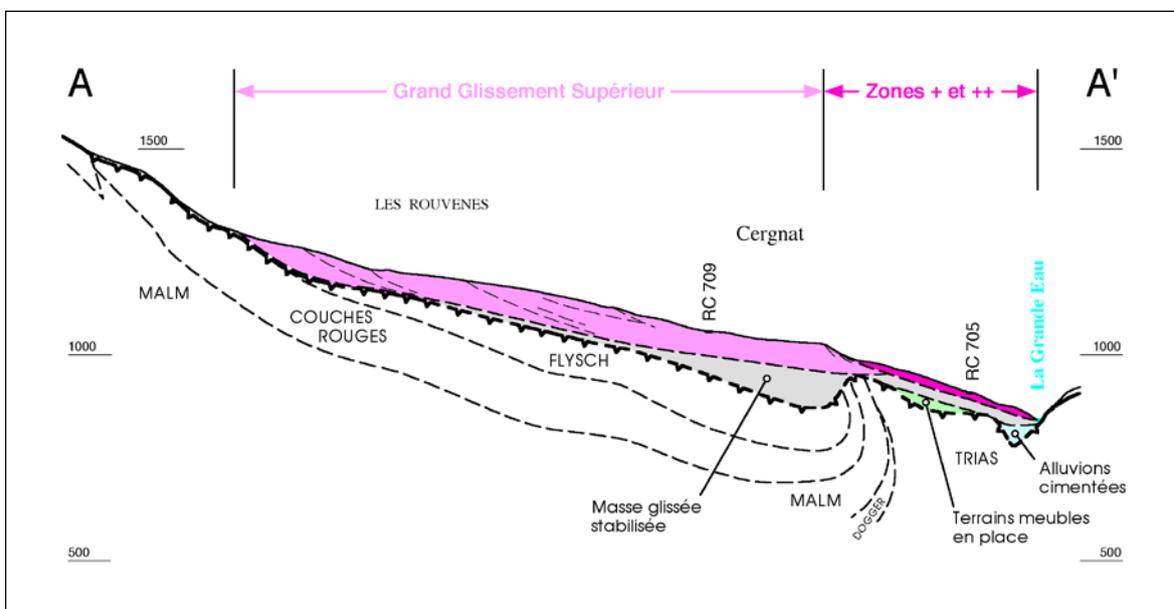
2 Contexte hydrogéologique

2.1 Géologie

Sur la base d'un grand nombre de données (sondages, géophysique, observations in situ), un modèle 3D géologique de la zone du glissement a été construit. La structure géologique principale (Figure 2) est un synclinal couché affectant la nappe des Préalpes Médiannes rigides (Trias, Jurassique et Crétacé supérieur - formations stables) et la nappe de la Simme (cœur du synclinal - Crétacé supérieur composé de Flysch argilo-gréseux et cause de l'instabilité du versant). Hormis à la Frasse, la stabilité du versant est bonne, le flanc renversé du synclinal formant une butée calcaire suffisante. Localement, à la hauteur de la Frasse, cette barrière est davantage érodée; à cela s'ajoute une faiblesse tectonique, ce qui a permis le développement de mouvements significatifs.

La masse glissée se compose de schistes fortement altérés avec des fragments de calcaires et de moraines, le tout broyé par le glissement. Elle est extrêmement hétérogène et aquifère.

Figure 2 : Profil en long du glissement



2.2 Hydrogéologie

Les mouvements de terrain sont largement dus aux variations dans le temps du champ de pression hydraulique. De nombreuses informations ont été récoltées au cours des années (piézomètres, mesures de débits, campagnes de traçage).

S'il est reconnu que l'eau est la cause du glissement, la corrélation entre les phases de grosse pluviométrie et les accélérations du glissement est mauvaise. Cela signifie que les événements pluviométriques du passé interviennent dans le comportement présent du glissement.

