



PROJET CAMUS :
CARACTÉRISATION MULTI-MÉTHODES
DES ALÉAS D'ÉBOULEMENTS EN MASSE
MULTI-METHODS CHARACTERIZATION OF ROCK
FALLS

Programme RDT
Rapport de fin de contrat

LIRIGM/LGIT
Université J. Fourier
(Grenoble)
Denis Jongmans

Date : 28/02/2007

N° de contrat : 21-D/2003
Date du contrat : 01/09/2004

CARACTÉRISATION MULTI-MÉTHODES DES ALÉAS D'ÉBOULEMENTS EN MASSE

PROGRAMME RDT

D. Jongmans/J. DeParis : LGIT/LIRIGM Université J . Fourier (Grenoble)
T. Villemain/B. Fricout: LGCA: Université de Savoie
A. Mathy/O. Meric : société SAGE-ADRGT
L. Effendiantz : CETE Lyon

1. CONTEXTE GENERAL

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 événements. 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.

Dès 1998, la question des éboulements dans la région Grenobloise a été posée par le service RTM, conscient que la méthodologie d'élaboration des Plans de Prévention des Risques (PPR) prend difficilement en compte les éboulements en masse (limite inférieure de volume mal précisée) du fait de leur faible probabilité et de la difficulté actuelle à qualifier l'aléa. En 1999, sous l'égide du Pôle Grenoblois Risques Naturels, une étude de l'aléa éboulement s'est engagée, dans la région grenobloise et à l'échelle transalpine.

Sur le plan local, une étude des aléas majeurs des falaises calcaires du Y Grenoblois a été commandée en 1999 par le Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Agglomération Grenobloise (SDAU/ SCOT). Son premier but est d'inventorier, décrire et hiérarchiser les aléas majeurs (> 100 000 m³) détectables sur ces 140 km de falaises hautes de 100 à 400 m, qui dominent un bassin où la pression foncière est très forte. La méthode consiste à observer l'ensemble des falaises sur des photographies stéréoscopiques prises d'hélicoptère selon un protocole précis, puis à observer sur le terrain les structures suspectes ou les zones cachées (forêt...). Les aléas détectés sont in fine classés en trois groupes : aléas « qualifiés » (à prendre en compte dans la gestion du territoire), aléas « à qualifier » (informations insuffisantes), ou encore aléas « non qualifiés ».

En parallèle de ces études locales, des projets de recherche méthodologique ont été menés par les partenaires français de ce projet en collaboration avec les services géologiques du Valais (CREALP) et de différentes régions italiennes (Vallée d'Aoste, Piémont, Lombardie) dans le cadre de projets européens Interreg, entre 1998 et 2007.

La présente demande vise à mettre au point une méthodologie opérationnelle d'investigation des aléas qui auront été détectés (« qualifiés » ou « à qualifier ») lors d'une première inspection sommaire des falaises telle que celle réalisée sur la région de Grenoble. Le but de ces investigations plus détaillées est d'obtenir une description géométrique et géomécanique quantifiée suffisamment précise et complète des aléas étudiés, pour permettre une éventuelle qualification ou non-qualification de l'aléa et une meilleure hiérarchisation des aléas entre eux.

2. OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Le projet CAMUS a pour but de mettre au point une méthodologie opérationnelle de reconnaissance de falaises rocheuses, permettant une description quantitative la plus précise possible des compartiments instables et une meilleure caractérisation de l'aléa d'éboulement, point de départ de l'évaluation du risque. 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 (sur le plateau, en paroi, dans les fissures ouvertes) ;
- la morphologie numérique à partir de mesures laser (lidar), permettant une description précise de la géométrie du compartiment et une localisation précise des mesures ;

- 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...)

L'originalité du projet réside dans l'utilisation et le test de techniques récentes - principalement d'imagerie de surface (lidar) et d'imagerie géophysiques -, et dans leur combinaison avec des méthodes traditionnelles afin d'améliorer significativement la connaissance de la structure d'un escarpement rocheux. Pour réaliser cet objectif, le projet CAMUS a rassemblé deux équipes universitaires ayant des compétences en géophysique (LIRIGM) et en morphologie numérique (LGCA), un partenaire scientifique opérationnel (Groupe mécanique des roches, CETE Lyon) et un bureau d'études en géotechnique (SAGE-ADRGT).

Trois sites d'étude ont été sélectionnés – le Rocher du Midi (Massif du Vercors), le Ravin de l'Aiguille (Massif de la Chartreuse) et le Rocher de la Bourgeoise (Massif du Vercors) (Fig. 1) – en raison de leurs caractéristiques différentes. Ils ont tous les trois fait l'objet de mesures structurales, géodésiques et géophysiques et les essais réalisés ont contribué à mettre au point la stratégie de reconnaissance présentée dans le guide méthodologique.

