

20. Caractérisation, suivi et assainissement des instabilités rocheuses à la carrière d'Arvel*

par

Renaud CHANTRY¹, Andrea PEDRAZZINI², Michel JABOYEDOFF²
& Etienne STAMPFLI¹

Résumé.—CHANTRY R., PEDRAZZINI A., JABOYEDOFF M. & STAMPFLI E., 2013. Caractérisation, suivi et assainissement des instabilités rocheuses à la carrière d'Arvel. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 243-261.

Suite à l'éboulement d'un dièdre de 20'000 m³ dans une importante carrière de calcaire produisant du ballast pour chemins de fer en bordure du Lac Léman (Suisse), CSD et l'IGAR sont intervenus pour réaliser une analyse structurale. Celle-ci a confirmé la présence d'instabilités menaçantes, notamment un dièdre de volume proche de celui qui s'est éboulé. Après évaluation des conditions de stabilité, et étant donné les conditions d'accès particulièrement difficiles, il a été décidé de soumettre ces instabilités à un monitoring par LiDAR terrestre couplé à un système interférométrique SAR (GB-InSAR) et un suivi des conditions météorologiques locales. Ce dispositif complexe permet de réaliser un suivi des parois rocheuses avec une précision de l'ordre du millimètre sans pose de réflecteurs ou d'extensomètres dans les zones menacées par le danger d'éboulement. Grâce à ce suivi, un système d'alarme a été mis en place. Couplé à une grille d'évaluation du risque d'éboulement, il a permis la réouverture partielle du site industriel situé sous l'instabilité, dans des conditions de risque tolérables. Grâce aux analyses réalisées, les zones les plus actives des parois ont pu être identifiées de manière à développer une solution d'assainissement de l'ensemble de la carrière.

Mots clés: instabilités rocheuses, dièdre, radar interférométrique, carrière, gestion du risque.

Abstract.—CHANTRY R., PEDRAZZINI A., JABOYEDOFF M. & STAMPFLI E., 2013. Rock slope instabilities characterization, monitoring and management in the Arvel quarry. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 243-261.

After a 20'000 m³ rock fall in an important limestone Swiss quarry producing ballast, CSD and IGAR have been called to realise a structural and stability analysis. This analysis confirmed the hazard level of some instabilities, i.e. another 20'000 m³ wedge similar to the fallen one. Because of the huge risks, a monitoring of the whole quarry with LiDAR and GB-INSAR has been performed for more than 20 months. This complex system coupled with risk management authorized the quarry to restart exploitation and gave the possibility of identifying the most active zones of the cliffs.

Keywords: rock slide, wedges, interferometric radar, active quarry, risk management.

¹CSD Ingénieurs SA, Lausanne; tél.: +41 (0)21 620 70 00. E.mail: r.chantry@csd.ch

²Centre de Recherche en Environnement Terrestre (anciennement Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque), Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse.

*L'article prend en compte l'état des travaux à fin 2010-début 2011 et non les changements survenus depuis.

INTRODUCTION

En mars 1922, un éboulement de 615'000 m³ causé par l'exploitation du rocher calcaire au moyen de la technique du foudroyage avait eu lieu aux Carrières d'Arvel à Villeneuve, situées dans le Canton de Vaud, Suisse (figure 1). La cicatrice de cet éboulement est toujours visible sur la face gauche de la carrière actuelle du Châble du Midi. Au cours de l'exploitation, plusieurs autres éboulements d'importance moindre ont eu lieu dans l'enceinte des carrières.

En décembre 2008, suite à des conditions climatiques défavorables, un nouvel éboulement de 20'000 m³ a eu lieu au sommet de la carrière du Châble du Midi, entraînant la fermeture provisoire de celle-ci pour raisons de sécurité.

CSD Ingénieurs et l'IGAR sont alors intervenus pour analyser les causes de l'éboulement de 2008, identifier les autres instabilités dans la carrière et définir un programme de surveillance et d'assainissement permettant l'accès aux infrastructures de production, directement menacées par un nouvel éboulement.

Cadre géologique

Du point de vue tectonique, les carrières d'Arvel se trouvent dans la nappe des Préalpes Médiannes. Les couches formant les Monts d'Arvel font partie du flanc normal d'un anticlinal dont le cœur triasique se situe au niveau du Vallon de la Tinière (figure 2). Les roches affleurantes s'étagent du Trias supérieur (Vallon de la Tinière) jusqu'au Jurassique supérieur (partie supérieure du versant des Monts d'Arvel).

La zone de l'éboulement de 2008 se situe dans la partie supérieure du Lias supérieur siliceux. La lithologie est essentiellement composée d'une alternance régulière de bancs marneux peu résistants (10-20 cm d'épaisseur) et de bancs calcaires siliceux (10-60 cm d'épaisseur) plus massifs.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Analyse structurale

La caractérisation des instabilités en termes de caractéristiques géométriques et géomécaniques a été effectuée sur le terrain en suivant les méthodologies classiques (ISRM, 1978, HOEK & BROWN 1997, MARINOS *et al.* 2005 pour plus de détail) permettant une appréciation objective des caractéristiques des discontinuités et du massif rocheux. De plus, la totalité de la partie centrale du Châble de Midi a fait l'objet d'un relevé topographique à haute résolution à l'aide du Scanner Laser terrestre (SLT) et d'un relevé Scanner laser Hélicoptère (système Helimap). Le nuage de points géoréférencé du SLT a été traité dans le logiciel Coltop3D (JABOYEDOFF *et al.* 2007), afin de calculer l'orientation spatiale de chaque point de mesure par rapport à son voisinage. Une représentation en couleur permet de visualiser et d'identifier les différentes familles de discontinuités, puisque à chaque orientation spatiale (azimut et pendage) correspond une couleur unique (figure 3).