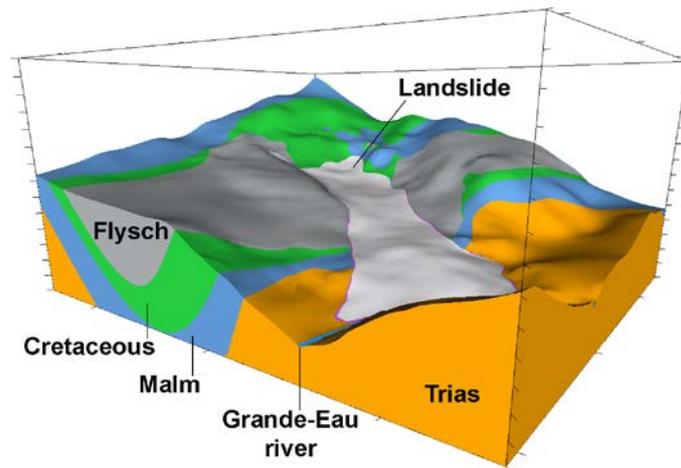
3 Modélisation du glissement

Afin d'évaluer les possibilités d'assainir le glissement, il a été entrepris de modéliser en 3D le comportement du glissement de la Frasse par calage en tenant compte de l'ensemble des données disponibles (sondages, mesures in situ des mouvements, suivi de la nappe, suivi des cours d'eau et des sources, données climatologiques, etc.) en restant au plus près de la réalité observée.

3.1 Géologie

La modélisation a débuté par l'établissement d'un modèle géologique structural à une échelle plus large que le glissement (Figure 3) en y intégrant l'ensemble des données des sondages, afin de servir de base aux modèles numériques.

Figure 3 : Géologie



3.2 Modèle hydrogéologique

Dans un second temps, un modèle hydrogéologique transitoire a été établi. Il inclut les masses glissée et stables, afin de caractériser de façon adéquate les conditions aux limites. Les difficultés principales consistent à évaluer les conditions d'infiltration et l'hétérogénéité du milieu. La modélisation a été effectuée avec le logiciel par éléments finis Feflow [3].

3.2.1 Conditions d'infiltration

Avec un modèle d'infiltration complet couplé tenant compte des processus hydrologiques et thermiques, soit le système sol-plante-atmosphère (COUP model, Jansson, 2003) et en les pondérant sur des périodes allant jusqu'à deux ans, on parvient à trouver des corrélations et à reproduire les périodes de crise du glissement ainsi que les périodes plus stables en terme d'évolution des pressions interstitielles dans la masse glissée. Il apparaît qu'en-dehors des pics d'infiltration, environ 2/3 de l'alimentation vient des bords du glissement, le tiers restant provenant de la surface et qu'il n'y a pas de réels apports par le fond.

3.2.2 Hétérogénéité du milieu

A l'hétérogénéité naturelle des Flysch s'ajoute l'hétérogénéité liée au remaniement par le glissement avec des chenaux plus perméables ($1e-2$ m/s) dans une matrice de Flysch ($1e-7$ m/s). Dans le modèle, cette hétérogénéité complexe naturelle est sous-estimée et est représentée en lieu et place par des systèmes de chenaux plus perméables fictifs. En conséquence, les résultats de la modélisation doivent être lus à l'échelle du glissement et non pas localement au droit de chaque sondage.

Les hypothèses du modèle ont été calées entre autres sur la base d'essais de pompage. Les résultats montrent que, conformément aux observations, l'amplitude des battements piézométriques dans le modèle augmente de l'amont vers l'aval. Cela provient du fait que plus un piézomètre est situé à l'aval, plus il répercute le cumul des flux entrant dans le glissement. La rapidité de la réaction du modèle est également comparable aux observations (jusqu'à 5 m en un jour).

3.2.3 Saturation

Le modèle est admis saturé jusqu'en surface et, de ce fait, néglige la frange non saturée superficielle, ce qui est sécuritaire et considéré comme admissible au vu du fonctionnement général de ce glissement.

3.3 Modèle hydro-géomécanique

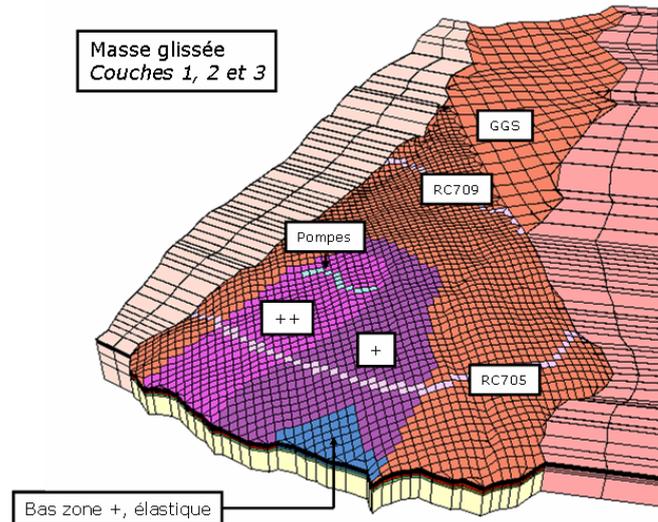
Dans un deuxième temps, un modèle hydromécanique intégrant les résultats du modèle hydrogéologique a été établi, afin de reproduire les mouvements observés au cours du temps aussi bien pour des périodes calmes que de crise.