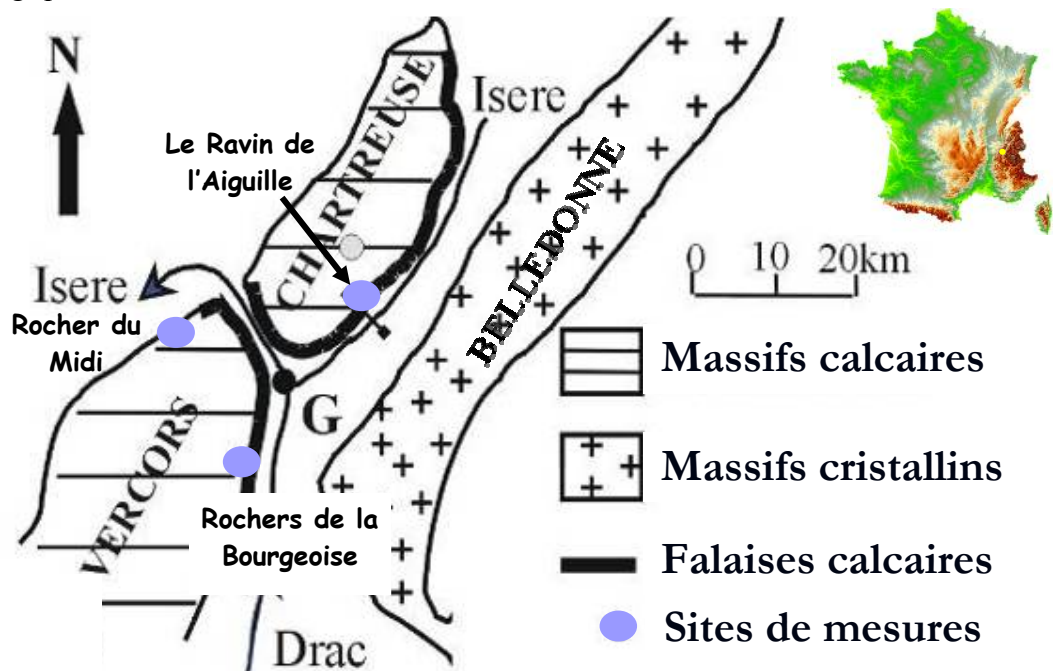


Figure 1 : Localisation des trois sites d'études

3. METHODOLOGIE

Le projet CAMUS a montré l'intérêt du recours aux nouvelles techniques de morphologie numérique (laser ou photogrammétrie) et de géophysique (radar, électrique et sismique) pour la caractérisation de l'aléa d'éboulement. Ces méthodes nécessitent des moyens techniques plus lourds (hélicoptère) et conséquents (portage de matériel, travaux sur cordes) que les méthodes classiques, et sont de mise en œuvre relativement coûteuse. Elles comportent également des phases de traitement et d'interprétation plus complexes.

Le projet a débouché sur une *stratégie de reconnaissance*, détaillée dans un **guide méthodologique** et scindée en trois parties principales (phase préparatoire, phase de reconnaissance, phase de synthèse).comportant chacune plusieurs étapes. Cette stratégie a été

présentée lors de la journée de restitution organisée au CETE de Lyon le 11 octobre 2006 qui a rassemblé plus de cinquante personnes issues de l'ensemble des organismes concernés, techniques, administratifs ou bureaux d'études.

Une vue globale de la stratégie est présentée à la figure 2. Elle comporte 3 phases (préparatoire, de reconnaissance et de synthèse) scindées en plusieurs étapes. Les différentes phases et étapes sont synthétisées par des fiches 2 à 14 présentées dans le guide méthodologique.

