

CARACTERISATION DES ALEAS D'ÉBOULEMENT DE FALAISES PAR DES METHODES MORPHOMETRIQUES ET GEOPHYSIQUES

Jacques DEPARIS¹, Denis JONGMANS¹, Bruno FRICOUT², Thierry VILLEMIN², Alex MATHY³, Laurent EFFENDIANTZ⁴

1 LIRIGM, Grenoble, France

2 LGCA, Chambéry, France

3 SAGE, Grenoble, France

4 CETE, Lyon, France

RÉSUMÉ – Les éboulements en masse (volume supérieur à 50.000 m³) constituent un problème important dans la gestion de l'aléa gravitaire. Des mesures morphométriques et géophysiques ont été réalisées sur un site d'instabilité potentielle, dont la géométrie est connue afin d'évaluer l'efficacité et la complémentarité des méthodes étudiées.

1. Introduction

Les éboulements en masse (volume supérieur à 50.000 m³) constituent un problème important et difficile pour les autorités responsables de la gestion et de l'aménagement du territoire en zone de montagne, en raison de la difficulté de prévision de ces évènements. Cette dernière résulte principalement de la soudaineté de ces phénomènes et de l'absence de précurseurs, de l'incertitude sur le découpage du compartiment rocheux et sur la structure interne du massif, et de la complexité des causes de déclenchement. Dans le cadre d'un projet financé par le ministère de l'écologie et du développement durable, une méthodologie opérationnelle de reconnaissance de falaises rocheuses a été développée afin de permettre une description quantitative 3D la plus précise possible des compartiments instables. Pour connaître la géométrie tridimensionnelle d'un compartiment rocheux (limites externes et fracturation interne), la méthodologie proposée s'appuie sur la combinaison de 3 techniques d'observation et de mesures : la prise détaillée d'observations géologique et structurale, la morphologie numérique à partir de mesures laser (lidar), permettant une description précise de la géométrie du compartiment et une localisation précise des mesures, et des reconnaissances géophysiques en surface et en paroi (tomographie électrique, radar géologique) pour localiser en surface et en profondeur les fractures principales et les caractériser (ouverture, remplissage, ponts de matière...). Des mesures radar et morphométriques ont été réalisées sur le site du Rocher du Midi (Massif du Vercors) où une écaille rocheuse présente une configuration typique d'instabilité (Frayssines et Hantz, 2006)

2. Description et caractérisation géologique du site

2.1. Lithologie

Le site du Rocher du Midi domine le village de La Rivière sur le rebord ouest du Vercors (fig. 1a). Il s'agit d'un compartiment haut de 80 m environ (fig. 2), dont le volume est estimé à 60000 m³. Il est découpé sur trois côtés par le plan de falaise et deux familles de fractures verticales (fig. 1b), et est encore relié au plateau par son quatrième côté. Une fracture ouverte FB1 est située en arrière de l'écaille et a pu être visitée sur une profondeur de 60 m. Un suivi extensométrique réalisé par le Lirigm révèle une tendance lente à l'ouverture, de l'ordre du mm par an.

