

MASTER « **H**ydrogéologie, **S**ol et **E**nvironnement »

Master 2

Quantification de la dégradation mécanique et chimique d'un versant instable : approche géologique, hydromécanique et hydrochimique.

Versant instable de Séchilienne (Isère, 38)

Présenté par

Cécile BAUDEMONT



Encadrement

Catherine BERTRAND (UMR Chrono-Environnement, Université de Franche-Comté, 25)

Yves Guglielmi (CEREGE, Université d'Aix-Marseille, 13)

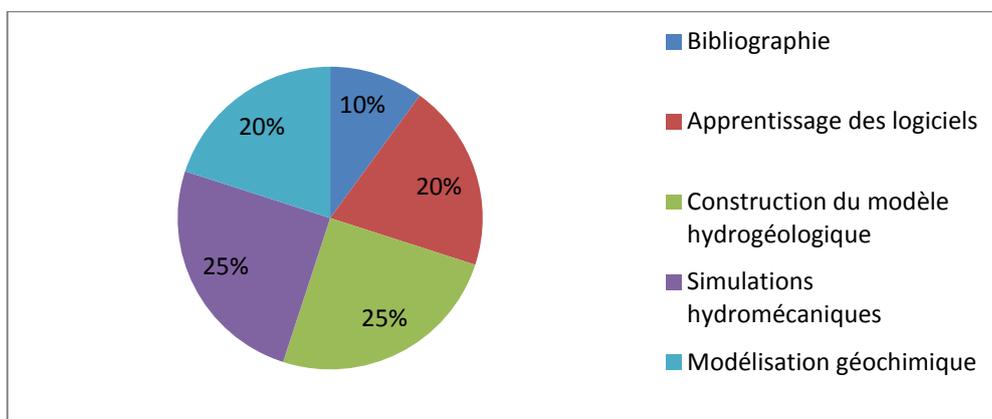
Sophie Viseur (CEREGE, Université d'Aix-Marseille, 13).

Année Universitaire 2012-2013

Avant Propos

Ce travail s'est déroulé au sein de l'équipe de recherche Chrono-Environnement de l'Université de Franche-Comté (25) ainsi que de l'équipe de recherche du CEREGE à l'Université d'Aix-Marseille (13). Ce stage s'effectue dans le cadre de ma deuxième année de Master Agrosciences en Hydrogéologie, Sol et Environnement de l'Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse (84). Il s'agit d'un stage de six mois encadré par Catherine BERTRAND (Maitre de Conférences, Université de Franche-Comté), Yves GUGLIELMI (Professeur, CEREGE, Université de Marseille), Sophie Viseur (Ingénieure de Recherche, CEREGE, Université de Marseille), Aurélien Vallet (Doctorant, Université de Franche-Comté) ainsi que les équipes des différents laboratoires. Ce stage a pour but de quantifier la dégradation hydromécanique et chimique du versant instable de Séchilienne, Isère (38).

Mon travail s'est déroulé en plusieurs parties représentées ci-dessous :



Pour commencer, j'ai essentiellement consulté et trié les données nécessaires pour la réalisation du modèle hydrogéologique en 3D. J'ai commencé l'apprentissage du logiciel Gocad en intégrant ces informations. Ceci m'a permis de prendre connaissance du fonctionnement de ce code.

Par la suite, j'ai étudié plus en détails le logiciel 3DStress grâce à quelques publications disponibles (Morris, 1996). J'ai ainsi pris connaissance des difficultés de cet outil et de la sensibilité des mouvements selon les failles étudiées. Ce travail couplant la géométrie 3D avec Gocad et l'analyse des effets des contraintes sur les failles en fonction de cette géométrie m'a permis d'appréhender certains aspects du fonctionnement hydromécanique du versant rocheux de Séchilienne.

Enfin lors de la réalisation des modélisations géochimiques, j'ai pu intégrer des données de chimie aux simulations précédentes et faire le lien entre les déformations mécaniques et les variations de chimie des eaux observées sur les sources qui drainent le versant.

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier ma directrice de stage, Catherine Bertrand pour m'avoir fait confiance lors de la proposition de ce sujet, pour m'avoir fait partager ses connaissances et soutenue tout au long du projet. Egalement je souhaite remercier vivement Yves Guglielmi pour ses qualités scientifiques et pédagogiques ainsi que sa sympathie. Je remercie chaleureusement Sophie Viseur pour son aide précieuse, ses conseils avisés et son enthousiasme lors de notre travail sur Gocad. Je tiens à remercier Aurélien Vallet pour ses conseils et ses idées qui m'ont permis de faire avancer cette étude, ainsi que Jacques Mudry qui nous a beaucoup aidés lors de nos réflexions.

De plus, je remercie Alan Morris, du département de Géologie de l'Institut de Recherche du Sud-ouest à San Antonio, qui a créé le code du logiciel 3DStress, pour son aide concernant l'apprentissage de ce logiciel et d'avoir été disponible afin de répondre à mes questions concernant la méthode utilisée. Je remercie également Olivier Le Roux, pour m'avoir obtenu les données de localisations des profils géophysiques réalisés lors d'une étude en 2011.

Il me faut remercier mes collègues appartenant au laboratoire du CEREGE de l'Université d'Aix-Marseille qui m'ont très bien accueillie et intégrée dans la vie marseillaise, je me souviendrai de ces gouters quotidiens qui ont diverti mes journées, et tout particulièrement Pierre-Olivier Bruna qui m'a beaucoup apporté dans l'apprentissage de Gocad et pour son soutien exprimé en marseillais.

Je tiens à remercier toutes les autres personnes qui m'ont soutenue tout au long de ce projet, les étudiants/personnels de l'Université de Franche-Comté et bien évidemment, je remercie encore les trois Avignonnaises Lucie, Léa et Sarah pour leur soutien très important durant ce projet et pour tous ces moments passés ensemble.

Résumé

La déstabilisation du versant instable de Séchilienne est très sensible aux événements pluviométriques. La compréhension de la circulation des fluides dans le versant ainsi que les effets hydromécaniques associés sont primordiaux pour caractériser les mécanismes de déformation. L'objectif de cette étude est de déterminer la relation entre la chimie des eaux et la déformation du versant afin de mieux comprendre l'influence des fluides sur les processus de déstabilisation du versant.

Un modèle géologique 3D a été réalisé avec le logiciel Gocad® en intégrant les données géologiques (lithologie, zones fracturées...) ainsi qu'hydrogéologiques (chimie, sources, venues d'eau...). Le modèle permet de reconstituer la complexité des surfaces de failles en profondeur par interpolation des données de surfaces et des galeries du versant. Les relations entre les variations de contraintes effectives produites lors des infiltrations d'eau dans le versant et la complexité géométrique des failles sont ensuite explorées.

Avec le modèle 3DStress, une estimation des variations spatiales de la tendance au glissement ou à la dilatance selon deux familles de failles qui affectent le versant, révèle des comportements significativement différents selon le tenseur de contraintes appliqué et la profondeur étudiée. Il apparaît une zone préférentielle d'activation en glissement selon les failles N120 qui se situe vers 200m de profondeur environ. Les simulations montrent qu'une variation de contrainte effective dans cette zone affecte toute la partie superficielle des failles.

L'estimation des variations de surfaces de zones activées a ensuite été prise en compte dans un modèle géochimique pour discuter des effets de la déformation mécanique du versant sur la variation de la chimie des eaux de sources qui le drainent.

Mots clés : Modélisation géologique 3D, réactivation des failles, chimie des interactions eau-roche, glissement de terrain.

Abstract

Pore water pressure, build up by recharge of hydro-system, is one of the main trigger of Sechilienne unstable slope. Groundwater flow and induced hydro-mechanical effects are challenging to understand in order to characterize deformation mechanisms. Aim of this study is to determine the relationship between water chemistry and deformation in order to understand fluids influence on the unstable slope destabilization process.

A 3D geological model was designed with Gocad® software by integrating geological and hydrogeological data (lithology, fractured area, springs chemistry, gallery water inflow...). Complexity of fault surfaces network was interpolating from surface and from slope gallery data (such as dip and strike) to be deeply extended. The relationship between effective stress variations, induced by water infiltration, and the geometric complexity of faults has been investigated.

A 3DStress model, based on the geological model, has allowed to estimate spatial variations of trend slip (or dilation), of two families of faults affecting the slope. Significantly different behavior were highlighted, depending on the applied stress tensor and depth. Model shows that preferential activation zone in slip in accordance with the N120 faults is around 200m depth. Simulations show as well that a change in effective stress in this area affects the shallow surface of faults.

Estimation of faults/fractures surface variations of activated areas was included in a geochemical model in order to evaluate consequences of the slope mechanical deformation on spring water chemistry fluctuations.

Keywords: Geological modelling 3D, faults reactivation, chemistry interaction water-rock, landslide.

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction | 1 |
| 1) Contexte de l'étude..... | 3 |
| a) Localisation | 3 |
| b) Géologie | 3 |
| c) Hydrogéologie | 5 |
| d) Comportement de l'instabilité..... | 8 |
| 2) Problématique et méthodologie..... | 9 |
| 3) Modèle hydrogéologique 3D du versant de Séchilienne | 10 |
| a) Principe de la modélisation sous Gocad | 10 |
| b) Création du modèle hydrogéologique | 10 |
| c) Système d'écoulement de l'eau souterraine dans le massif | 17 |
| d) Conclusion sur le modèle hydrogéologique..... | 18 |
| 4) Modèle hydromécanique 3D du versant de Séchilienne | 19 |
| a) Principes des estimations hydromécaniques..... | 19 |
| b) Scénarios testés sur le versant instable de Séchilienne..... | 21 |
| c) Résultats des simulations : tendances au glissement ou à la dilatance des failles sous l'effet d'une variation de contraintes dans le versant..... | 24 |
| d) Synthèse de l'étude hydromécanique | 31 |
| 5) Analyse de l'impact des surfaces potentiellement réactivées mécaniquement sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines | 32 |
| a) Principe de la modélisation géochimique : lois cinétiques | 32 |
| b) Calculs des simulations géochimiques | 33 |
| c) Simulations géochimiques | 34 |
| d) Synthèse et hypothèses : simulations géochimiques | 38 |
| Conclusion..... | 40 |
| 6) Bibliographie | 41 |
| 7) Annexes..... | 43 |
| ANNEXE I Plans des vecteurs déplacements, Ruines de Séchilienne (Vengeon, 1998) | 43 |

| | |
|--|----|
| ANNEXE II Carte de la foliation du versant des Ruines de Séchilienne..... | 44 |
| ANNEXE III Tableau des directions et pendages des failles du secteur d'étude | 45 |
| ANNEXE IV Visualisations de la faille F23 lors de la mise en eau du modèle : tendance à la dilatance | 46 |
| ANNEXE V Visualisations de la tendance à la dilatance pour la faille F23 lors de l'infiltration en profondeur..... | 46 |
| ANNEXE VI Visualisations de la tendance à la dilatance pour la faille F3 lors de l'infiltration en profondeur..... | 47 |
| ANNEXE VII Visualisations du réseau de failles dans le scénario d'un modèle sec : tendance à la dilatance | 47 |
| ANNEXE VIII Visualisations du réseau de failles en présence du niveau piézométrique | 48 |
| ANNEXE IX Paramètres cinétiques pour les simulations géochimiques | 49 |
| ANNEXE X Conditions initiales modifiées après plusieurs simulations géochimiques | 50 |
| ANNEXE XI Présentation de plusieurs simulations réalisées. | 50 |
| ANNEXE XII Résultats des simulations géochimiques pour le point C79 | 51 |

Listes des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 Schéma éventuel des risques sur le site de Séchilienne | 1 |
| Figure 2 Localisation du versant instable de Séchilienne (Vengeon, 1998)..... | 3 |
| Figure 3 Géologie simplifiée réalisée par A. Vallet du massif de Belledonne et localisation des galeries (reconnaissance et de mine). Carte IGN n°3335OT-Grenoble..... | 4 |
| Figure 4 Coupe de la vallée de la Romanche au niveau des ruines de Séchilienne. Positions maximales des glaciers estimées (Vengeon, 1998) | 4 |
| Figure 5 Schéma conceptuel du massif instable modifié de (Guglielmi et al, 2002) | 5 |
| Figure 6 Localisation des points de suivis, de la zone instable et de la galerie EDF | 6 |
| Figure 7 Schéma d'écoulement à l'échelle du massif modifié de Vallet et al, 2012..... | 7 |
| Figure 8 Coupe transversale du secteur des Ruines (Vengeon, 1998)..... | 8 |
| Figure 9 Topographie de la zone d'étude (carte IGN n°3335OT-Grenoble) Le Nord géographique est indiqué par l'axe Y dans le repère GoCad. Dans le plan XY, le modèle représente un carré de 6475 mètres de côté..... | 10 |
| Figure 10 Interprétation des failles en surface de la zone d'étude (extrait de la carte IGN n°3335OT-Grenoble) | 12 |
| Figure 11 Marqueurs de fractures/venues d'eau dans les galeries..... | 14 |
| Figure 12 Profil électrique ET4 avec les indicateurs des failles..... | 15 |
| Figure 13 Identification des marqueurs dans les galeries G585 et G710 | 16 |
| Figure 14 Réseau de failles en 3D réalisé sous Gocad, avec la localisation de la galerie EDF ainsi que les points de suivis hydrochimiques..... | 17 |
| Figure 15 Contrainte normale, σ , contrainte de cisaillement τ appliquées sur une surface définie par les trois contraintes principales compressives (modifié d'après Morris, 1996)..... | 19 |

| | |
|---|----|
| Figure 16 Contours de la contrainte maximale principale (σ_1) | 20 |
| Figure 17 Données d'entrée dans 3DStress pour le modèle sec | 21 |
| Figure 18 Présentation des deux familles de failles selon leur orientation..... | 22 |
| Figure 19 Schéma du scénario d'une infiltration d'eau en profondeur..... | 23 |
| Figure 20 Faille N20 a) Tendance au glissement (gauche) et tendance à la dilatance (droite) dans le cas du modèle sec b) Tendance au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique c) Tendance au glissement selon la propagation de l'infiltration..... | 24 |
| Figure 21 Stéréogramme F23 (N20) : tendance au glissement et à la dilatance à 160m de profondeur..... | 25 |
| Figure 22 Faille N120 a) Tendance au glissement (gauche) et tendance à la dilatance (droite) dans le cas du modèle sec b) Tendance au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique c) Tendance au glissement selon la propagation de l'infiltration..... | 27 |
| Figure 23 Stéréogramme F3 (N120) : tendance au glissement et à la dilatance à 160m de profondeur..... | 28 |
| Figure 24 Tendance au glissement et à la dilatance selon la profondeur des failles et la mise en eau du modèle | 29 |
| Figure 25 Réseau de failles a) Tendance au glissement dans le cas du modèle sec ; b) Tendance au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique ; c) Tendance au glissement selon la propagation de l'infiltration | 30 |
| Figure 26 Zone pour l'étude de l'augmentation de surface activée des failles drainantes | 32 |
| Figure 27 Diagramme de Piper des eaux de la galerie G710 (Logiciel Diagramme, R.SIMLER) | 35 |
| Figure 28 Premières simulations géochimiques réalisées avec les données initiales | 36 |
| Figure 29 Simulations géochimiques pour le point G710..... | 37 |
| Figure 30 Déplacement cumulé (mm/an). La pente représente le taux moyen de déstabilisation. Vallet et al, 2013.. | 38 |
| Figure 31 Schéma des trois hypothèses de déformation du versant | 39 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 Contraintes effectives : mise en eau du modèle sur 3DStress..... | 22 |
| Tableau 2 Paramètres de la composition de la roche initiale..... | 34 |
| Tableau 3 Composition des eaux pour les points G710 et C79 (en mg/L)..... | 35 |
| Tableau 4 Conditions du modèle géochimique pour obtenir un bon calage..... | 36 |

Introduction

Située dans les gorges de la Romanche (Isère), le lieu dit des « Ruines de Séchilienne » est célèbre pour sa zone d'instabilité et d'éboulements. Depuis plus de vingt ans, le versant instable de Séchilienne est en situation de crise. En 1985, un premier éboulement se produit et conduit à mener des investigations géologiques poussées. Cet aléa complexe suscite des études approfondies et des décisions politiques dans le but de prévenir le risque majeur qu'il constitue pour les habitants et infrastructures de la vallée. Dès 1985 la route nationale située en rive droite de la Romanche a été déviée afin d'éloigner les automobilistes d'éventuelles chutes de pierres. De plus, un dispositif de suivi en continu des mouvements de terrain a été mis en place par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de Lyon. Un risque bien plus important de barrage de la vallée par un éboulement massif suivi d'inondation et d'embâcles est vite apparu à la suite de ces premières études. Celles-ci ont permis d'estimer un volume de mouvement de plusieurs millions de mètres cubes. La rivière de la Romanche, affluent du Drac, est un cours d'eau à régime de crue rapide. Le débit centennal est estimé à $550 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette rivière est une composante importante à prendre en compte dans les risques. En effet, la chute dans la vallée de tout ou partie d'un tel volume rocheux entrainerait l'accumulation des eaux de la Romanche derrière ce barrage naturel, créerait un lac inondant un territoire plus ou moins étendu. Le danger principal résulterait de la rupture du barrage qui libérerait une onde de crue pouvant inonder rapidement, selon le volume retenu, la ville de Vizille, les plates-formes chimiques situées en aval ainsi que dans le pire des cas l'agglomération de Grenoble (Figure 1).

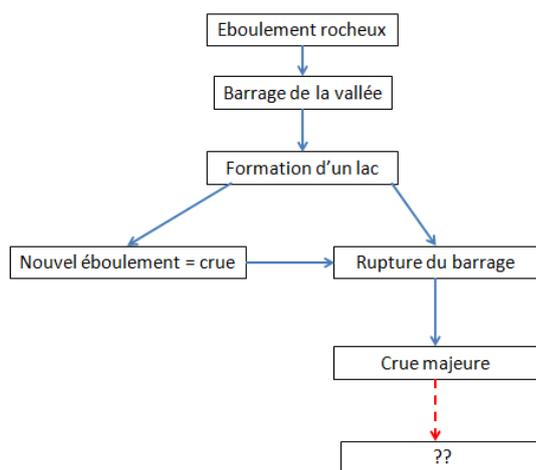


Figure 1 Schéma éventuel des risques sur le site de Séchilienne

Les travaux antérieurs sont nombreux sur la zone instable de Séchilienne. Plusieurs approches ont été développées (sismicité, datation...) mais seulement les études hydrochimiques et hydromécaniques seront rappelées dans ce mémoire :

- Un suivi hydrogéologique et hydrochimique mis en place sur les sources drainant les aquifères contenus dans le massif. Les données acquises concernent la localisation des sources, le suivi des paramètres chimiques, des paramètres physiques (température, conductivité...) et plusieurs mesures du débit ont été réalisées (Vallet et al, 2010-2012).

- Une étude hydromécanique à grande échelle pour comprendre les relations entre les mouvements de fluides et la déformation des roches fracturées soumises à de fortes pressions hydrauliques (Vengeon, 1998).

Les études hydrogéochimiques ont permis d'établir un modèle conceptuel d'écoulement à l'échelle du massif avec les résultats de campagnes de traçages naturels hydrochimiques et isotopiques. Des traceurs de temps de séjours (rapport Mg/Ca, carbone 13...) couplés à des traceurs de transits courts (carbone organique, fluorescence naturelle..) ont permis de proposer des circulations d'eau dans le massif dans le cadre du projet de l'Agence Nationale de la Recherche « SLAM » (Etudes Multidisciplinaires du Mouvement de Séchilienne) par les hydrogéologues du laboratoire Chrono-Environnement de Besançon. De plus, la chimie des sources a démontré des interactions eau-roche importantes et l'existence de quatre faciès hydrochimiques. Les études hydromécaniques ont quant à elles démontré qu'une forte augmentation de pression de fluide génère des endommagements volumiques (dégradation du milieu) dans les zones intensément fracturées. Les déformations provoquent des augmentations de perméabilité sur certains secteurs selon l'ouverture des fractures (Cappa, 2006 et Vengeon, 1998).

Dans le cadre de ce stage de fin d'études, un modèle géologique en trois dimensions a été construit afin de synthétiser les données connues et d'étudier la complexité hydrogéologique du secteur instable de Séchilienne. Cette étape s'effectue en extrapolant en profondeur les projections des tracés des failles connues à l'échelle de la zone instable et reportées sur la surface topographique. Ensuite la géométrie des failles est introduite dans le champ de contraintes appliquées au versant pour comprendre les comportements des failles sous l'effet de variations de contraintes liées à des infiltrations d'eau. Les surfaces activées des failles sont alors identifiées, leur dimension quantifiées et introduites dans un calcul géochimique afin d'estimer les liens entre surface active et productions d'éléments dans les eaux souterraines. Les concentrations en éléments ainsi estimées sont comparées à celles mesurées aux exutoires.

1) Contexte de l'étude

a) Localisation

La rive droite de la vallée de la Romanche, à l'aval de la ville de Séchilienne dans le département de l'Isère (38, France), est le centre d'une instabilité de versant rocheux (Figure 2).

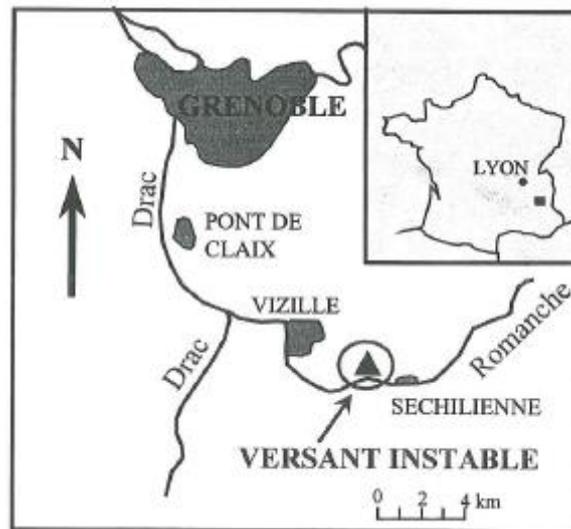


Figure 2 Localisation du versant instable de Séchilienne (Vengeon, 1998)

L'instabilité se situe à une vingtaine de kilomètres au Sud-est de l'agglomération de Grenoble.

b) Géologie

Le versant instable de Séchilienne appartient au socle de la Chaîne de Belledonne qui est un massif cristallin des Alpes Françaises (Figure 3). Deux grandes unités composent cette chaîne montagneuse alpine (Barféty et Bordet, 1972) :

- La série satinée composée de micaschistes forme le rameau externe du massif de Belledonne (Paléozoïque).
- La série verte constituée de plusieurs faciès lithologiques différents comprenant des granitoïdes.

Les terrains composants le massif externe sont du Houiller d'âge Carbonifère (conglomérats polygéniques), des cargneules et du gypse reposant sur des dolomies et des calcaires d'âge triasique ainsi que des schistes reposant sur des calcaires du Lias. Le Quaternaire est essentiellement composé par des dépôts glaciaires. Ces roches de la chaîne de Belledonne se sont structurées en plusieurs étapes, dont les plus anciennes datent de l'époque Hercynienne. Les mouvements tectoniques après le Trias supérieur se traduisent par des jeux en failles normales. Les différents compartiments qui se sont formés suite à cette phase et ont ensuite été réactivés selon de grands couloirs de cisaillement lors de la phase compressive Alpine.