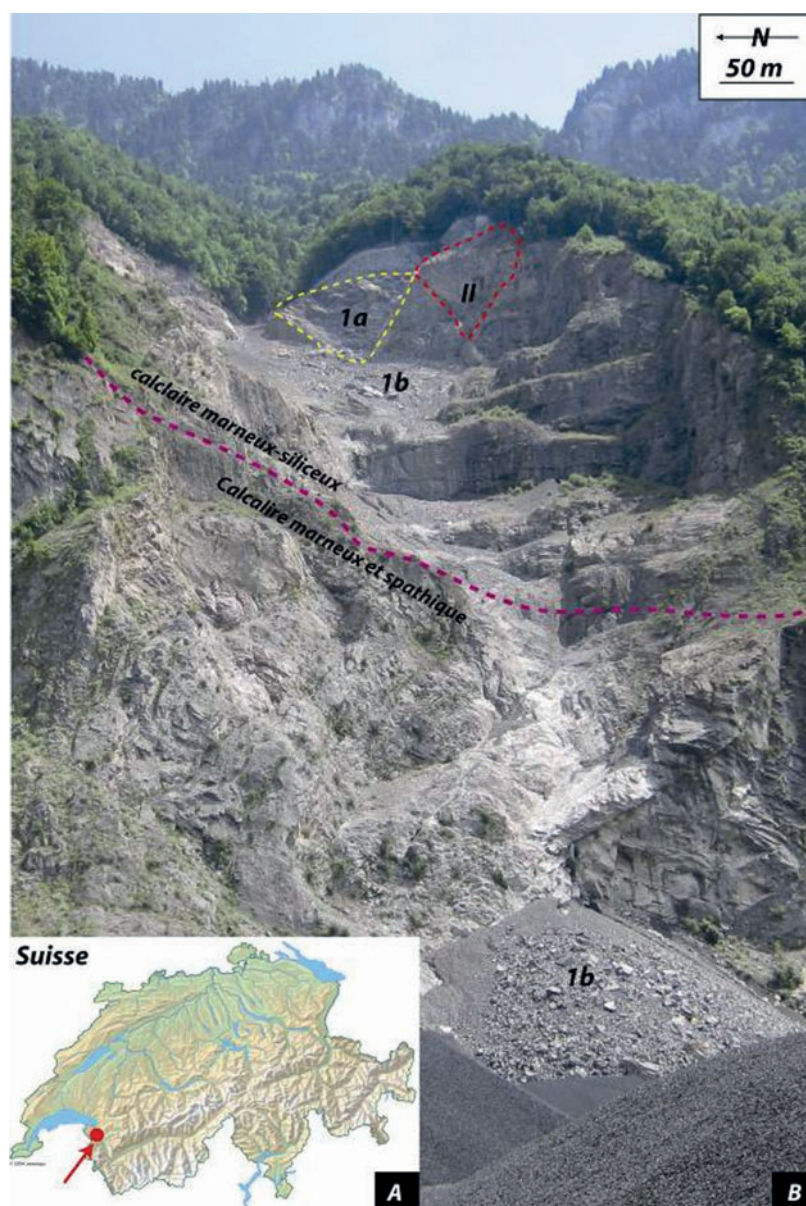


Figure 1.—A) Localisation de la zone d'étude. B) Vue de la partie centrale de la carrière avec la zone de l'éboulement de décembre 2008 (1a) les débris de l'éboulement (1b) et la zone potentiellement instable (II).

Analyses de stabilité

Une série de modèles géomécaniques simples a été testée afin de déterminer les paramètres géomécaniques et les différentes discontinuités ayant conditionné la rupture survenue le 12 décembre 2008. Des analyses déterministes, probabilistes ainsi qu'une analyse combinée ont été menées sur la base de méthodes à l'équilibre limite (SWEDGE[®], Rocscience, 2006). Un code aux éléments distincts a également été testé sur un modèle 2D afin d'évaluer l'effet des discontinuités du massif (code UDEC, Itasca, 2000).

Scanner laser terrestre

Le Scanner Laser Terrestre (ou LiDAR) est un système de monitoring distant basé sur la mesure du temps de parcours d'un rayon laser émis par l'appareil et réfléchi par la paroi rocheuse. Dépendant de la distance d'acquisition, sa résolution peut atteindre quelques centimètres. Le résultat final est un nuage de 26 millions de points géo-référencés (figure 3). Il représente l'état initial pour le suivi des mouvements (état 0) et permet une analyse structurale détaillée de la carrière. Plus d'informations sur l'utilisation et l'application de ces méthodes pour la caractérisation des instabilités rocheuses sont données par PEDRAZZINI *et al.* (2010), OPPIKOFER *et al.* (2009) et OPPIKOFER *et al.* (2008).

Interférométrie Radar GB-InSAR

L'interférométrie radar terrestre (Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) est une technique récente de monitoring distant, sans réflecteurs. Les premiers prototypes ont été développés à la fin des années 90 et les premiers équipements commerciaux sont disponibles depuis quelques années.

Le principe du GB-InSAR utilisé (fourni par Ellegi et basé sur la technologie LisaLab) consiste en une combinaison de plusieurs images radar acquises pendant que le dispositif d'émission/réception radar se déplace sur un rail de 3 m de long environ, installé fixement sur un socle stable (figure 4). Un trajet complet et retour est réalisé en 5 minutes environ, ce qui permet l'obtention d'images radar complexes (phase + amplitude) de la paroi toutes les 5 minutes également. Grâce au processing de ces images, il est possible de recréer une image interférométrique 2D distance-azimut. En comparant les différences de phase pour chaque pixel de deux images acquises à des moments différents, il est possible de calculer les déplacements de chaque pixel le long de l'axe de visée de l'instrument. Le résultat final est une image 2D en couleurs, dans laquelle l'amplitude des déplacements est facilement identifiée (figure 5).

Les données sont traitées en continu par le système et transmises à un PC qui permet de réaliser le post processing, l'analyse des déplacements et la gestion des alarmes. La précision de mesure des mouvements est de l'ordre de 0.5 mm à 1 mm le long de la L.O.S. (Line Of Sight ou axe de visée), et ce à environ à 900 m de distance. Les données peuvent être cumulées pendant 8h et 24h afin d'augmenter le rapport signal/bruit et permettre une amélioration de la précision des mesures de déplacement. La résolution spatiale des mesures est faible par rapport au SLT et dépend de la distance d'acquisition et de la longueur d'onde utilisée. Dans notre cas, la taille des pixels est d'environ 3 m sur 0.75 m à 900 m de distance.

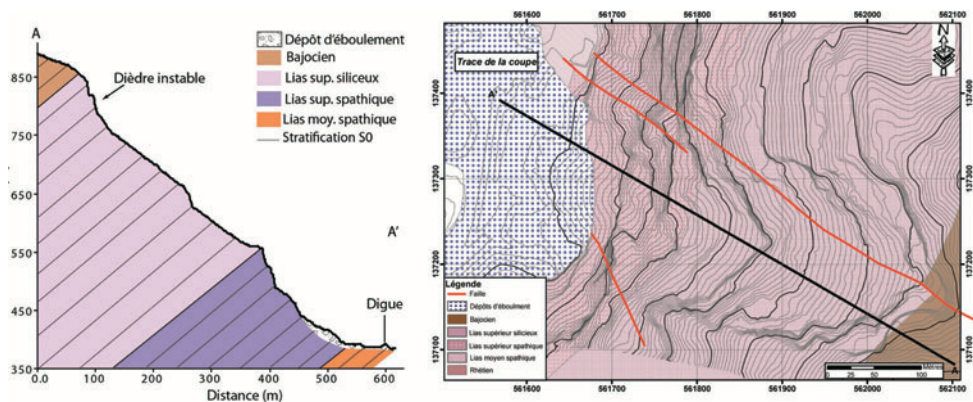


Figure 2.–Carte géologique montrant les différentes lithologies et structures en présence (en haut). Coupe simplifiée au niveau du Châble de Midi (en bas).