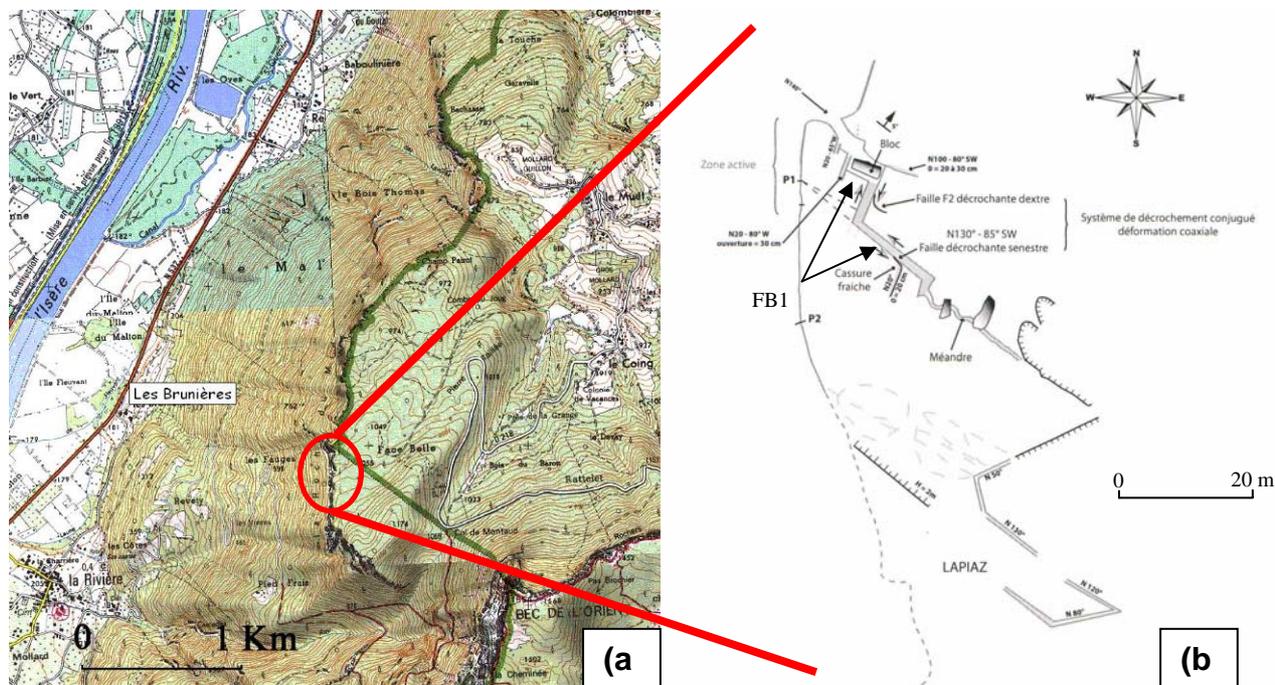


Figure 1. (a) Plan de situation du site du Rocher du Midi et (b) schéma montrant la géométrie des fractures en surfaces.

Le Rocher du Midi est constituée de calcaires urgoniens inférieurs, à faciès calcaire à pâte fine ou cristalline, avec variations latérales et conditions de sédimentation peu profondes à péri récifales. La partie inférieure de la falaise est constituée, sous le niveau de la vire principale, de calcaires roux progressivement plus grenus (Fig. 2). La falaise appartient aux grandes corniches calcaires du N-E du Vercors à regard W et léger pendage général amont. Au niveau tectonique, le petit chaînon de la Roche du Midi est pris en écharpe par la faille inverse de Montaud (Gidon et Arnaud, 1978), orientée NE-SW, qui passe à environ 250m à l'Est du site. Le caractère structural polyphasé est marqué par le rejet vertical du compartiment E oblique sur les plis et les structures, et par les déformations sans doutes anciennes (failles et plis) qui leur donnent localement un caractère chevauchant.

2.2. Contexte structural

Le site étudié se situe en avant de la faille de Montaud (~250m) et des répliques mineures de cet accident ont pu être constatées dans les escarpements et falaises du couloir qui interrompt la continuité de la falaise vers le nord (à ~60m du secteur étudié). Au niveau de la falaise, les mesures de fracture réalisées ont mis en évidence deux familles bien individualisées : Fb N110° à 135° verticales et Fa N20° à 50° verticales (figs. 3a et 3b). Ces deux familles présentent une bonne continuité souvent de haut en bas de la falaise (Fig.2). Les mesures d'orientation réalisées lors de descentes en rappel sur la paroi (figs. 3c et 3d), ont confirmé celles en surface. L'ouverture importante des fractures s'explique par les phénomènes de dissolution karstique (lapiaz sur le plateau). Une certaine variation dans l'inclinaison des pendages (60° à verticaux) a localement pu être observée (figs. 3a et 3b).