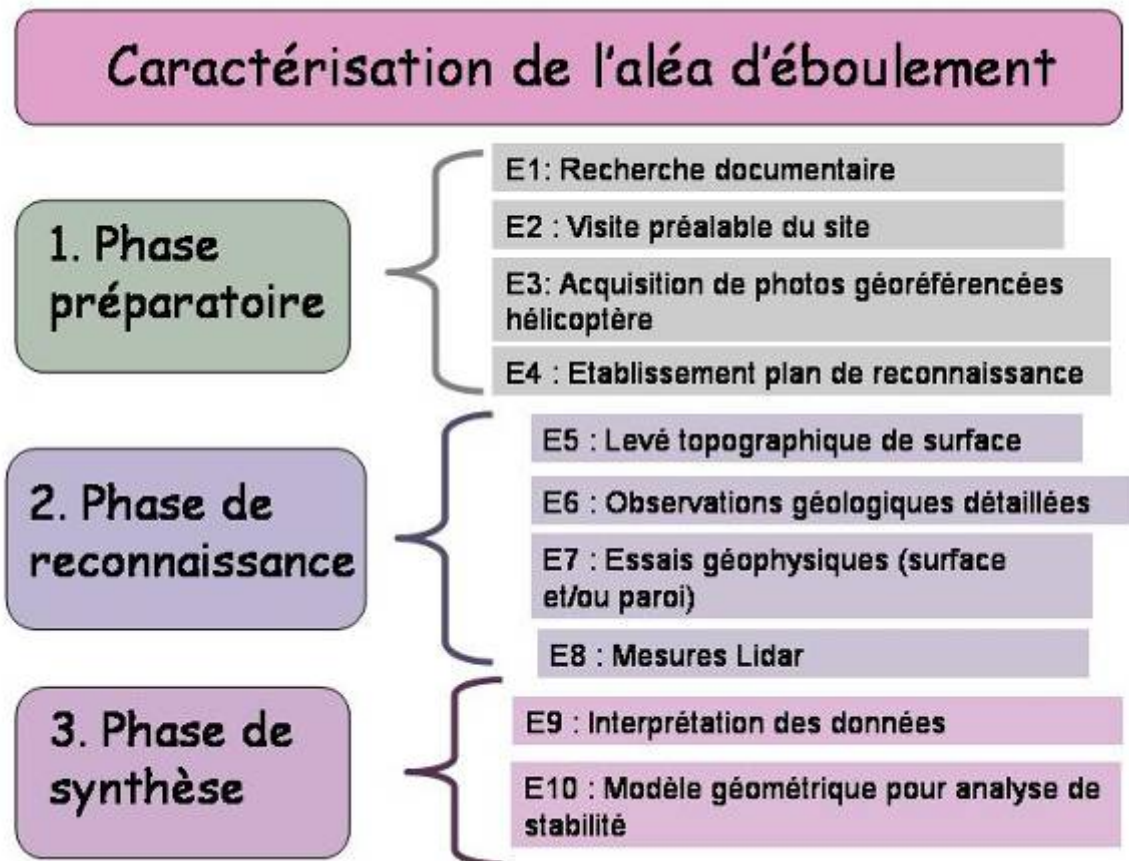


Figure 2 : Présentation des phases et étapes de la stratégie de reconnaissance proposée à l'issue du projet CAMUS.

4. RESULTATS OBTENUS

Le projet **Camus** avait pour objectif de développer une méthodologie de reconnaissance de falaises rocheuses, s'appuyant sur la combinaison de 3 techniques d'observation et de mesures : la prise détaillée d'observations géologique et structurale, la morphologie numérique à partir du balayage laser et l'imagerie géophysique s'appuyant, si possible, sur des mesures radar en falaise.

La prise de mesures d'origines différentes (géologiques, géophysiques et géodésiques) sur ces deux sites a été réalisée en cherchant à optimiser des procédures et à tirer parti de la combinaison des techniques.

Le principal résultat obtenu est la définition de la méthodologie de reconnaissance exposée au chapitre 3 et détaillée dans le guide méthodologique joint à ce rapport.

Dans ce chapitre sont exposés les apports des nouvelles technologies (méthodes géophysiques et morphométriques) qui sont apparus à partir de l'expérience commune acquise

par les quatre équipes sur les trois sites d'investigation (le Rocher du Midi et le Rocher de la Bourgeoise dans le Massif du Vercors et le Ravin de l'Aiguille dans le Massif de la Chartreuse).

4.1 APPLICATION DES METHODES DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE AUX FALAISES AUTOUR DE GRENOBLE

Les essais géophysiques réalisés sur les trois sites ont permis de tirer les conclusions suivantes sur l'application des méthodes.

Sur la falaise

Lorsque les conditions de sécurité et de stabilité le permettent, le radar en falaise apparaît comme la méthode la plus performante puisqu'elle permet de mettre en évidence les discontinuités à l'intérieur du massif avec une résolution de l'ordre du dcm et une pénétration de 30 m maximum dans le type de calcaire étudié (résistivité électrique moyenne de l'ordre de 1000 à 2000 Ω m). En combinant des profils horizontaux et verticaux sur la falaise, cette technique est la seule capable d'obtenir la géométrie et la continuité des fractures à l'intérieur du massif. Sur le site du Rocher du Midi, cette méthode a permis de caractériser la continuité des fractures observées en surface. De plus, une fracture ouverte majeure impossible à déterminer à partir d'observations de surface a été détectée (figure 3). Sur le site du Rocher de la Bourgeoise, le radar a permis de mettre en évidence deux fractures ouvertes d'épaisseur métrique, dont une n'apparaît pas en surface mais a été mise en évidence par la tomographie électrique sur le plateau.

La localisation des profils sur la falaise peut se faire en plaçant des pastilles réfléchissantes qui sont détectées à partir d'une reconnaissance Lidar ultérieure. Cette combinaison du scan laser (Lidar) et du radar s'est avérée très efficace pour positionner facilement les mesures radar sur la falaise.

La méthode du radar en falaise présente cependant une série de limites et de contraintes à bien prendre en compte avant son utilisation :

- La technique n'est applicable que sur un site sécurisé ne présentant pas de risques de chutes de blocs
- L'altération du rocher peut localement entraîner une atténuation importante des ondes radar, rendant très faible la profondeur de reconnaissance. Lors de cette étude, ce problème ne s'est posé que sur un seul profil (Rocher du Midi).
- Si la fracture présente un tracé très irrégulier (en baïonnette), les diffractions et réflexions multiples peuvent rendre difficile la détermination de sa géométrie (Rocher du Midi).
- La mise en œuvre de cette technique nécessite un équipement du site et la prestation d'une équipe rompue au travail sur corde.
- Sauf si des vires sont disponibles sur le site, les acquisitions de profils horizontaux en paroi sont de réalisation plus délicate (techniques d'accès) que les profils verticaux
- La limite à 30 m de la profondeur de pénétration réserve cette technique à des objets de relativement faible volume (plusieurs dizaines de milliers de m^3).

