Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherches
Pour la Prévention des Risques Naturels

Novembre 2004

Programme de recherche 2003 financé par le Conseil Général de l'Isère

Modélisation numérique de la perte d'équilibre d'un escarpement rocheux multiblocs

Coordonnateur : Frédéric Victor Donzé[1,6]

Olivier Galizzi[1,2,6], Ioannis Stefanou[1, 4], Bruno Fricout[5,6], Magali Frayssines[3,6],
Thierry Villemin [4,6], Didier Hantz[3,6]

1 : L3S, UJF/INPG/CNRS, Grenoble
2 : Gravir-INRIA, MontBonnot
3 : LIRIGM
4 : GeoLab-NTUA, Athènes
5 : Laboratoire LGCA, Chambéry
6 : RNVO-Structure Fédérative de Recherche

RESUME

L'étude proposée s'intéresse à la phase d'initialisation de la chute de blocs rocheux. A partir de la description tridimensionnelle de la géométrie et de la topologie du système de fractures, l'objectif est de développer un modèle numérique tridimensionnel permettant l'étude mécanique de la perte d'équilibre d'un escarpement rocheux formé par l'empilement de multiples blocs.
Dans l'approche proposée, la description externe du massif rocheux est obtenue par un scanning au laser ou une description topographique de type MNT détaillée. Ensuite, le découpage interne du massif est estimé à partir des observations de fractures en surface, qu'un traitement numérique 3D peut extrapoler dans des cas complexes.

Une fois ces descriptions internes et externes obtenues, celles-ci sont utilisées comme données d'entrée dans des logiciels fondés sur la méthode des éléments discrets.
Il a été mis en évidence l'influence importante des ponts rocheux sur la stabilité des falaises calcaires avec le code commercial UDEC (intervenant principal LIRIGM).

Un autre logiciel commercial mais cette fois-ci pour traiter un cas tridimensionnel a été testé (TriDec), dans un cas d'application s'approchant de la configuration rencontrée à la Bastille de Grenoble. Il s'agit d'un site présentant des fortifications reposant sur un karst particulièrement fracturé. Des informations concernant la stabilité mécanique du massif rocheux ont déjà pu être dégagées, affinant ainsi nos futurs moyens d'investigation numérique pour la région Grenobloise.

Ce logiciel s'est révélé très coûteux d'un point de vue calcul et, comme la plupart des cas à traiter demandent une description très fine du milieu, les limites de simulation ont rapidement été atteintes. Pour disposer d'un logiciel plus performant pour ce type de configuration, une nouvelle plate-forme de calcul nommée YADE et intégrant le code SDEC est en ce moment développée à L3S avec une collaboration INRIA. La première phase consistant à développer l'interface entre la topographie 3D et les failles présentes dans le massif a été achevée. Le massif peut-être désormais représenté par des éléments discrets tétraédriques non structurés.

Table des matières

1 Introduction 3
1.1 Contexte général du projet 4
1.2 Objectifs du projet 5
2 Analyses en retour d'eboulements dans des falaises calcaires 6
2.1 Géométrie des compartiments rocheux éboulés 7
2.2 Mécanismes de rupture 8
2.3 Méthodes d'analyse et critères de rupture 9
2.4 Résultats obtenus 10
2.5 Conclusions 10
3 Analyse d'une falaise potentiellement instable en site urbain 11
3.1 Contexte de l'étude 11
3.2 Géométrie tridimensionnelle 12
3.3 Modélisation et résultats 14
3.4 Conclusions 16
4 Développement de l'interface entre topographie scannée et le code Eléments Discrets YADE 16
4.1 Conclusion 20
5 Conclusion générale 20
6 Bibliographie 21

1 Introduction

Plusieurs équipes de recherche travaillent actuellement dans le cadre de la structure fédérative RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages), à améliorer la conception ou la performance des modèles numériques utilisés pour l'étude de stabilité de falaise.

Il s'agit d'une part du laboratoire 3S qui avec une collaboration avec l'INRIA, développe une nouvelle plate-forme numérique tridimensionnelle utilisant la méthode des Eléments Discret pouvant intégrer directement des caractéristiques topographiques numérisées. Pour cela, le LGCA (Laboratoire Géodynamique des Chaîne Alpines) s'applique depuis plusieurs années à maîtriser et à étendre l'utilisation de scanner au laser pour l'acquisition de ces topographies numériques haute résolution.

D'autre part, le LIRIGM, grâce à l'utilisation du geo-radar, apporte une information précieuse sur l'existence et la distribution des discontinuités derrière les écailles rocheuses potentiellement dangereuses. Sa compétence sur la stabilité des blocs calcaires permet de mieux contraindre les hypothèses utilisées pour traiter numériquement les cas réels.
Enfin, le cas de figure d'une falaise calcaire potentiellement instable en site urbain a été modélisé à l'aide d'un code commercial (code TriDec, Itasca). L'objectif de ce travail était d'évaluer les capacités d'un tel logiciel à estimer les volumes rocheux susceptibles de s'effondrer. Pour cela, une collaboration avec le GeoLab du National Technical University d'Athènes, nous a permis, à partir d'observations précises, d'élaborer un modèle géométrique 3D d'une falaise présentant des risques d'effondrement (site de l'Acropole). Une fois cette géométrie réalisée, l'analyse mécanique des différents scénarios de déstabilisation a été réalisée. Cette configuration nous intéresse tout particulièrement, car elle présente de fortes similitudes avec le site de la bastille à Grenoble ; en ce sens, elle nous permet d'ors et déjà de préparer nos modèles numériques pour contribuer à l'étude de ce site.

L'étude financée par le Conseil Générale de l'Isère et intitulée « Modélisation numérique de la perte d'équilibre d'un escarpement rocheux multiblocs » est un appui dans le développement de nouveaux outils numériques capables de décrire la transition entre l'initiation des instabilités rocheuses et la phase de glissement ou de basculement de la falaise. En effet, plus de cinq thèses se déroulent actuellement de façon concertée et complémentaire autour d'une coordination située au laboratoire 3S dans le cadre du réseau de laboratoires RNVO.

1.1 Contexte général du projet

La stabilité de falaise est un problème récurrent en montagne. Avec l'existence et le développement d'infrastructures routières, d'implantation de zones urbanisées ou d'équipements divers en aval de falaises susceptibles de perdre brutalement des quantités parfois importantes de roche, il est nécessaire de se protéger.

Derrière le terme générique de falaise, une grande variété de configurations existe, liée à des degrés divers à la nature de la roche, à l'inclinaison de la pente et à l'exposition du site aux altérations climatiques (Goodman & Kiefer, 2000, Hatzor, 2003). Pour ce dernier point, on peut évoquer l'élévation de la température qui aurait un effet direct sur l'accroissement de la pluviosité dans les régions de montagne, ce qui aurait comme conséquence l'augmentation de la probabilité d'aléas d'éboulement.