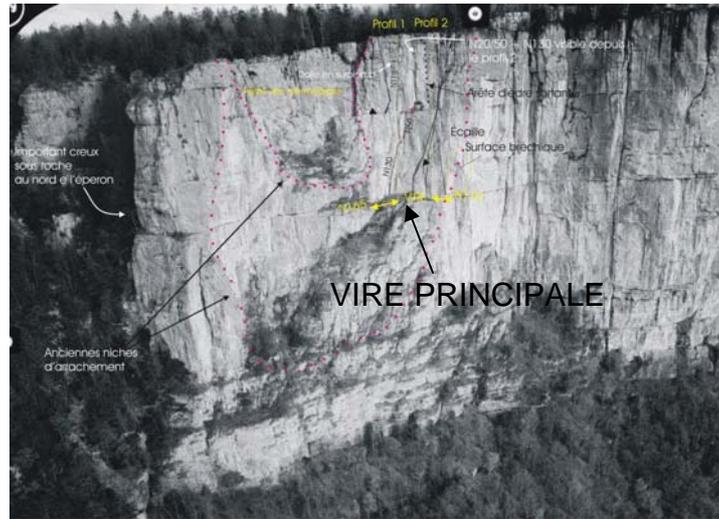


Figure 2. Photographie aérienne (vue vers le NE) du site du Rocher du Midi avec des observations morphologiques et structurales.

Elle pourrait résulter des manifestations chevauchantes décrites dans le contexte tectonique régional et expliquer les ondulations et relais couramment observés sur le secteur d'étude. Une fracture majeure, notée Fb1, d'ouverture métrique pré découpe fortement le plateau au niveau du secteur d'étude (Fig 1b).

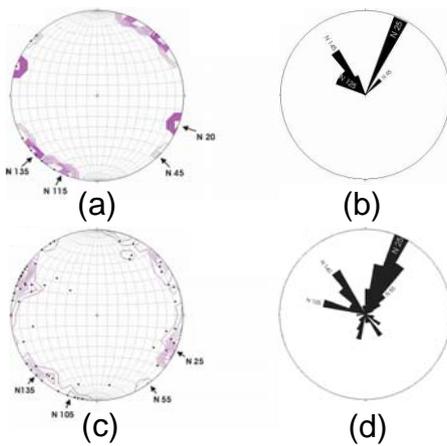


Figure 3. Stéréogrammes de Schmidt des fractures mesurées en surface (a) et en paroi (c), et diagrammes en rose correspondants en surface (b) et en paroi (d). Lors des relevés en parois, le pendage n'a pas été mesuré.

3. Morphologie numérique

L'objectif de cette partie est de fournir un modèle numérique de la topographie de la paroi, dans sa zone d'intérêt. Pour cela, une double démarche a été entreprise : d'une part une approche classique par photogrammétrie et une approche nouvelle par imagerie lidar d'autre part.

3.1 Les données photogrammétriques

L'approche photogrammétrique consiste à recueillir une série de clichés argentiques (numérisés après développement) ou d'images numériques de l'objet étudié. Chacune des images ainsi obtenues représente une projection plane centrale de l'objet 3D. A partir de deux images ayant une partie commune et de quelques points connus en coordonnées dans la zone

de recouvrement, il est possible, par recoupement des deux projections, de déterminer les coordonnées 3D de tout point de la zone commune. L'intérêt de cette méthode est de permettre une analyse structurale fine et précise. Ses inconvénients sont sa lourdeur de mise en œuvre et la difficulté, voire l'impossibilité pratique de l'automatiser pour obtenir rapidement un modèle topographique de la surface.

Les clichés ont été numérisés au pas de 12 μm , résultant en des images dont la taille utile est de 13000x9000 pixels. La taille du pixel résolue sur l'affleurement est comprise entre 2 et 3 cm. Pour pouvoir utiliser ces images numériques, nous avons au préalable matérialisé sur la paroi des croix de peinture dont la position a été mesurée à l'aide d'une station totale. Les modèles stéréoscopiques ont ensuite été établis à l'aide de la suite logicielle de photogrammétrie numérique Poivilliers en prenant en compte, pour l'orientation interne, la calibration complète de l'appareil photo (distance focale, position du point principal et mesures de distorsion) et pour l'orientation externe la position des croix et quelques points homologues entre les images de chaque couple. L'essentiel de la zone d'étude se situant sur un seul couple.

Par cette technique, nous pouvons positionner tout point de la paroi avec une précision de l'ordre de 2 cm dans les 3 dimensions de l'espace. Inversement, il est possible de positionner, en superposition sur le modèle tout point ou ligne connue par ses coordonnées.

3.2 Les données lidar

L'imagerie Lidar est une technique nouvelle qui permet de disposer rapidement de la position 3D d'un très grand nombre de points d'une surface rocheuse naturelle. Un faisceau laser infrarouge balaye la surface à scanneriser. L'imagerie Lidar reprend le principe de la télémétrie laser orientée. Ce principe repose sur la mesure du « temps de vol » d'une impulsion laser pour faire l'aller-retour entre l'ensemble émetteur-capteur et l'objet.