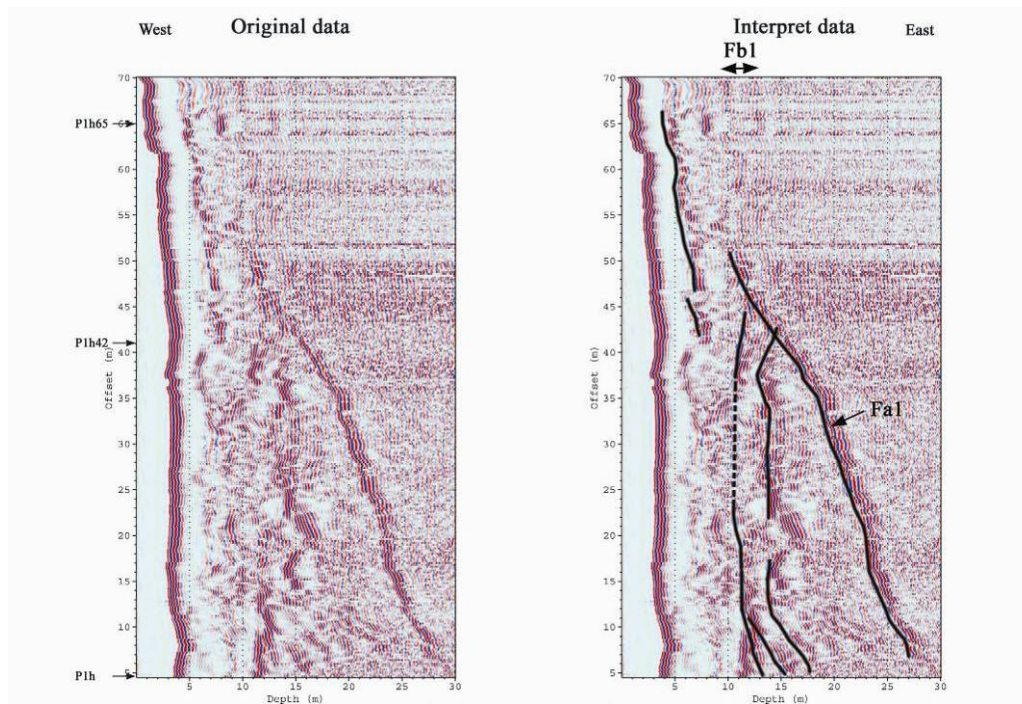


Figure 3 : Site du Rocher du Midi. Profil radar PI (antenne de 100 MHz). A gauche : radargramme brut sur le profil vertical. A droite : signaux interprétés avec la position des principaux réflecteurs.

Sur le plateau

Les investigations géophysiques réalisées sur le plateau ont pour but de déterminer la continuité des discontinuités mises en évidence en paroi. Des profils de tomographie sismique et électrique 2D ont été réalisés, en général parallèlement à la direction de la paroi. Les profils de tomographie électrique ont systématiquement permis de localiser les zones fracturées recoupant le massif, soit par une diminution de la résistivité électrique si la fracture est remplie d'argile (figure 4a, Ravin de l'Aiguille), soit par une augmentation de ce paramètre si la fracture est remplie d'air (figure 4b, Rocher du Midi ; figure 4c, Rocher de la Bourgeoise). La résolution horizontale est directement liée à l'écartement entre les électrodes et est d'ordre métrique. Sur les essais sismiques, les fractures se marquent par une diminution de la vitesse sismique ou, de façon équivalente, par une augmentation du temps de parcours. Sur le site du Ravin de l'Aiguille où l'utilisation du radar en paroi est impossible en raison de l'instabilité de la paroi, la taille du dièdre a pu être contrainte par des mesures électriques et sismiques sur le plateau avec une résolution métrique et une pénétration de 20 à 30 m. L'intérieur du dièdre, plus fracturé, est caractérisé par une augmentation de la résistivité électrique ainsi que par une diminution de la vitesse sismique de propagation (Ravin de l'Aiguille), par rapport au terrain encaissant. La limite du dièdre a été bien mise en évidence à partir de la variation de temps de propagation pour des tirs en éventail.

Les techniques géophysiques sur le plateau présentent les limites et restrictions suivantes :

- La profondeur d'investigation est réduite à quelques dizaines de mètres et la résolution diminue avec la profondeur. Les techniques permettent donc principalement de localiser les fractures à proximité de la surface du sol.
- La réalisation et la localisation des profils peuvent être rendues difficiles par la présence d'une végétation boisée.

La technique de tomographie électrique, facile à mettre en œuvre et rapide à interpréter, est recommandée sur le plateau.