Après plusieurs itérations, un modèle par éléments finis 3D (logiciel ZSOIL [4]) comprenant environ 30'000 éléments a été retenu (voir Figure 4). Il reprend le modèle structural géologique et les résultats de la

modélisation hydrogéologique en imposant des pressions interstitielles variables dans le temps au niveau de l'interface glissement stabilisé-rocher en place.

Les caractéristiques géomécaniques des matériaux ont été définies sur la base de l'ensemble des essais en laboratoire disponibles issus des campagnes de sondages. Un modèle élastoplastique avec écrouissage (CAP) a été retenu au niveau de plan de glissement et un modèle élastique parfaitement plastique (de type Drucker-Prager) pour la masse glissée et le glissement stabilisé.

Figure 4 : Modèle géomécanique, vue 3D d'ensemble du maillage



Les résultats ont été comparés sur une période allant d'août 1993 à décembre 1995, cette période étant bien documentée et incluant une importante crise à la fin de l'année 1993 et au début de 1994.

Plusieurs ajustements ont été effectués afin de reproduire au mieux les observations faites en termes de déplacements. Plus particulièrement, le modèle reproduisait bien la répartition spatiale des mouvements, mais l'amplitude était initialement trop faible. Il a ainsi été nécessaire de modifier le modèle hydrogéologique afin de générer des pics de pressions interstitielles ponctuels plus marqués, ces pressions étant probablement sous-estimées par les mesures in situ (mesures piézométriques). Les figures suivantes illustrent les mouvements prédits par le modèle.

Figure 5 : Allure des déplacements absolus prédits pour la période calculée, vue 3D (en rouge la zone de mouvement la plus marquée)