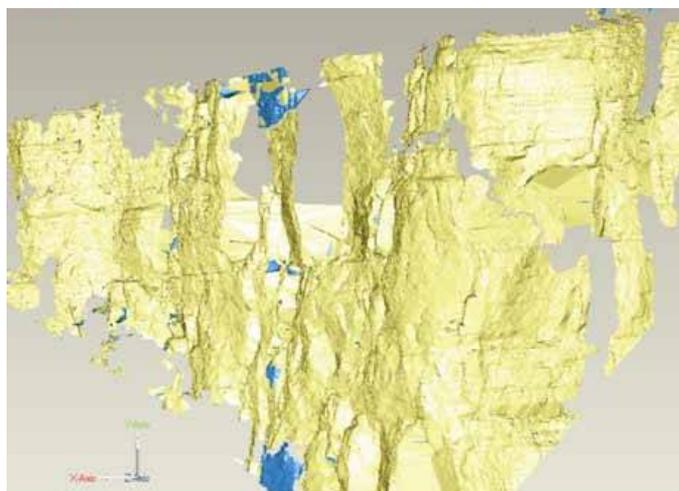


Figure 4. Surfaces synthétiques construites à partir des deux nuages de points. Les zones marquées par l'absence de données sont repérables sur l'image (zones grises ou d'éclairage uniforme)

Le Lidar utilisé est de type lidar terrestre et nécessite une station fixe pour la réalisation de la scannerisation. Le matériel utilisé a été un lidar RIEGL 420i. La précision effective de positionnement des points scannerisés est légèrement supérieure à 1 cm. Nous avons stationné deux points de vues respectivement au nord et au sud du site, à une distance moyenne de 100 m par rapport au centre de la paroi. Notons que l'incidence moyenne de l'éclairage laser est fortement rasante et a occasionné des zones d'ombre importantes (fig. 4).

La triangulation peut-être réalisée en fonction de l'ordre d'acquisition des points par le lidar, ce qui permet une absence d'ambiguïté dans la triangulation (Alberts, 2004 ; Bern 1997), l'absence de trous dans la triangulation lorsque la surface est trop rasante par rapport à la direction du laser, et enfin une triangulation plus rapide car les calculs nécessitent moins de mémoire vive et

moins de temps de calcul. Cette méthode possède par contre un inconvénient majeur : il est nécessaire de trianguler les différents points de vue séparément et de réunir les surfaces au lieu des nuages de points. Or si réunir les nuages de points ne pose pas de problème au niveau du recouvrement des différents points de vue, réunir les surfaces est plus complexe. Cette méthode est donc très efficace lorsque les points de vue se recouvrent à peine, ce qui était le cas au rocher du Midi, mais est à éviter dans le cas de points de vue avec recouvrement.

L'étape finale est l'élaboration d'une image solide, qui est la surimposition d'une image numérique avec l'information spatiale issue de l'acquisition LIDAR. Ainsi chaque pixel de la photo possède un positionnement.

3.4 Comparaison étude de surface et imageries photogrammétrique et Lidar

Le schéma structural établi à partir des observations en paroi a été comparé au modèle stéréoscopique d'une part et à l'image solide d'autre part. Une attention particulière a été portée sur les plans de fractures qui avaient été identifiés et dont l'orientation avait été mesurée en paroi directement à la boussole. Tous ces plans ont pu être retrouvés aussi bien sur le modèle stéréoscopique que sur l'image solide. Les orientations mesurées sur les images sont comparables à celles faites à la boussole (Fig. 5).