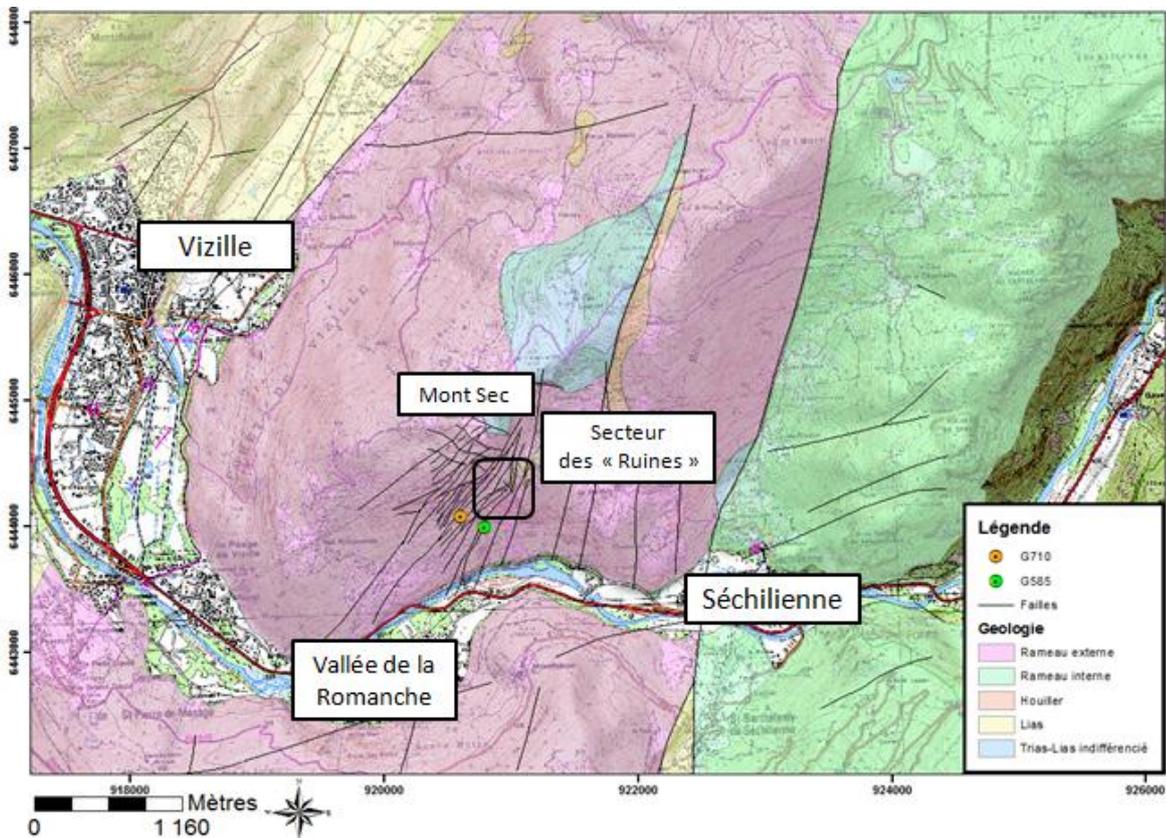


Figure 3 Géologie simplifiée réalisée par A. Vallet du massif de Belledonne et localisation des galeries (reconnaissance et de mine). Carte IGN n°3335OT-Grenoble.

Enfin, la zone a été recouverte par les glaciers (-300000 à -130000BP) qui ont contribué à façonner le relief actuel. A partir du Würm (-90 000 à -10 000 BP) les glaciers ont eu tendance à s’individualiser et plusieurs stades de retrait des glaciers sont connus (Figure 4).

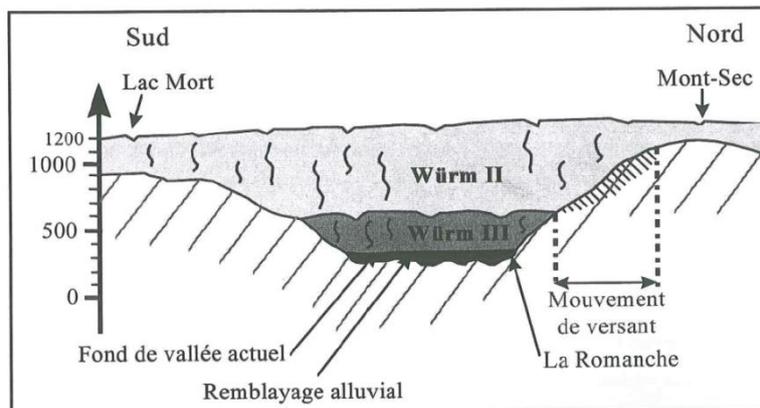


Figure 4 Coupe de la vallée de la Romanche au niveau des ruines de Séchilienne. Positions maximales des glaciers estimées (Vengeon, 1998)

Le Mont Sec culmine à 1100m d’altitude est le point le plus haut affecté par l’instabilité du versant. Les paramètres de structure de la roche (lithologie, fabrique de la roche) et de fracturation de la roche (densité, orientation...) sont des facteurs de prédispositions à l’instabilité. La diminution de la résistance de la roche due à l’altération, aux mouvements tectoniques ainsi qu’à l’érosion glaciaire (surcreusement de la vallée, raidissement des pentes et augmentation des contraintes dans le massif) sont des paramètres préparatoires à l’instabilité (Leroux, 2010).

La décompression du massif lors de la déglaciation est responsable de l'instabilité des versants rocheux en provoquant des fragilisations (Augustinus, 1995) par relaxation complexe des contraintes dans le versant. Des facteurs déclenchant sont à prendre en compte comme des sollicitations sismiques ou climatiques. En effet une augmentation de température agit sur la fonte du permafrost et permet une décompression. Un intense événement pluvieux peut avoir des conséquences sur les effets hydrostatiques du milieu (augmentation de pression dans les fractures).

A l'échelle du massif de Belledonne, les failles cartographiées appartiennent à plusieurs familles (Figure 3):

- Les failles de direction N20-30 sont plus ou moins parallèles au synclinal médian représentant le contact entre les deux rameaux de la chaîne.
- Les failles N120-140.
- Les failles N70 au niveau des Ruines découpent le versant en « lanières ».

Les faciès lithologiques se situant dans le secteur de l'instabilité sont des faciès micaschistes présentant une forte foliation. Les principaux minéraux composant ces faciès sont les micas noirs (biotite-annite, biotite-phlogopite), les micas blancs (muscovite), et des chlorites. Des zones quartzo-feldspathiques sont présentes dans les galeries de côtes 710 et 585m NGF présentes sur ce massif (Figure 2). Ces feldspaths sont essentiellement des albites. Au niveau du secteur des Ruines de Séchilienne des niveaux de schistes noirs riches en sulfures ont aussi été localisés. De plus, des indices de pyrite sous forme d'amas interstratifiés sont présents dans les calcaires dolomitiques du Trias. La calcite est essentiellement retrouvée dans les couches sédimentaires (Trias-Lias).

c) Hydrogéologie

Plusieurs unités d'écoulements composent le schéma conceptuel (figure 5, Guglielmi et al, 2002). Un aquifère perché s'écoule dans la couverture sédimentaire à haute altitude vers un aquifère se situant dans la zone instable. Cet aquifère superficiel est drainé verticalement vers un aquifère profond à la base du massif. L'eau s'écoule ainsi jusqu'à la nappe alluviale de la rivière de la Romanche.

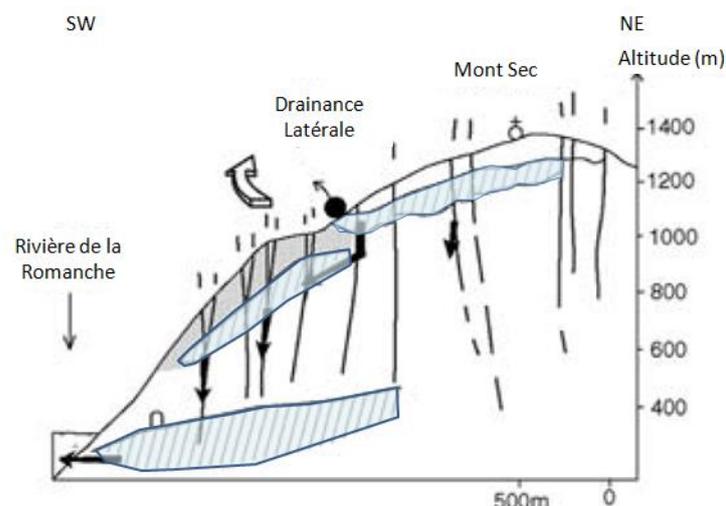


Figure 5 Schéma conceptuel du massif instable modifié de (Guglielmi et al, 2002)

Un système de surveillance des sources a été mis en place afin de suivre les paramètres physiques et chimiques de certaines sources qui représentent les exutoires de ces aquifères. Les points de suivi de l'eau sont localisés sur la Figure 6 et sont des caractéristiques du système hydrogéologique. Leur localisation est due à la complexité du massif : présence de failles ou fractures, géologie, aquifères perchés.

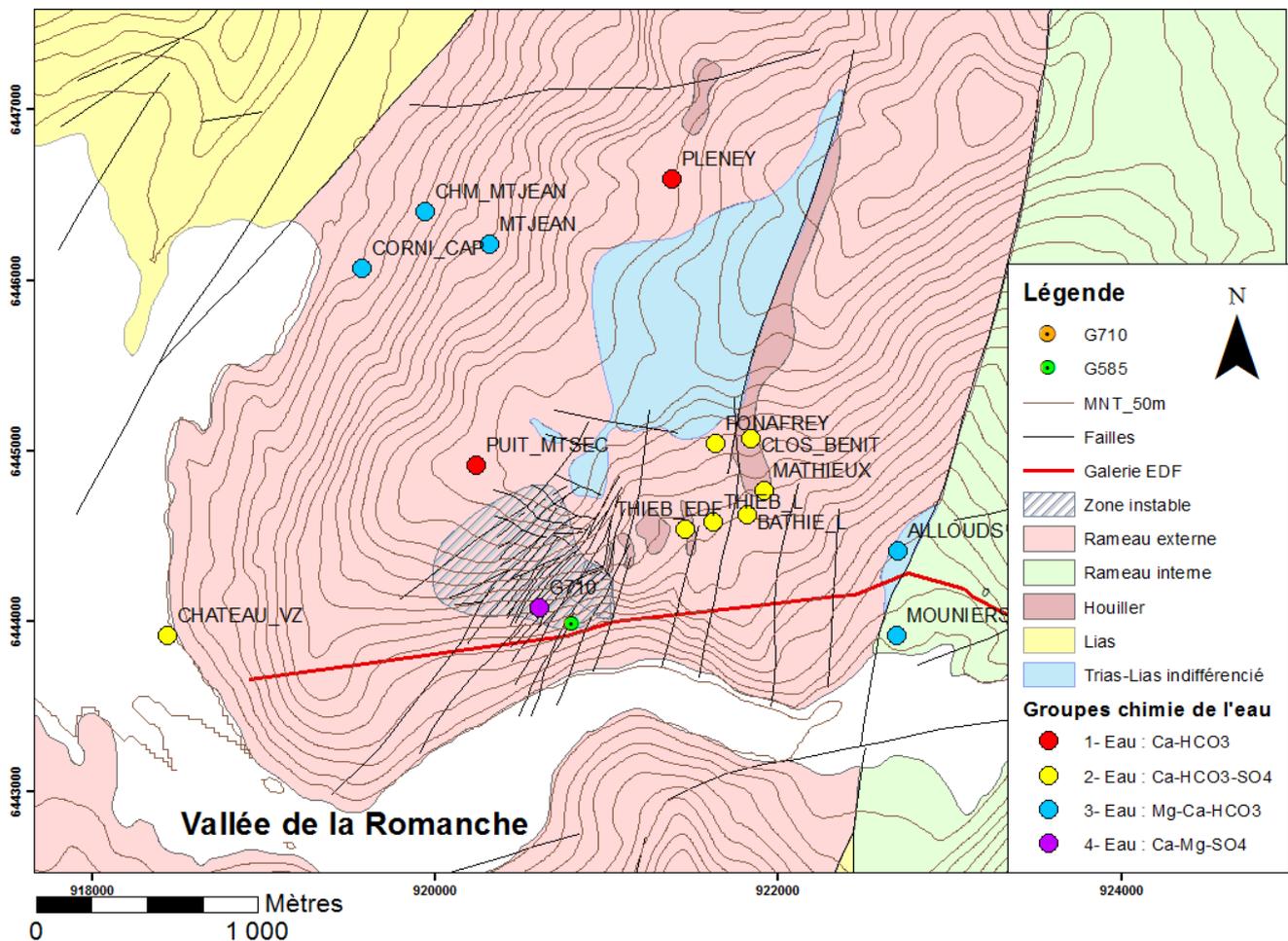


Figure 6 Localisation des points de suivis, de la zone instable et de la galerie EDF

Une galerie appartenant à Electricité De France se situe en bas du versant du Mont Sec à une altitude d'environ 425m. Elle traverse le massif rocheux directement sous la zone instable. Le creusement de la galerie EDF a provoqué une perturbation hydraulique dans le système d'écoulement qui a pu amener à l'assèchement de certaines sources à 500m d'altitude. Il est clair que le niveau de base de l'aquifère rocheux a été rabattu par cette galerie. L'eau a été libérée lors de ce creusement en s'évacuant par des discontinuités ouvertes. Dans cette galerie des indices de fracturation ont été repérés ainsi que des venues d'eau sur des fractures ouvertes. Des venues d'eau ponctuelles et de nombreux suintements sont identifiés dans cette galerie au sein de la zone instable. Ces paramètres seront à intégrer dans le modèle hydrogéologique.

A l'intérieur d'une galerie de reconnaissance située à l'altitude 710m NGF, au sein de la zone instable, le point de suivi nommé G710 représente deux venues d'eau. Ces deux points de suivi sont localisés à 79m et 143m à l'intérieur de cette galerie. Une deuxième galerie, à la côte 585m NGF est caractérisée par des sources pérennes. En effet, un

piézomètre installé à la côté 757m NGF (Lacombe, 2010) a indiqué le niveau naturel de l'eau (CETE, 2010) entre 590 et 602m d'altitude.

Lors de campagnes de traçages, les sources ont été regroupées selon leurs caractéristiques chimiques (figure 6). Le premier groupe est caractéristique des eaux ayant traversé la couverture sédimentaire carbonatée alors que le groupe 2 a traversé en plus de cette couverture du socle pour obtenir ses concentrations en sulfates. Le troisième groupe a également traversé la couverture sédimentaire mais ces eaux ont rencontré des secteurs de dolomite pour se charger en magnésium. Les points d'eau localisés dans la galerie G710 présentent une infiltration locale avec certainement un lessivage du socle (pyrite).

En milieu rocheux fracturé, la circulation de l'eau s'effectue dans des fractures ouvertes et connectées entre elles. Afin de comprendre au mieux le système hydrogéologique du massif de Séchilienne, le schéma d'écoulement réalisé lors d'études antérieures (Vallet et al, 2012) a démontré que l'eau provient de différentes régions du massif (figure 7).

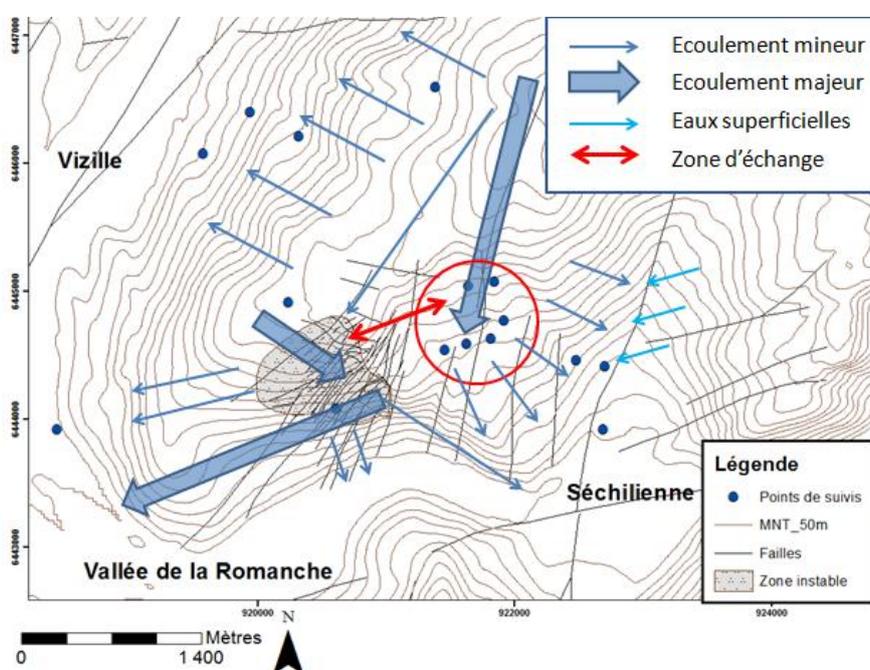


Figure 7 Schéma d'écoulement à l'échelle du massif modifié de Vallet et al, 2012.

Les interprétations des campagnes d'échantillonnages d'eau, les résultats des campagnes isotopiques $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ainsi que les campagnes de traçages ont défini un schéma d'écoulement à l'échelle du massif. Un couloir de drainage existe selon les failles majeures d'orientation N20 à l'Est du modèle. De plus au niveau de la zone instable, un écoulement s'effectue en direction de la pente mais aussi vers le Sud-ouest. Cette dernière direction indique le rôle de drain des compartiments rocheux en lanières (N50-70°) mais surtout ceci informe sur le rôle important des failles N20. Les failles N50-70° délimitant les lanières peuvent être étanches ou faire s'écouler l'eau par phénomène de surverse (Vengeon, 1998). Les traçages ont alors démontré qu'il existe un drainage important de la zone instable en direction de l'Est vers les failles N20. Les écoulements préférentiels dans la zone fracturée sont réactifs et rapides, et ils sont à différencier des écoulements plus diffus et lents dans la roche peu fracturée.

d) Comportement de l'instabilité

L'infiltration des eaux souterraines est un phénomène aggravant pour la stabilité du versant de Séchillienne, des corrélations ayant été faites entre les vitesses d'ouverture des fractures et la pluviométrie (Vengeon, 1998).

La déstabilisation du versant est due dans un premier temps au basculement des lanières rocheuses vers la vallée de la Romanche sous l'effet de la gravité (figure 8). Il n'y a pas de surface de rupture enveloppant la zone instable en profondeur. L'affaissement sommital du Mont Sec est également un des mécanismes de l'instabilité provoquant la poussée vers la vallée de la partie basse du versant. La rupture résulte d'une diminution de la résistance du versant rocheux comme les fortes amplitudes de températures, l'alternance gel et dégel ou simplement de l'altération géochimique qui désorganise les roches.

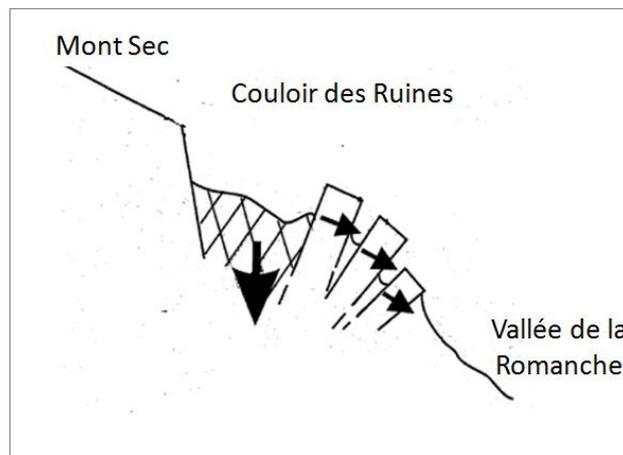


Figure 8 Coupe transversale du secteur des Ruines (Vengeon, 1998)

Cette instabilité est progressive dans le temps et dépend de la géométrie du versant, des systèmes de failles et de fractures, du type de matériau en place et des conditions d'eau souterraine. En retour la déformation du versant provoque des modifications des propriétés hydrauliques des fractures. Selon la saturation en eau du massif et l'intensité des pluies qui atteignent la zone déstabilisée, la rupture est plus ou moins importante. Il a été montré que la présence de séismes profonds (Lacroix, 2011) peut provoquer des éboulements et déstabiliser le versant localement. La figure 8 illustre les phénomènes qui se produisent au niveau du versant rocheux de Séchillienne.

2) Problématique et méthodologie

Les questions qui se posent lors de ce projet sont liées à la circulation des fluides dans le versant, leur accumulation, les effets hydromécaniques associés dans les zones faillées et les conséquences sur la chimie de l'eau. Cette étude du versant instable de Séchilienne, se déroulera en trois étapes :

- Un modèle hydrogéologique en trois dimensions du versant est établi avec le géo-modeleur Gocad. Une synthèse des données géologiques et hydrogéologiques est effectuée grâce à ce modèle. Les failles cartographiées en surface sont extrapolées en profondeur. Des indices de fracturation répertoriés dans les galeries souterraines permettent de recalculer l'emplacement de certaines failles. Ce modèle hydrogéologique confirme les écoulements d'eau à travers le massif.
- Une fois les plans de faille construits une analyse des états de contraintes sur les principales failles actives du versant est effectuée pour déterminer leur tendance au glissement ou à la dilatance. Le comportement hydromécanique des plans de failles est étudié en réalisant des simulations de variations des contraintes effectives. Cette analyse permet de localiser et de quantifier les surfaces activées de ces plans de failles. En effet lors d'infiltration d'eau dans le massif, des zones de failles non-actives sont sollicitées. Des créations de surfaces actives surviennent en conséquence.
- Pour finir, une analyse de l'altération géochimique des surfaces actives précédemment estimées par un modèle géochimique 1D est effectuée. Ceci permet d'estimer les quantités dissoutes des éléments chimiques dans l'eau lors du glissement des failles et de comparer ces quantités à celles mesurées sur le terrain au niveau des sources du versant. Cette partie met en lien la déformation du versant par l'augmentation de surfaces actives des failles et les conséquences sur la chimie de l'eau. Si le versant se déstabilise, la chimie des sources du massif sera affectée. Grâce à ces études géochimiques, des prédictions de dégradation du massif pourront se réaliser.