Compte tenu de la diversité géologique des massifs rocheux, le projet s'est focalisé sur les massifs calcaires souvent rencontrés dans la région des pré-Alpes. Récemment encore, des évènements dramatiques, comme celui de la Bourne (Figure 1), montre la difficulté de sécuriser totalement les zones exposées aux éboulements de blocs rocheux.

La protection contre ce type d'alea gravitaire peut se formuler sous deux formes. D'une part une protection dite active où pour une falaise accessible, des structures couplées pieux-filets sont installées pour permettre la stabilisation et le confinement des blocs rocheux désolidarisés. Un autre type de protection, dite passive, consiste à ériger en aval de la falaise, des structures de protection composées soit de filets anti-sous-marin, soit de merlons, structures beaucoup plus massives qui sont capables de stopper la trajectoire de blocs rocheux possédant une grande énergie cinétique. Pour dimensionner ces différents ouvrages de protection, il est indispensable d'identifier l'instabilité spatiale amont et de lui affecter un degré de dangerosité. Pour cela, l'agencement structural et la topographie doivent être connus au mieux afin de pouvoir quantifier le volume de roche mobilisable au moyen de modèles numériques. C'est dans ce contexte bien précis que s'insère le présent projet.



Figure 1. Cicatrice de l'éboulement de la Bourne

1.2 Objectifs du projet

L'étude proposée s'intéresse à la stabilité d'assemblages de blocs rocheux dans des massifs calcaires et à l'examen des conditions dans lesquelles ces ensembles sont susceptibles de départs en masse. A partir des travaux récents portant sur la description tridimensionnelle de la géométrie et de la topologie de systèmes de fractures, l'objectif est donc d'abord de développer un modèle numérique tridimensionnel permettant l'étude mécanique de la perte d'équilibre d'un escarpement rocheux.

Il est par ailleurs nécessaire d'affiner la description de ces falaises utilisée dans les modèles numériques, dès lors que l'on souhaite une évaluation quantitative de l'instabilité. A partir de données issues de campagnes de scanning au laser, les points obtenus sont traités pour réaliser un maillage tridimensionnel directement intégré dans un modèle numérique de type Eléments Discrets. Selon le degré de complexité du massif, la représentation numérique du découpage interne du massif rocheux s'appuie soit sur une description évidente des failles en surface, soit sur une approche comparable à celle développée par Empereur & Villemin (2003). Ce logiciel permet en effet de simuler une description de l'état de fragmentation 3D du milieu rocheux. Les données d'entrée sont les informations de fracturation résultant de l'examen de surface et de subsurface du site étudié et sur celle de milieux équivalents (Malartre, 2002).

Dans notre approche, chaque fragment issu de ce découpage spatial est alors considéré comme un bloc autonome aussi bien d'un point de vue géométrique que du point de vue du comportement mécanique. Ainsi, il est possible de faire la liaison avec les méthodes numériques particulaires qui permettent de traiter l'aspect mécanique de cet ensemble de blocs rocheux. Au moyen de logiciels 3D utilisant la méthode des éléments discrets, où chaque bloc est représenté par un ensemble d'éléments discrets répondant au principe de la dynamique, l'évolution gravitaire de l'ensemble ainsi que de leurs interactions mises en jeu, peuvent alors être décrites et suivies au cours du temps.

Bien que développant nos propres outils de simulation, il est important de ne pas écarter l'utilisation de méthodes existantes. Cela permet d'une part de comparer les résultats obtenus, mais aussi de prendre en compte leurs limites pour améliorer nos capacités d'analyse. Ainsi une dizaine de cas d'éboulements survenus dans les falaises calcaires du Vercors ont été analysés en utilisant une méthode d'équilibre limite et, dans certains cas, le logiciel commercial UDEC. D'autre part, un site d'éboulement potentiel a été analysé avec le logiciel commercial 3D TriDec, dans le cadre d'une collaboration avec le GeoLab de l'Université technologique d'Athènes.

2 Analyses en retour d'eboulements dans des falaises calcaires

Pour valider les méthodes d'évaluation de la stabilité des falaises calcaires, des analyses en retour de 10 éboulements survenus ces dernières années dans les falaises du Vercors ont été effectuées par le LIRIGM (Figure 2). Les volumes de ces éboulements sont compris entre 50 et 10 000 m^3.

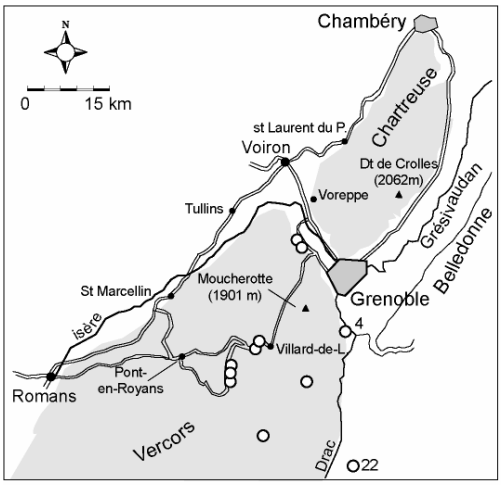

Figure 2. Localisation des éboulements étudiés

2.1 Géométrie des compartiments rocheux éboulés

Les cicatrices des éboulements ont été parcourues en rappel afin de décrire leur orientation (azimuts, pendages des différents plans), leur morphologie (rugosité) et les surfaces de rupture de matrice rocheuse. La morphologie initiale des compartiments éboulés a été reconstituée approximativement, soit à partir de photographies antérieures à l'éboulement, soit par interpolation de la morphologie de part et d'autre de la cicatrice. Dans un cas (Echarina 2), un modèle numérique de terrain (MNT), de type Autocad, a pu être construit à partir de prises de vues photogrammétriques aériennes effectuées avant et après l'éboulement (Figure 3). Par la suite, trois autres cas pourront également être traités à partir d'un MNT.