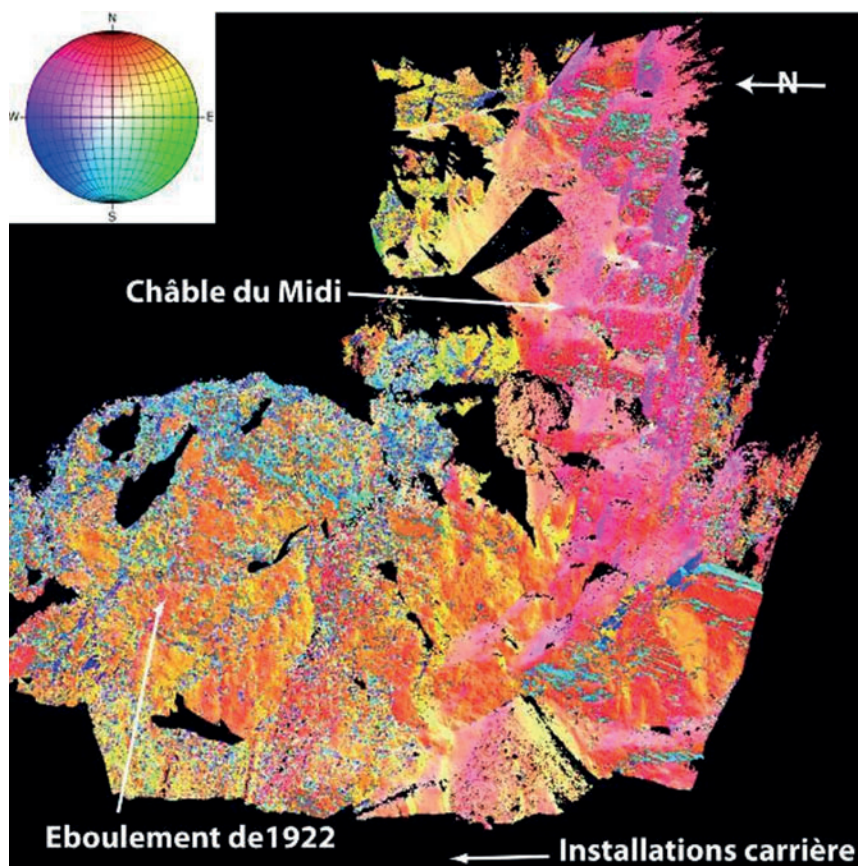


Figure 3.–Représentation Coltop3D du nuage de points SLT de la zone supérieure. Une couleur unique est attribuée à chaque orientation (Azimut/pendage). Stéréonet en hémisphère inférieure.



Figure 4.—Système d'interférométrie radar GB-InSAR installé aux Carrières d'Arvel depuis octobre 2009.

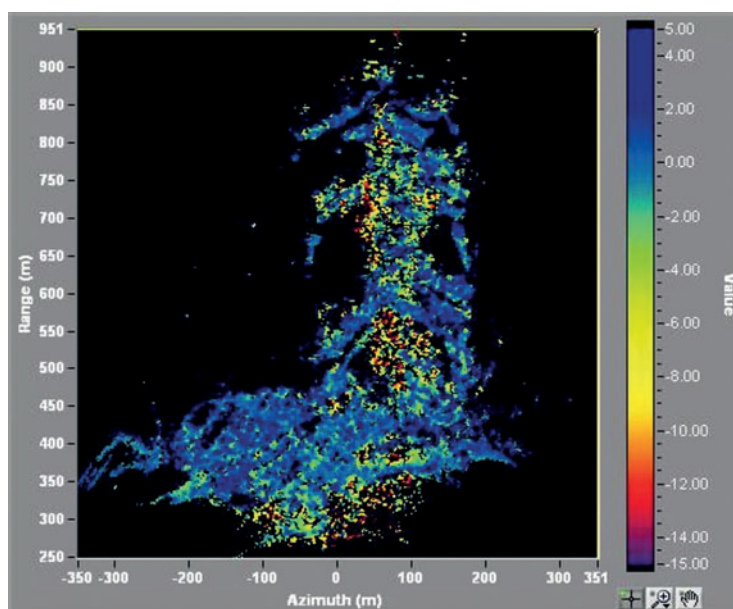


Figure 5.—Image cumulée des déplacements dans la carrière (en mm). Les parties rocheuses massives et stables (bleues à vertes) sont identifiables par rapport aux zones d'ébouilis où des mouvements importants sont relevés (jaunes à rouges).

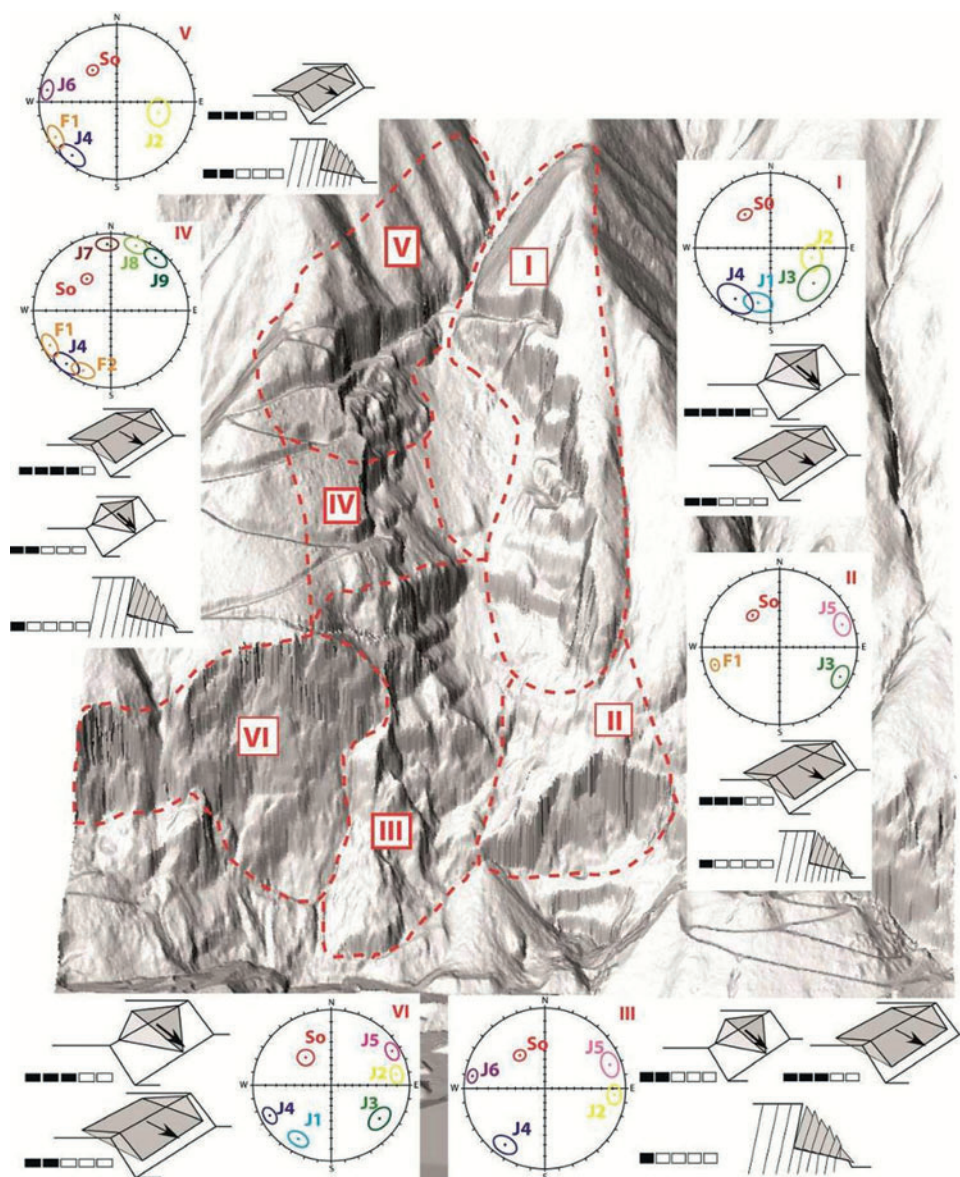


Figure 6.—Visualisation 3D du Châble de Midi avec les cinq domaines structuraux détectés à l'aide de COLTOP3D. Les stéréogrammes sont en hémisphère inférieure. Les ellipses autour du pôle des discontinuités représentent la variabilité des mesures comprise dans un écart-type. Pour chaque domaine, les principaux mécanismes de rupture ainsi que leur susceptibilité relative sont présentés.

La détection de mouvements de blocs inférieurs à cette dimension n'est donc pas possible.

Ce dispositif a été complété par une station d'acquisition des données météorologiques, installée au sommet de la carrière, avec envoi d'alertes SMS en fonction de seuils préétablis.