3) Modèle hydrogéologique 3D du versant de Séchilienne

a) Principe de la modélisation sous Gocad

La partie modélisation géologique de ce projet intègre des données récoltées par différentes personnes intervenant dans l'étude du versant instable de Séchilienne. La complexité des écoulements de fluides et des structures de ce massif étant très importante, seules les structures cartographiées et les indices d'écoulement d'eau souterraine seront replacés en trois dimensions afin d'élaborer les grands traits de l'hydrogéologie du versant. Le modèle hydrogéologique de Séchilienne en trois dimensions est réalisé avec le géo-modeleur Gocad, Geological Object Computer Aided Design, version 2009. Ce logiciel est basé sur la méthode de Discrete Smooth Interpolation (Mallet, 1997). Grâce à cet algorithme, des surfaces en trois dimensions sont obtenues en interpolant des structures comme des points ou des lignes. La fiabilité du modèle dépend du nombre mais surtout de la qualité des données entrées dans le logiciel. Le modèle réalisé étant une simplification de la réalité tout en considérant une représentation en trois dimensions qui est essentielle pour obtenir une meilleure compréhension du système hydrogéologique complexe.

b) Création du modèle hydrogéologique

La topographie de la zone d'étude a été triangulée sous Gocad à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) réalisé à l'échelle locale à partir d'un maillage carré de 25 mètres de côté (Figure 9). Les limites du modèle s'étendent à l'Ouest jusqu'à la ville de Vizille, à l'Est jusqu'à la faille majeure de Belledonne. La limite au Nord est imposée de manière à ce que le modèle comprenne la totalité du massif à l'étude (pied du versant Nord du massif) et au Sud la limite est fixée peu après la vallée de la Romanche.

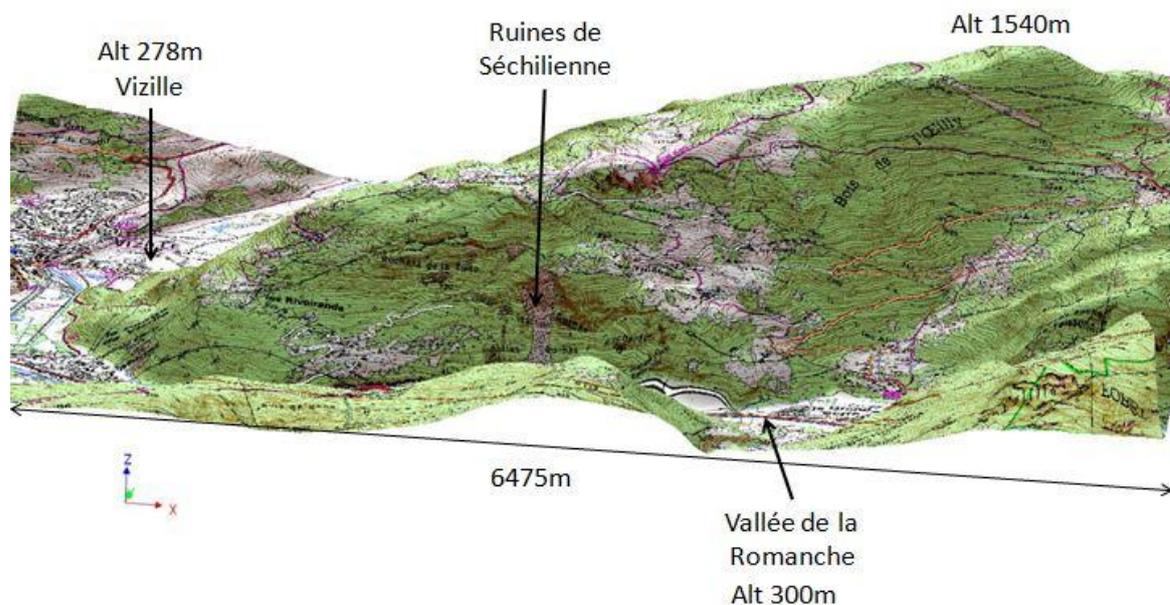


Figure 9 Topographie de la zone d'étude (carte IGN n°33350T-Grenoble) Le Nord géographique est indiqué par l'axe Y dans le repère GoCad. Dans le plan XY, le modèle représente un carré de 6475 mètres de côté.

Plusieurs interprétations de failles sont intégrées dans le modèle géologique :

- Deux cartes présentées par J.M. Vengeon (Annexe I et Annexe II) sont utilisées pour l'interprétation à 1/5000 du tracé des failles au niveau du secteur instable des Ruines de Séchilienne.
- A l'échelle régionale, les tracés des failles sont extraits de la carte géologique de Vizille (Barféty et al, 1972).

A l'Est du versant instable, un réseau de failles présente une orientation N20° plus ou moins parallèle à l'accident majeur de Belledonne. Dans la zone instable, deux ensembles de failles subverticales N50-70° et N120° sont présents. Les failles sont très nombreuses sur une superficie relativement étroite (forte densité). Au niveau des Ruines de Séchilienne, un phénomène de basculement des plans de failles vers l'aval est constaté. Il est possible d'observer cet effet sur trois failles dans le secteur des Ruines de Séchilienne très actif (encadré rouge) sur la figure 10 b).

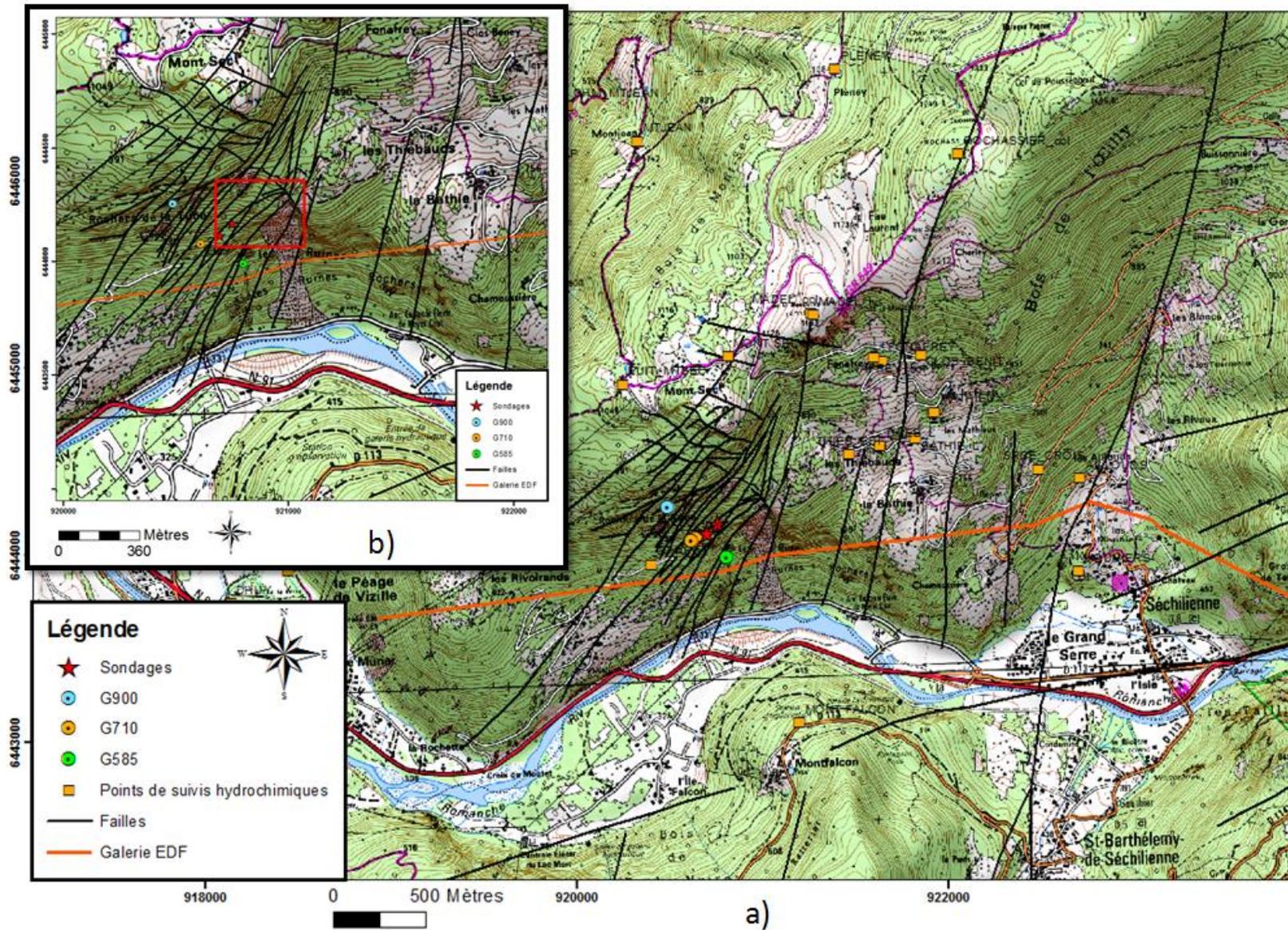


Figure 10 Interprétation des failles en surface de la zone d'étude (extrait de la carte IGN n°3335OT-Grenoble)

Ce basculement est lié aux forces de gravité en superficie du versant rocheux. Les blocs formés par les failles présentent une tendance au mouvement en direction de la vallée de la Romanche. L'effet du basculement sur la géométrie des plans de failles a été intégré dans la modélisation géologique.

Sur la zone active du versant instable de Séchilienne se trouvent plusieurs galeries à des altitudes différentes dont la fracturation et les venues d'eau ont aussi été intégrées dans le modèle :

- Une galerie appartenant à EDF permet de relier une ancienne galerie existante (près de Séchilienne), à la ville de Péage de Vizille (CETE, 1993). Celle-ci traverse le pied de la zone active du versant instable à une altitude de 425m. Le rapport du CETE donne des informations sur la fracturation et les venues d'eau repérées lors de l'assèchement de cette galerie. En effet, la galerie transporte l'eau retenue dans un barrage près de Séchilienne sur huit kilomètres jusqu'à l'usine de Péage de Vizille.
- Deux galeries minières aux cotes 900m (G900) et 585m (G585) sont localisées dans les secteurs de la Grande Combe et des Ruines de Séchilienne (Doladille, 1997). La galerie G585 est située à l'intérieur de la zone où l'effondrement est actif et possède une longueur de 240m. Celle-ci est orientée NO° et est horizontale. La galerie de mine G900 est située au pied d'une falaise et possède une longueur de 60 mètres (Vengeon, 1998). Dans cette étude la galerie G900 n'apporte pas d'informations nécessaires dans la structure du massif, elle ne sera ainsi pas insérée dans l'étude.
- Une galerie de reconnaissance située à la cote 710m traverse des roches déformées et altérées de 240m de long (Vengeon, 1998). Cette galerie recoupe des zones broyées correspondant à un secteur de failles majeures cartographiées en surface de versant. De plus, deux collecteurs d'eau y sont installés pour récupérer l'eau provenant de fractures recoupées par cette galerie.

La construction des plans de failles en profondeur a été réalisée avec plusieurs outils :

- Les traces des failles cartographiées en surface.
- Des profils de résistivité électriques donnent des informations sur le pendage des failles en profondeur.
- Les galeries de reconnaissance et de mine indiquent la présence de fractures et de venues d'eau.

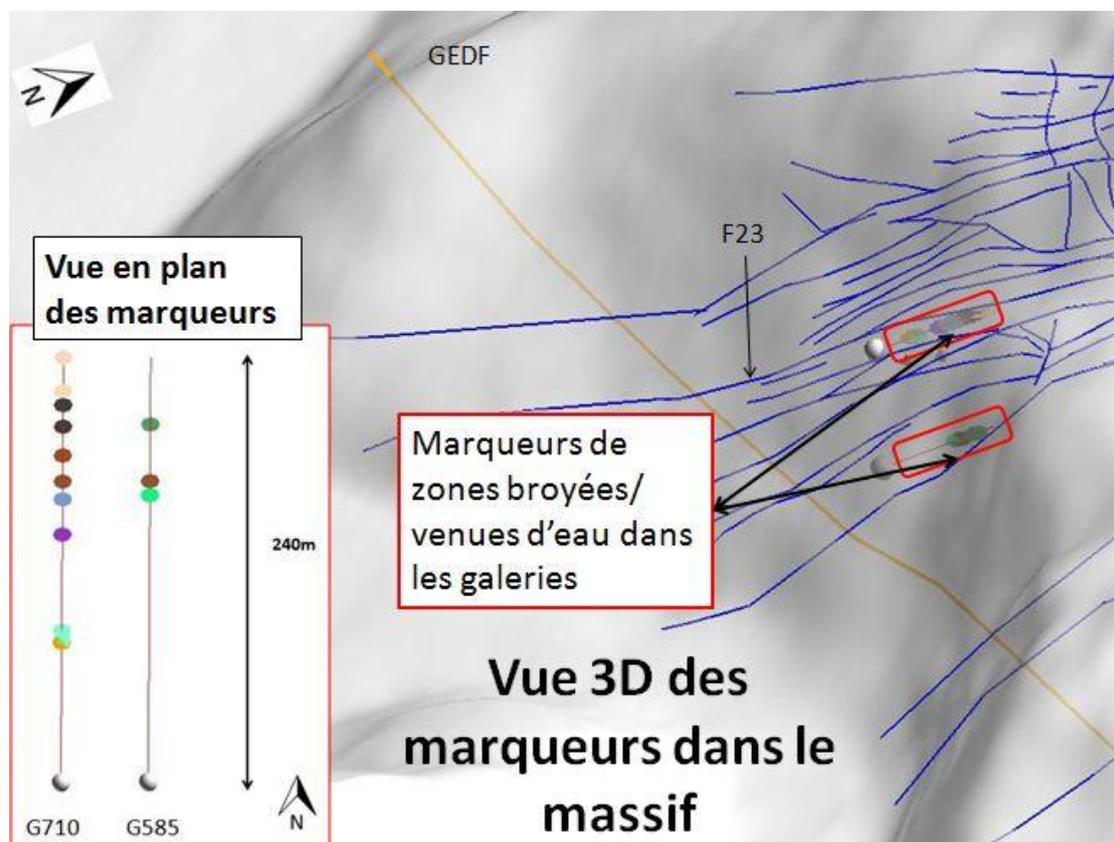


Figure 11 Marqueurs de fractures/venues d'eau dans les galeries

Ces informations reliées entre elles ont permis de préciser la géométrie des plans de failles en profondeur. La faille F23 peut être prise comme exemple pour expliquer cette méthode (Figure 11).

Une campagne géophysique a été menée sur le versant instable de Séchilienne dans le but de déterminer la profondeur et le volume de la zone active (Le Roux, 2011). Après relocalisation, ces données de résistivité électrique ont été incorporées dans le modèle géologique afin d'identifier l'extension des failles dans le massif. Des faibles valeurs de résistivité sont constatées dans la zone saine et stable du massif constituée de micaschistes relativement peu fracturés. A l'inverse des fortes valeurs de résistivité électrique caractérisent la zone fracturée au sein de laquelle les déplacements sont très actifs. Le changement abrupt de valeurs de résistivité dans les profils et les fortes valeurs mesurées, traduisent la présence de failles fortement ouvertes. La zone saturée en eau du versant n'a pas été recoupée par les investigations géophysiques qui sont peu profondes (jusqu'à 700m d'altitude).

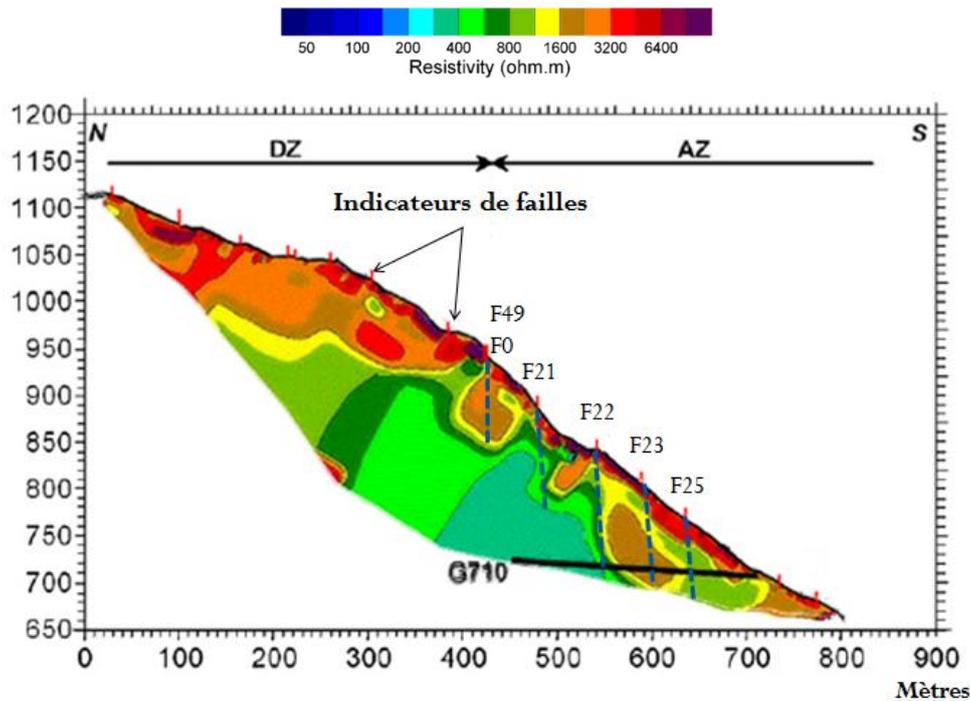


Figure 12 Profil électrique ET4 avec les indicateurs des failles

Sur ce profil électrique (Figure 12), il est possible de constater que les failles sont nombreuses entre 0 et 300m horizontalement et caractérisées par des zones de résistivité élevées (≈ 3200 ohm.m). Cette zone informe sur la forte densité de fractures présentes jusqu'à 100m de profondeur. En-dessous, la résistivité de la roche se situe entre 200 et 800 ohm.m et caractérise des micaschistes faiblement fracturés. Plus en aval, à 400m de distance horizontale, l'épaisseur de la couche supérieure de forte résistance diminue fortement. Les failles peuvent être tracées en profondeur selon les changements de résistivité. Le pendage des failles dans le modèle a été ajusté aux anomalies repérées sur les profils.

Ces plans de failles sont alors créés grâce aux traces en surface des failles cartographiées, puis les pendages sont modifiés par ces interprétations géophysiques. Pour finir les galeries donnent des indices de fracturation qui sont des indices du passage des failles. La figure 13 présente une vue « du dessus » en plan des projections de failles créés au niveau des galeries de mine et de reconnaissance.

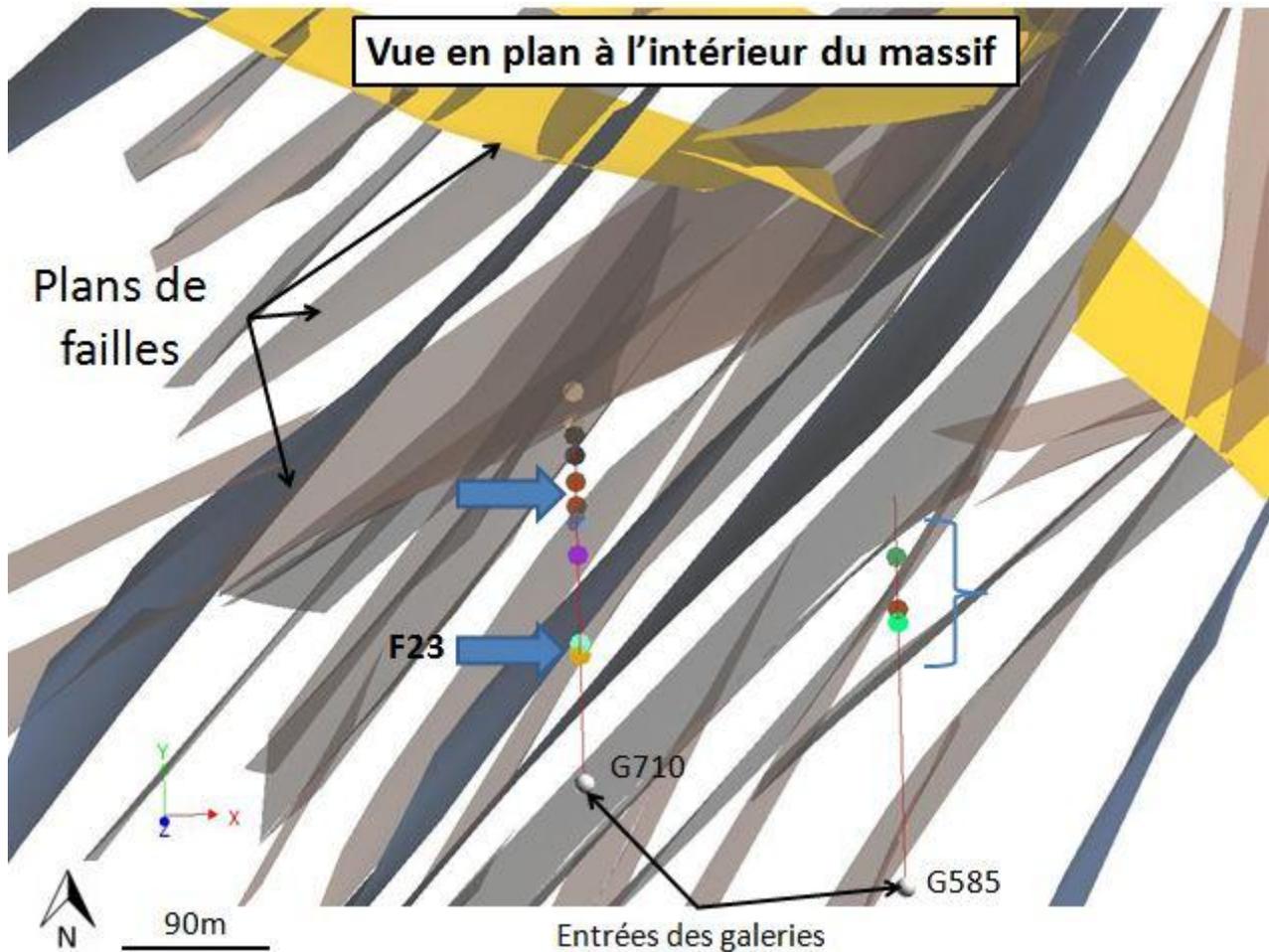


Figure 13 Identification des marqueurs dans les galeries G585 et G710

Il apparaît que les indices de fracturation dans la galerie 710 ne sont pas obligatoirement recoupés par un plan de faille. En effet, les failles restent subverticales, et il n'a pas été possible de faire correspondre ces indices et les surfaces de failles en profondeur. De plus, les projections de failles ne sont que des simples surfaces sans épaisseur, alors qu'en réalité les zones faillées possèdent une certaine épaisseur dont il est difficile d'estimer la continuité. Ces incertitudes de l'ordre de 10m sont à prendre en compte dans les résultats obtenus sur la correspondance entre les indices de fracturation et les surfaces de failles en profondeur. Ainsi, par exemple dans la galerie G585, les marqueurs ne correspondent pas tout à fait à la présence d'une faille en profondeur selon le modèle géologique réalisé. Les indices des fractures repérés dans la galerie de mine 585 se situent à 11m de la faille représentée depuis la surface. Dans la galerie 710, en créant ces plans de failles, il a été vu que la faille F23, se situait à seulement 1m d'un indice de venues d'eau. En modifiant le pendage de ce plan de faille, il a été possible de placer la faille F23 exactement sur ce point de suivi de la chimie de l'eau. En ANNEXE III, le tableau complet des données des directions et pendages des failles est présenté avec les modifications effectuées (en gris). Une hypothèse émise sur le fait que les plans de failles ne correspondent pas exactement aux indices de fracturation dans les galeries, serait que les pendages des projections de failles à l'altitude de la galerie soient plus faibles.