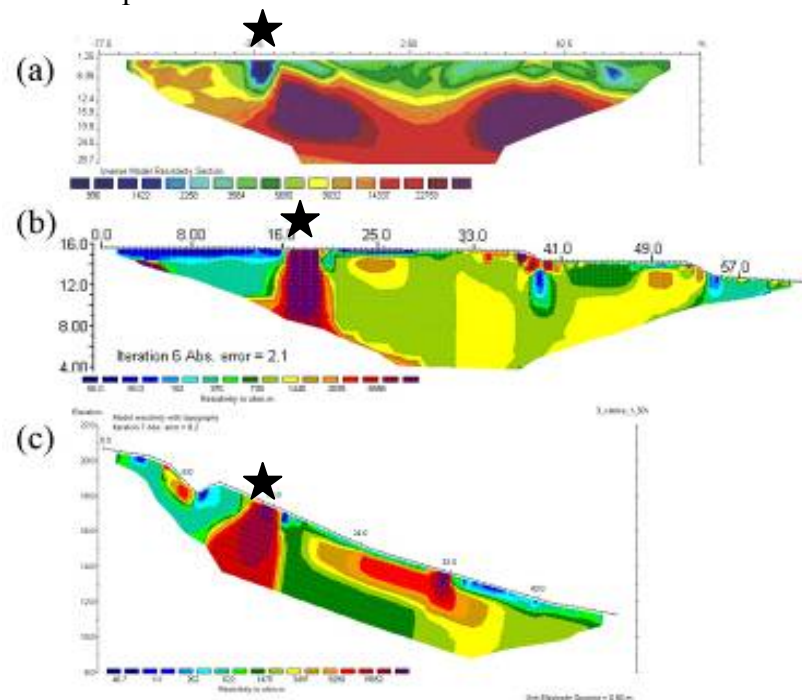


Figure 4 : Tomographie électrique réalisée sur le Ravin de l'aiguille (a), le Rocher du midi (b) et le Rocher de la bourgeoise (c). La position des fractures est indiquée par une étoile.

4.2 APPLICATION DES TECHNIQUES DE PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE AUX FALAISES CALCAIRES

Seules à même d'apporter une qualité homogène dans la représentation de la paroi, les techniques de morphologie numérique compensent les difficultés d'accès et d'observation terrestre. Par rapport aux techniques de photointerprétation classiques, elles apportent une plus grande finesse d'analyse et la possibilité de relever l'orientation des discontinuités. L'examen des parois en technique alpine ne sera utilisé ici qu'en complément ponctuel et en calage des techniques de morphologie numérique.

Conditions et restrictions d'utilisation des techniques basées sur une approche photogrammétrique.

Idéalement, les clichés doivent être pris perpendiculairement à la paroi étudiée, avec un recouvrement compris entre 60% et 80%, selon des axes approximativement parallèles et un entre-axe du même ordre de grandeur que la distance à la paroi. De telles conditions ne peuvent généralement pas être réalisées depuis le sol. La nécessité de recourir à une haute résolution empêche l'utilisation de prises de vue avion. Le recours à l'hélicoptère est donc imposé. Avec l'avènement de la photographie numérique haute définition (e.g. 10 mégapixels), la réalisation de clichés exploitables en photogrammétrie ne nécessite plus d'avoir recours à des bureaux spécialisés. Il suffit de disposer d'un appareil équipé d'un objectif à focale fixe et grand angulaire qui aura été calibré. Lors de la réalisation des prises de vues, on définit au pilote une trajectoire à suivre, approximativement linéaire et équidistante de la paroi. Cette trajectoire sera suivie à faible vitesse (quelques m/s) et les

clichés seront pris en très grand nombre de manière à pouvoir ensuite sélectionner les meilleures combinaisons.

L'exploitation quantitative des clichés nécessite, préalablement à prise de vue, la matérialisation de points d'amer (points de référence). Plus que leur nombre, la géométrie de ces points d'amer est importante. Sur un couple donné, ils doivent être répartis de la manière la plus tridimensionnelle et la plus dispersée possible. La position des points d'amer doit être déterminée avant toute exploitation des clichés mais peut être réalisée après la prise de vue. Il n'est en principe nécessaire que d'orienter un seul couple de photos, l'orientation de suivantes pouvant se déduire par la technique dite d'aérotriangulation. En l'absence de points d'amer, il sera nécessaire d'utiliser des détails naturels du terrain comme points de référence. Si aucune de ces techniques n'est possible, il faudra nécessairement faire appel à une technique d'orientation directe des clichés combinant l'usage du GPS et d'une centrale d'orientation.

Même si l'ensemble des opérations préalables à réaliser (stéréopréparation, prise de vue, orientation des clichés) ne présente pas de complexité apparente, nous recommandons néanmoins de sous-traiter cette opération auprès de bureaux spécialisés pour en assurer une réalisation parfaite. Cela est d'autant plus intéressant qu'un nombre croissant de ces cabinets dispose maintenant des outils d'orientation directe dispensant de points d'amer.

L'observation des photos en couples stéréoscopique doit être réalisée avec un équipement informatique de vue stéréoscopique et un logiciel spécifique. Plusieurs solutions techniques existent actuellement sur le marché. La plupart des applications de ce type étant développées pour la photogrammétrie aérienne classique, il convient de s'assurer que la solution technique retenue est à même de traiter convenablement les cas de photogrammétrie dite terrestre (à vues horizontales). Une fois le travail préalable réalisé, l'opérateur dispose d'un modèle stéréoscopique de la paroi sur lequel il peut identifier et hiérarchiser des discontinuités. Cette phase qualitative est suivie d'une phase quantitative de calcul de l'orientation et du positionnement spatial des surfaces détectées.

Les **contraintes** relatives à cette démarche sont principalement :

- Les facteurs inhérents à la prise de vue (choix d'un jour où l'éclairage est favorable) ;
- La disponibilité d'un hélicoptère et du matériel de prise de vue spécifique (appareil calibré métrique (cf. 2.3.2)) ;
- La nécessité d'un créneau météo favorable ;
- La végétation arbustive (rare mais pas impossible en paroi) (éviter la saison de pousse des feuilles).
- La possibilité matérielle de mettre en place des points d'amer et de les mesurer avec précision si aucun dispositif d'orientation directe n'est utilisé.