RÉSULTAT

Discontinuités principales et caractérisation du massif

L'analyse détaillée des données a permis d'identifier cinq domaines structuraux (figure 6). Chaque domaine est défini par l'orientation des discontinuités détectées, leurs relations avec la topographie ainsi que par la qualité du massif rocheux (degré de fracturation, altération, etc.). Le Châble (zone médiane de la carrière où sont concentrés les écoulements de surface), semble être une zone de séparation structurale nette, en particulier en ce qui concerne la partie supérieure de la carrière. Ceci peut être expliqué par la présence d'un système de failles qui décalent légèrement les couches géologiques (figure 2). Les légères différences, en termes d'orientation des familles, entre la partie supérieure et la partie inférieure de la carrière peuvent être en partie reliées aux changements lithologiques.

Analyse de l'éboulement du 12 décembre 2008

La cicatrice de l'éboulement de 20'000 m³ survenu le matin du 12 décembre 2008 est clairement visible sur le terrain (figure 7) et sur les données LiDAR. L'analyse structurale démontre que l'éboulement a été délimité par les discontinuités J1 et J2 qui forment un dièdre. La fracture arrière, composite entre la stratification S0 et les discontinuités J2-J3, a permis à la masse rocheuse de se détacher de la paroi.

L'orientation locale des discontinuités délimitant l'éboulement du 12 décembre 2008 a été calculée d'après l'analyse structurale dans Coltop3D (figure 8). Ces structures ont

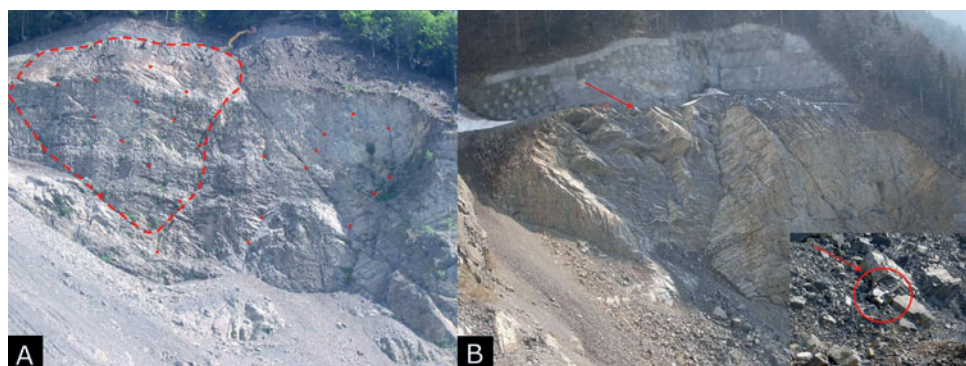


Figure 7.—A) Vue de la zone supérieure de la carrière en 2005-2006. Deux dièdres de volume similaire sont identifiables. A gauche, entouré en noir, le dièdre qui s'effondrera en décembre 2008 et à sa droite un autre dièdre de taille et caractéristiques similaires. B) Vue de la zone supérieure de la carrière après l'éboulement du dièdre de 20'000 m³ en décembre 2008.

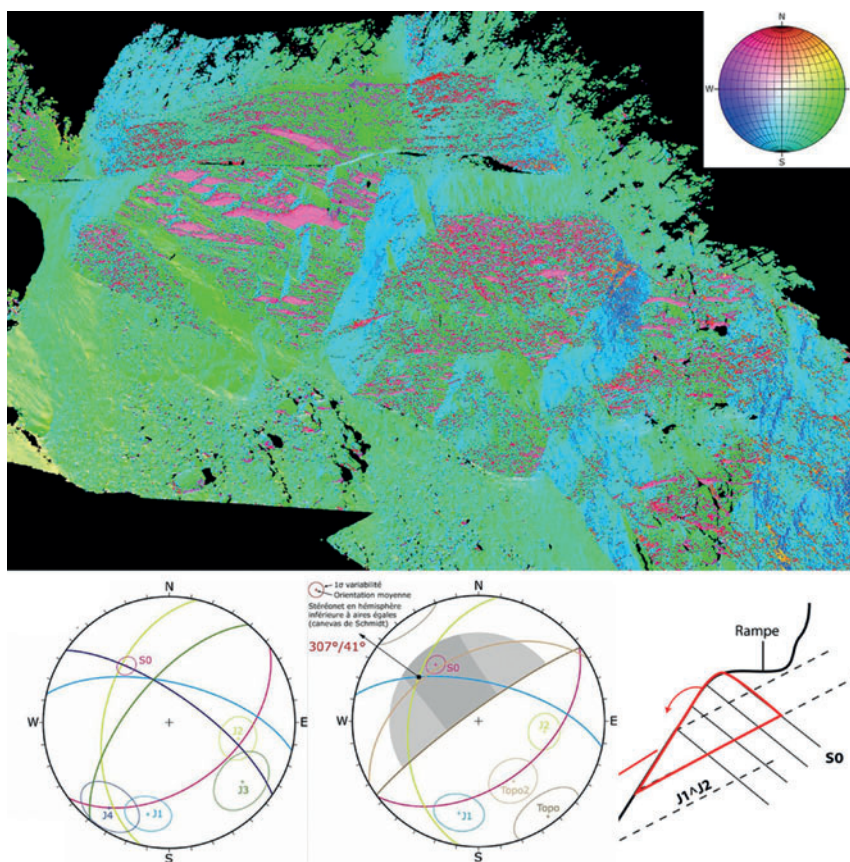


Figure 8.—Représentation COLTOP3D du nuage de points SLT de la zone supérieure. Une couleur unique est attribuée à chaque orientation spatiale. Les principales discontinuités visibles sont S0 (en rose), J1 (en bleu clair), J2 (en jaune), J3 (en vert) et J4 (en bleu foncé). B) Stéréogramme des discontinuités issu des données COLTOP3D. C) Test cinématiques montrant la possibilité de glissement dièdre.

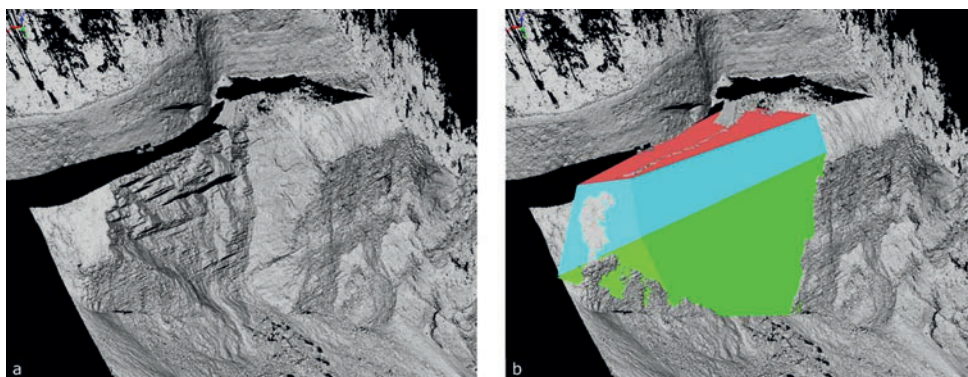


Figure 9.—Reconstruction du volume éboulé par prolongement de la morphologie des alentours.

permis d'établir un modèle de cet éboulement et d'en déterminer le mécanisme. Formé par J1 ($012^\circ/64^\circ$) et J2 ($279^\circ/44^\circ$), le dièdre remplit les critères de rupture pour un glissement dièdre, avec une ligne d'intersection parallèle à la direction de pendage de la paroi exploitée.