Les plans de failles sont alors créés comme énoncé précédemment en plusieurs étapes. Il n'y a pas de données précises disponibles sur les extensions en profondeur des failles en dessous des altitudes des galeries. Ces projections de failles sont interpolées jusqu'à l'altitude de la vallée de la Romanche.

c) Système d'écoulement de l'eau souterraine dans le massif

Les indices d'écoulements d'eau (sources, infiltrations dans les différentes galeries, etc.) ont été localisés par des points dans le modèle géologique 3D (Figure 14). Dans la galerie EDF traversant tout le massif, des venues d'eau sur plusieurs mètres ou ponctuelles sont représentées par les segments colorés.

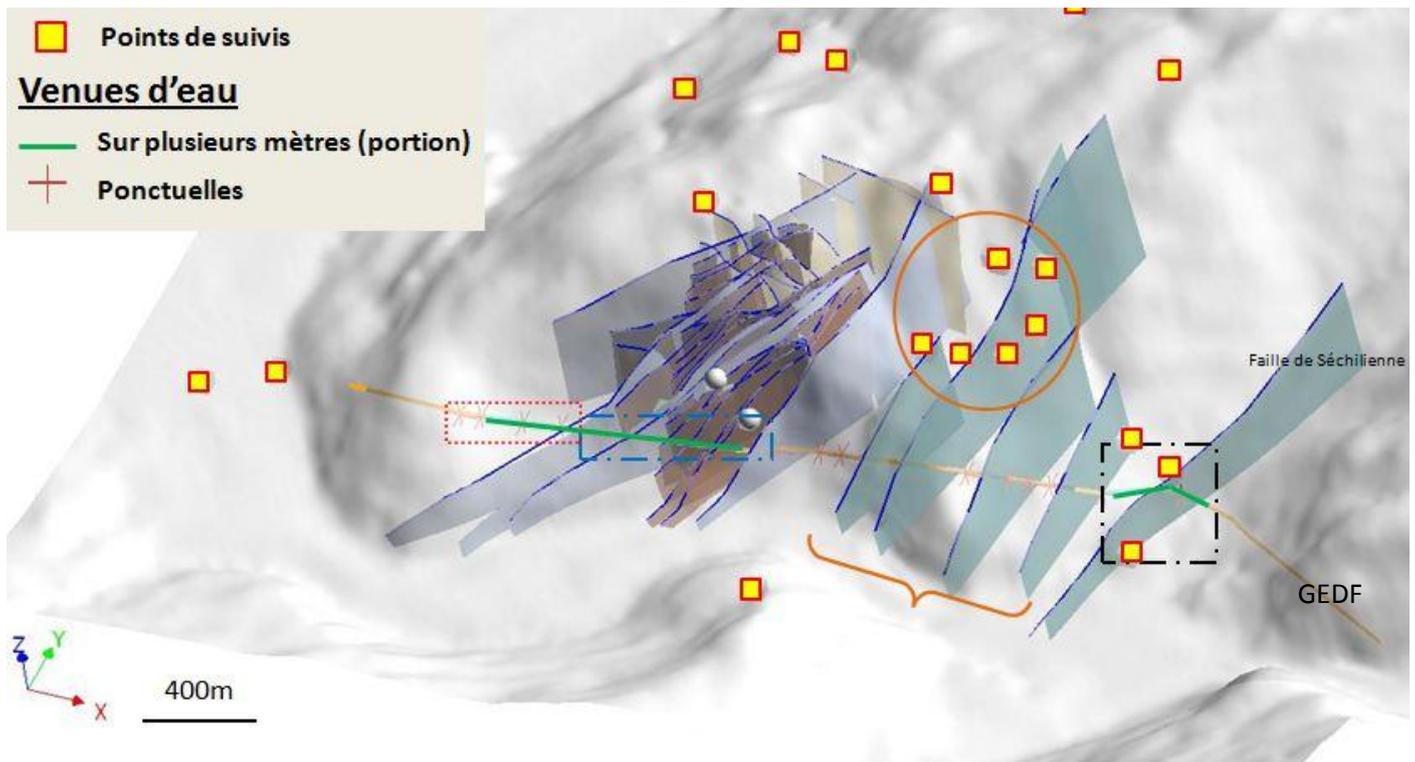


Figure 14 Réseau de failles en 3D réalisé sous Gocad, avec la localisation de la galerie EDF ainsi que les points de suivis hydrochimiques

De nombreuses venues d'eau ponctuelles ainsi que des suintements se produisent dans la galerie EDF (segments verts) au droit de la région très fracturée correspondant à la zone instable du massif (zone en pointillés bleu). A l'Ouest du modèle, très peu de données sont disponibles sur la présence de failles. Celles-ci ne sont pas connues puisqu'il n'y a pas eu de cartographie précise réalisée dans cette zone. Ainsi des venues d'eau sont également identifiées dans la galerie EDF alors que les failles ne sont pas visibles en surface. Nous pouvons donc penser que ces apports d'eau proviennent de fractures ou de failles non-répertoriées en surface. A l'Est du modèle, entre la zone active du versant et la faille de Séchilienne, la densité de failles est faible mais la géologie ainsi que la cartographie des failles est bien identifiée. Dans cette zone moins fracturée du massif, un écoulement d'eau atteint les six sources encerclées. Elles présentent le même type d'eau Ca-Mg-SO₄ selon les campagnes de traçages réalisées. Le fait que ces sources soient présentes dans cette région indique la présence d'une zone où la conductivité hydraulique de la roche est plus faible. Cette diminution entraîne une hausse du niveau piézométrique localement.

La galerie EDF ne présente que peu de venues d'eau dans cette zone, l'écoulement dans cette direction est mineur. Elle est affectée par de grandes venues d'eau à l'intersection avec la faille majeure de Séchilienne à l'Est du modèle (zone en noir). De plus, dans cette zone de faille, un ruisseau circule en surface et transporte l'eau présente en altitude jusqu'à la vallée de la Romanche. Ce cours d'eau peut participer à l'écoulement de l'eau selon le plan de faille en s'infiltrant en profondeur.

d) Conclusion sur le modèle hydrogéologique

Ce modèle géologique établit une description en trois dimensions du système hydrogéologique avec les données connues. Les surfaces de cinquante failles ont été créées en profondeur grâce à une interpolation sous Gocad. Les hypothèses du système d'écoulement avancées par Vallet et al, 2012 sont confirmées grâce au positionnement des indices hydrogéologiques (sources, venues d'eau dans les galeries) dans l'espace. Ce modèle permet de mieux comprendre les écoulements de fluides et leur accumulation à travers le massif. Les plans de failles créés sont utilisés pour établir le comportement hydromécanique du versant instable dans l'étude suivante.

4) Modèle hydromécanique 3D du versant de Séchilienne

a) Principes des estimations hydromécaniques

L'état de contrainte normale et tangentielle à un plan de faille situé dans un massif peut être calculé à partir des trois contraintes principales, la contrainte maximale (σ_1), la contrainte intermédiaire (σ_2) et la contrainte minimale (σ_3) (figure 15).

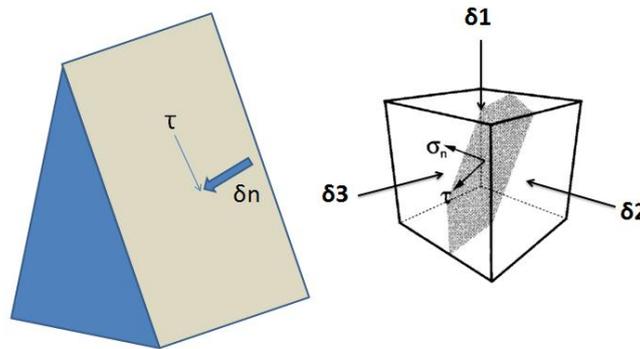


Figure 15 Contrainte normale, σ_n , contrainte de cisaillement τ appliquées sur une surface définie par les trois contraintes principales compressives (modifié d'après Morris, 1996)

La tendance au glissement (slip tendency, T_s , en anglais) selon le plan de faille correspond au rapport de la contrainte de cisaillement (τ) sur la contrainte normale (σ_n) appliquées sur une surface de faille selon l'équation 1 (Morris, 1996):

$$T_s = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (\text{Equation 1})$$

Le glissement d'une surface de faille s'effectuera lorsque la contrainte de cisaillement sera égale ou supérieure à la résistance de frottement au glissement. Dans cette approche, la tendance au glissement selon le plan de faille dépend uniquement de l'orientation du plan par rapport aux contraintes principales (la cohésion du plan de faille est considérée comme négligeable). De la même façon, la tendance de la faille à se dilater (dilation tendency, T_d) dépend du rapport donné par l'équation 2 :

$$T_d = \frac{(\sigma_1 - \sigma_n)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (\text{Equation 2})$$

La dilatance des fractures est principalement contrôlée par la contrainte normale qui est fonction des contraintes lithostathiques et tectoniques. La possibilité que possède une faille à se dilater et faire s'écouler un fluide est directement liée à son ouverture, qui à son tour est fonction de la contrainte normale effective agissant sur cette faille (Ferrill et al, 1999).

Les calculs des contraintes dans le versant instable de Séchilienne ont été effectués avec le logiciel Flac3D (version 4.00) dans le cadre de l'ANR SLAM (Cappa et al, 2012). La topographie du versant a été prise en compte ainsi que ses propriétés mécaniques simplifiées à trois couches verticales représentant une zone faible (zone instable) encadrée de deux zones saines (zones stables du versant). Un comportement de Mohr-Coulomb a été utilisé pour représenter la stabilité du versant. Pour chaque cellule du modèle, les propriétés mécaniques telles que l'élasticité de la roche, le coefficient de Poisson, le coefficient de friction et la cohésion sont renseignées. La gravité est la seule force qui s'exerce sur ce versant instable. Le modèle est alors bloqué sur les côtés afin de simuler la réalité. Les valeurs de la contrainte maximale calculée sont représentées sur la figure 16 :

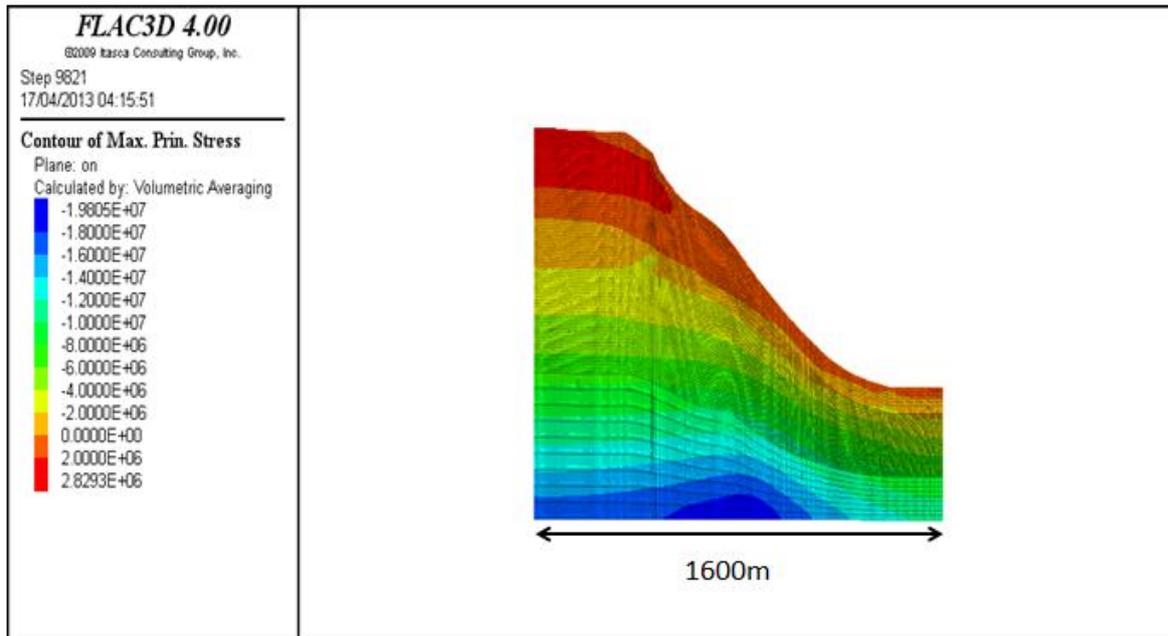


Figure 16 Contours de la contrainte maximale principale (σ_1)

Les magnitudes des contraintes utilisées dans 3D-Stress ont été extraites du calcul FLAC3D selon une verticale située au droit de la zone instable des Ruines de Séchilienne. Près de la surface, les rotations et les valeurs de contraintes sont très variables parce qu'elles sont fortement influencées par la topographie. En-dessous de l'altitude de la vallée de la Romanche, les contraintes se stabilisent.

Par la suite, les simulations hydromécaniques sont réalisées avec le logiciel 3Dstress (Southwest Research Institut, SwRI). Cet outil analyse les tendances des failles ou des fractures à glisser ou à se dilater selon un état de contraintes spécifié en trois dimensions.

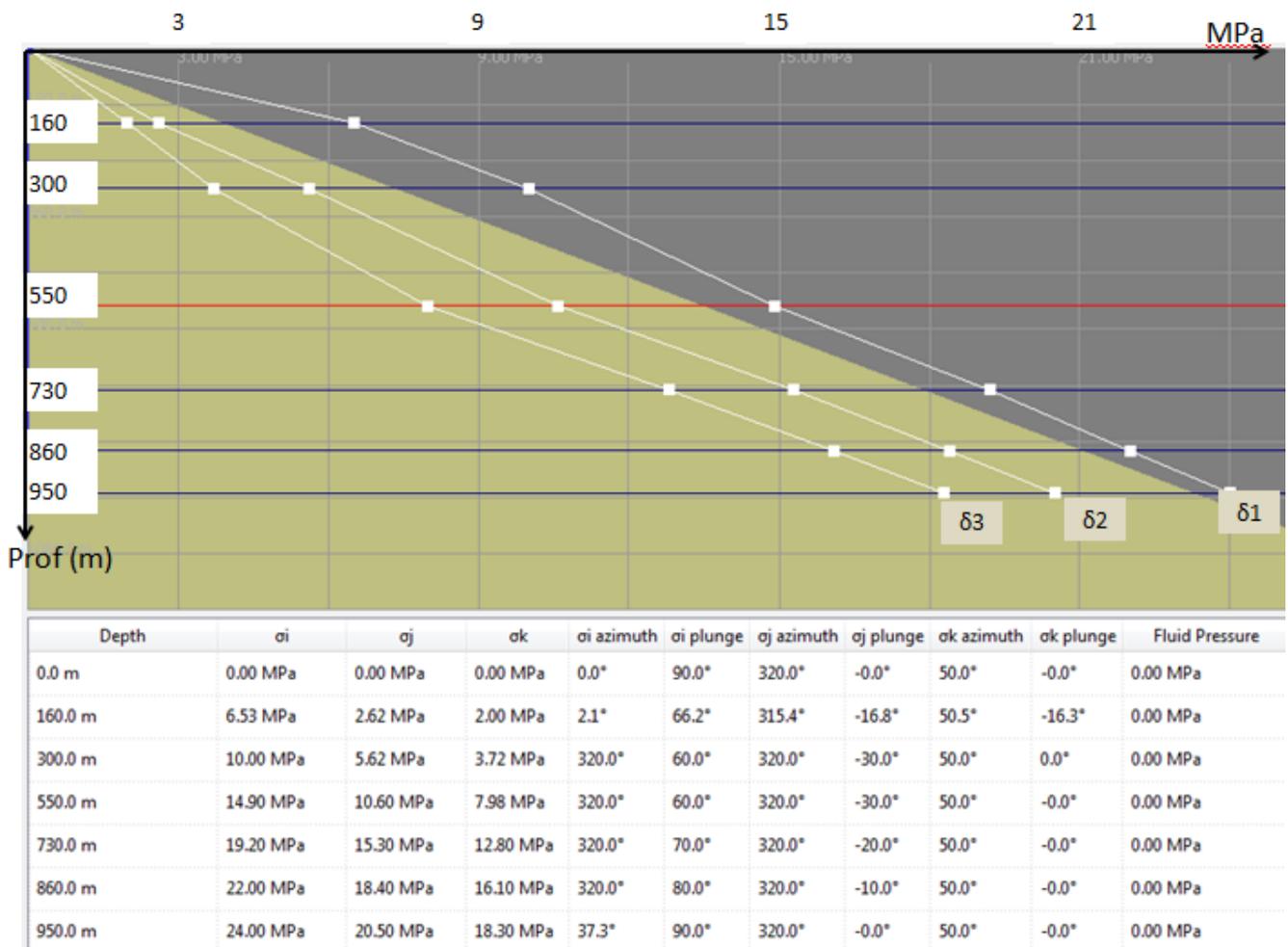


Figure 17 Données d'entrée dans 3DStress pour le modèle sec

Le graphique (figure 17) contient les valeurs des contraintes avec leurs azimuts et leurs pendages, selon la profondeur. La magnitude de la contrainte maximale σ_1 atteint les 24MPa à 950m de profondeur (base du modèle à l'altitude de la vallée de la Romanche). La contrainte σ_1 est verticale en surface, son plongement varie en profondeur jusqu'à 60° puis revient à 90° à la base du modèle. Ces variations dans le massif sont dues à la topographie et à la déformation du versant. L'azimut de la contrainte minimale est identique sur toute la profondeur du modèle, égal à 50°.

b) Scénarios testés sur le versant instable de Séchilienne

L'étude a été menée en deux temps. Dans un premier temps, deux failles d'orientations représentatives des deux grandes familles de failles N20-30° et N120° du versant ont été sélectionnées et étudiées séparément (figure 18) :

- La faille F23 d'orientation N20 qui recoupe la galerie de reconnaissance G710. Et à l'intersection de laquelle une venue d'eau est observée. C'est dans un intérêt hydrogéologique que cette faille sera étudiée en premier lieu.
- La faille F3 d'orientation N120 qui recoupe la première faille.

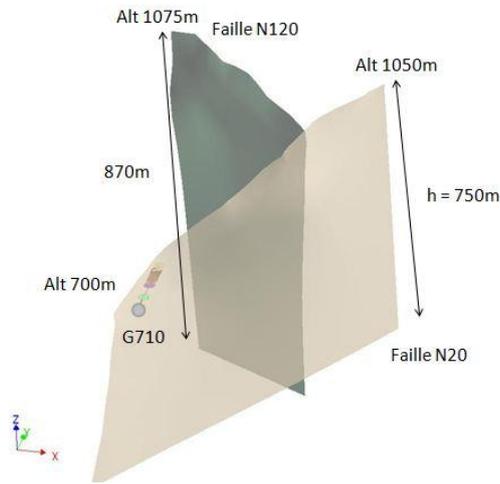


Figure 18 Présentation des deux familles de failles selon leur orientation

Dans un second temps, l'ensemble des failles intégrées dans le modèle hydrogéologique a été considéré.

Le premier scénario étudié sera réalisé afin d'observer comment se comporte le versant instable sans eau avec comme unique pression, celle exercée par le poids du massif sous l'effet de la gravité. Un second scénario est réalisé avec la présence d'un niveau d'eau dans la roche à la cote 600m NGF pour prendre en compte la présence d'un aquifère d'un profond dans le versant. Les fluides présents dans le massif jouent un rôle important dans le comportement des failles, pouvant entraîner leur ouverture ou leur glissement selon l'effet d'une variation de contrainte normale effective $\sigma'_n = \sigma_n - P_f$ avec σ_n la contrainte normale au plan de faille et P_f la pression d'eau dans la faille. Un niveau piézométrique a donc été inséré dans les failles pour simuler les effets des variations piézométriques de l'aquifère du versant sur leur activation. Cependant, les tests suivants ne prennent pas en compte toute la complexité hydrogéologique du versant de Séchilienne. En effet, il a été montré qu'en réalité, à Séchilienne, l'eau est située dans deux aquifères différents, un aquifère perché situé dans la partie supérieure de la couverture sédimentaire et un aquifère profond situé en profondeur dans la roche métamorphique fracturée (Guglielmi et al, 2002).

Le tableau 1 indique les valeurs de pressions de fluide ainsi que les contraintes effectives prises en compte dans le calcul.

Tableau 1 Contraintes effectives : mise en eau du modèle sur 3DStress

| Profondeur (m) | σ_1 (MPa) | σ_2 (MPa) | σ_3 (MPa) | Pression de Fluide (MPa) |
|----------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 160 | 6.53 | 2.62 | 2.00 | 0.00 |
| 300 | 10.00 | 5.62 | 3.72 | 0.00 |
| 550 | 13.90 | 9.60 | 6.98 | 1.00 |
| 730 | 16.20 | 12.30 | 9.80 | 2.80 |
| 860 | 18.00 | 14.40 | 12.10 | 4.10 |
| 950 | 19.00 | 15.50 | 13.30 | 5.00 |

La pression de fluide est insérée dans le modèle (1MPa) à 550m de profondeur pour faire correspondre ceci à une hauteur d'eau de 100m et ainsi une altitude de 600m NGF. Le niveau d'eau renseigné est horizontal pour les simulations.