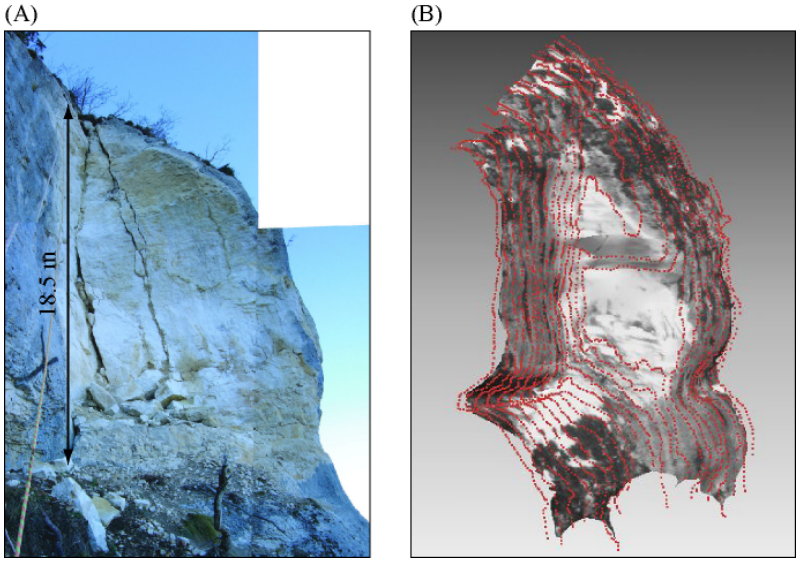

Figure 3. Cicatrice de l'éboulement de l'Echarina 2 (A) et modèle numérique de terrain (B)

2.2 Mécanismes de rupture

Les mouvements initiaux sont des mouvements de masses monolithiques ayant glissé (8 cas) ou basculé (2 cas). Dans tous les cas, des surfaces de rupture de matrice rocheuse ("cassures fraîches") ont été observées (Figure 4).

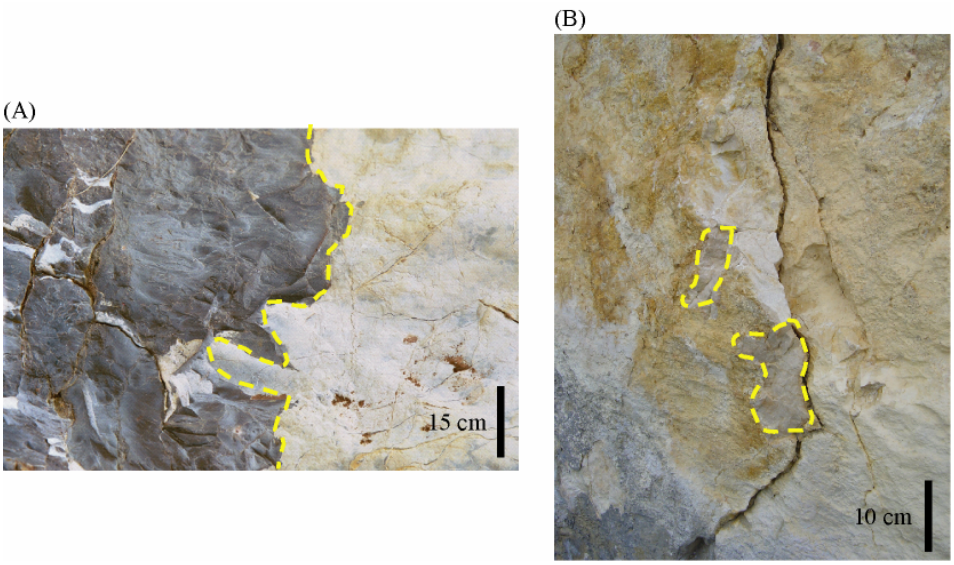

Figure 4. Rupture de matrice rocheuse en gris dans le Tithonique (A), en beige clair dans l'Urgonien (B)

Elles représentent entre 0,2 et 1% de la surface totale de la cicatrice. L'existence de ponts rocheux reliant les masses éboulées au massif en place permet d'expliquer la stabilité passée de ces masses qui reposaient sur des surfaces de discontinuité très inclinées ou qui étaient fortement déversées (dans le premier cas, il peut s'agir également d'aspérités très marquées). Dans le cas des glissements, les ruptures de matrice rocheuse se sont produites en traction dans un cas (sur les faces déversées des "marches d'escalier" constituant la surface de glissement, figure 5A) et en cisaillement dans les 7 autres cas (Figure 5B). Lors des 2 basculements, la rupture de la matrice s'est produite en traction (Figure 5C).

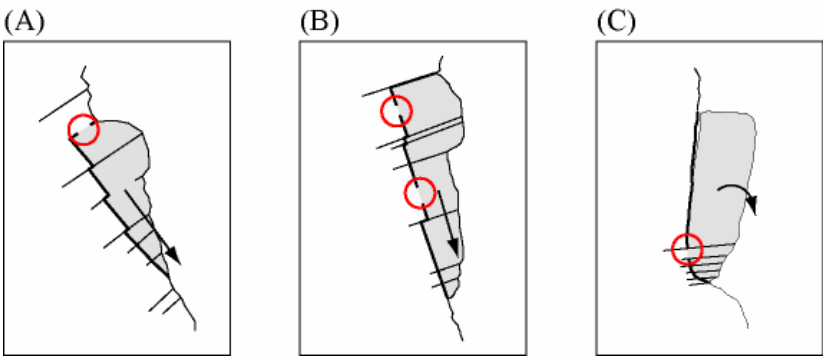

Figure 5. Mécanismes de rupture observés

2.3 Méthodes d'analyse et critères de rupture

Deux types de méthode ont été utilisés : l'analyse à l'équilibre limite et la méthode des éléments distincts (code UDEC). Pour les surfaces de rupture préexistantes, la cohésion a été supposée nulle et l'angle de frottement égal à 43° (à partir d'essais de cisaillement direct effectués sur des joints calcaires). Pour les ponts rocheux, constitués de matrice rocheuse, le critère de rupture de Mohr-Coulomb, associé à un critère de traction maximale, a été utilisé, en considérant que le rapport de la cohésion à la résistance à la traction (C/T) est compris entre 2 et 5. Un angle de frottement de 45° (obtenu à partir d'essais triaxiaux) a été adopté. La résistance en traction et la cohésion de la matrice ont été déterminées par analyse en retour, puis les valeurs obtenues ont été comparées à celles obtenues en laboratoire, afin d'évaluer la validité des hypothèses et de la méthode de calcul.