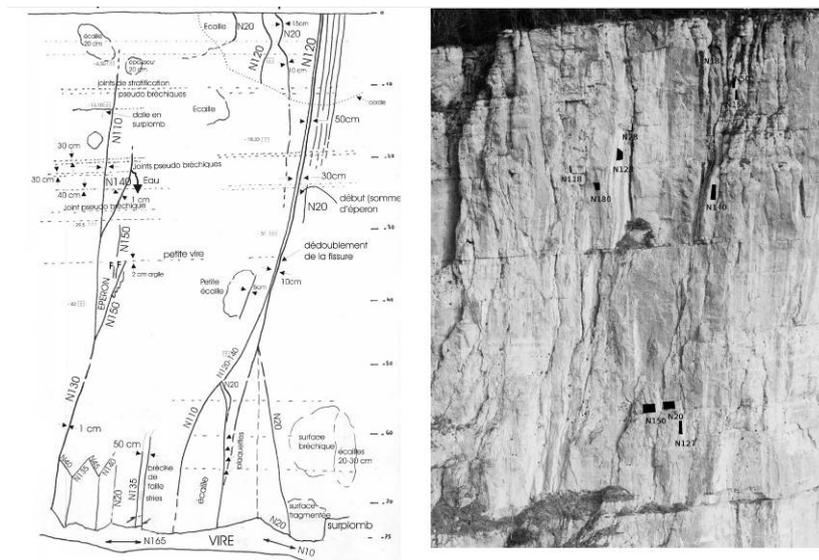


Figure 5. Comparaison entre les mesures structurales réalisées en paroi (à gauche) et les mesures réalisées directement sur l'image solide et/ou le modèle stéréoscopique (à droite).

Par ailleurs, l'examen des images permettant un levé sur l'ensemble de la paroi, celui-ci est plus exhaustif dans la mesure où certaines zones n'avaient pas été inspectées lors de l'examen direct. Enfin, les mesures effectuées sur les images sont positionnées dans l'espace, contrairement à celle faites en paroi qui ne peuvent être que placées sur un schéma général.

4. Prospection géophysique

Les études géophysiques ont principalement été réalisées à l'aide du Géoradar qui consiste à émettre dans le sol des ondes électromagnétiques (EM) au travers d'une antenne émettrice et de mesurer l'intensité des ondes réfléchies par des obstacles dans le sol, au moyen d'une antenne réceptrice. Quand les ondes frappent la limite entre deux matériaux différents, elles sont renvoyées à un récepteur (antenne). Les résultats – analogue à la sismique réflexion - sont présentés sous forme d'une coupe transversale où la profondeur relative est estimée en temps

aller-retour des ondes. Les ondes EM ont un pouvoir de pénétration inférieur en comparaison aux ondes sismiques mais une plus grande résolution, ce qui la rend particulièrement efficace pour imager la fracturation d'un massif rocheux. Dans des formations géologiques résistives, le radar géologique a été récemment utilisé avec succès pour cartographier des réseaux de fractures 2D ou 3D sur des surfaces horizontales (Grasmueck et al, 2005) ou sur des falaises verticales (Jeannin et al, 2006)

Sur le site étudié, quatre profils radar verticaux (P1, P2, P2b et P3) ont été réalisés sur la falaise avec des antennes non blindées de fréquence 100 MHz et 200 MHz. L'implantation des profils sur la falaise, effectuée avec l'imagerie Lidar, est reprise sur la figure 6. Dans cet article, seuls les résultats du profils P1 seront présentés.

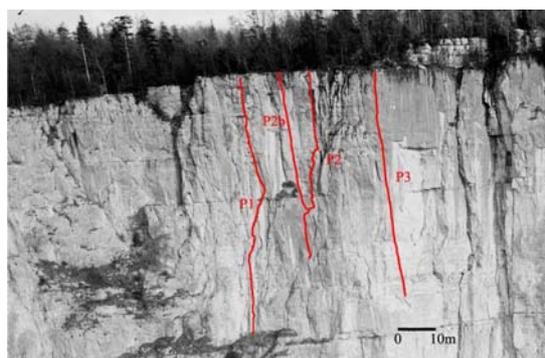


Figure 6: Localisation des profils radar verticaux P1 à P3 sur la falaise.