Pour finir, un troisième scénario simule une onde de pression transportée verticalement via les failles à travers le massif pour rejoindre le niveau piézométrique en profondeur. Ce scénario est schématisé sur la figure 19 :

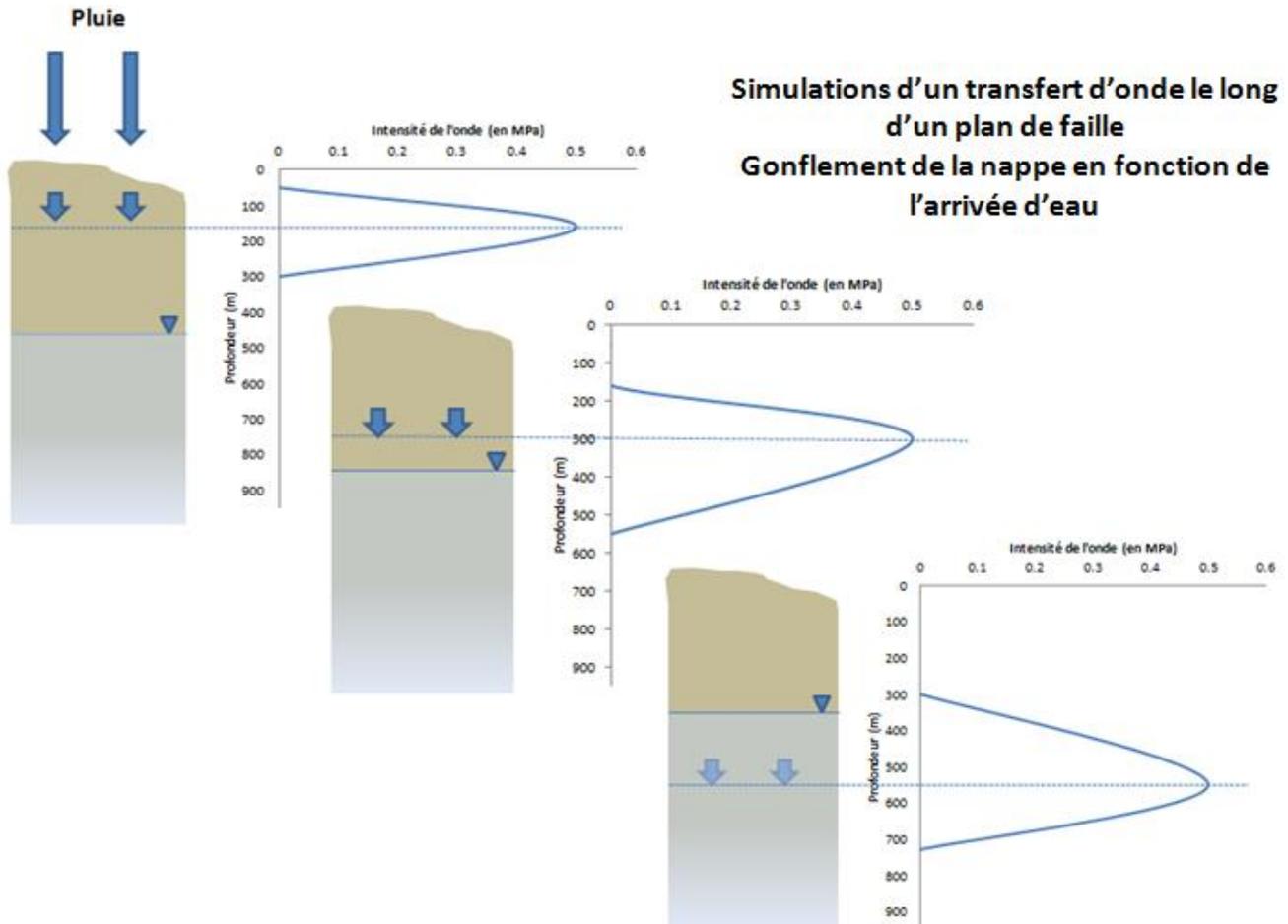


Figure 19 Schéma du scénario d'une infiltration d'eau en profondeur

Une onde sera affectée dans un premier temps à 160m de profondeur, puis à 300m et enfin à 550m. La nappe augmente son niveau d'eau lors de cette infiltration. Cette infiltration sera considérée de 0.5MPa, cette valeur faible permet de visualiser le moindre changement de surface sur les failles étudiées.

c) Résultats des simulations : tendances au glissement ou à la dilatace des failles sous l'effet d'une variation de contraintes dans le versant.

La faille d'orientation N20 est étudiée selon les trois scénarii (Figure 20)

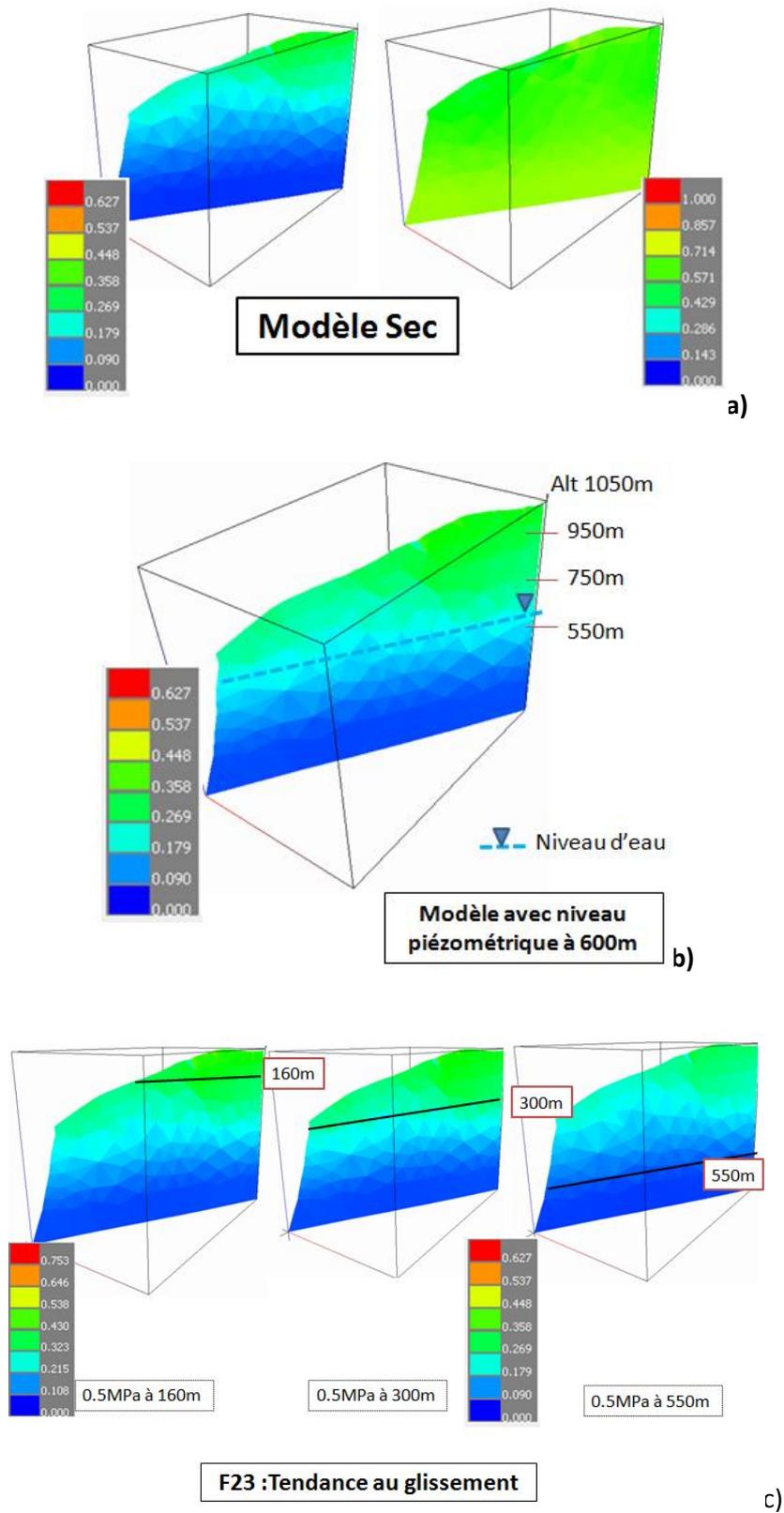


Figure 20 Faille N20 a) Tendence au glissement (gauche) et tendence à la dilatace (droite) dans le cas du modèle sec b) Tendence au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique c) Tendence au glissement selon la propagation de l'infiltration

Dans le cas du modèle sec, il apparaît une diminution de la tendance au glissement selon la profondeur selon la faille F23. Celle-ci présente une tendance au glissement faible en surface ($T_s \approx 0.358$) alors qu'en profondeur cette valeur est quasiment nulle. La tendance à la dilatance varie sur la surface de faille. En surface, il apparaît des valeurs élevées (≈ 0.714) très localisées qui se généralisent en profondeur. La partie superficielle de la faille (jusqu'à environ 50m de profondeur) est affectée par un cisaillement plus ou moins important et par la tendance à la dilatance également. La friction des roches lors du glissement peut entraîner une légère ouverture de faille. Des irrégularités sur le plan de faille, comme des petits ressauts de roche, vont ouvrir des cavités lorsque le mouvement de faille est favorable. C'est pourquoi la faille N20 présente une zone en surface affectée par le cisaillement et par la dilatance.

Le scénario du modèle avec la présence d'un niveau piézométrique est étudié dans un premier temps selon deux stéréogrammes (Figure 21), la tendance au glissement (à gauche) et la tendance à la dilatance (à droite) à 160m de profondeur pour l'état de contrainte défini dans le tableau 1.

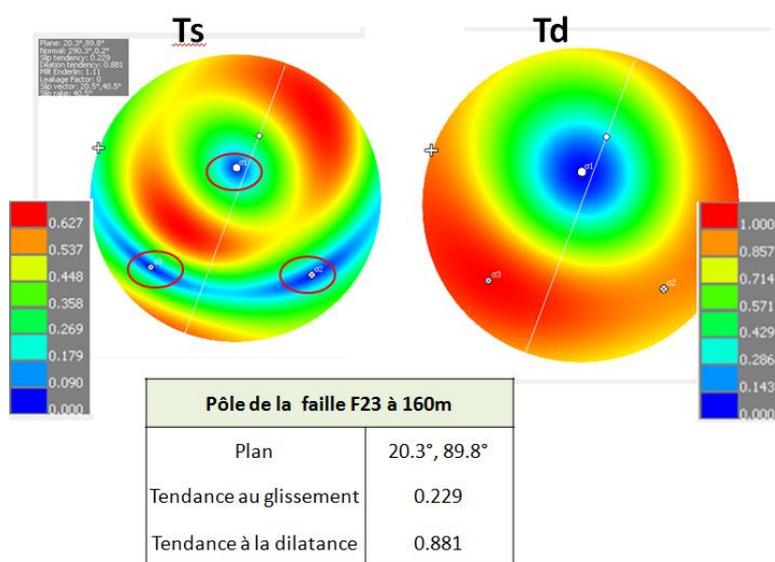


Figure 21 Stéréogramme F23 (N20) : tendance au glissement et à la dilatance à 160m de profondeur.

Sur les stéréogrammes une faille est représentée par son pôle (croix blanche) et son plan (arc de cercle blanc). Le losange sur le plan indique la position (plongement et azimuth) du vecteur glissement calculé sur le plan de faille pour un état de contraintes défini. Dans ce cas-ci, la faille F23 présente une valeur faible de la tendance au glissement et une valeur relativement forte pour la tendance à la dilatance, respectivement de 0.229 et 0.881, selon le scénario présentant un niveau piézométrique.

En comparaison avec le modèle sec, la présence d'eau en profondeur permet l'augmentation de surface active de la faille pour la tendance au glissement. Quant à la tendance à la dilatance (ANNEXE IV), les variations de surface actives ne sont pas significatives entre le modèle sec et le modèle avec la nappe.

Selon le scénario de propagation d'une onde de pression selon le plan de faille F23, il apparaît que lorsque une pression de 0.5MPa créée à 160m de profondeur, la tendance au glissement est plus élevée (0.430) que le modèle avec la présence de la nappe de 0.08. La propagation de l'onde de pression affecte la tendance au glissement en

augmentant ce rapport dans les zones concernées par le passage de l'eau et active la faille lors de cette infiltration. La présence de l'onde à 300m affecte seulement la zone de faille à cette profondeur. Ainsi les secteurs de la faille en surface présentent des valeurs diminuées. Lorsque l'onde de pression atteint les 550m de profondeur, le plan de faille revient à un état initial avec uniquement la présence du niveau piézométrique. En effet, l'orientation des contraintes et leur magnitude ne permettent pas l'activation des failles en profondeur et les zones superficielles sont plus sensibles à ce transfert d'onde que les parties inférieures des failles. Le secteur se situant entre 150m et 200m de profondeur est réactif au passage de l'eau et représente la zone activée des failles.

Concernant l'étude de la tendance à la dilatance, l'impact de l'infiltration en profondeur est négligeable, il n'y a pas de variations remarquables (Annexe V).

La faille d'orientation N120 est étudiée selon les trois scénarii (Figure 22)

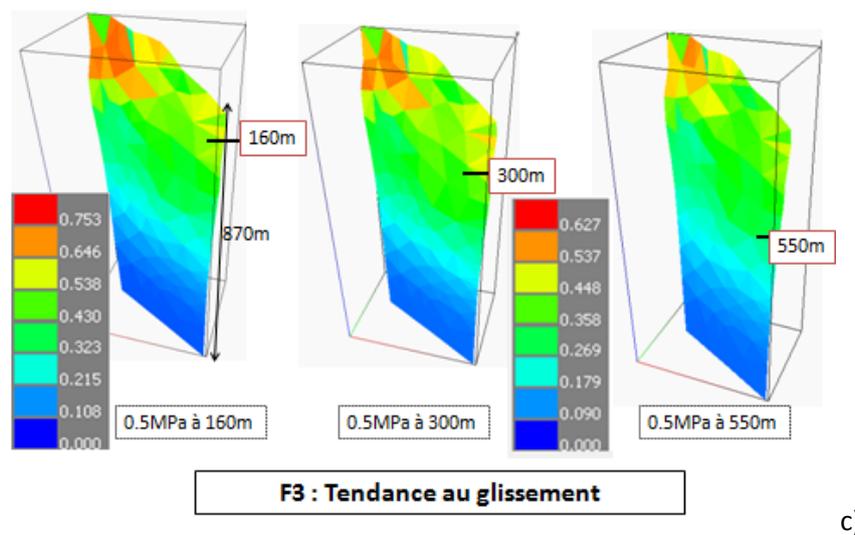
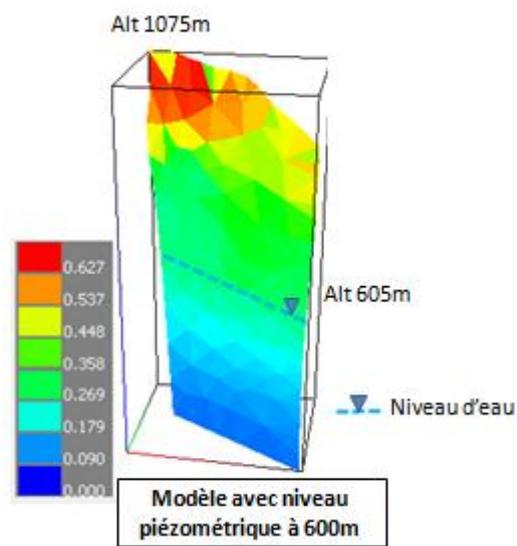
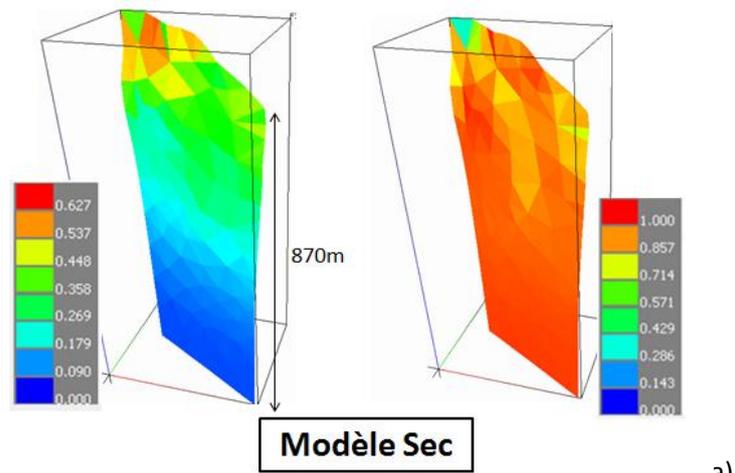


Figure 22 Faille N120 a) Tendance au glissement (gauche) et tendance à la dilatance (droite) dans le cas du modèle sec b) Tendance au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique c) Tendance au glissement selon la propagation de l'infiltration

La deuxième faille d'orientation N120 est orientée perpendiculairement à la contrainte principale minimale σ_3 , cela lui confère une position favorable à la dilatance (Figure 22 a)).

Dans le cas du modèle sec, la zone superficielle de la faille jusqu'à environ 300m de profondeur présente une tendance au cisaillement marquée ($T_s=0.537-0.358$). Au contraire, la tendance à la dilatance augmente avec la profondeur pour atteindre les valeurs maximales (0.857-1). Dans les 300 premiers mètres, la tendance à la dilatance est hétérogène mais reste tout de même forte. Selon l'équation 2, la différence entre σ_1 et σ_3 tend vers 0 avec la profondeur dans un milieu où la gravité domine. Il en résulte que T_d a tendance à augmenter selon les failles possédant une orientation favorable (N120) par rapport aux contraintes principales (plans perpendiculaires à la contrainte minimale σ_3).

Le scénario du modèle avec la présence d'un niveau piézométrique est étudié selon les deux stéréogrammes (Figure 23), la tendance au glissement (à gauche) et la tendance à la dilatance (à droite) à 160m de profondeur pour l'état de contrainte défini dans le tableau 1.

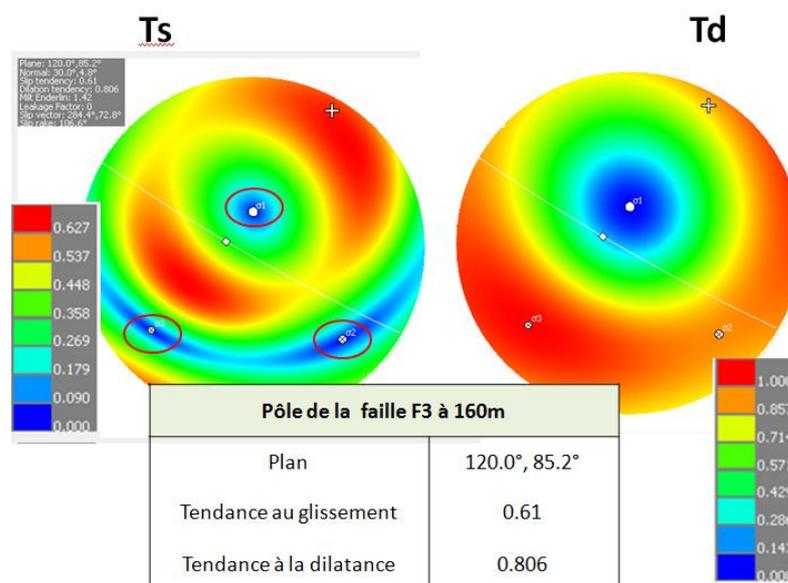


Figure 23 Stéréogramme F3 (N120) : tendance au glissement et à la dilatance à 160m de profondeur

A 160m de profondeur, cette faille présente une tendance au glissement importante (=0.61) pour ce modèle avec le niveau piézométrique.

Lors de la mise en pression du modèle, la faille est activée sur une plus grande surface de faille où il apparaît des zones avec une tendance au glissement élevée (Figure 22 b)).

Lors de la propagation de l'onde de pression, la faille d'orientation N120 présente de fortes valeurs en superficie lorsque l'infiltration se situe à 160m de profondeur. Cette simulation révèle la présence d'une zone particulièrement active en surface entre 150 et 200m de profondeur (Figure 22 c)). En effet, pour cette faille les valeurs fortes ($T_s=0.753$) sont trouvées lorsque l'onde se situe dans cette zone, alors qu'en profondeur la réaction du plan de faille est moindre.

L'étude de la dilatance (ANNEXE VI) démontre que la propagation d'une infiltration de faible intensité dans le système n'engendre pas de variation remarquable.

Le graphique (Figure 24) suivant met en relation les valeurs des tendances au glissement et à la dilatance avec la profondeur dans le cas du modèle avec la présence du niveau piézométrique.

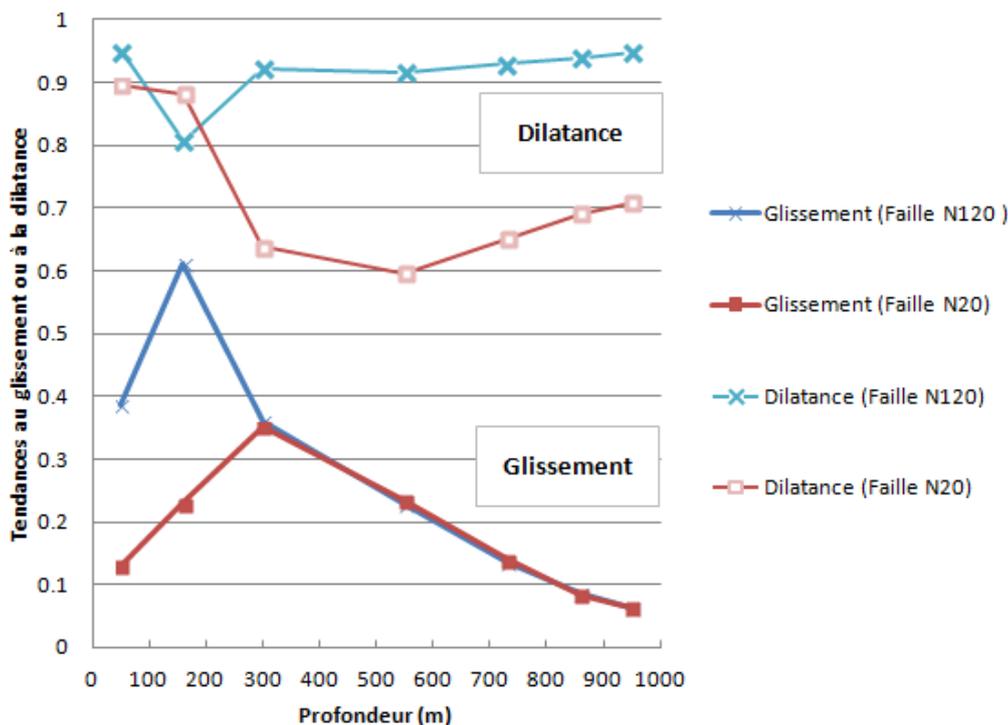


Figure 24 Tendances au glissement et à la dilatance selon la profondeur des failles et la mise en eau du modèle

Les valeurs de T_s des deux failles auront tendance à augmenter jusqu'à 160m de profondeur. Concernant la faille N120, la tendance au glissement diminue abruptement à 160m de profondeur, alors que la valeur de la deuxième faille augmente. Cette hétérogénéité de surface est due à l'influence de la topographie et à l'orientation des contraintes effectives qui sont les seuls facteurs qui jouent un rôle sur la valeur de la tendance au glissement. A 300m de profondeur, les deux failles sont caractérisées par le même comportement de glissement avec des valeurs similaires qui décroissent pour tendre vers 0.

Concernant le phénomène de dilatance, les deux failles ne se comportent pas de la même manière. Dès 160m de profondeur, la faille N20 indique des valeurs faibles qui diminuent en fonction de la profondeur, alors que la faille N120 présente une tendance à l'augmentation.

Le réseau entier des failles est maintenant étudié (figure 25).