Le volume de l'éboulement est obtenu par la comparaison de la topographie actuelle avec la topographie d'avant l'évènement (figure 9). Les différences d'altitude entre les surfaces topographiques pré- et post-éboulement atteignent 38.3 m dans la partie centrale de l'éboulement. Le volume total de l'évènement est calculé à $20'400 \text{ m}^3$.

L'analyse géomécanique en retour a permis de confirmer les caractéristiques de l'instabilité. Les facteurs intrinsèques du massif rocheux (angle de frottement et cohésion très proche des valeurs résiduelles) combinés à l'agencement structural ont généré une situation très défavorable (figure 10). Le déclenchement de l'éboulement lui même est très probablement lié à la présence de surpressions d'eau au niveau des fractures. En effet, l'éboulement a eu lieu lors de conditions météorologiques très particulières, marquées par de fortes précipitations suivies par une diminution brutale des températures en une seule nuit. Le gel peut avoir eu pour conséquences la dilatation des fissures superficielles par la glace mais aussi la montée en pression dans le massif, due à l'obstruction des exutoires.

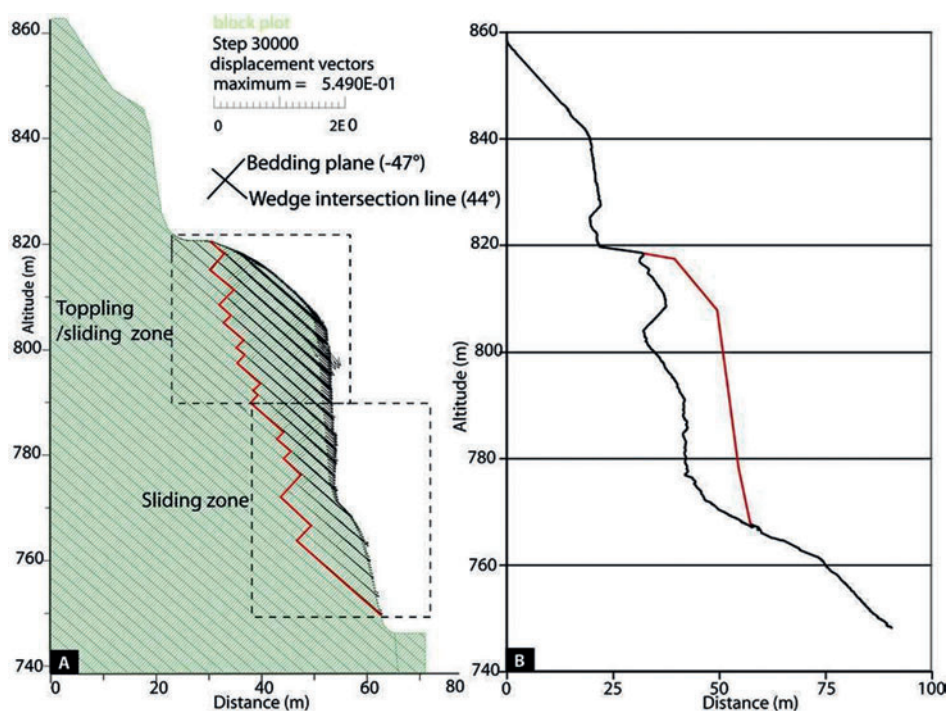


Figure 10.–A) Résultats de l'analyse en retour pour l'éboulement de décembre 2008 obtenus par UDEC et comparaison avec la topographie avant et après éboulement (B). Tiré de PEDRAZZINI *et al.*, (2010).

Dièdre potentiellement instable

L'instabilité potentielle située à côté du dièdre éboulé présente essentiellement les mêmes caractéristiques structurales que le dièdre qui s'est éboulé, soit un dièdre formé par les discontinuités J1 et J2 et la stratification S0 jouant en extension pour le découpage de la partie arrière du dièdre (figure 11).

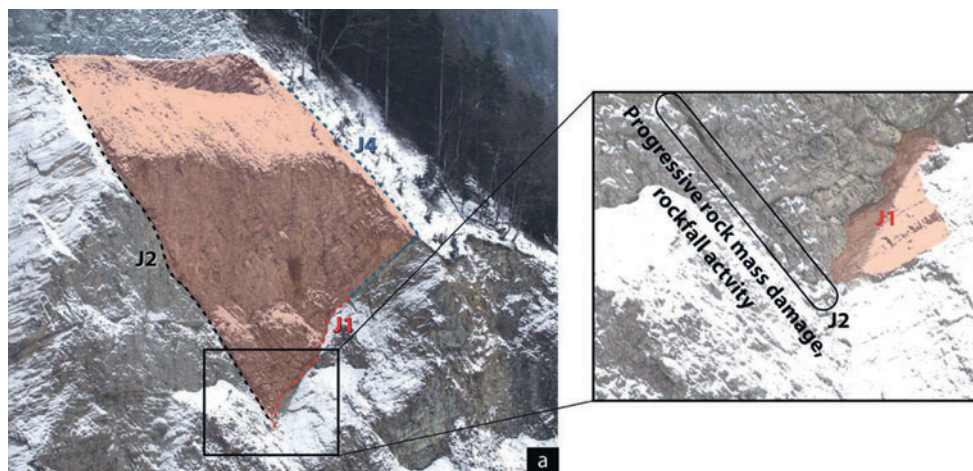


Figure 11.–Zone du dièdre potentiellement instable avec extension maximale supposée du dièdre délimité par J1 et J2. La zone encadrée indique une zone présentant une activité importante.

Le joint J2 présente des signes clairs d'activité (fracture ouverte, présence de matériel broyé) indiquant l'occurrence de mouvements. Ceci implique une continuité du joint et l'absence de ponts rocheux importants. Les propriétés mécaniques actuelles de ce joint ont dès lors des valeurs très faibles, voire résiduelles. Le joint J1 par contre ne montre pas de signe évident de mouvements à l'affleurement et il ne semble pas posséder une continuité importante (persistance apparente de ~15 m maximum). Des ponts rocheux semblent être encore présents.

Les caractéristiques du versant au-dessus du dièdre présentent également des différences avec l'éboulement du 12 décembre 2008. Pour ce dernier, la partie supérieure du dièdre était découpée et entièrement dégagée par la route, ce qui a pu augmenter l'infiltration d'eau dans le massif et donc le remplissage progressif des fractures.

En revanche, dans le dièdre instable, la partie Sud (joints J1 et J4) se termine à l'extérieur de la zone taillée par la piste. Le volume potentiel de cette instabilité a été évalué en construisant la surface de rupture du dièdre à l'aide des plans de discontinuités qui délimitent l'instabilité avec J1 et J2 à la base et J4 latéralement (figure 12). La modélisation montre un volume potentiellement instable compris entre 19'000 m³ et 21'000 m³. A cet endroit la paroi sub-v verticale atteint 60 m de hauteur environ.