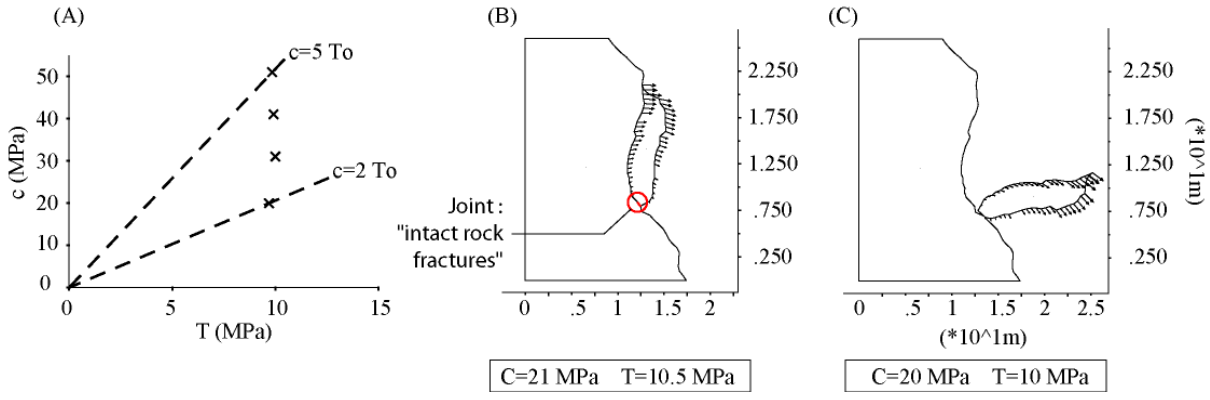

Figure 6. Simulation par éléments distincts de l'éboulement de l'Echarina 2. A: cohésion C et résistance en traction T expliquant la rupture, pour différentes valeurs du rapport C/T ; B: stabilisation après un déplacement maximal de 5 mm ; C : basculement (C/T=2)

2.4 Résultats obtenus

Dans les 2 cas de basculement, le pont rocheux est sollicité essentiellement en traction. Il en résulte que la résistance en traction T obtenue (8 à 10 MPa) est peu sensible au rapport C/T (Figure 6A). Dans l'autre cas de rupture de pont rocheux en traction (glissement en escalier), la résistance obtenue est de 5 à 8 MPa. Les valeurs de T obtenues par analyse en retour sont dans la même plage que celles obtenues en laboratoire par essais brésiliens (4,5-8,3 MPa). La méthode utilisée est donc validée dans ce type de configuration.
Pour les glissements, l'analyse en retour permet de déterminer la cohésion des ponts rocheux. Les valeurs obtenues sont comprises entre 3 et 15 MPa, alors que la cohésion obtenue en laboratoire est d'environ 24 MPa. Plusieurs hypothèses (non exclusives) peuvent être avancées pour expliquer cette différence :

- la variabilité naturelle de la résistance de la roche ;
- les essais de laboratoire ont surestimé la résistance, du fait du mode de prélèvement des échantillons, dans des gros blocs éboulés, donc constitués de matrice très résistante ;
- les ponts rocheux sont moins résistants que la matrice ;
- les surfaces de rupture de matrice ont été surestimées, car certaines cassures fraîches peuvent être dues au déplacement de la masse après la rupture initiale ;
- la méthode de calcul suppose que les contraintes sur un pont rocheux sont uniformes, alors que la réalité est plus défavorable (concentration de contrainte aux extrémités de fissures).

Une méthode d'analyse basée sur la mécanique de la fracture (qui prend en compte les concentrations de contrainte) sera également appliquée.
La différence entre les valeurs de cohésion obtenues par analyse en retour et en laboratoire (facteur 1,5 à 8) peut sembler importante. Mais elle doit être comparée à l'incertitude qui pèse sur les surfaces de pont rocheux, qui est beaucoup plus grande. Le modèle mécanique utilisé peut donc être considéré comme utilisable en pratique.

2.5 Conclusions

Les analyses effectuées montrent que les modèles mécaniques utilisés sont satisfaisants pour des mécanismes de rupture relativement simples, mais cependant représentatifs des éboulements de taille moyenne (50 à 10 000 m3), qui se produisent fréquemment dans les falaises calcaires du Vercors et de la Chartreuse.
Le facteur principal d'incertitude dans l'évaluation de la stabilité des masses rocheuses susceptibles de s'ébouler, est l'étendue des ponts rocheux qui retiennent ces masses. Pour que les modèles mécaniques utilisés dans cette étude deviennent utilisables en pratique, il est donc nécessaire de mieux connaître l'extension des fractures qui pré découpent les falaises. Pour cela, des méthodes d'observation en surface, axées sur cette problématique, doivent être développées, ainsi que des méthodes d'investigation de la fracturation en profondeur, par prospection géophysique. Dans cet objectif, le LIRIGM expérimente

actuellement l'utilisation du géo-radar, dans le cadre d'un projet RDT (Risques, Développement, Territoires).

3 Analyse d'une falaise potentiellement instable en site urbain

A Grenoble, le site de la Bastille présente un risque de mouvements de terrain potentiellement dangereux. Cette zone non constructible est suivie depuis 1994 avec une remise à neuf en 2004 des moyens de surveillance. En cas d'évolution critique des zones surveillées, il sera nécessaire de disposer d'un nombre suffisant d'outils pour évaluer les différents scénarios de glissement ou d'effondrement. Les modèles numériques tridimensionnels devront alors être prêt à contribuer à cette évaluation. Il est donc dès maintenant nécessaire de les confronter à des problèmes critiques réels.
Dans cette optique, un site similaire à celui de la bastille, comportant un édifice de fortification bâti sur un massif rocheux calcaire très faillé, a été étudié. Ce site, le coin de falaise Est-SudEst de l'Acropole d'Athènes, est actuellement sujet de quelque inquiétude : un volume rocheux conséquent présente un risque d'éboulement en site urbain. Au sein du laboratoire 3S, nous avons donc entrepris de tester le code TriDec pour étudier le mécanisme de déstabilisation de ce massif rocheux. Ce travail permet donc d'affiner la capacité de nos modèles à étudier des configurations semblables rencontrées en isère.

3.1 Contexte de l'étude

Le site de l'Acropole est composé d'un massif rocheux calcaire très faillé, d'une trentaine de mètres de haut reposant sur une couche dite de Schiste Athénien. Le coin Est-Sud Est de ce massif présente une configuration surplombante sur un périmètre d'une cinquantaine de mètres (Figure 7). Ce coin attire toutes les attentions car il présente plusieurs symptômes d'instabilités potentielles. En effet, le mur en maçonnerie composant la partie supérieure de la structure présente de nombreuses discontinuités verticales et récemment des affaissements de quelques centimètres ont été observés sur l'esplanade, à la verticale du coin surplombant.



Figure 7. A gauche, la partie éclairée est le coin Est-Sud Est. A droite, vue de face du coin surplombant Sud-Sud Est de l'Acropole

A partir des campagnes d'observation géologique, un réseau de faille apparent a été clairement identifié, mais pas dans sa globalité. L'emplacement du mur et l'érosion superficielle sont autant d'éléments qui n'ont pas permis d'avoir une information locale exacte. Toutefois, trois grandes familles d'orientation de faille semblent exister (Figure 8).