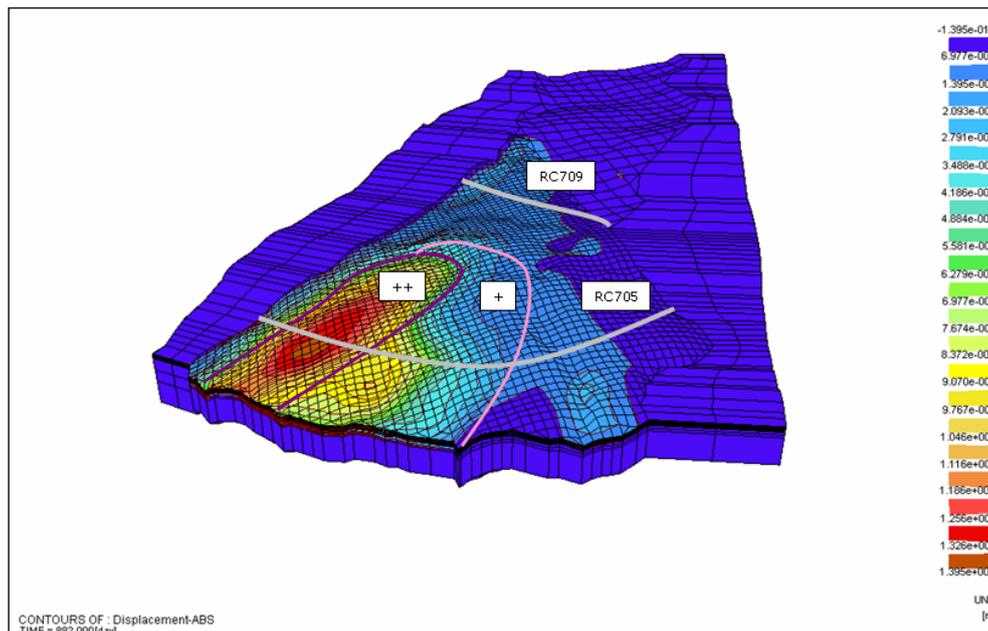
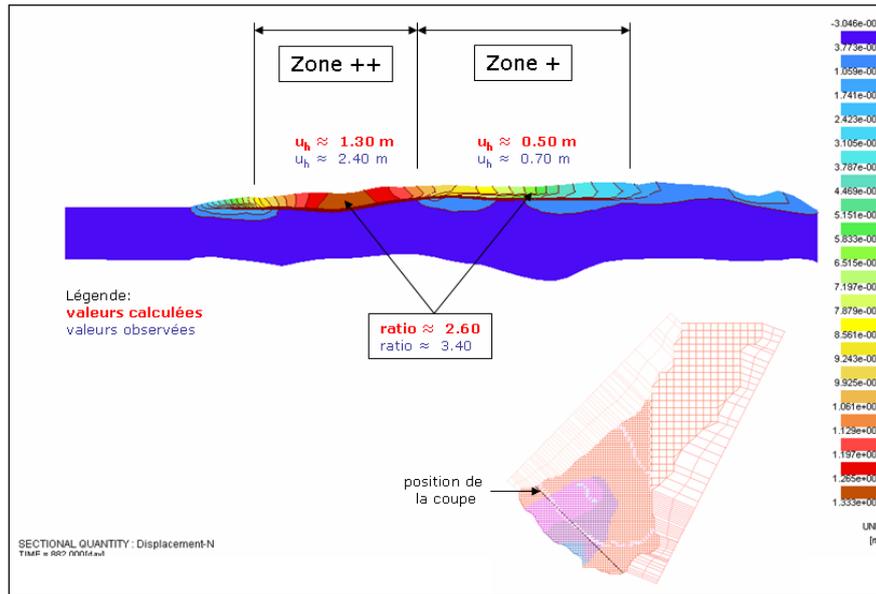
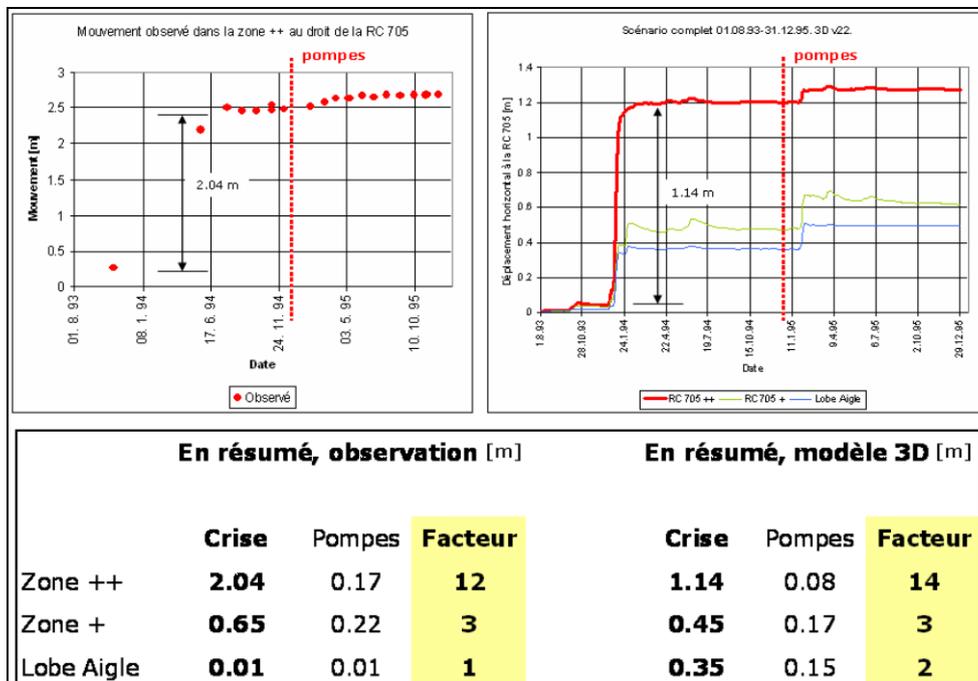


Figure 6 : Allure des déplacements horizontaux prédits pour la période calculée, coupe le long de la route - comparaison modèle-observations



A titre de contrôle du modèle, la mise en service d'une série de pompes à la fin de 1994 a également été simulée et l'on observe que l'effet stabilisateur observé suite à la mise en place des pompes est reproduit correctement.