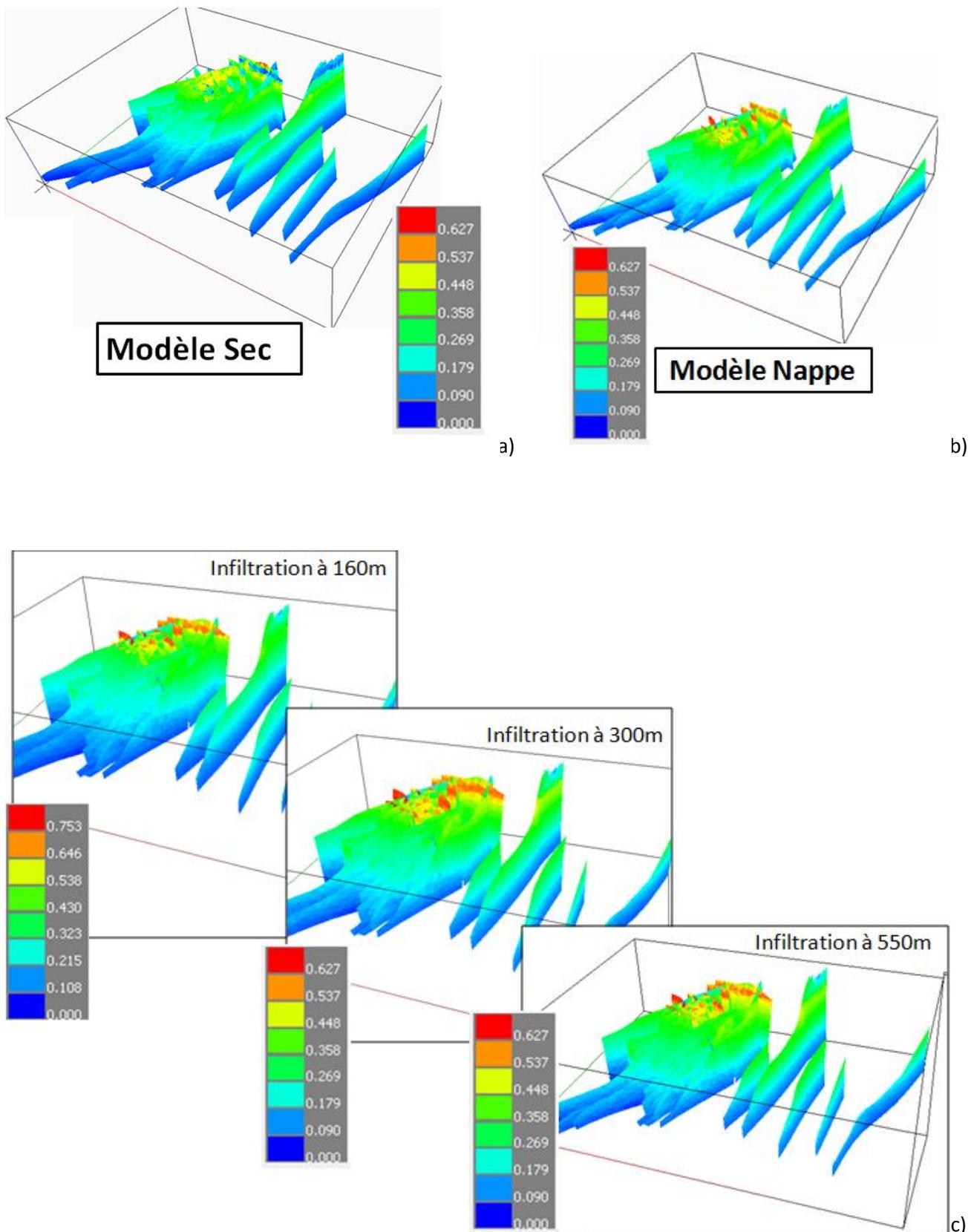


Figure 25 Réseau de failles a) Tendance au glissement dans le cas du modèle sec ; b) Tendance au glissement dans le cas du modèle avec le niveau piézométrique ; c) Tendance au glissement selon la propagation de l'infiltration

Le réseau de failles possède une tendance au glissement élevée en surface et nulle en profondeur. Seules, les failles d'orientation N120 se distinguent sur les scénarii par leur forte tendance au glissement en superficie.

Dans le cas du modèle sec, en ANNEXE VII, la tendance à la dilatance est présentée : la zone instable n'est que très peu affectée par ce comportement alors que les failles à l'Est du modèle présentent des valeurs plus importantes.

La présence du niveau piézométrique n'affecte que les parties superficielles, les surfaces de failles inférieures ne sont pas activées (Figure 25, b)). Les valeurs de la tendance à la dilatance ont augmenté essentiellement en superficie des failles (ANNEXE VIII).

Lors de la propagation de l'onde de pression en profondeur, le réseau de failles présente de fortes valeurs en superficie lorsque l'infiltration se situe à 160m de profondeur. Seulement les zones de haute altitude réagissent à ce passage d'eau à travers les failles.

Dans la continuité de l'étude hydromécanique du versant instable de Séchilienne, d'autres valeurs d'infiltrations devraient être testées afin de déterminer au mieux la sensibilité du comportement des failles.

d) Synthèse de l'étude hydromécanique

L'estimation des variations de la tendance au glissement ou à la dilatance affectant les failles du versant révèle des secteurs de failles remarquables. Une zone d'activation préférentielle des failles apparaît entre 150m et 200m de profondeur. Les failles d'orientation N120 auront tendance à adopter un comportement cisailant en surface, alors que les failles d'orientation N20 ne seront pas susceptibles d'adopter ce même comportement dans ce champ de contraintes, les valeurs identifiées étant très faibles.

La tendance à la dilatance n'est sans doute pas affectée par la présence d'eau. Pour mieux contraindre les effets dilatants, il est alors nécessaire de prendre en compte les paramètres mécaniques comme la cohésion des failles pour mieux déterminer l'activation des failles (Leclère, 2012).

5) Analyse de l'impact des surfaces potentiellement réactivées mécaniquement sur l'hydrogéochimie des eaux souterraines

Pour analyser l'impact de l'altération des surfaces activées des failles sur la chimie des eaux, il a été défini un secteur précis d'étude au droit du versant instable.

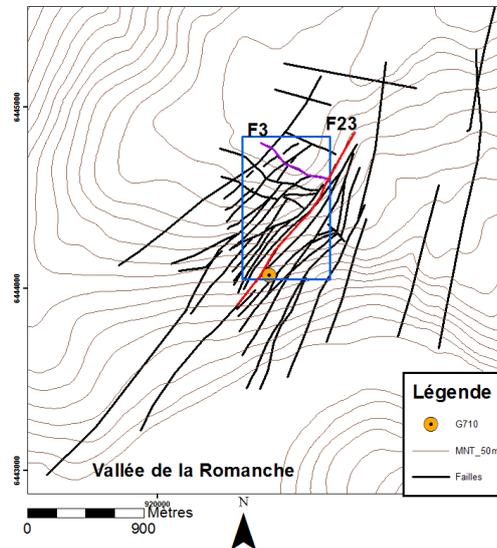


Figure 26 Zone pour l'étude de l'augmentation de surface activée des failles drainantes

Les deux failles étudiées dans le chapitre précédent sont des drains majeurs alimentant les deux venues d'eau dans la galerie G710. Les autres failles ayant le rôle de drains pour ces exutoires sont également considérées (encadré bleu, Figure 26)

La surface de failles activée représente une surface de contact entre l'eau et la roche. Les minéraux de cette roche possèdent une surface spécifique définie selon leur géométrie. La variation de la surface spécifique des minéraux peut être étudiée selon les données géochimiques des eaux, puis comparée à la variation de surface activée lors de l'infiltration d'eau dans le massif.

a) Principe de la modélisation géochimique : lois cinétiques

Le modèle de réaction géochimique Phreeqc (Parkhurst et Appelo, 1999) est utilisé afin de simuler la composition de l'eau pour différentes interactions de l'eau avec les micaschistes de Séchillienne. Ce modèle décrit les interactions entre les minéraux et les solutions aqueuses, en tenant compte des dissolutions irréversibles ainsi que des précipitations de produits secondaires réversibles. Les calculs donnent la quantité de phase détruite ou formée des minéraux par kilogramme de solution en fonction de la vitesse de réaction. A chaque étape du calcul, l'évolution de la composition chimique de l'eau et la répartition des éléments sont déterminés. La durée d'interaction entre la roche et l'eau caractérise la charge totale en éléments dissous de l'eau de sortie. Cette chimie de sortie est comparée aux données de terrain recueillies dans la galerie de reconnaissance G710.

b) Calculs des simulations géochimiques

Dans ce modèle, la loi cinétique incorporée est adaptée de Lasaga, 1984 :

$$\frac{dM}{dt} = k_m S_p \left(1 - \frac{Q_m}{K_m}\right) \text{ Equation (3)}$$

Les dissolutions ou précipitations des minéraux sont déterminées par l'indice de saturation correspondant au rapport du produit ionique d'activité du minéral, Q_m et de la constante d'équilibre du minéral étudié, K_m , la surface spécifique S_p (m^2). La constante cinétique k_m ($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) est donnée par Palandri et Kharaka, 2004 selon si le milieu est acide, neutre ou basique.

$$k_{ta} = S_p * k_a * Act(H^+)^n * \left(1 - \frac{Q_m}{K_m}\right) \text{ Equation (4)}$$

$$k_{tn} = S_p * k_n * \left(1 - \frac{Q_m}{K_m}\right) \text{ Equation (5)}$$

$$k_{tb} = S_p * k_b * Act(H^+)^n * \left(1 - \frac{Q_m}{K_m}\right) \text{ Equation (6)}$$

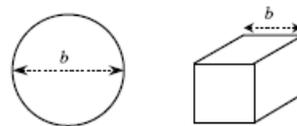
Avec k_t la vitesse de réaction selon si le milieu est acide, neutre ou basique, k_m la constante de vitesse selon le milieu, n l'ordre de la réaction. L'équation (6) est modifiée pour les minéraux carbonatés, l'activité des protons est remplacée par la pression partielle de CO_2 . La vitesse totale de réaction est alors la somme des vitesses selon les trois milieux.

Williamson M. A. and Rimstidt (1994) ont défini une équation pour l'oxydation de la pyrite utilisée dans le modèle:

$$V_{dpyrite} = k_a * a_{O_2}^{0.5} * a_{H^+}^{-0.11} * \left(1 - \frac{Q}{K}\right) \text{ Equation (7)}$$

Avec $V_{dpyrite}$ la vitesse de dissolution de la pyrite (mol/s), a_{O_2} l'activité de l'oxygène, a_{H^+} l'activité des protons.

Dans cette étude géochimique la surface spécifique est calculée à partir de la formule suivante (Murphy and Helgeson, 1989, Santamarina et al, 2002) :



$$S_p = \frac{6W}{\rho * d} \text{ Equation (8)}$$

Avec W la masse du minéral (en g), ρ la densité du minéral et d le diamètre de référence d'un grain sphérique (ici = $0.012cm=12\text{\AA}$).

$$Sp = \frac{6}{b \cdot \rho_w \cdot G_s} \quad \text{Equation (9)}$$

Avec $b=50 \text{ \AA}$, le diamètre de la sphère ou l'arête du cube, G_s la densité du minéral, ρ_w la densité de l'eau (1 g/cm^3).

Les minéraux tels que les micas (muscovite et biotite) et la chlorite sont constitués à partir d'empilement de feuillets, leur surface spécifique est définie à partir des minéraux argileux s'en rapprochant (ici $Sp=100 \text{ m}^2/\text{g}$ selon Lérau, 2005-2006).

La vitesse des réactions est thermo-dépendante. Les constantes cinétiques sont calculées en fonction du facteur pré-exponentiel A , de l'énergie d'activation E_a (J/mol), de la constante des gaz parfaits R (usuellement $R=8.314 \text{ J/mol/K}$) qui sont donnés pour une température de 25°C dans la littérature. Cependant les sources présentes sur le massif de Séchilienne indiquent une température de 10°C . Les constantes cinétiques doivent alors être recalculées grâce à l'équation d'Arrhenius, 1889 :

$$k_m = A e^{-E/RT} \quad \text{Equation (10)}$$

Ces constantes recalculées selon le milieu d'étude (ANNEXE IX).

c) Simulations géochimiques

La minéralogie des roches présentes sur le versant instable de Séchilienne provient d'une étude précédente (Vengeon, 1998, Guglielmi et al, 2002). Les minéraux principaux sont le quartz, l'albite, la biotite (annite et phlogopite), la muscovite. Les minéraux présents en quantité plus faible sont la calcite, la dolomite, la chlorite, le feldspath-K et la pyrite (tableau 2). La porosité est généralement définie à 25% pour les milieux fissurés. Cette valeur est utilisée dans les calculs.

Tableau 2 Paramètres de la composition de la roche initiale

| Minéraux | % Massique | Masse molaire des minéraux (g/mol) | Volume molaire (cm^3/mol) | Densité | Moles/100g de roche | Sp (m^2) |
|--------------------|------------|------------------------------------|---|---------|---------------------|---------------------|
| Quartz | 21 | 60.08 | 22.69 | 2.65 | 0.35 | 0.40 |
| Albite | 25 | 262.22 | 100.43 | 2.62 | 0.10 | 0.48 |
| Muscovite K | 20 | 398.31 | 140.81 | 2.82 | 0.05 | 2000.00 |
| Biotite-annite | 10 | 511.88 | 154.32 | 3.17 | 0.02 | 1000.00 |
| Biotite-phlogopite | 10 | 417.26 | 149.60 | 2.81 | 0.02 | 1000.00 |
| Calcite | 5 | 100.08 | 36.93 | 2.71 | 0.05 | 0.09 |
| Dolomite | 5 | 184.4 | 64.36 | 2.85 | 0.03 | 0.09 |
| Chlorite | 1 | 611.60 | 211.92 | 2.6 | 0.00 | 0.02 |
| Feldspath K | 1 | 278.33 | 108.74 | 2.59 | 0.00 | 0.02 |
| Pyrite | 2 | 119.98 | 23.94 | 5 | 0.02 | 0.02 |

L'eau d'entrée choisie pour le modèle est celle de la source Fonafrey. En effet, elle se situe en dehors de la zone instable. Par ailleurs les traçages ont montré une relation entre cette source et les venues d'eau dans la galerie G710. A fin de contraindre le modèle géochimique, les résultats théoriques de la composition chimique de l'eau

issue de l'interaction avec le micaschiste sont comparés à la composition chimique de deux venues d'eau : le point G710 et le point C79 appartenant tous les deux à la galerie de cote 710m. Ces deux points sont caractérisés par des chimies différentes alors qu'ils se situent à une soixantaine de mètres l'un de l'autre (figure 27).

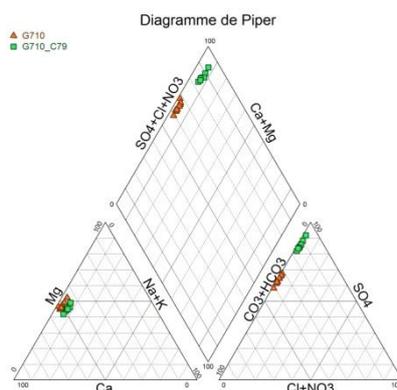


Figure 27 Diagramme de Piper des eaux de la galerie G710 (Logiciel Diagramme, R.SIMLER)

Le point C79 présente un faciès sulfaté et calcique magnésien plus marqué que la venue d'eau G710. Cette dernière est plus concentrée avec une charge totale dissoute de 625 mg/L pour le 15 Février 2012, alors que la venue d'eau C79 possède une charge totale dissoute de 277mg/L pour cette même date (tableau 3):

Tableau 3 Composition des eaux pour les points G710 et C79 (en mg/L)

| STATIONID | Date | Ca | Mg | Na | K | HCO3 | SO4 | SiO2 | Charge (mg/L) |
|-----------|------------|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|---------------|
| G710 | 15-févr-12 | 95.00 | 56.50 | 5.60 | 1.20 | 177.60 | 282.42 | 6.67 | 624.99 |
| G710_C79 | 15-févr-12 | 43.00 | 21.00 | 4.80 | 1.58 | 33.67 | 157.51 | 15.16 | 276.72 |

Le point G710 possède des concentrations élevées pour chaque élément par rapport au point C79.

Le milieu fissuré est considéré suffisamment ouvert sur l'atmosphère pour estimer la pression partielle de CO₂ à 10^{-3.5} atm. La pression partielle d'oxygène, fixée à 10^{-0.68} atm, ainsi que le pH initial vont déterminer le potentiel redox de la solution. Durant la modélisation, seule la calcite est autorisée à précipiter contrairement aux autres minéraux qui sont soit très peu solubles (dolomite) soit dont les conditions de formation nécessitent des températures et des pressions plus importantes que celles de surface.

Les résultats issus de la première simulation géochimique sont figurés sur le diagramme suivant (figure 28). Les variations des concentrations en sulfates, calcium, magnésium et bicarbonates sont reportées en fonction de la charge dissoute (somme de tous les éléments dissous dans l'eau mg/L). Ce même calcul a pu être fait sur les analyses chimiques des deux venues d'eau. Ainsi, la concentration de ces éléments est comparée en fonction de la charge dissoute (TDS).

Les concentrations simulées augmentent en fonction de la charge dissoute, sauf celle des bicarbonates. Ce dernier ion est consommé par la précipitation de la calcite.

Sur cette figure sont également reportés les concentrations en sulfates, calcium, magnésium et bicarbonates mesurées dans les venues d'eau. Si les concentrations en sulfates mesurées au point C79 sont proches des concentrations modélisées, il n'en est pas de même pour les autres éléments. Dans le cas du point G710, aucune des concentrations mesurées ne s'alignent sur les concentrations simulées, ce qui prouve que les conditions initiales de la modélisation ne sont pas cohérentes avec les données de terrain.

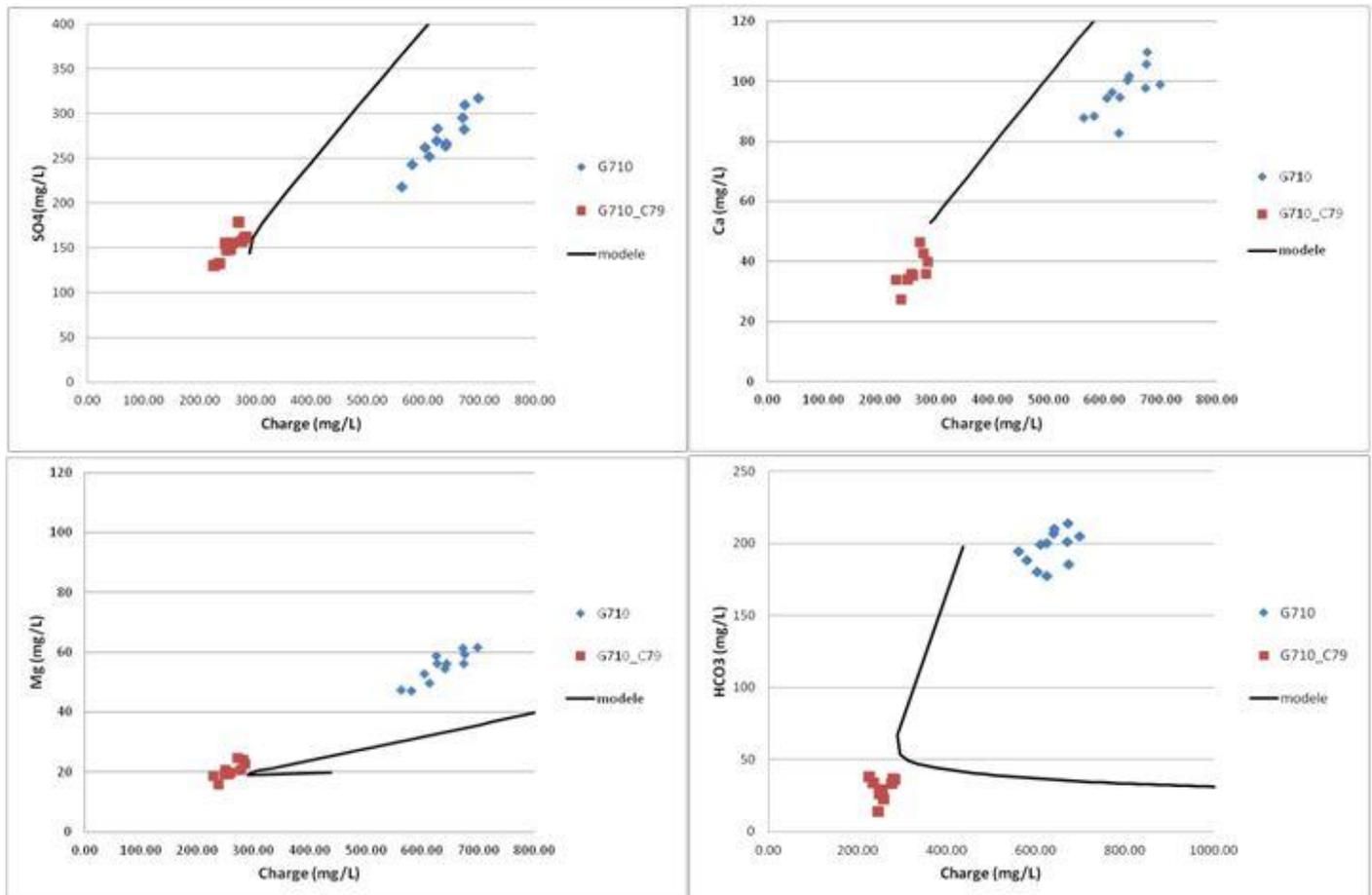


Figure 28 Premières simulations géochimiques réalisées avec les données initiales

Pour les simulations suivantes, les conditions initiales ont été modifiées et sont présentés sous forme d'un tableau (Annexe X et XI). Les résultats suivants sont ceux qui expliquent au mieux les concentrations mesurées :

Tableau 4 Conditions du modèle géochimique pour obtenir un bon calage

| | Minéralogie | Mélange des eaux | PCO2 |
|----------|---------------------------|-------------------------|------|
| G710 | Sans calcite; 5% dolomite | 25% Fonafrey; 75% Pluie | -2.3 |
| G710_C79 | Sans calcite; 5% dolomite | 75% Pleney; 25% Pluie | -3 |

Pour le point C79 : la calcite a été enlevée des minéraux primaires, afin d'éviter la précipitation de celle-ci, l'eau initiale est de l'eau de pluie de la source Pleney à 75%, qui est une eau très peu minéralisée et à 25% d'eau de pluie. La pression partielle de $CO_2 = 10^{-3}$ ne correspond plus à la PCO_2 atmosphérique mais à celle d'une eau qui aurait circulé sur un sol peu épais, mais suffisant pour la modifier.

Pour le point G710 : les mêmes conditions minéralogiques ont été gardées (absence de calcite), l'eau initiale est un mélange entre de l'eau de pluie (75%) et de l'eau prélevée à Fonafrey (25%). Cette hypothèse est cohérente avec les résultats de l' ^{18}O (Vallet, 2010). La pression partielle de CO_2 a été augmentée pour atteindre la valeur de $10^{-2.3}$ ce qui est cohérent avec une infiltration de l'eau dans un sol épais.

Une optimisation des simulations géochimiques serait nécessaire afin de s'assurer de l'exactitude des résultats.