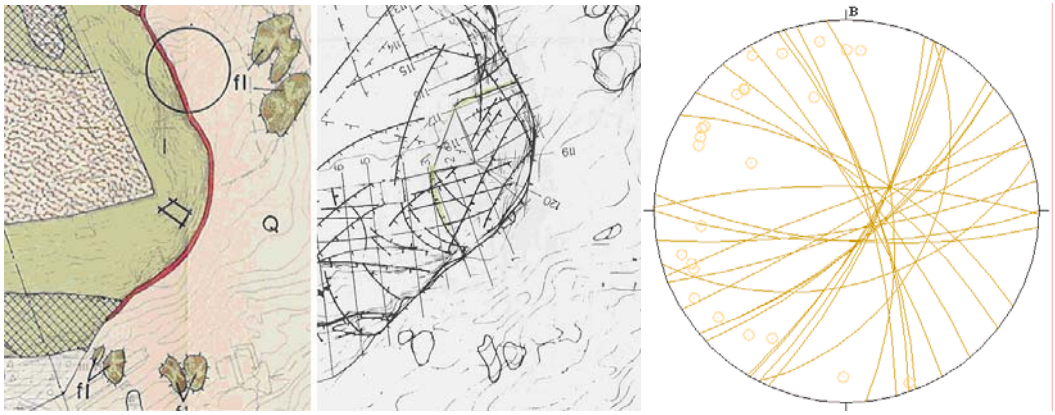

Figure 8. A gauche, relevé topographique et failles en surface répertoriées. A droite, stéréographe des failles identifiées : trois grandes orientation semblent se dégager.

Certaines failles apparentes en surface présentent une connectivité potentielle qui si elle s'avère réelle en profondeur, peut présenter un réel risque d'instabilité pour le massif rocheux. Ces failles principales pourraient être d'autant plus dangereuses qu'elles côtoient un nombre important de failles secondaires denses et diffus.

3.2 Géométrie tridimensionnelle

Pour établir un pré-diagnostique sur la situation actuelle, en attendant des études plus approfondies impliquant par exemple une campagne de prospection radar qui permettrait d'établir une carte plus exacte du réseau 3D des failles au sein même du massif, un

modèle numérique tridimensionnel a été réalisé par Ioannis Stefanou au laboratoire 3S, à partir des données topographiques et des relevés de failles en surface existants.

La première étape a donc été d'intégrer un relevé topographique numérisé. En attendant les résultats du scanner laser, l'utilisation d'une carte topographique classique accompagnée de photo prises sur site, a permis d'établir un premier maillage surfacique apte a reproduire les grandes caractéristiques du coin Est-Sud Est de l'Acropole (Figure 9).

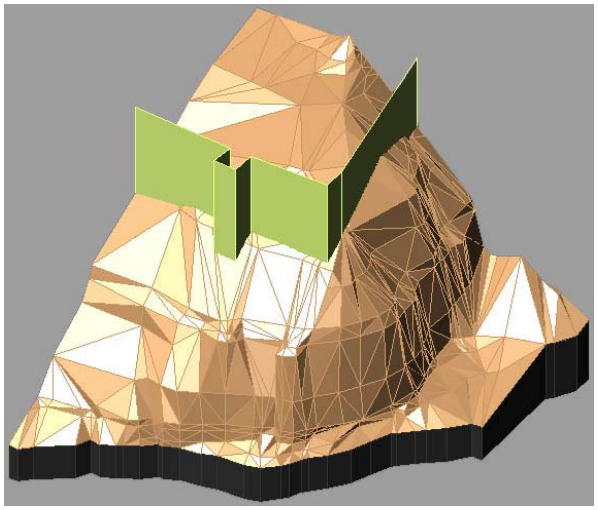

Figure 9. Maillage 3D issu des données topographiques existantes.

A partir des relevés en surface, une première sélection d'un ensemble de failles a été réalisée et introduite dans le modèle numérique. Ces failles font bien sûr parties de l'ensemble supposé contribuer à l'instabilité de la structure rocheuse. Les différents blocs issus du positionnement respectif de ses discontinuités sont présentés à la Figure 10.

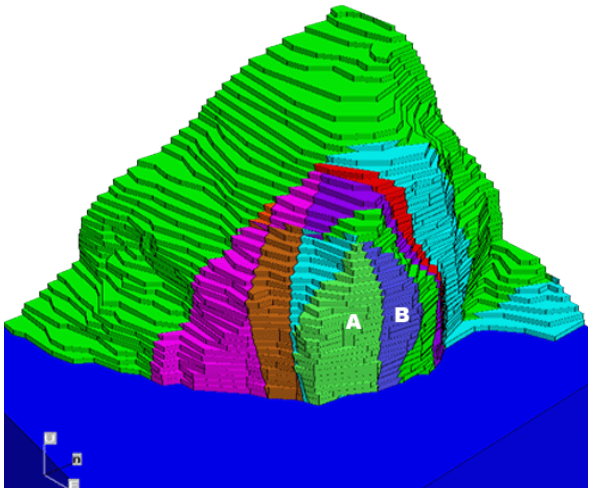

Figure 10. Issus de la prise en compte de 8 failles principales, les blocs rocheux distincts apparaissent. Les blocs A et B sont les plus exposés au glissement ou au basculement

3.3 Modélisation et résultats

En ce qui concerne le chargement sommital dû au remblais contenu par l'enceinte du site de l'Acropole, un effort vertical réparti uniformément de 1 GPa, correspondant à la charge estimée a été appliqué sur le massif rocheux modélisé.

Les caractéristiques mécaniques et physique introduites dans le modèle sont d'une part celles génériques des roches calcaires, et d'autre part, celle du matériau présent aux interfaces des blocs. Or, les observations ont montré que les discontinuités entre blocs sont toutes remplies de ce matériau de remplissage, jusqu'à des épaisseurs de 7 cm. On peut donc supposer que ce matériau joue un rôle prépondérant dans la stabilité de l'ensemble. Malheureusement, il n'existe pas actuellement de résultats quantitatifs issus de tests réalisés en laboratoire sur ce type de matériau, ce qui nous aurait permis de bien calibrer la loi de comportement à utiliser dans le modèle numérique.
Cependant, des études réalisées sur un matériau similaire à un autre endroit de l'Acropole ont données les indications suivantes : un angle de friction de **25**° et une cohésion d'environ **48kPa (±11kPa).**

En considérant le cas le plus extrême, c'est à dire une cohésion nulle au niveau de l'interface entre blocs tout en conservant un angle de friction de **25**°, le modèle montre que pour une configuration tridimensionnelle, tout le massif ne s'écroule pas entièrement : seul la partie extrême composée des blocs notés A et B glissent sans basculer (Figure 11). Une telle configuration représentée par un modèle bidimensionnel aurait certainement donné un processus d'écroulement de l'ensemble du massif. On voit donc bien l'importance de l'agencement des plans de failles à 3D qui peuvent augmenter

la stabilité du massif par un phénomène de coincement des blocs les uns par rapports aux autres.