Sur la partie sommitale de l'éboulement du 12 décembre 2008 et du dièdre instable, cinq acquisitions à l'aide du LiDAR terrestre ont été effectuées. Ces scans ont été comparés entre

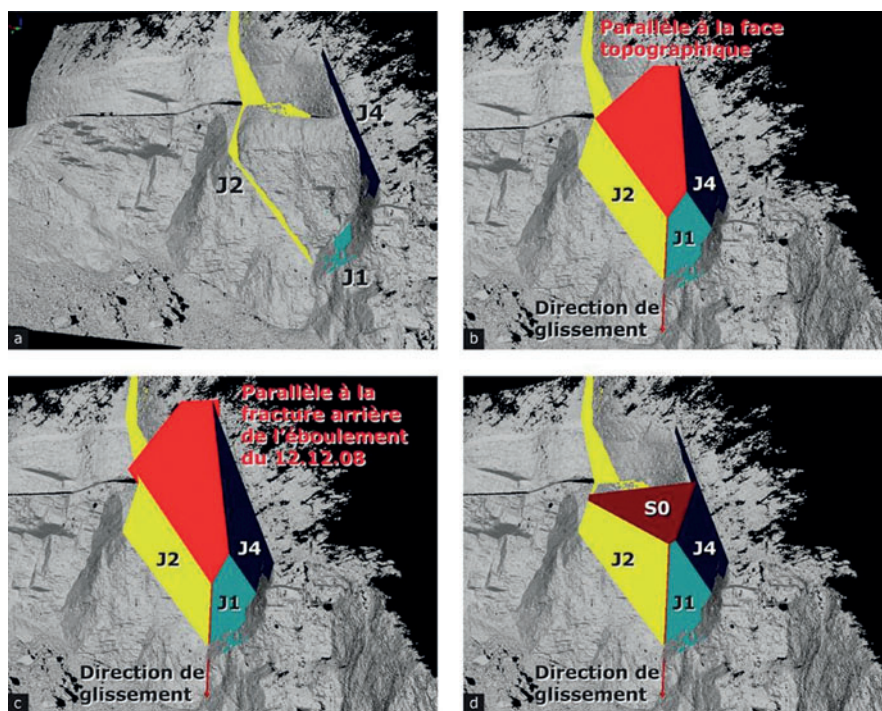


Figure 12.—Construction des limites du dièdre potentiellement instable par projection des discontinuités J1, J2 et J4.

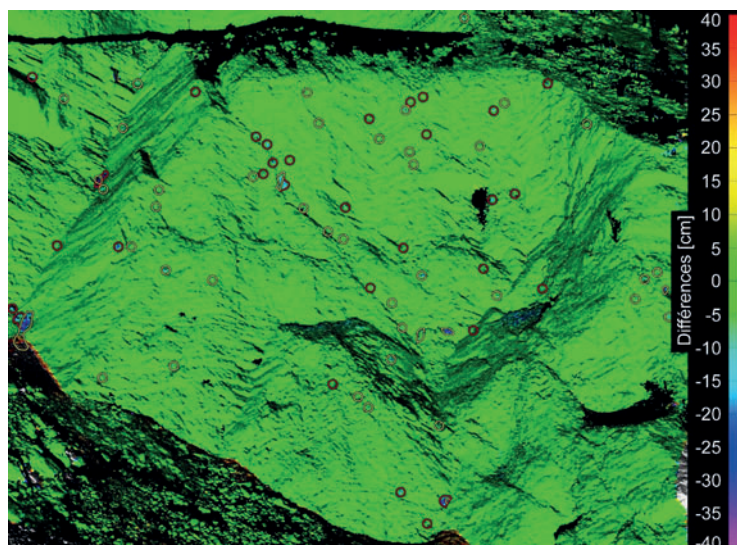


Figure 13.—Détail du dièdre potentiellement instable et localisation des chutes de blocs observées entre janvier et février 2009. Les chutes de blocs se concentrent le long du plan de glissement J2 et sur le front du dièdre.

eux afin d'observer d'éventuels déplacements du dièdre instable ou de localiser l'activité de chutes de blocs (figure 13). Le seuil de détection pour ces acquisitions se situe autour de 2.5 cm. Les comparaisons entre les différents scans n'ont pas mis en évidence de façon claire des mouvements au niveau du dièdre instable ni au niveau du dièdre éboulé.

Par contre, des chutes de blocs indiquant une certaine activité de la falaise ont été mises en évidence, spécialement entre le premier scan et l'acquisition du mois d'avril (figure 14). Entre le mois d'avril et le mois de juin, l'activité de chute de blocs a nettement diminué. L'activité de chute de blocs détectée par les acquisitions successives de données LiDAR a été comparée aux conditions météorologiques. Les comparaisons montrent une relation claire entre les jours ayant une excursion thermique importante avec des températures minimales inférieures à zéro et l'activité de chute de blocs.

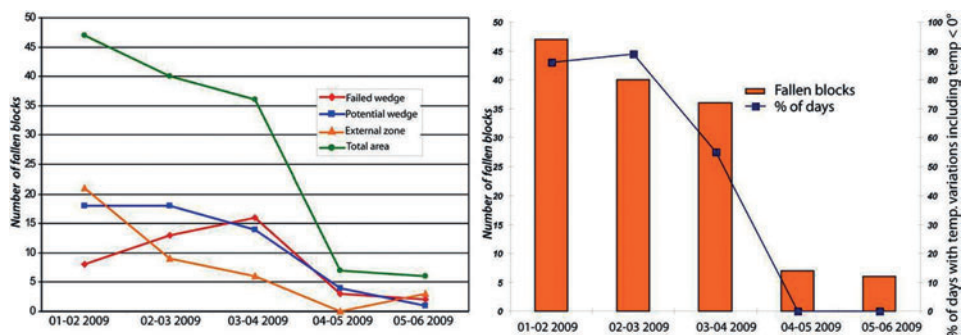


Figure 14.—Evolution de l'activité de chutes de blocs. A gauche: nombre de blocs éboulés dans les différents secteurs suivis entre janvier et juin 2009. A droite: comparaison entre le nombre total de blocs éboulés et le % des jours par mois incluant des températures négatives au cours d'une journée.

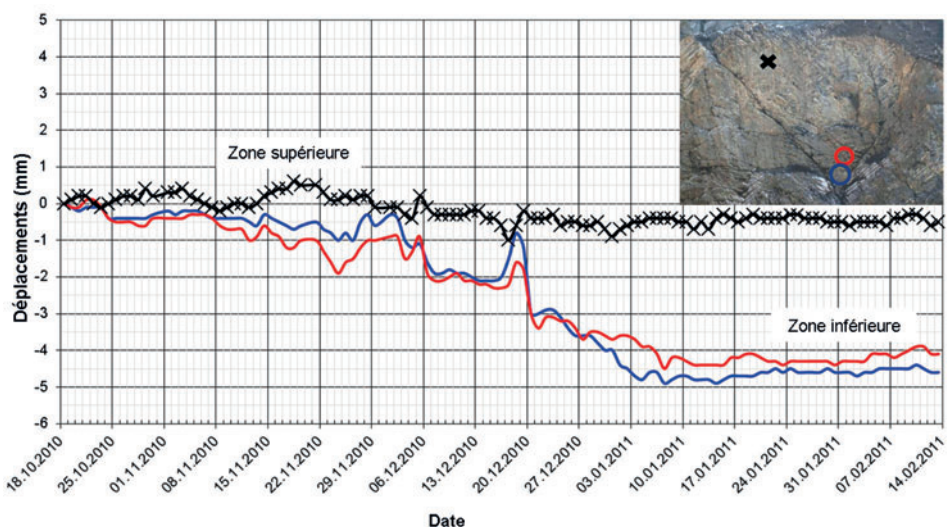


Figure 15.—Historique des déplacements mesurés au niveau du dièdre instable. La zone supérieure est globalement stable, alors que des mouvements cumulés d'environ 3 à 4 mm ont été enregistrés dans la zone inférieure du dièdre.

Plus précis que les mesures LiDAR, les relevés GB-InSAR ont permis par contre de déceler des mouvements faibles au niveau de la partie inférieure du dièdre instable (figure 15). Stable pendant plusieurs mois, une zone de 9 m de large sur 8 m de haut a montré un mouvement cumulé régulier de 3 mm à 4 mm au cours du mois de décembre 2010, marqué par des précipitations très importantes et plusieurs cycles gel/dégel.