Les résultats du point G710 sont présentés (Figure 29) selon les concentrations de quatre éléments : sulfates, magnésium, calcium et ions bicarbonates. A nouveau, les concentrations calculées des éléments sont représentées en fonction de la charge totale de la solution (mg/L). Deux groupes de points sont insérés sur le graphique selon deux périodes de temps 1996-1997 et 2010 à 2012, correspondant à deux comportements différents du massif :

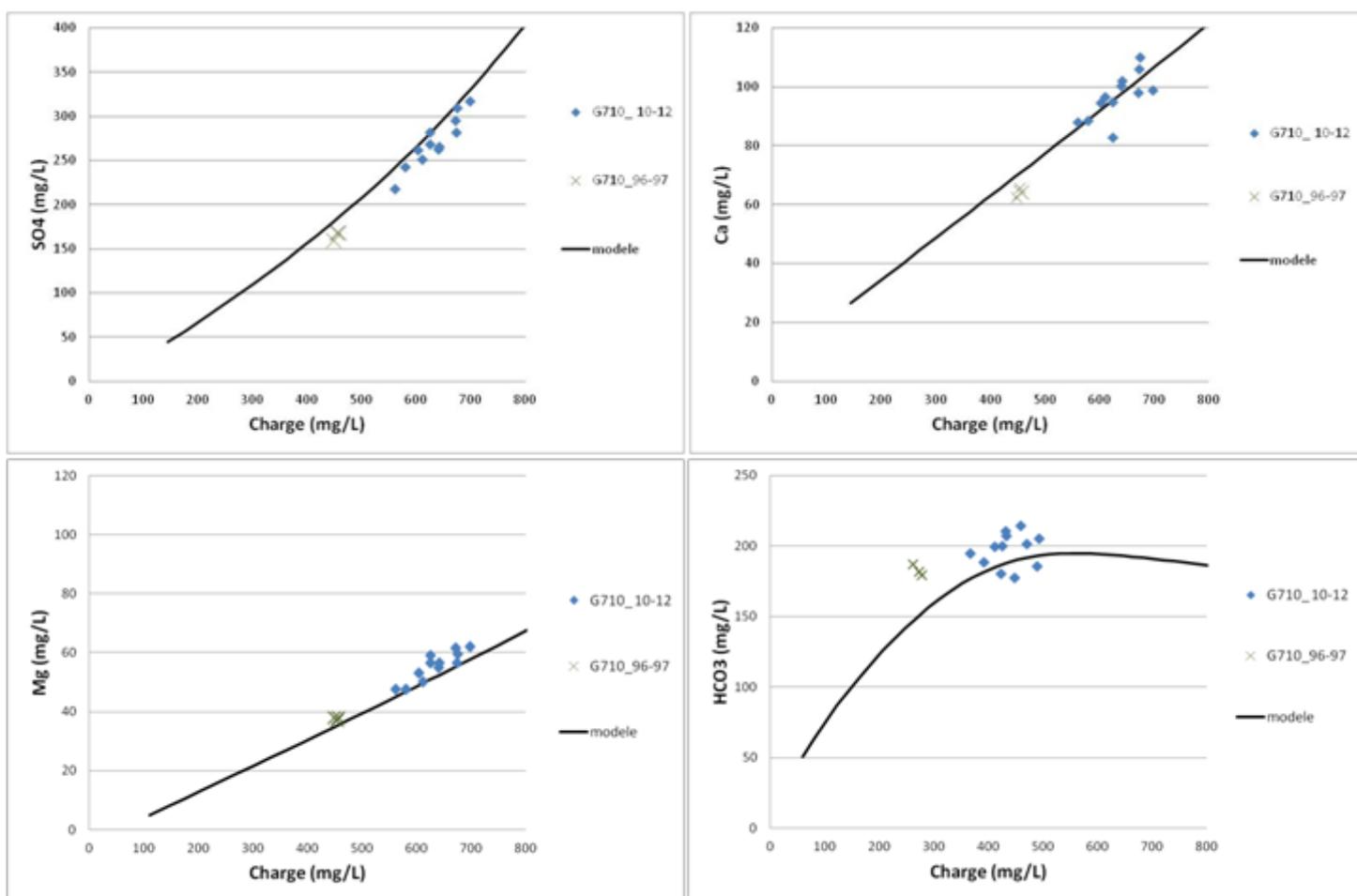


Figure 29 Simulations géochimiques pour le point G710.

Durant la simulation, les concentrations en sulfates sont contrôlées par la dissolution de la pyrite. Le modèle présentant les sulfates est bien calé sur les données de terrain. Le pH est stable sur toute la simulation géochimique (pH initial de 6.22 jusqu'à 7.48). Selon les tests, les marges d'erreur sont acceptables ($\pm 15\text{mg SO}_4$; $\pm 10\text{mg Ca}$; $\pm 5\text{mg Mg}$; $\pm 15\text{mg HCO}_3$). La chimie du point G710 est caractéristique d'une eau qui a traversé un milieu fermé avec une forte production d'ions bicarbonates. Cette eau a lessivé les roches en place en dissolvant essentiellement la pyrite et la dolomite.

En ANNEXE XII, les résultats des simulations géochimiques pour le point C79 qui présente une faible interaction eau-roche, l'eau traverse rapidement le versant pour atteindre un exutoire dans la galerie.

d) Synthèse et hypothèses : simulations géochimiques

La première période de temps (1996-1997) est caractérisée par une faible interaction eau-roche alors que les données récentes (2010-2012) présentent une charge dissoute plus importante pour le même point étudié. La chimie des eaux enregistrées au même point mais à des périodes de temps différentes correspond également à un comportement mécanique différent du massif. Rappelons que ce dernier est suivi par des capteurs qui enregistrent les déplacements rocheux. Les mouvements de l'instabilité indiquent une augmentation de la déformation progressive du versant dans le temps (figure 30) qui accélère à partir de 2009 (pente = 3.30).

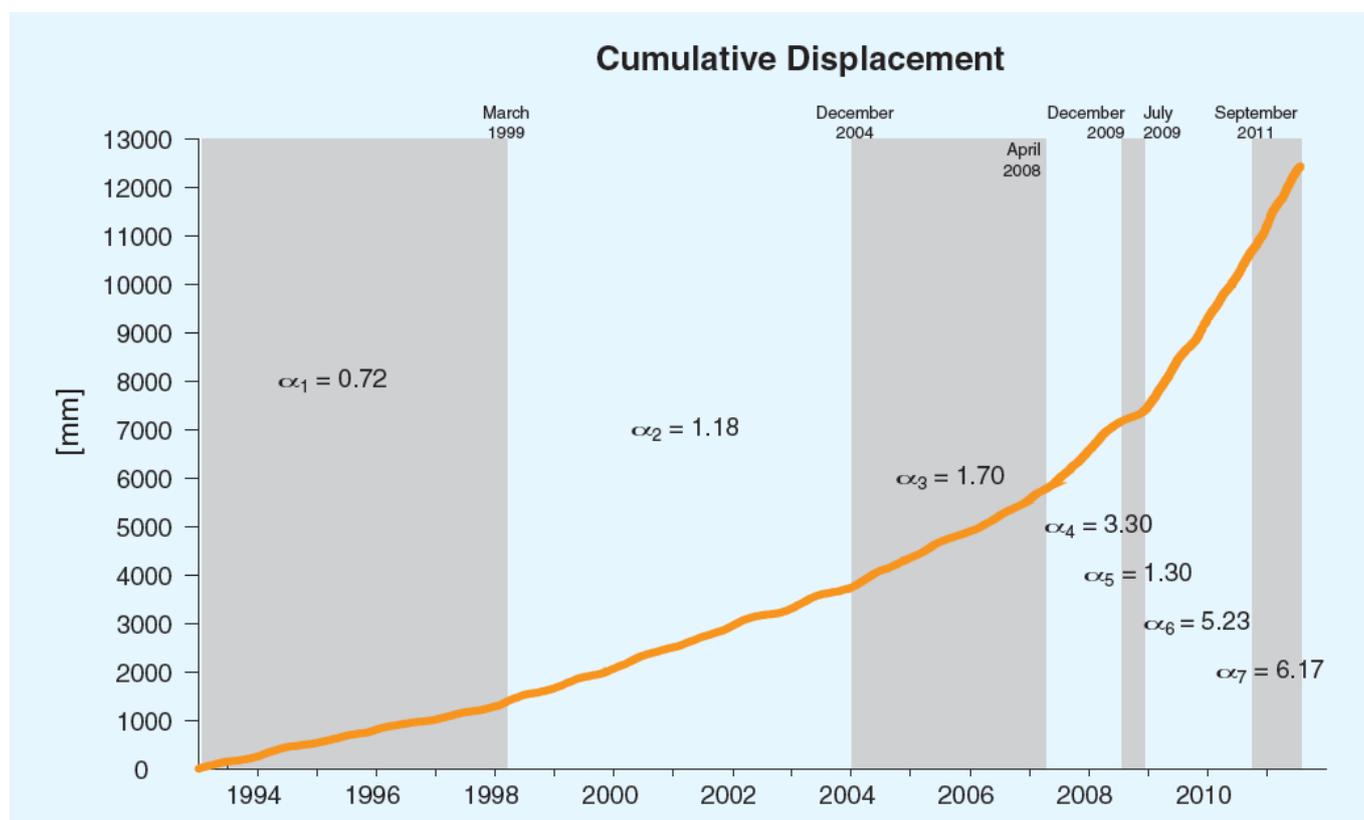


Figure 30 Déplacement cumulé (mm/an). La pente représente le taux moyen de déstabilisation. Vallet et al, 2013.

Plusieurs hypothèses sont émises et résumées quant à cette variation de quantité de matière (figure 31):

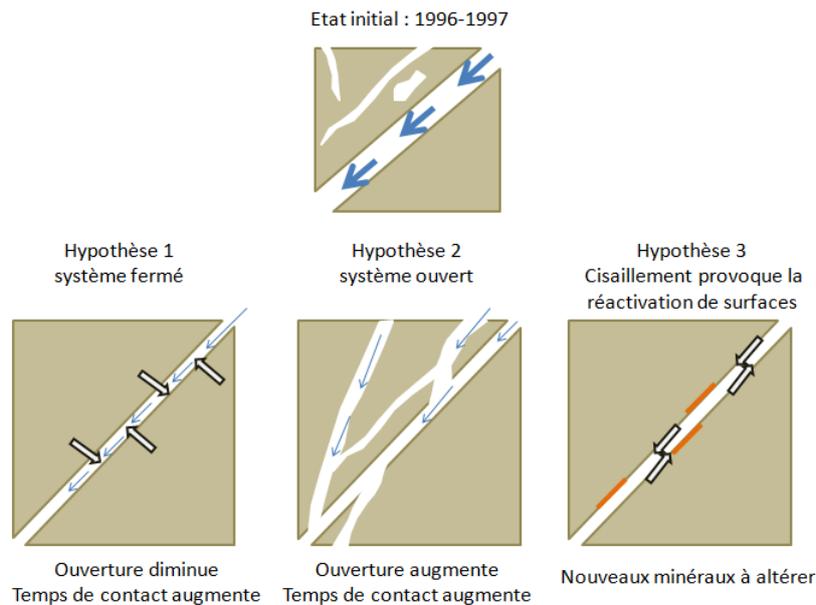


Figure 31 Schéma des trois hypothèses de déformation du versant

- Hypothèse 1 : en raison de la dégradation du massif, les failles drainant l'eau se sont refermées, le temps de contact de l'eau avec la roche a augmenté et la charge dissoute de la solution augmente en conséquence.
- Hypothèse 2 : l'ouverture de nouvelles fractures augmente les surfaces de contact de l'eau avec la roche. L'eau emprunte des chemins différents dans le réseau de fractures et interagit avec de nouvelles surfaces de contact.
- Hypothèse 3 : le comportement cisailant de la faille apporte la réactivation de nouvelles surfaces. Des minéraux fortement altérés peuvent présenter une couche d'oxyde. L'eau ne possédait plus d'interaction avec ces minéraux oxydés. Le cisaillement permet la réactivation de ces surfaces de contact et l'eau peut être à nouveau agressive vis-à-vis de la pyrite d'où l'augmentation de la charge dissoute.

Dans la suite du projet, cette quantité de matière dissoute sera quantifiée selon les résultats des simulations obtenus sous Phreeqc. En effet, le modèle géochimique donne les quantités de matière des minéraux créés ou détruits selon le temps d'interaction eau-roche. Grâce à cette différence de quantité de matière entre les deux périodes, la surface spécifique des minéraux sera recalculée. Cette augmentation de surface spécifique des minéraux sera comparée à l'augmentation de surface d'activation des failles identifiée lors de l'étude hydromécanique.

Conclusion

Ce projet mettant en relation la création d'un modèle hydrogéologie en 3D, une étude hydromécanique ainsi qu'une analyse géochimique permet d'apporter des éléments de compréhension sur les circulations de fluides et leur impact sur les variations de chimie de l'eau. Les études multidisciplinaires s'avèrent indispensables pour ce phénomène complexe tel que cette instabilité de versant.

En effet, le modèle géologique créé a permis d'étudier les écoulements d'eau à travers les failles cartographiées. Les indices hydrogéologiques tels que les sources et les venues d'eau dans les galeries, reportés en trois dimensions permettent une compréhension du comportement de l'eau à travers le massif. Les plans des failles ont été établis en profondeur selon les indices de fracturation identifiés dans les galeries.

Les comportements hydromécaniques des failles jouent un rôle majeur dans l'instabilité du versant rocheux de Séchilienne. La circulation des fluides le long de failles induisent ces comportements hydromécaniques. Les simulations indiquent un comportement cisailant des failles d'orientation N120 lors de la circulation d'eau. Les valeurs de la tendance au glissement sont élevées dans ce champ de contraintes appliquées. Une zone préférentielle d'activation des failles se situe entre 150m et 200m de profondeur et est très sensible aux événements d'infiltration d'eau. Lors de ces modélisations hydromécaniques, des surfaces de failles sont activées lors d'une circulation d'eau. Ces dernières sont identifiées et localisées au sein de la zone instable du versant. Le pourcentage d'augmentation de surface active entre le modèle (avec nappe) et le modèle avec une infiltration (à 160m) est de +41%.

L'étude géochimique compare deux venues d'eau dans la galerie G710 au sein de la zone instable. Des simulations sont réalisées afin comprendre les interactions eau-roche qui se sont produites lors de l'écoulement de l'eau dans le massif. Ces tests ont mis en évidence des chimies différentes pour les deux points de suivi, soient deux systèmes hydrogéologiques. La dégradation progressive du massif est identifiée au sein de la chimie des eaux. Les augmentations de concentrations des éléments, sur le même point d'étude, entre deux périodes différentes prouvent que le massif a été fortement modifié.

Dans la suite de l'étude, la zone activée des failles (étude hydromécanique) sera mise en relation avec la surface spécifique des minéraux. De 1996 à 2013, des événements pluvieux ont provoqué la dégradation progressive du massif qui a créé de nouvelles surfaces de contact entre l'eau et la roche. Lors de cette même étude, une création de surface active des failles ($\approx + 40\%$) s'est produite lors d'une infiltration d'eau selon les plans de failles. Cette augmentation doit être mise en relation avec une augmentation de la surface spécifique des minéraux pour observer la réaction de la chimie des eaux grâce au modèle géochimique établi.

6) Bibliographie

- Arrhenius S.A., 1889, On the reaction velocity of the inversion of cane sugar by acids.
- Augustinus P.C., 1995, Rock mass strength and stability of some glacial valley slopes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39:55-68.
- Barféty J.C., Bordet P., Carme F., Debelmas J., Meloux M., Montjuvent G., Mouterde R. et Sarrot Reynauld J., 1972, Carte géologique détaillée de la France (1/50000) n°797 Vizille, Editions du BRGM, 38p.
- Cappa F., 2006, Rôle des fluides dans le comportement hydromécanique des roches fracturées hétérogènes: Caractérisation in situ et modélisation numérique. *Bull Eng Geol Env* (2006) 65: 321–337.
- Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon (CETE), 1993, Galerie de péage de Vizille et rapports communiqués par EDF.
- Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon (CETE), 2010, Ruines de Séchilienne, Rapport annuel de suivi du site, Avril 2009-Mars 2010.
- Doladille D., 1997, Concession de Ruines (Isère), Rapport de visite et d'évaluation des risques-Rapport BRGM R39723, 3 figures, 2 annexes, 27p.
- Ferrill D.A., Winterle J., Wittmeyer G., Sims D., Colton S., Armstrong A., Morris A.P., 1999, Stressed Rock Strains Groundwater at Yucca Mountain, Nevada, *GSA Today* Vol 9, No 5, 32p.
- Guglielmi, Y., Vengeon, J.M., Bertrand, C., Mudry, J., Follacci, J.P., Giraud, A., 2002, Hydrogeochemistry: an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides). *Bull. Eng. Geol. Environ.* 61, 311–324.
- Lacombe J.Y., 2010, Rapport de sondages, Ruines de Séchilienne, Geotec, 176p.
- Lacroix P., Helmstetter A., 2011, Location of seismic signals associated with micro-earthquakes and rockfalls on the Sechilienne landslide.
- Lasaga A. C., 1984, Chemical kinetics of water-rock interactions. *Journal of Geophysical Research B* 89, B6, 4009-4025.
- Le Roux O., 2010, Caractérisation de l'évolution géomorphologique de la basse vallée de la Romanche en relation avec les instabilités gravitaires de ses versants rocheux - *Contraintes morphologique, géophysique et géochronologique* -. Thèse, Université Joseph Fournier, Grenoble 1.
- Le Roux O., Jongmans D., Kaperski O., Schwartz S., Potherat P., Lebrouc V., Lagabrielle R., Meric O., 2011, Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (western Alps, France) and calibration with geological data. *Engineering Geology*. vol. 120, pp.18-31.
- Leclère H., Fabbri O., 2012, A new three-dimensional method of fault reactivation analysis. *Journal of Structural Geology* 48 (2013) p153-161.
- Mallet J.L., 1997. Discrete modeling for natural objects. *Mathematical Geology* 29 (2), 199–219.
- Morris A., Ferrill D. A., Brent Henderson D., 1996, Slip tendency analysis and fault reactivation, *Geology*, p275-278.

- Murphy WM, Helgeson HC, 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. United States geological survey, water resources investigations report 99–4259 (p. 326). Washington DC: United States Geological Survey.
- Santamarina J.C., Klein K.A., Wang Y.H., Prencke E., 2002, Specific surface: determination and relevance. *Can. Geotech. J.* Vol 39: 233–241
- Vallet A., Bertrand C., Mudry J., 2012, Mouvements de fluides et processus de déstabilisation des versants alpins, ANR SLAM.
- Vallet A, 2010-2013, Mouvements de fluides et de processus de déstabilisation des versants alpins, Thèse en cours, Laboratoire Chrono-Environnement, Besançon (25). Thèse encadrée par Catherine Bertrand et Jacques Mudry.
- Vallet A., Charlier J.B., Chanut M.-A., Bertrand C., Mudry J., 2013, Impact of rainfall and snowmelt on unstable slope destabilisation using wavelet analysis (Séchilienne, French Alps). European Geosciences Union, Vienne, Autriche.
- Vengeon J.M., 1998, Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Williamson M. A. and Rimstidt J. D., 1994, The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 5443-5454.

Sites internet :

- <http://www.swri.org/> consulté en Avril 2013 pour l'aide sur 3DStress.

Cours :

- Lérau J., 2005-2006, Géotechnique, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Présentations :

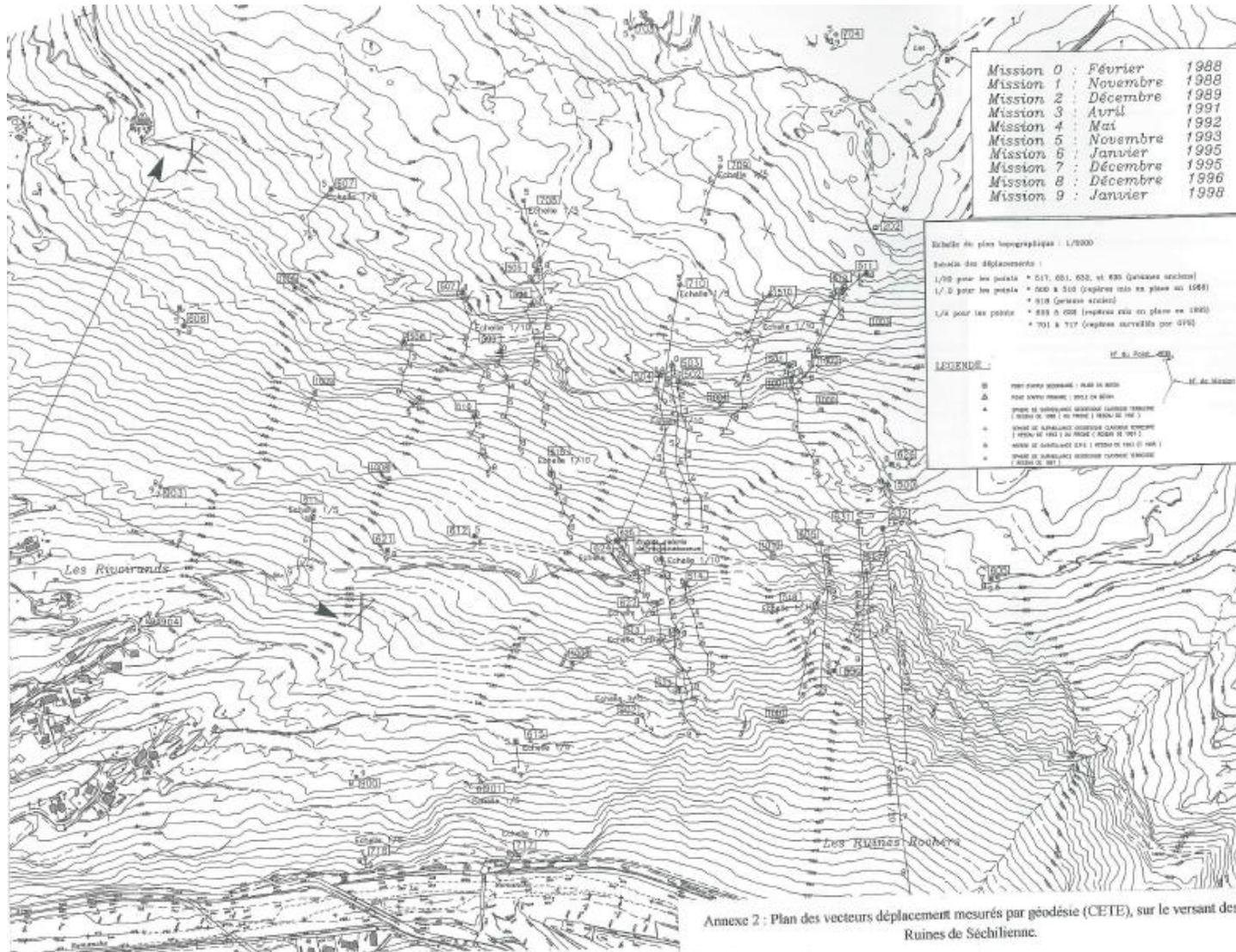
- Cappa F., Guglielmi Y., Viseur S., Derode B., 2012, Hydromécanique du grand versant instable de Séchilienne, du terrain à la modélisation, ANR SLAM.