Figure 11. Avec une cohésion nulle, seuls les blocs A et B glissent sous l'effet de la gravité

Le modèle numérique tel qu'il a été formulé, ne présente pas de mécanisme complexe à l'éboulement, avec seulement un glissement en bout de falaise. Toutefois, s'il n'est pas complexe, les deux blocs concernés présentent un volume rocheux déjà important. Ces deux blocs sont séparés du reste du massif par deux failles que l'on notera R12 et R14 (Figure 12).

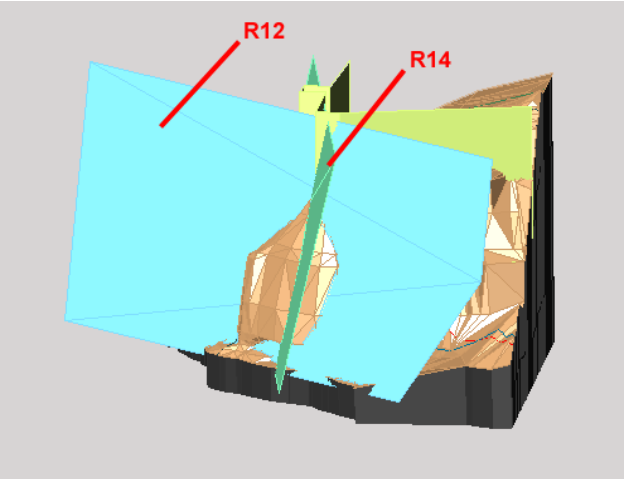

Figure 12. Les deux failles notées R12 et R14 qui séparent les deux blocs A et B du reste du massif.

Deux scénario sont considérés concernant la cohésion de ces deux failles. Si les deux failles ont la même cohésion, alors les blocs A et B commenceront à glisser pour une cohésion inférieure à 34 KPa. Dans l'autre cas de figure, si la faille R14 n'a pas de cohésion, alors, le glissement aura lieu si la cohésion de R12 est inférieure à 42 KPa.

3.4 Conclusions

Que peut-on retenir des ces valeurs de cohésion ? Simplement que pour des matériaux de remplissage de failles issus du même massif rocheux mais à un autre endroit, les propriétés de cohésion qui ont été mesurées sont de l'ordre de 48 KPa avec une dispersion importante (±11 KPa). Nous sommes donc en présence du même ordre de grandeur pour les valeurs critiques de la cohésion exprimées dans le modèle.
Si ces résultats numériques sont confirmés, la stabilité du coin Est-Sud Est, est peut-être proche d'une configuration critique, avec un risque d'effondrement par glissement de sa partie périphérique qui fait plus de 100 m^3. Il est donc important de mener une investigation plus en profondeur dans le massif, afin de mieux contraindre les hypothèses retenues. Pour ce faire, l'utilisation du géo-radar développée par le LIRIGM, dans le cadre d'un projet RDT (Risques, Développement, Territoires), peut apporter une contribution majeure.

4 Développement de l'interface entre topographie scannée et le code Eléments Discrets YADE

l'objectif est de restituer le plus fidèlement possible la topographie réelle de la structure rocheuse étudiée dans les modèles numériques utilisés pour étudier la stabilité de l'ensemble. Cette topographie numérisée servira ensuite d'enveloppe pour un maillage tridimensionnel dont chaque élément volumique sera identifié comme étant un élément discret à part entière, ayant sa propre masse et sa propre loi de comportement au contact.

Pour partir d'un cas concret, nous avons choisi d'utiliser les données consistant en un nuage de point, issues d'une campagne de scanning sur une des tours Saint-Jacques, monolithes de calcaires du Fontanil situées en rive droite de la cluse de Banges, à l'ouest du village d'Aiguebelette (Figure 13). Ce type de tour rocheuse, qui menace de s'effondrer, se rencontre fréquemment dans les chaînes subalpines (Vercors, Chartreuse, Bauges, Bornes, Aravis).



Figure 13. Tours Saint-Jacques. La numérisation de la tour avale est utilisée pour construire un maillage 3D complet (externe et intene)

La première étape consiste à obtenir de ce nuage de 430 999 points , un maillage surfacique cohérent. Cette surface reconstruite par l'intermédiaire du logiciel commercial « Rapidform » (Figure 14) donne malheureusement un maillage de pauvre qualité, avec des trous importants et une variation de densité de maille trop grande pour espérer obtenir des volumes élémentaires 3D de tailles raisonnables. Aussi, un remaillage supplémentaire est nécessaire pour éliminer les trous et s'assurer qu'un maillage correct avec des tailles surfaciques adéquates pave l'espace (Figure 15).