La **restriction principale** de la photogrammétrie est liée à l'affleurement : les plans parallèles à la paroi sont sous-échantillonnés pour des raisons géométriques car peu recoupés par celle-ci. Du fait de l'irrégularité généralement constatée des plans de falaise, cette restriction tombe dans la plupart des cas. Néanmoins, le recours à cette technique de photogrammétrie est incontournable, surtout en cas d'impossibilité d'examen visuel rapproché.

Conditions et restrictions d'utilisation des techniques basées sur les images solides.

La mise en œuvre de la scannerisation laser lidar terrestre requiert des stations d'acquisition (deux ou plus) au niveau de la ligne de crête, de part et d'autre de l'objet à reconnaître (figure 5, site du ravin de l'Aiguille). Des photos sont systématiquement prises avec la même orientation que le dispositif laser lidar pour y greffer les données numériques issues de l'acquisition laser et donner une image solide. Ceci ne peut se faire sans un référencement commun des deux sources de données. De petites cibles réfléchissantes de type

plaquettes catadioptriques peuvent être disposées dans le champ du scanner. Ces petits objets apparaissent comme des points brillants. Il faut néanmoins s'assurer que le scanner utilisé n'utilise pas un dispositif d'élimination des cibles trop réfléchissantes. Si c'est le cas, il faudra alors utiliser des objets de forme (e.g. sphères de diamètre adapté) pour assurer le géoréférencement des données. Ces cibles devront être localisées à l'aide de moyens topométriques classiques. Les conditions requises au niveau de l'appareil photographiques sont identiques à celles de la photogrammétrie (appareil calibré métrique petit au moyen format).

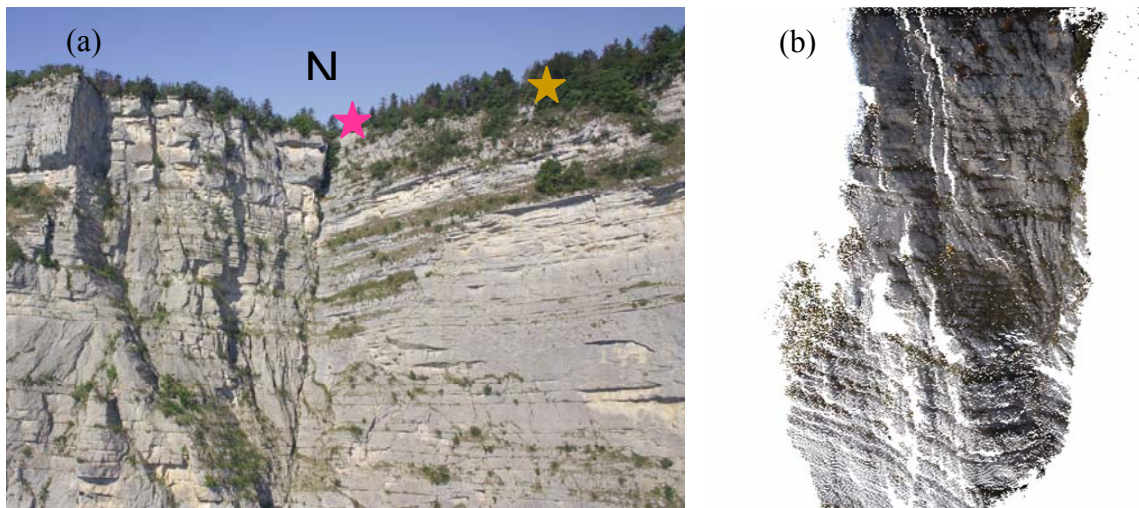


Figure 5 : Site du Ravin de l'Aiguille (a) Points de vue Laser situés le rebord de la paroi au nord du site (b) perspective 3D du nuage de points colorisé de la paroi du Ravin de l'Aiguille. Vue correspondant au point de vue proche et rasant.

Les **contraintes inhérentes à la scannerisation terrestre** sont les suivantes :

- trouver des points de vue permettant le balayage du site avec un angle suffisamment ouvert, faute de quoi les zones d'ombre générées par l'effet de masque des parties en saillie prendront une importance rédhibitoire. Le contexte morphologique du site (indentation de la ligne de crête) doit avoir été évalué avant de lancer l'opération ;
- être en mesure de disposer les cibles réfléchissantes dans le champ commun de prise de vue du scanner et des photographies.

Les mesures faites sur l'image solide doivent être assorties des **restrictions** suivantes:

- les plans parallèles (ou proches de la parallèle) à l'axe du faisceau laser ne sont pas bien échantillonnés (imprécision par manque de points). Cette restriction tombe en utilisant plusieurs images solides, établies à partir de scannerisations d'orientations significativement différentes
- les plans parallèles à la paroi sont sous-échantillonnés pour des raisons géométriques car peu recoupés par celle-ci (restriction identique à celle de l'approche photogrammétrique).

Stratégies d'utilisation :

Dans le cas où la configuration topographique permet une bonne implantation des points d'acquisition LIDAR, l'approche image solide permet l'identification de plans mais renseigne mal sur leur continuité dans le terrain et sur l'ouverture des discontinuités détectées. Le recours à l'examen stéréoscopique des couples de photos de qualité photogrammétrique

permet en complément une première appréciation de ces critères. Si la qualité du rocher l'autorise (du point de vue de la sécurité), quelques descentes sur corde permettront de vérifier, d'apprécier l'ouverture et le remplissage des discontinuités identifiées.