Cette zone correspond approximativement à la partie du dièdre encadrée sur la figure 11, située sous un joint de stratification S0 ouvert. Ces déplacements semblent confirmer le mécanisme d'éboulement suspecté pour le dièdre éboulé, avec éboulement initial de la partie inférieure du dièdre et création d'un surplomb entraînant l'éboulement partiel du reste du dièdre.

Partie supérieure du dièdre éboulé

Au-dessus du dièdre éboulé, l'analyse géomorphologique basée sur les relevés du SLT a révélé la persistance des discontinuités impliquées dans l'éboulement de 2008 (figure 16). Quatre forages de reconnaissance de 70 m de profondeur ont été réalisés et analysés à l'aide de scanner optique. Ils ont permis de confirmer la persistance et l'orientation des joints en profondeur. Ils ont également indiqué la présence d'eau dans les fissures. Un volume potentiellement instable de 100'000 m³ à 150'000 m³ a ainsi été identifié dans le versant au sommet de la carrière. Jusqu'à présent, aucun déplacement significatif n'a cependant été mesuré avec le SLT ou avec l'interférométrie radar dans cette zone.

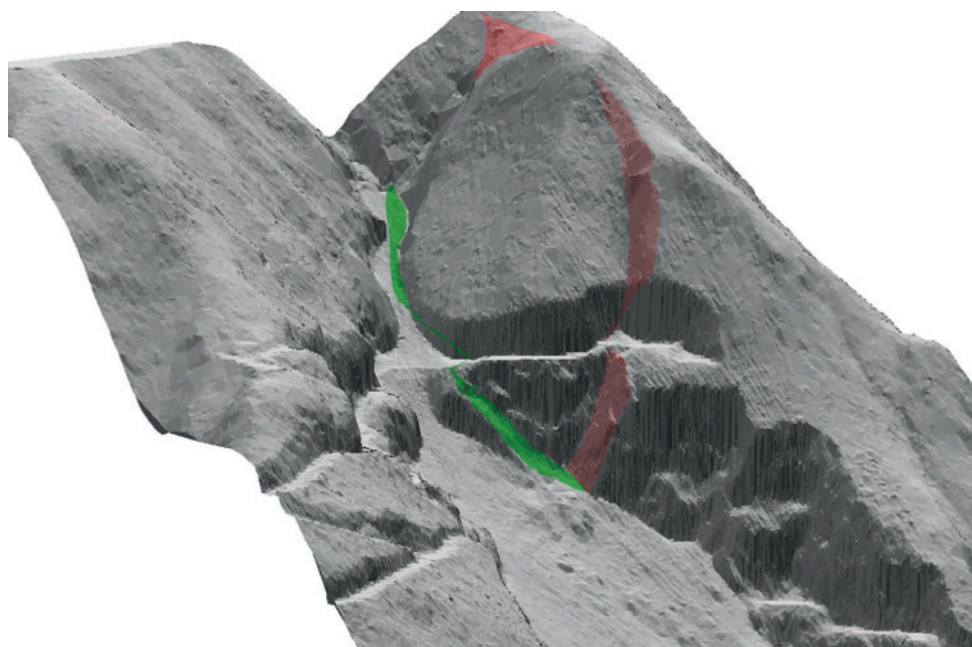


Figure 16.—Au-dessus de la zone éboulée en 2008, une zone potentiellement instable de 100 à 150'000 m³ a été identifiée. L'analyse géomorphologique et des forages de reconnaissance ont révélé la persistance des joints impliqués dans l'éboulement (J1 en rouge et J2 en vert).

Autres instabilités

Un catalogue complet des instabilités présentes dans chaque domaine structural de la carrière a été réalisé afin de pouvoir en réaliser le suivi. Tous les mécanismes de rupture sont présents dans la carrière. L'analyse des cicatrices d'éboulement présentes indique que des joints de stratification S0 ouverts sont presque systématiquement impliqués dans les éboulements, en conjonction avec d'autres discontinuités structurales. Outre les deux instabilités majeures citées ci-dessus, environ quinze autres instabilités ont été identifiées avec des volumes compris entre 5 et 10'000 m³ au maximum.

Le suivi réalisé à l'aide du GB-InSAR a permis de confirmer l'activité élevée de certaines instabilités identifiées lors du levé géologique et du suivi LiDAR. Plusieurs petits éboulements (3-30 m³ environ) ont également été observés et pour certains prédits, ce qui a permis l'établissement de seuils d'alerte.

Le 18 novembre 2010 à 6h10, un éboulement de plaques superficielles de l'ordre de 2 m³ a eu lieu suite à des précipitations très importantes. Précédé par quelques chutes de pierres la veille, il a été notifié précisément par le personnel de la carrière dans le cahier de suivi. Cette mesure a permis d'évaluer la durée des mouvements précurseurs avant l'éboulement. Sur les images radar, des déplacements légèrement anormaux de quelques millimètres ont été enregistrés 18 heures avant l'éboulement, en même temps que des petites chutes de pierres (figure 17). A partir de 4h59 le 18 novembre, le système radar a enregistré une accélération des mouvements sur plusieurs points de la paroi. L'éboulement a finalement eu lieu 1 heure plus tard pour un déplacement cumulé de 5 mm à 7 mm.

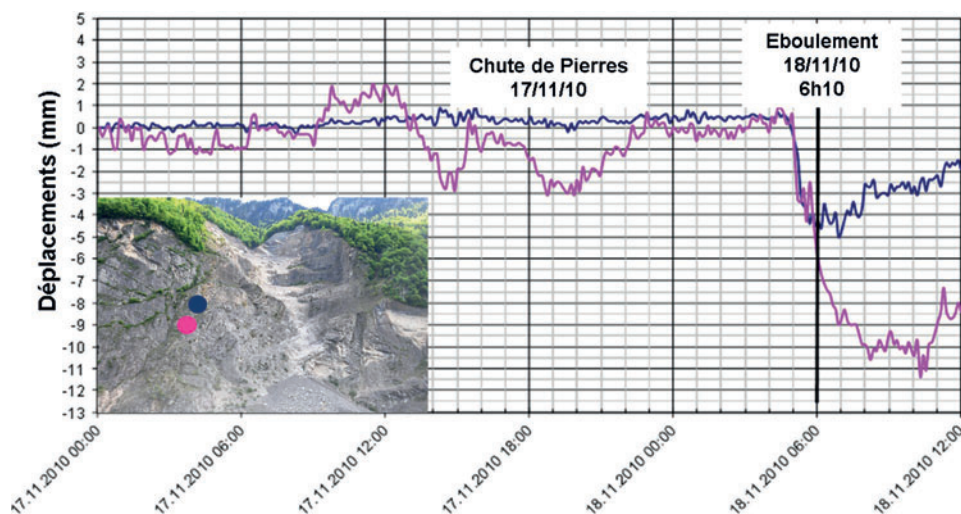


Figure 17.—Courbes de déplacement mesuré au sommet et à la base de l'éboulement intervenu le 18/11/2010 à 6h10. Cet éboulement de plaques superficielles a été précédé par quelques chutes de pierre le 17/11 et une accélération importante des mouvements sur une durée de 1 h avant l'éboulement final.