Figure 7 : Comparaison des déplacements horizontaux en différents points entre le modèle et la réalité, avant et après mise en service des pompes



3.4 Conclusions concernant la modélisation

Si les rapports de vitesses sont bien reproduits par le modèle, il reste toutefois une différence en termes de déplacements absolus entre le modèle et les observations, d'un facteur 1.5 à 2, qui peut s'expliquer :

- par le pas de temps du calcul (admis 1 jour dans le modèle pour garder des temps de calcul raisonnables) : il a ainsi été démontré qu'en diminuant ce pas d'un facteur 4, on obtiendrait des déplacements 10-20% plus importants.
- par l'absence de composante viscoplastique dans le modèle qui peut conduire à une sous-estimation.
- par l'approche totalement continue du modèle par éléments finis ce qui ne permet pas la création locale de niches d'arrachement telles qu'observées sur site et conduit à une part de sous-estimation.
- par l'influence du choix du modèle constitutif.

Ce modèle est toutefois considéré comme représentant de façon satisfaisante la réalité et apte à intégrer les différentes variantes d'assainissement, afin de déterminer leur efficacité.

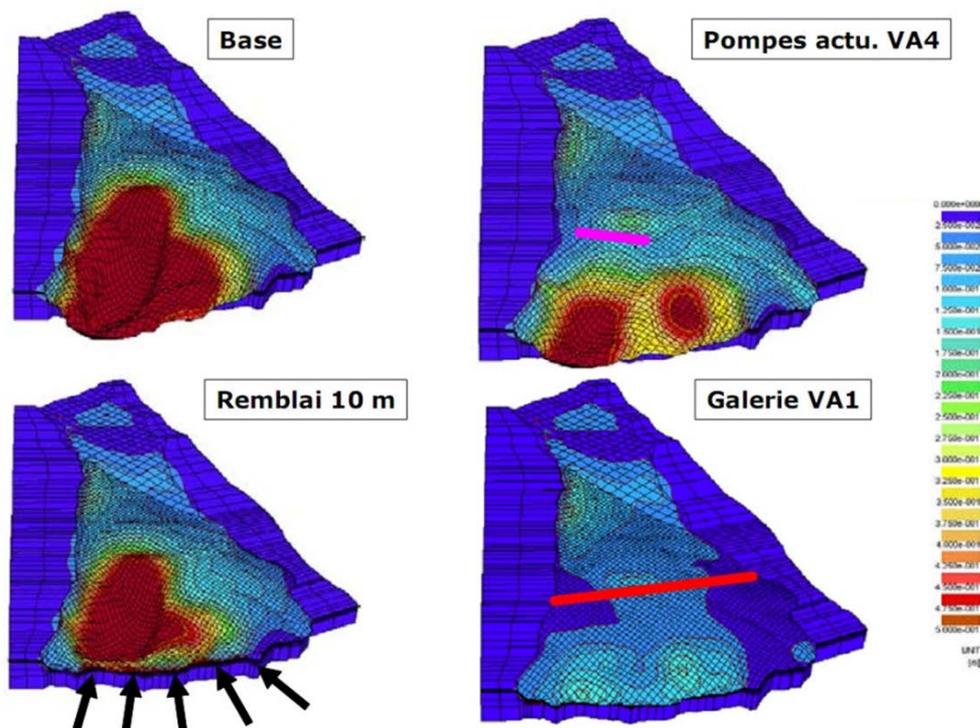
4 Assainissement

Deux types de variantes d'assainissement ont été testés :

- Les variantes « mécaniques », avec un remblayage au niveau du pied du glissement, pour améliorer la butée.
- Les variantes « hydrauliques » qui consistent à réduire les pics de pressions interstitielles. Comme il a été montré par la modélisation que, pour être efficace, il faut agir non seulement au niveau du plan de glissement, mais aussi sur toute la masse de Flysch, où se produisent les circulations d'eau, des variantes, de type galerie de drainage, avec une série de drains subverticaux traversant les Flysch ou une série de puits profonds équipés de pompes ont été testées. Ces variantes de longueurs variables sont situées essentiellement sur le haut des zones les plus actives (zone + et ++). A noter que l'espacement des drains ou puits a été établi à 10 m sur la base de l'ensemble des études effectuées et de la compréhension de l'hétérogénéité du glissement.

Les variantes de type drainages sont nettement plus efficaces, comme le montrent les figures ci-dessous.

Figure 8 : Comparaison des déplacements absolus, cas de base et variantes d'assainissement, vue en 3D.