Dans le cas où la configuration topographique ne permet pas une bonne implantation des points d'acquisition il reste le recours à la scannerisation laser lidar hélicoptée. Cette technique présente en outre l'avantage de pouvoir se passer de points de référence terrestre car elle est nécessairement accompagnée d'un positionnement et d'une mesure d'attitude obtenus par une combinaison GPS-centrale d'orientation. Les performances actuelles de telles plateformes d'acquisition ne permettent pas d'obtenir des pixels de taille inférieure à 10cm. Le recours à cette technique est donc limité aux sites qui présentent des surfaces de discontinuités dont la surface est de l'ordre de 50 dm² minimum.

Stratégies et développements futurs des techniques de morphologie numérique :

Une amélioration significative des performances de la technique de scannerisation laser lidar hélicoptée permettrait d'envisager son utilisation systématique, voire l'abandon des acquisitions terrestres. Cela lèverait la limitation due à l'aspect rasant des acquisitions terrestres. Dans l'immédiat nous retiendrons l'aspect synergie et complémentarité des deux méthodes, la photogrammétrie offrant en plus de l'absence de "zones d'ombre", la possibilité d'un examen stéréoscopique détaillé et confortable de la paroi. L'approche image solide reste néanmoins plus simple d'emploi pour mesurer l'orientation de discontinuités tout en donnant une bonne restitution 3D de la paroi.

5. IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

5.1. IMPLICATIONS PRATIQUES

Les retombées du projet Camus sont principalement dans la définition d'une nouvelle stratégie de reconnaissance de compartiments reconnus comme potentiellement instables, basée sur la combinaison de technologies nouvelles et de méthodes classiques. Il a été montré sur les trois sites d'études que méthodologie proposée permet d'améliorer la qualité et la précision des résultats obtenus lors de la phase de reconnaissance. En particulier sur le site du Ravin de l'Aiguille, les reconnaissances effectuées ont permis de préciser le volume du dièdre, initialement évalué de 125.000 à 280.000 m³, et maintenant estimé à 190.000 m³. Egalement la géométrie du dièdre et ses conditions d'appui ont pu être précisées. Ces résultats sont essentiels pour l'évaluation de la stabilité du compartiment étudié.

5.2. RECOMMANDATIONS

Les recommandations issues du projet sont reprises dans le guide méthodologique joint à ce rapport et synthétisées dans les paragraphes 3 et 4.

5.3. VALORISATION

Les résultats obtenus lors de ce projet ont été présentés lors de la journée de restitution organisée le 10 octobre 2006 au CETE de Lyon. Cette manifestation a regroupé 50 personnes issus des organismes d'état (DDE, RTM, Conseil général), de bureaux d'études ou d'instituts de recherche. La matinée a été consacrée à la présentation et à la discussion des résultats du projet CAMUS, tandis que dans l'après-midi ont été présentés des études réalisées par des instituts ou bureaux d'études extérieurs au projet.

5. PARTENARIATS

Le projet a regroupé quatre partenaires (deux laboratoires universitaires, un bureau d'études et un organisme scientifique et opérationnel) apportant des compétences scientifiques et opérationnelles complémentaires. La réalisation en commun de mesures d'origines différentes (géologiques, géophysiques et géodésiques) sur les trois sites a été réalisée en cherchant à optimiser des procédures et à tirer parti de la combinaison des techniques. A ce niveau, la coordination des équipes des 4 partenaires s'est avérée particulièrement fructueuse avec le développement d'une véritable synergie, et les leçons tirées de ces expériences communes ont servi de base pour la définition de stratégie de reconnaissance détaillée dans le guide méthodologique joint à ce rapport.

6. REFERENCES

Caractérisation de l'aléa d'éboulement

Etude du risque d'écroulement sur les falaises du Y Grenoblois, Schéma de Cohérence Territoriale (ex SDAU), 2000-2001-2002-2003.

Groupe "FALAISES", Programme Interreg 2C (2001). Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises - Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin.

PAULY J.-C., PAYANY M. (2002). Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin géographique : cas des gorges du Tarn et de la Jonte. Bull. des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 236, p. 37-57.

ROUILLER, J.-D., JABOYEDOFF, M., MARRO, C., PHILIPPOSIAN, F. et MAMIN, M. (1998).

MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR 31, VDF, Zurich, 239 p.

Prospection Géophysique

Dubois J. et M. Diament, Géophysique, 2ème édition, 2001, Dunod.

Jongmans D. and Garambois S., Geophysical investigation of landslides: a review, 2007, Bull. Soc. Geol. France, in press.

Kearey P. & M. Brooks, 2000, An introduction to Geophysical Exploration, second edition, 2000, BlackwellScience.

Reynolds J.M., An introduction to applied and environmental geophysics, 1997, Wiley.

Sharma P.V., Environmental and engineering geophysics, 1997, Cambridge University Press.

Telford W.M., L.P. Geldart, R.E. Sherif, D.A. Keys, Applied Geophysics, 1990, Cambridge University Press.