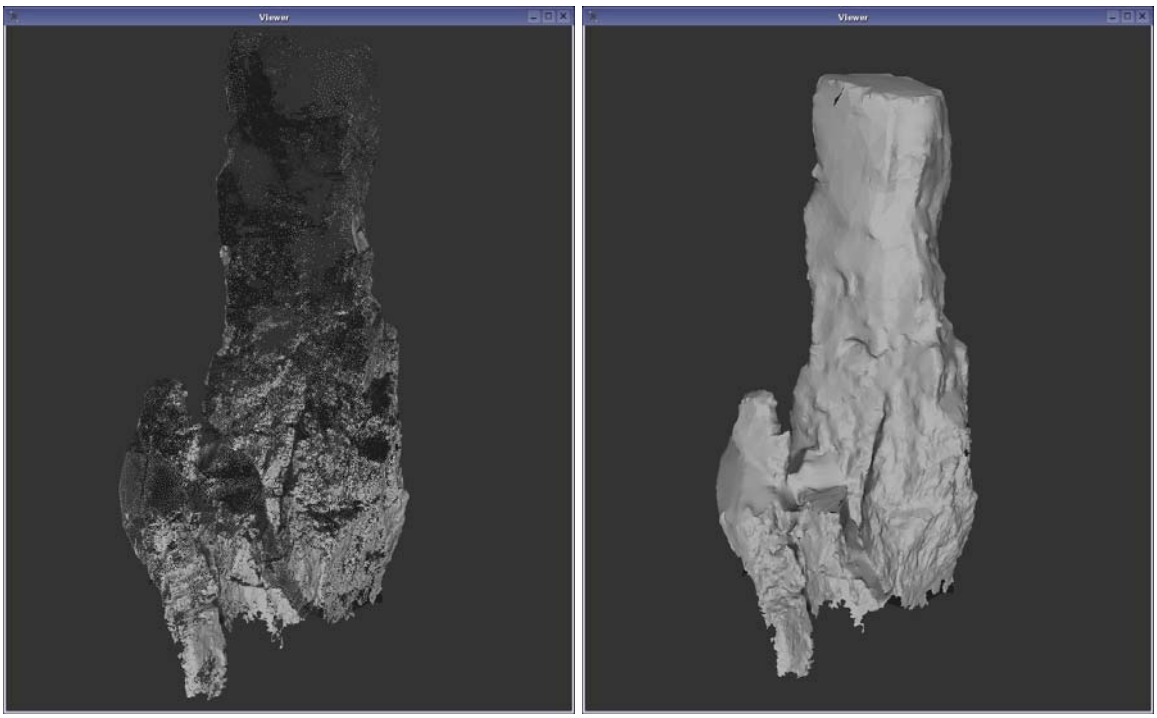

Figure 14. A gauche le nuage de points initial obtenu par scanning laser. A droite, la surface maillée avec *rapidform* : surface incomplète et irrégulière.

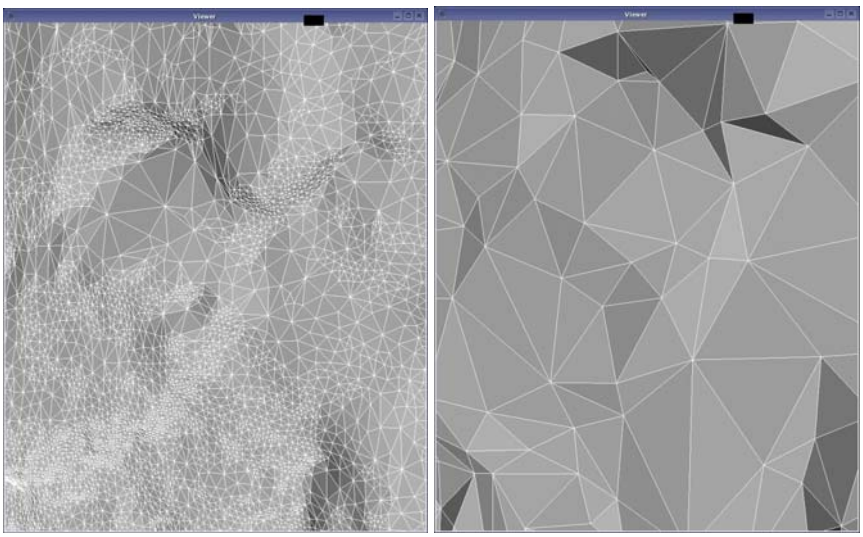

Figure 15. A gauche, le maillage initial obtenu avec *rapidform*. A droite, cette même surface transformée avec *qslim*.

Une fois ce remaillage effectué, les discontinuités majeures issues des observations en surface peuvent être introduites dans le volume global. Par exemple, dans le cas présent, si de grandes failles sont répertoriées, il est possible de les prendre en compte avec des scénario de chevauchement différents. Un exemple est donné à la Figure 16. Le massif est alors représenté par un ensemble de blocs séparés par ces discontinuités majeures.

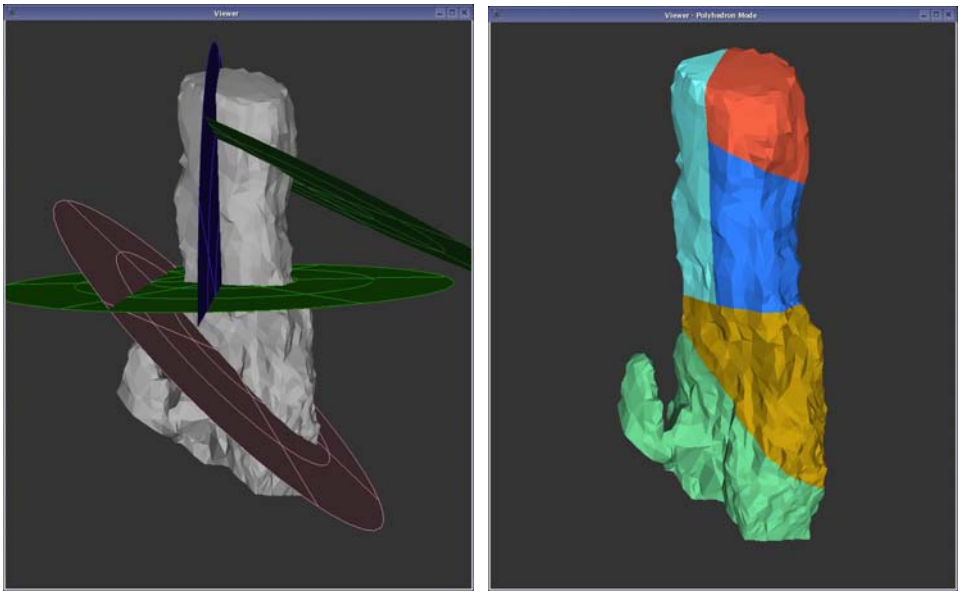

Figure 16. A gauche, un scénario arbitraire de distribution de faille intégrant certaines hypothèses de connexions. A droite, les blocs résultants de ce découpage.

Ces blocs sont identifiables les uns des autres par un nouveau maillage surfacique représentant les plans de contact. Chaque bloc est alors rempli par des tétraèdres non structurés par l'intermédiaire d'un logiciel de maillage volumétrique *Netgen*, permettant ainsi une description à une échelle plus fine du massif. Le résultat est indiqué à la Figure 17.

Le massif est ainsi totalement pavé par des tétraèdres élémentaires qui sont identifiés comme étant autant d'éléments discrets. Chaque élément discret possède sa propre forme, sa masse ainsi que des propriétés de contact ou d'interaction, suivant les propriétés mécaniques et physiques du milieu rocheux modélisé.
Pour rendre compte des nouveaux contacts lors de collisions, par exemple lors de l'effondrement de la structure, il a été nécessaire d'optimiser les algorithmes dédiés à cette phase là, afin de rendre le coût en calcul 3D raisonnable. La technique utilisée a été de représenter chaque tétraèdre par un ensemble de sphères dont le calcul d'interpénétration est très rapide à déterminer (Figure 18).