5 Observations après les travaux d'assainissement

5.1 Travaux d'assainissement

Entre août 2007 et mars 2009, une galerie avec forages de drainage a été réalisée (projet d'exécution et DT par le consortium SDBE) dans les terrains stables, sous le glissement, à l'aplomb essentiellement des zones + et ++ (situation voir Figure 1). Cette variante retenue est proche de la variante VA1, présentée au chapitre 4, bien que plus courte. La récolte des eaux souterraines est assurée par gravité à l'aide de forages drainants exécutés depuis la galerie et traversant le plan de glissement et la masse glissée. La galerie est longue de 715 m et d'une section moyenne de 25 m². 56 forages drainants de 50 à 100 m de long ont été réalisés depuis la galerie avec un espacement d'environ 10 m [8].

En complément, en 2010 et 2011, le lit de la Grande Eau a été réaménagé afin de protéger le pied du glissement de l'érosion et réduire les risques d'obstruction du lit de la rivière.

5.2 Observations [7]

Les observations les plus intéressantes depuis la fin des travaux ont eu lieu entre 2012 et 2013. En effet, à l'exception de 2007 (pendant la réalisation de la galerie), ces années sont les plus riches en précipitations depuis 2002. A signaler que 5 mois ont été particulièrement pluvieux durant ces années (150% par rapport à la moyenne), mais que les précipitations annuelles moyennes restent comparables aux mesures effectuées depuis 1986.

Globalement, on observe au niveau des piézomètres des rabattements maximaux de l'ordre de 8 m en zone + et plus de 25 m en zone ++. Il n'y a par contre pas de rabattement significatif dans la zone supérieure (GGS), mais un écrêtage des pics. Ce comportement est conforme aux prévisions issues des modèles hydrogéologiques.

A noter qu'en terme de débits de la galerie, les prévisions du modèle hydrogéologique se sont avérées correctes également.

Au niveau des déplacements en 2012 et 2013, on peut observer :

- un effet drainant, marqué sur une bande de 100 à 200 m, de part et d'autre du tracé de la galerie.
- dans les zones + et ++, des vitesses moyennes de respectivement 1-2 cm/an et inférieures à 1 cm/an.
- une faible accélération au niveau du GGS en 2012 après une période stable, avec des mouvements de l'ordre de 1.5 à 2cm/an.

Au niveau du modèle géomécanique, un comparatif simple a été fait. Comme il n'y a pas eu d'année de crise aussi marquée que celle de 1993 depuis la mise en service de la galerie, il serait nécessaire de refaire une simulation complète en tenant compte des données pluviométriques et climatiques des dernières années pour se prononcer en termes quantitatifs. Qualitativement, on observe que l'effet de la galerie a été correctement prédit au niveau des rapports de vitesses observés entre les différentes zones.

6 Références

- [1] Glissement de la Frasse. Assainissement : Etude de faisabilité 2002-2003, rapport de synthèse 2004, 143 p. plus annexes. Groupement NCG. Norbert SA et De Cérenville Géotechnique SA.
- [2] DUTI 1986. Etude de site, le glissement de Cergnat-La Frasse. Analyse pluridisciplinaire. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [3] Feflow software, Groundwater modeling system, Wasy AG, Berlin.
- [4] Z_Soil - User manual. Zace Services Ltd Report 1985-2014. Lausanne, Elmepress International.

- [5] Commend S., Geiser F. and Tacher L. 3D numerical modelling of a landslide in Switzerland, in Numerics in geotechnics and structures, Zimmermann ed., Elsevier International, 2006, pp 103 – 113.
- [6] Tacher L. and Bonnard Ch. Hydromechanical modelling of a large landslide considering climate change conditions. Lecture at *International conference on 'Landslides and Climate Change - Challenges and Solutions'*. Ventnor, Isle of Wight, UK. 21-24 May 2007.
- [7] Rapport technique – bilan complémentaire du suivi à fin 2013, 2014, NCG -Norbert SA et De Cérenville Géotechnique SA.
- [8] M. Soldini, E. Maclay, C. Taruffi et L. Tacher. Assainir le glissement de la Frasse. Tracés N°6 2009

Remerciements

Ce travail a été réalisé par l'Association pour l'étude de la Frasse regroupant De Cérenville Géotechnique SA et Norbert Géologues-Conseils SA, ainsi que 2 instituts de l'EPFL (LMS et GEOLEP), avec GeoMod en sous-traitance. Le suivi est actuellement assuré par De Cérenville Géotechnique SA et Norbert Géologues-Conseils SA.

L'auteure remercie les différents intervenants au projet pour la mise à disposition de l'ensemble des documents.

Auteure :

Françoise Geiser
Dr Ingénieure civil EPFL
Geomod SA / De Cérenville Géotechnique SA
Lausanne / Ecublens