Le profil P1 vertical, de 65 m de long environ, a fait l'objet de trois acquisitions distinctes, en faisant varier la fréquence (100 MHz et 200 MHz) et le mode d'acquisition (TE ou TM). L'espacement entre deux traces est de vingt centimètres. La figure 7 montre les radargrammes acquis en mode TE à 100 MHz pour le profil vertical ainsi que pour trois profils horizontaux. Les deux premiers, P1h65 et P1h42 (de 2.75 m et 2.25 m de longueur, respectivement) se trouvent à 5 mètre et 28 mètres par rapport au sommet de la falaise (aux cotes 65 m et 42 m), tandis que le troisième, réalisé au bas du profil (cote 5 m), a atteint une longueur de 22 mètres environ. Les radargrammes sont présentés en fonction de la profondeur d'investigation, obtenue grâce à l'analyse de vitesse (Dix, 1955) effectuée sur les profils CMP (Hollender, 1999). La profondeur de pénétration maximale pour le profil P1 – 100 MHz (fig. 7) est de 25 mètres en bas de profil. La plupart des réflexions observées sur ce dernier présentent des pendages variant de 60° à 90°, avec des structures en relais et des variations de réflectivité. Grâce aux profils horizontaux, il est possible de déterminer l'orientation des fractures apparaissant sur le profil vertical et de distinguer les deux principales familles de fractures Fa et Fb observées sur le terrain, avec des orientations de l'ordre de N120°-140° et N20°-40°. La fracture Fb1, qui est une fracture d'ouverture métrique prédecoupant le massif, apparaît de manière relativement tenue en surface sur le radargramme. Elle est mise en évidence par une série de réflexions faibles et discontinues (figure 7). Ce résultat provient certainement de son tracé en baïonnette empruntant les familles Fa et Fb et qui génère des réflexions multiples venant de plusieurs azimuts (voir fig. 1b). Par contre, cette fracture apparaît de manière plus nette au-delà de 25 m de profondeur, avec des variations de pente qui suggèrent des relais sur deux familles de discontinuités. La seule réflexion continue sur le radargramme est une fracture (Fa1) dont le pendage varie de 60° à 80° vers l'est, qui apparaît à 8 m de profondeur à partir de la cote 50 m et que l'on suit jusqu'en en bas de profil à 25 m de profondeur. Cette fracture majeure affectant le massif, caractérisée par une orientation NS, est parallèle à la faille de Montaud. Elle n'a pas été mise en évidence lors des relevés géologiques préliminaires mais a été observée lors de la descente dans la fracture ouverte Fb1.

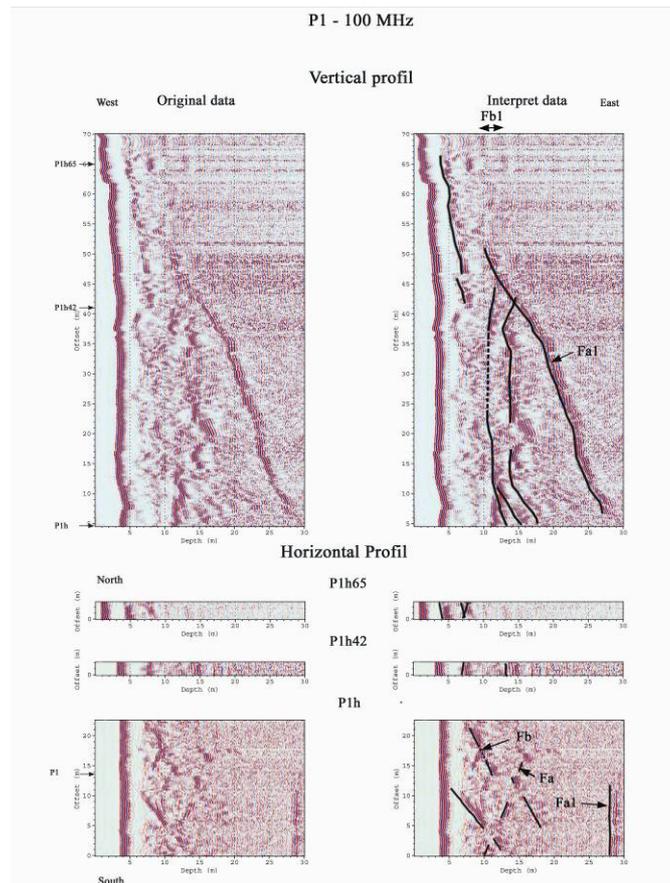


Figure 7. En haut : Profil radar vertical P1 mesuré avec l'antenne 100 MHz. A droite : radargrammes bruts. A gauche : radargramme avec l'interprétation des principaux réflecteurs. En bas : les trois profils horizontaux. Les flèches indiquent les intersections entre les profils horizontaux et le profil vertical.