Morphométrie numérique

Alberts C-P. 2004. Surface reconstruction from scan paths. Future Generation Computer Systems 20, pp.1285–1298

Bornaz L., Dequal S. The Solid Image: a new concept and its applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12

Kasser M., Egels Y. 2002 Photogrammétrie numérique. Taylor & Francis Ed. 351 p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 1999. L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. LCPC Ed. 132 p.

Mikhail E.M., Bethel J.S., McGlone J.C. 2001. Introduction to modern photogrammetry. John Wiley & Sons Ed. 479p.

Skaloud J., Vallet J., Keller K., Vessière G., Kölbl O. 2005. Helimap: Rapid Large scale Mapping Using Handheld LiDAR/CCD/GPS/INS Sensors on Helicopters. ION GNSS Congress, Long Beach, sept. 2005.

Wilfried L. 2006 Digital Photogrammetry- A Practical Course. Springer Ed. 214 p.

Zhu Q., Li Z., Gold C. 2004. Digital Terrain Modeling- Principles and Methodology. Taylor & Francis Ed. 344

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	
Publications scientifiques à paraître	
Publications scientifiques prévues	Engineering geology, Rock mechanics
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	JNGG 2006, GPR 2006, EGU Vienne 2006
Participations futures à des colloques	12 th Int. Conf. Landslides, China, 2008
THESES	
Thèses passées	
Thèses en cours	Thèses de J. Deparis et de B. Fricout
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	Comptes-rendus de colloque de Lyon
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT - FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	Journée de restitution 10 octobre 2006 CETE Lyon
Enseignements/formations prévus	
EXPERTISES	
Expertises menées	
Expertises en cours	
Expertises prévues	
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites :	Guide méthodologique
méthodologies en cours d'élaboration	
méthodologies prévues	
AUTRES	
Précisez...	

RESUMES

En français

RESUME

1/2 à 1 page

Les éboulements en masse 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 événements. 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.

Le projet CAMUS avait pour but de mettre au point une méthodologie opérationnelle de reconnaissance de falaises rocheuses, permettant une description quantitative la plus précise possible des compartiments instables et une meilleure caractérisation de l'aléa d'éboulement, point de départ de l'évaluation du risque. Trois sites tests (le Rocher du Midi et le Rocher de la Bourgeoise dans le Massif du Vercors, le Ravin de l'Aiguille dans le Massif de la Chartreuse), présentant des caractéristiques de forme et de volume d'instabilité potentielle différentes, ont été choisis pour tester ces techniques et mettre au point une méthodologie pratique de reconnaissance détaillée.

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 (sur le plateau, en paroi, dans les fissures ouvertes) ;
- la morphologie numérique à partir de mesures laser (lidar), permettant une description précise de la géométrie du compartiment et une localisation précise des mesures ;
- 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...)

L'ensemble des résultats obtenus ont permis de proposer une nouvelle méthodologie (voir guide méthodologique) de reconnaissance en falaise, qui a été présentée aux utilisateurs potentiels lors d'une journée de restitution (le 11 octobre 2006).

MOTS CLES

EBOULEMENT, ALEA, RECONNAISSANCE, MORPHOMETRIE NUMERIQUE, IMAGERIE GEOPHYSIQUE

In English

ABSTRACT

1/2-1 page

Rock falls in cliff areas pose critical problems to the risk management in mountain areas, due to the suddenness of the phenomena and the lack of precursors. The hazard assessment is made difficult by, first, the difficulty to perform surface observations, second the lack of information about the internal structure of the rock mass and, third, the little knowledge about the triggering mechanism.

CAMUS

The CAMUS project aimed at developing a new methodology of cliff investigation, allowing a more quantitative determination of the geometry of the unstable blocks and a better rock fall hazard assessment. Three test sites were chosen in the Chartreuse and Vercors massifs (French Alps) around Grenoble, which exhibit different shape and volume characteristics.

The proposed methodology is based on the combination of three main techniques of investigation:

- Structural and geological measurements (on the plateau, on the cliff face and in open fractures)
- Numerical morphology using Lidar measurements, which allows the face geometry to be accurately known and the measurements on the cliff to be located.
- Geophysical tests on the cliff and on the plateau, in order to locate the main fractures and to follow them inside the mass.

From the results, a new methodology has been defined and is detailed in a guide. It was presented to the end-users during a workshop held in Lyon (11th of October, 2006).

KEY WORDS

Rock fall, Hazard, Investigation, Numerical Morphometry, Geophysical Imaging

CAMUS

RAPPORT SCIENTIFIQUE

TITRE DU PROJET

NOM DU PROGRAMME

Nom du responsable scientifique du projet

Noms des autres partenaires scientifiques bénéficiaires

Note importante

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

ANNEXE : TEXTES DES PUBLICATIONS

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Merci de joindre des tirés à part, et d'indiquer les restrictions éventuelles en termes de droits de reproduction (notamment sur le site Internet du MEDD). Notez que ce rapport pourra être mis en ligne sur le site Internet du MEDD.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES A PARAITRE

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PREVUES

ANNEXE : PARTIE CONFIDENTIELLE

Vous pouvez insérer ici toute information ou résultat qui revêt une part de confidentialité.

Merci de préciser le degré de confidentialité de ces données.

Nous vous recommandons de préciser dans la partie non confidentielle l'existence de ces données confidentielle et d'expliquer la raison de leur confidentialité.

Cette partie ne sera pas diffusée sur le site Internet du Ministère.

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.