Cartes :

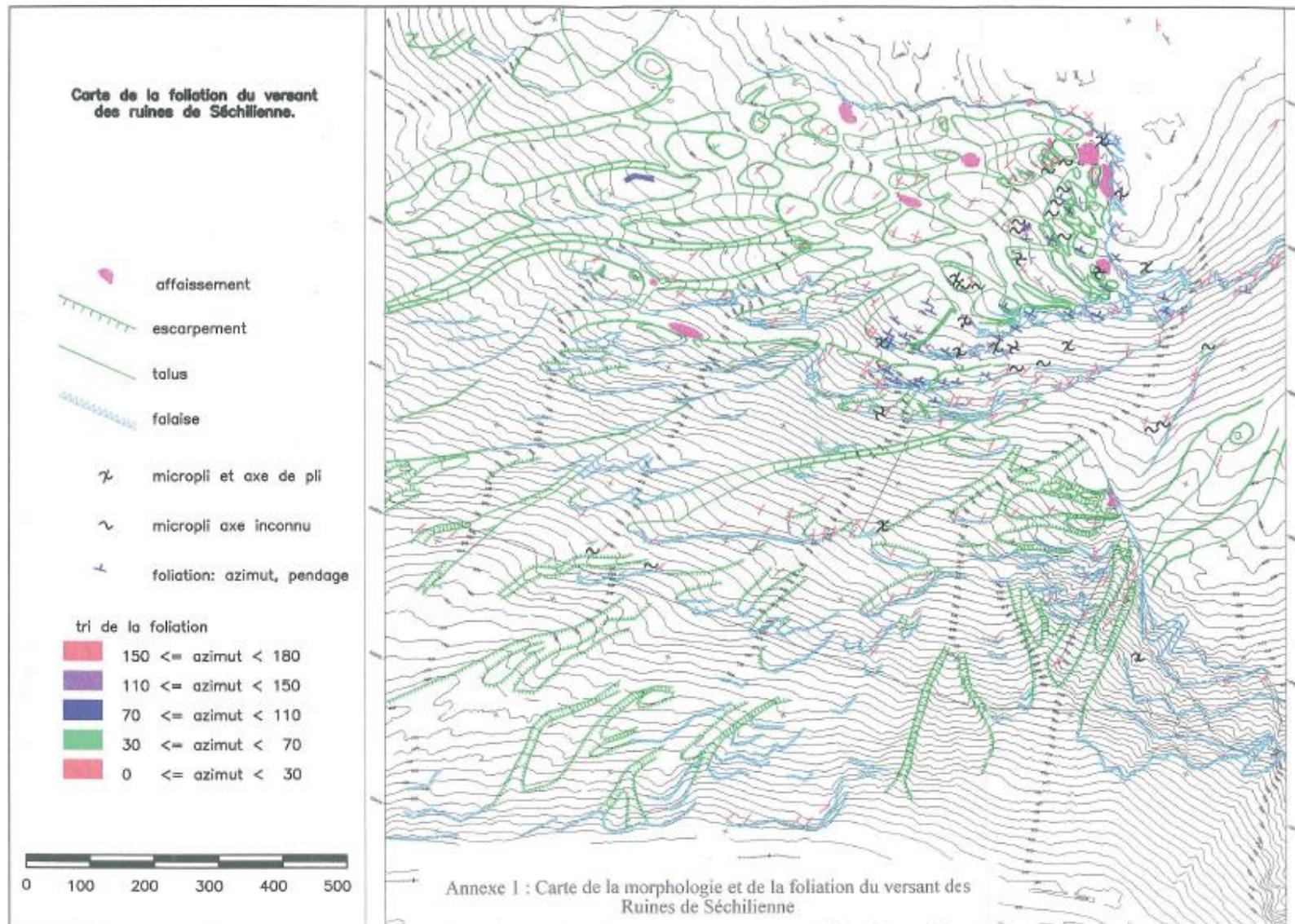
- Extrait de la carte IGN n°3335OT-Grenoble (Mètres Lambert 93).
- Extrait de la carte géologique détaillée de la France au 1/50000 N°797 de Vizille, BRGM.

7) Annexes

ANNEXE I Plans des vecteurs déplacements, Ruines de Séchilienne (Vengeon, 1998)



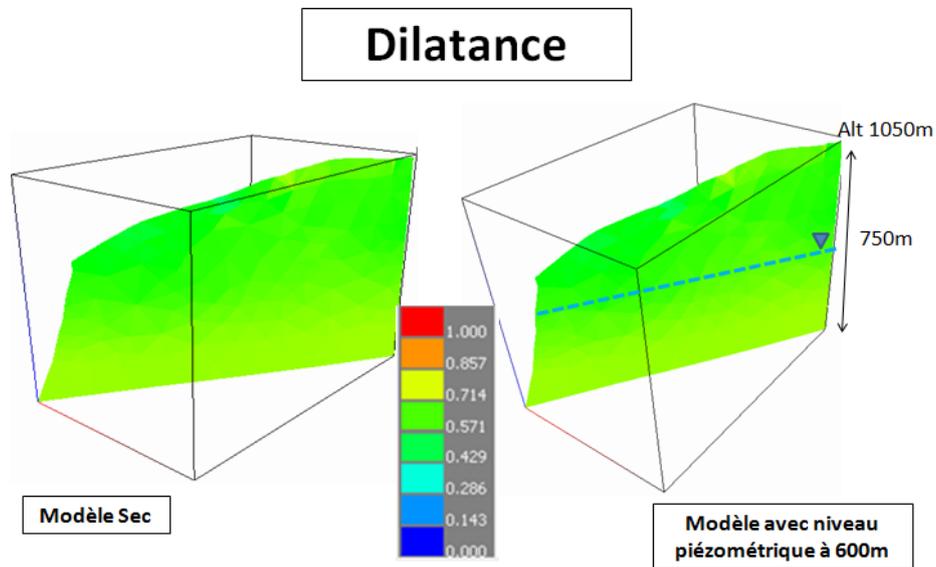
ANNEXE II Carte de la foliation du versant des Ruines de Séchilienne



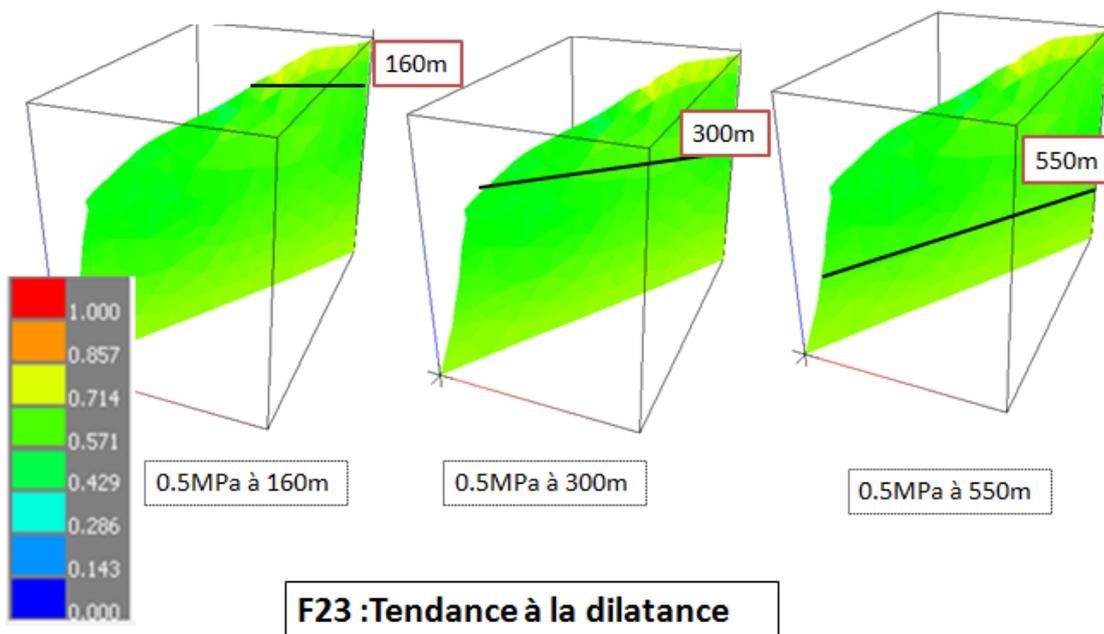
ANNEXE III Tableau des directions et pendages des failles du secteur d'étude

| Nom Faille | Direction (Degrés Nord) | Pendage (Degrés Nord) |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| F0 | 55 | 90 |
| F2_F1 | 113 | 85 |
| F21 | 36 | 85 |
| F22 | 38 | 85 |
| F23 | 23 | 90 |
| F25 | 37 | 85 |
| F26 | 29 | 85 |
| F3,8,7,4,6 | 119 | 85 |
| F36 | 41 | 90 |
| F36_bis | 49 | 85 |
| F38 | 32 | 85 |
| F39 | 22 | 85 |
| F40_FR2 | 24 | 85 |
| F40_FR2_part1 | 10 | 85 |
| F44_43 | 50 | 85 |
| F45 | 112 | 85 |
| F45_bis | 121 | 85 |
| F49 | 37 | 90 |
| F50_5 | 29 | 85 |
| Failles_Part01 | 48 | 85 |
| Failles_Part02 | 65 | 85 |
| Failles_Part03 | 39 | 85 |
| Failles_Part04 | 37 | 85 |
| Failles_Part05 | 42 | 85 |
| Failles_Part06 | 44 | 90 |
| Failles_Part07 | 76 | 85 |
| Failles_Part08 | 68 | 85 |
| Failles_Part09 | 65 | 85 |
| Failles_Part10 | 54 | 85 |
| Failles_Part11 | 105 | 85 |
| Failles_Part12 | 100 | 85 |
| Failles_Part13 | 54 | 85 |
| Failles_Part14 | 47 | 85 |
| Failles_Part15 | 37 | 85 |
| Failles_Part26 | 27 | 85 |
| Failles_Part35 | 88 | 90 |
| Failles_Part36 | 137 | 90 |
| Failles_part39 | 9 | 85 |
| Failles_Part43 | 43 | 85 |
| Failles_Part43_bis | 40 | 85 |
| Failles_Part50 | 47 | 85 |
| FR1_part1 | 118 | 85 |
| FR1_part2 | 100 | 85 |
| FR3 | 15 | 85 |

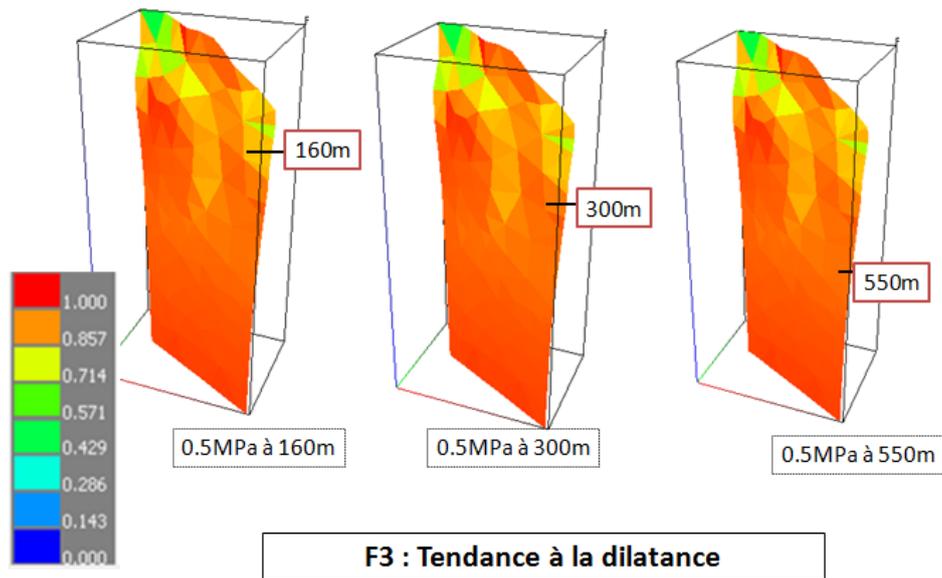
ANNEXE IV Visualisations de la faille F23 lors de la mise en eau du modèle : tendance à la dilatance



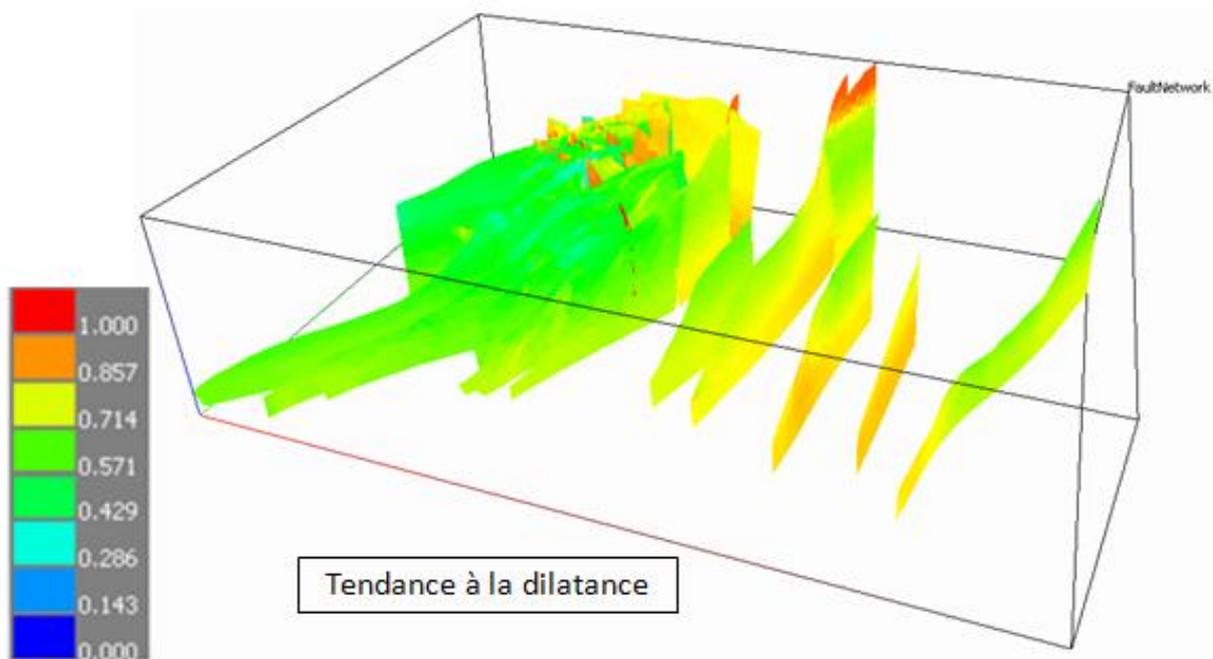
ANNEXE V Visualisations de la tendance à la dilatance pour la faille F23 lors de l'infiltration en profondeur.



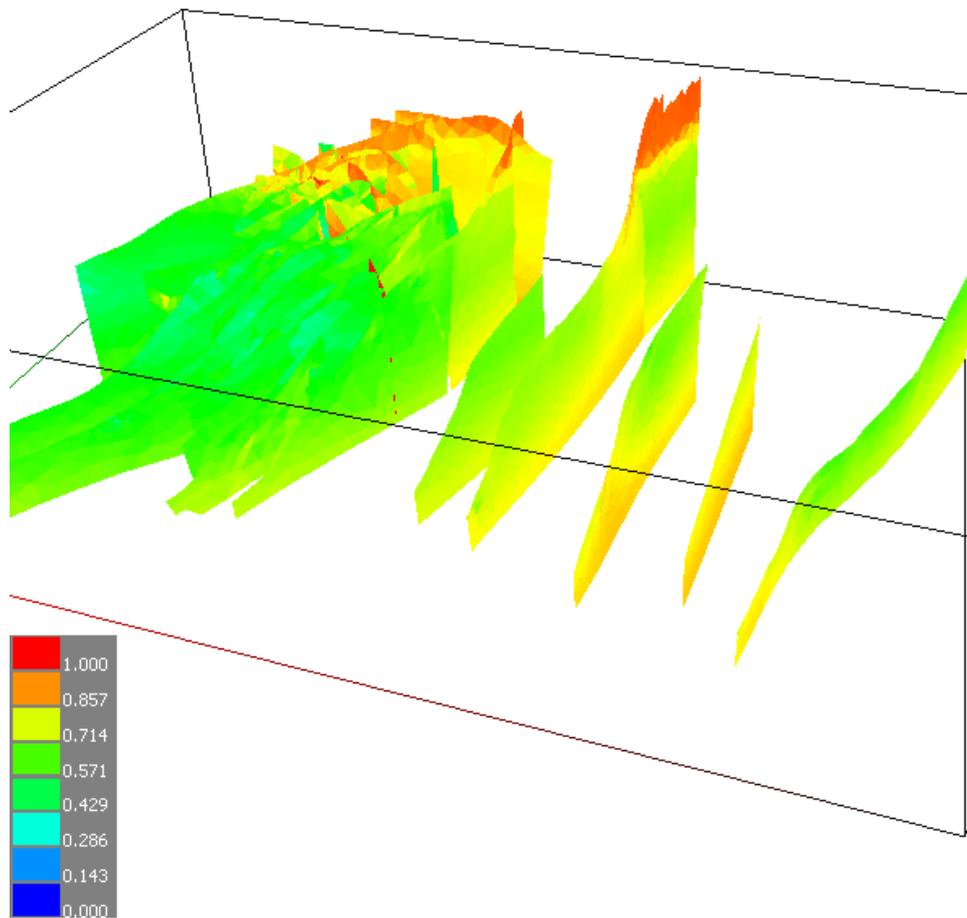
ANNEXE VI Visualisations de la tendance à la dilatace pour la faille F3 lors de l'infiltration en profondeur.



ANNEXE VII Visualisations du réseau de failles dans le scénario d'un modèle sec : tendance à la dilatace



ANNEXE VIII Visualisations du réseau de failles en présence du niveau piézométrique



ANNEXE IX Paramètres cinétiques pour les simulations géochimiques

| | Milieu Acide | Milieu Neutre | Milieu Basique | | | |
|------------------------------------|--------------|---------------|----------------|----------|-------|----------|
| Quartz | log k | -14.805 | log k | -14.807 | log k | -17.105 |
| | A | 24.098 | A | 24.000 | A | 0.121 |
| | Ea | 87700 | Ea | 87700 | Ea | 87700 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Calcite | log k | -0.434 | log k | -6.028 | log k | -3.808 |
| | A | 167.484 | A | 0.020 | A | 531.481 |
| | Ea | 14400 | Ea | 23500 | Ea | 35400 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Dolomite | log k | -3.525 | log k | -8.015 | log k | -5.432 |
| | A | 1372.950 | A | 41.646 | A | 9.786 |
| | Ea | 36100 | Ea | 52200 | Ea | 34800 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Albite | log k | -10.764 | log k | -13.309 | log k | -16.259 |
| | A | 17.093 | A | 0.375 | A | 0.001 |
| | Ea | 65000 | Ea | 69800 | Ea | 71000 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Pyrite | log k | -10.764 | log k | -5.079 | log k | -16.259 |
| | A | 17.09 | A | 2.65E+05 | A | 7.00E-04 |
| | Ea | 65000 | Ea | 56900 | Ea | 71000 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Chlorite | log k | -11.928 | log k | -13.338 | log k | -26.936 |
| | A | 2.06E+04 | A | 8.02E+02 | A | 2.02E-11 |
| | Ea | 88000 | Ea | 88000 | Ea | 88000 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| K-Feldspar | log k | -10.540 | log k | -12.763 | log k | -22.074 |
| | A | 1.00E-01 | A | 1.78E-06 | A | 1.97E-05 |
| | Ea | 51700 | Ea | 38000 | Ea | 94100 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Biotite (Annite- Phlogopite) | log k | -10.044 | log k | -12.754 | log k | -12.754 |
| | A | 1.04E-06 | A | 2.02E-09 | A | 2.02E-09 |
| | Ea | 22000 | Ea | 22000 | Ea | 22000 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |
| Muscovite | log k | -12.053 | log k | -13.754 | log k | -14.754 |
| | A | 1.02E-08 | A | 2.03E-10 | A | 2.02E-11 |
| | Ea | 22000 | Ea | 22000 | Ea | 22000 |
| | T | 283 | T | 283 | T | 283 |

ANNEXE X Conditions initiales modifiées après plusieurs simulations géochimiques

| Minéraux | % Massique | Masse molaire des minéraux (g/mol) | Volume molaire (cm ³ /mol) | Densité | Moles/100g de roche | Sp (m ²) |
|--------------------|------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------|---------------------|----------------------|
| Quartz | 26 | 60.08 | 22.69 | 2.65 | 0.43 | 0.491 |
| Albite | 25 | 262.22 | 100.43 | 2.62 | 0.10 | 0.477 |
| Muscovite K | 20 | 398.31 | 140.81 | 2.82 | 0.05 | 2000 |
| Biotite-annite | 10 | 511.88 | 154.32 | 3.17 | 0.02 | 1000 |
| Biotite-phlogopite | 10 | 417.26 | 149.60 | 2.81 | 0.02 | 1000 |
| Dolomite | 5 | 100.08 | 36.93 | 2.85 | 0.05 | 0.088 |
| Chlorite | 1 | 611.60 | 211.92 | 2.6 | 0.00 | 100 |
| Feldspath K | 1 | 278.33 | 108.74 | 2.59 | 0.00 | 0.019 |
| Pyrite | 2 | 119.98 | 23.94 | 5 | 0.02 | 0.020 |

ANNEXE XI Présentation de plusieurs simulations réalisées.

| Minéralogie | Eau | PCO2 | Surface Spécifique | Modèle par rapport aux points | |
|--|---------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| | | | | G710 | C79 |
| Initiale (5% calcite 5% dolomite) | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Normale | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ #HCO3 | ≈SO4 Ca ↗ ≈Mg ≈HCO3 |
| Initiale (5% calcite 5% dolomite) | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | calcite ↘ -10% | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ HCO3 ↘ | ≈ OK |
| Initiale (5% calcite 5% dolomite) | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Normale | / | / |
| Initiale (5% calcite 5% dolomite) | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Dolomite ↗ +50% | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ #HCO3 | Avant simulation |
| Initiale (5% calcite 5% dolomite) | Fonafrey | 10^{-2.3} | Dolomite ↗ +50% | OK | / |
| 10% calcite, pas de dolomite | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Normale | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ HCO3 ↘ | ≈ OK sauf #HCO3 |
| Sans calcite, 5% dolomite | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Normale | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ #HCO3 | Avant simulation |
| Sans calcite, 5% dolomite | Fonafrey | 10^{-2.3} | Normale | ≈SO4 Ca ↗ Mg ↘ ≈HCO3 | / |
| Sans calcite, 5% dolomite | Fonafrey | 10 ^{-3.5} | Dolomite ↗ Δ% | / | / |
| Sans calcite, 5% dolomite | Fonafrey | 10 ^{-3.6} | Pyrite ↗ 50% | / | / |
| Sans calcite, 5% dolomite | Eau de pluie | 10^{-2.3} | Normale | ≈OK | SO4 ↗ Ca et Mg OK, HCO3 ↗ |
| Sans calcite, 5% dolomite | Eau de pluie | 10^{-3.5} | Normale | SO4 ↗ Ca et Mg OK, ↗ HCO3 | ≈ OK sauf #HCO3 |
| Sans calcite, 5% dolomite | Pleney | 10^{-3.5} | Normale | SO4 ↗ Ca ↗ Mg ↘ #HCO3 | ≈ OK sauf #HCO3 |

ANNEXE XII Résultats des simulations géochimiques pour le point C79