6. Conclusions

Le site du Rocher du Midi a fait l'objet de reconnaissances géologiques, géodésiques et géophysiques pour évaluer la géométrie et l'état de l'écaille potentiellement instable. Les observations géologiques ont mis en évidence la présence de deux réseaux de fractures sub-verticales N20° (Fa) et N130° (Fb) découpant le massif calcaire constitué de calcaires urgoniens inférieurs. La fracture ouverte, située en arrière de la paroi et reconnue sur 60 m de profondeur, emprunte les deux familles de fractures et son tracé est caractérisé par une structure en baïonnette. Les outils de la morphologie numérique (prises de vue horizontales et balayages laser) ont permis d'obtenir un modèle photogrammétrique avec une résolution centimétrique. Utilisé par les géologues, cet outil a permis de positionner avec précision toutes les observations géologiques réalisées en paroi. Une comparaison des données structurales obtenues en descendant sur la paroi et des résultats tirés de l'image solide et du modèle photogrammétrique montre un très bon accord. D'un point de vue opérationnel, ce résultat est important car il montre que la morphologie numérique permet d'obtenir une information équivalente à moindre coût et à moindre risque. La morphologie numérique a également permis le positionnement aisé des profils radar réalisés sur la paroi avec une précision centimétrique, ce qui constitue une amélioration importante en facilité par rapport aux méthodes de géodésie classique (station totale). Les profils radar en paroi ont montré la présence, à l'intérieur du massif calcaire, de plusieurs réflecteurs dont la pente et l'orientation correspondent aux deux grandes familles de fracture observées en surface. Une grande fracture plane à pendage sud-est, recoupant la fracture ouverte en arrière du front de falaise Fb1 et parallèle à la faille de

Montaud , a été mise en évidence sur trois profils. Sa présence n'aurait pas pu être détectée par les observations géologiques seules. Orientée vers l'Ouest (vers la falaise), cette structure aurait considérablement augmenté l'aléa d'éboulement du compartiment du Rocher du Midi. La fracture ouverte Fb1 est relativement peu mise en évidence sur les radargrammes, probablement en raison de sa structure en baïonnette qui génère des réflexions sur plusieurs plans de fracture et de la diffraction. La profondeur de pénétration des ondes radar est au maximum de 25 m dans les calcaires, en accord avec des mesures antérieures sur d'autres falaises des Massifs de la Chartreuse et du Vercors.

5. Remerciements

Cette étude a été soutenue par le programme de recherche RDT (Risque, Décision, Territoire) du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

6. Références bibliographiques

- Alberts C-P. (2004). *Surface reconstruction from scan paths*. *Future Generation Computer Systems* 20, pp.1285–1298
- Bern, M. 1997. Triangulations, in: J.E. Goodman, J. O'Rourke (Eds.), *Handbook of Discrete and Computational Geometry*, CRC Press, New York, pp. 413–428.
- Dix, C. H. (1955) *Seismic velocities from surface measurements*. *Geophysics*, 20, p. 68-86.
- Empereur-Mot, L. (2000). *La fragmentation naturelle des massifs rocheux. Modèles de blocs et bases de données tridimensionnelles réalisation, exploration géométrique et applications*. *Thèse de doctorat*. Université de Grenoble I.
- Frayssines, M. and D. Hantz (2006) *Failure mechanisms in calcareous cliffs of the Subalpine ranges (French Alps)*, *Engineering Geology*, accepted.
- GIDON M. & ARNAUD H. (1978). - *Carte géologique détaillée de la France 1/50.000° feuille GRENoble*, 2° édition. B.R.G.M., Orléans, une carte avec notice explicative de 32 p. et 4 planches hors-texte.
- Grasmueck M., Weger, R. and H. Horstmeyer (2005) *Full resolution 3D GPR imaging*. *Geophysics*, 70, K12-K19.
- Hollender, F.(1999) *Interprétation de la distorsion des signaux géoradar propagés et réfléchis – Développement d'une tomographie par bandes de fréquences*: PhD thesis, INPG, Grenoble.
- Jeannin M., Garambois S., Jongmans D. and C. Grégoire (2006) *Multiconfiguration GPR measurements for geometrical fracture characterization in limestone cliffs (Alps)*. *Geophysics*, in press.