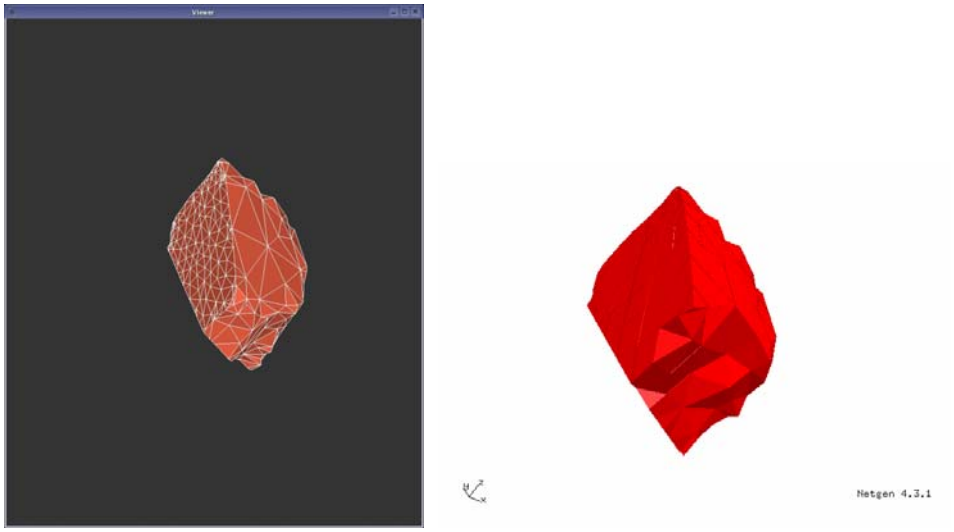

Figure 17. A gauche, le bloc surfacique identifié en haut de la tour. A droite, ce bloc est rempli de tétraèdres non structurés.

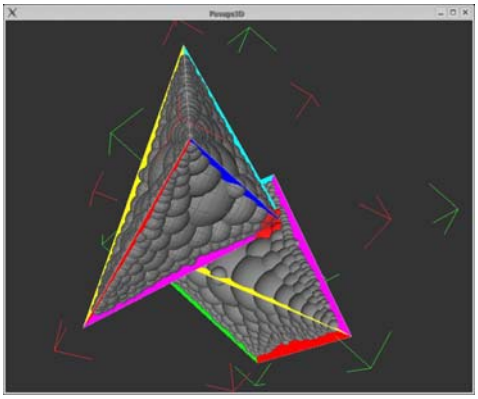

Figure 18. Les éléments discrets tétraédriques sont remplis de sphères permettant une détection plus rapide du contact.

4.1 Conclusion

La première étape de la simulation aux éléments discrets utilisant directement les données issues de scanning a été réalisée. L'objectif est d'utiliser uniquement des logiciels libres afin de pouvoir les intégrer dans la plate-forme YADE. Un effort important sur l'optimisation de l'algorithme de détection de contacts pour les éléments discrets tétraédriques a été mené. L'intégration de la formulation explicite de l'équation de la dynamique est en cours d'achèvement. Les premières simulations d'effondrement de structures rocheuses complexes devraient avoir lieu dès le début de l'année 2005.

5 Conclusion générale

L'objet de cette étude est ambitieuse car il s'agit de mettre en œuvre une plate-forme tridimensionnelle permettant de formuler le modèle numérique le plus complet possible pour traiter la perte d'équilibre d'une falaise calcaire fracturée.

Pour ce faire, il est d'abord indispensable de compléter la modélisation numérique par des informations issues directement des observations faites sur site. Le travail de recherche réalisé au LIRGM apporte justement les éléments nécessaires pour établir les hypothèses les plus exactes dans la formulation du problème. Prenons pour exemple le rôle des ponts rocheux dans la stabilité des écailles. Cette notion de ponts sera explicitement prise en compte dans la formulation 3D de la plate-forme en développement.

Il est aussi nécessaire de ne pas perdre de vue ce que les autres logiciels peuvent apporter en termes de performance et de résultats complémentaires. Par exemple, l'utilisation du code TriDec pour traiter le cas de l'Acropole nous a permis de constater le fossé qui existe entre le traitement du problème de l'instabilité d'un massif rocheux en trois dimensions par rapport à une simple approche bidimensionnelle, par exemple sur les

effets d'auto-stabilisation des blocs entre eux. Mais au delà de tout cela, ces premières simulations ont mis en évidence le risque potentiel actuel élevé de l'effondrement de la partie périphérique du coin rocheux E-SE.

Ces deux modélisations numériques confrontées à des cas de figures réels, montrent un besoin urgent de poursuivre une investigation in situ capable de fournir davantage d'informations sur la structures interne du massif. En ce sens, nous avons bon espoir que la technique du radar puisse nous fournir assez d'éléments pour améliorer l'aspect prédictif de ces modèles.

Enfin, les limitations en terme de performance calcul de ce type de logiciel nous conforte dans notre choix de développer des outils plus puissants en calcul 3D. Un nouveau code dénommé YADE est actuellement développé par le laboratoire 3S en collaboration avec l'INRIA. Ce code qui est en réalité une plate-forme qui peut intégrer des codes existants, comme SDEC, possède un potentiel d'utilisation et de développement beaucoup plus important. Il permet déjà d'intégrer des volumes 3D très proches de la réalité à partir de données topographiques scannées. Le choix et la distribution des discontinuités dans le modèle ne sont pas limités, ce qui permet de tester un large éventail d'hypothèses sur la fracturation du milieu rocheux. Sa prochaine mise en route d'un point de vue mécanique devrait nous permettre de disposer d'un logiciel libre performant, réalisé à Grenoble, pour traiter les différentes phases d'effondrement d'une falaise à partir d'une description locale très riche.

6 Bibliographie

Donzé F. V.& S.-A. Magnier, « Spherical Discrete Element Code » In: *Discrete Element Project Report* no. 2. GEOTOP, Université du Québec à Montréal, 1997.

Empereur-Mot, L., Villemin, T. (2003) OBSIFRAC: database-supported software for 3-D modeling of rock mass fragmentation; ***Computers and Geosciences*** ; 29/2 pp. 173-181.

Goodman, R. E., and Kiefer, D. S. (2000). ''Behavior of rock in slopes.''*J. Geotech. Geoenviron. Eng.,* 126-8, 675–684.

Hatzor, Y. H., (2003). Keyblock stability in seismically active rock slopes – the Snake Path cliff – Masada. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Vol. 129, No. 8, pp.697-710

Kieffer, D. S. (1998). ''Rock slumping—A compound failure mode of jointed hard rock slopes.'' PhD dissertation, Dept. of Civil and EnvironmentalEngineering, U.C. Berkeley, Berkeley, Calif.

Malartre, N. (2002); Fragmentation des massifs et écroulements rocheux : modélisation géométrique et simulation mécanique. Application au cas de Randa (Valais Suisse). Mémoire DEA Dynamique de la Lithosphère, Université de Savoie, 33 p.

Shi, G.-H. (1993). Block system modeling by discontinuous deformation analysis, Computational Mechanics, Southampton, U.K., 209.