Ces valeurs faibles sont vraisemblablement sous-estimées par le système radar interférométrique pour les raisons suivantes. Les déplacements d'un nombre entier de longueur d'onde n'entraînent pas de décalage de phase. Par exemple, pour un déplacement réel de $1,4 \lambda$ ou $2,4 \lambda$ entre deux images successives acquises à 5 minutes d'intervalle, le système enregistre seulement un déplacement de $0,4 \lambda$.

D'autre part, la position de la zone éboulée par rapport au système entraîne à cet endroit une sous-estimation importante des déplacements, du fait de leur projection sur la L.O.S.

MANAGEMENT DU RISQUE

Afin de ramener l'exploitation de la carrière d'Arvel à un niveau de risque tolérable, plusieurs mesures ont été entreprises.

Des modélisations trajectographiques 3D et 2D ont été réalisées afin de calculer l'énergie et la propagation des blocs au niveau du carreau minier. La protection offerte par la digue actuelle a été vérifiée, ce qui a permis d'identifier un déficit de protection au niveau du concasseur primaire et de certaines voies d'accès (figure 18). Sur base de cette analyse, un nouveau plan de circulation des engins sur le carreau minier a été proposé, avec notamment la création d'une nouvelle rampe d'accès au concasseur, nettement moins exposée aux chutes de pierres et blocs. Sur base des modélisations, un plan de zones a également été défini à partir de leur exposition au danger.

Grâce au suivi réalisé par interférométrie radar pendant 20 mois, des seuils de déplacement ont été définis pour chaque instabilité. Lorsqu'ils sont dépassés, un dispositif d'alerte est activé pour assurer un monitoring spécial pouvant conduire à l'interdiction d'accès au chantier.

Outre le monitoring en continu des déplacements, une station météorologique de mesure en continu a été installée en juillet 2009 au sommet de la carrière du Châble du Midi, à 820 msm. Des seuils d'alerte ont été définis sur la base des données historiques de pluviométrie.

Tous les jours, l'exploitant relève les indices de chutes de pierres et les consigne dans un cahier de suivi qui est communiqué aux géologues.

Grâce aux indicateurs relevés, le danger d'éboulement est évalué quotidiennement grâce à une grille d'évaluation développée sur base de l'expérience acquise (figure 19). Des seuils ont été définis pour chaque paramètre relevé (déplacements, T° , précipitations, chutes de pierres), avec une valeur en points associée, positive ou négative, en termes de danger d'éboulement. En fonction du paramètre (pluie, gel, déplacements, etc...), une durée de validité associée au niveau de risque émis est également déterminée. L'observation des écoulements d'eau dans les fissures présentes sur les fronts a permis d'évaluer la durée de drainage du massif après un épisode pluvieux prolongé. La somme des points pour tous les indicateurs est réactualisée chaque jour, de manière à définir le niveau de danger lié aux éboulements. A chaque niveau, correspond un plan d'accès aux infrastructures et aux zones exposées, depuis l'accès sans restrictions jusqu'à l'évacuation du site. Depuis sa mise en place, le système a confirmé son bien-fondé. Il a en effet permis de fermer préventivement le chantier 48h avant l'éboulement du 18 novembre 2010 pour causes de précipitations

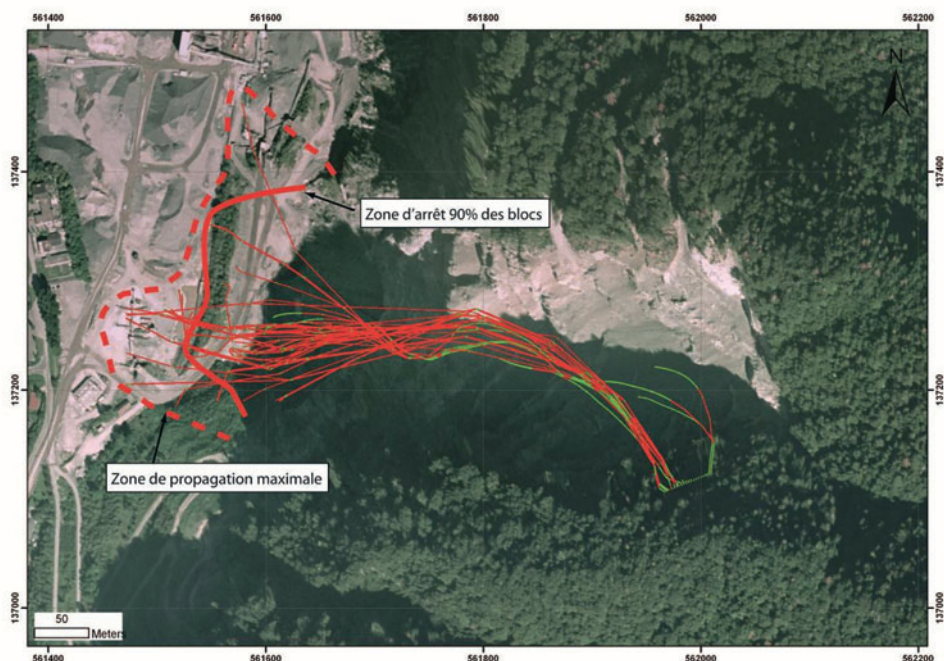


Figure 18.—Simulations trajectographiques 3D des blocs pouvant se détacher depuis la zone du dièdre instable.

Σ points	Niveau de risque	Mesures	Réévaluation du niveau de risque
≥ 6 pts	3	Risque maximal <u>Fermeture zones à risques 1 et 2</u> Mesures de surveillance et de sécurité renforcées	Avis CSD après évaluation de la situation et visite de site
≥ 3 pts	2	Risque important <u>Fermeture totale zone à risques 1</u> Fermeture de la zone concasseur I et du pied du dévaloir aux personnes	Avis CSD après évaluation de la situation
> 1 pts	1	Risque modéré <u>Fermeture partielle zone à risques 1</u> Fermeture de la zone du pied du dévaloir aux personnes Accès au concasseur I par la rampe	Réévaluation de la situation toutes les 24 h
≤ 1 pt	0	Risque faible <u>Accès normal selon réglementation Arvel</u>	Réévaluation de la situation en temps réel

Figure 19.—Echelle du degré de danger avec mesures à prendre pour chaque niveau appliqué pour la gestion des risques à la carrière d'Arvel. L'échelle est basée sur la somme de différents paramètres influençant la stabilité.

élevées. Des chutes de pierres sont ensuite venues prolonger la fermeture, avant que l'éboulement ne vienne confirmer que le niveau de danger identifié était bien correct.

Grâce à l'ensemble du dispositif mis en place, le niveau de risque a été rétabli à un niveau tolérable, permettant l'exploitation du site sous conditions.

ASSAINISSEMENT DE LA ZONE SUPÉRIEURE DE LA CARRIÈRE

Grâce aux études et au monitoring réalisés, il a été possible de définir précisément l'activité des différents parois de la carrière. L'activité de la zone des dièdres a été confirmée par les relevés et a permis d'établir l'urgence d'une solution d'assainissement. Afin d'éviter une dégradation importante de la zone empêchant toute intervention future, une solution d'assainissement de la partie supérieure de la carrière du Châble du Midi a dès lors été établie. Du fait des volumes impliqués, une stabilisation par clouage n'est pas applicable. La solution d'assainissement recommandée est basée sur un reprofilage de la paroi depuis le sommet de la carrière avec des fronts réduits à 20 m de hauteur maximum, associé à une réorientation de ceux-ci dans une direction moins défavorable pour la stabilité. Un drainage profond des principales discontinuités sera réalisé de manière à diminuer l'influence négative de l'eau sur la stabilité des compartiments rocheux.

DISCUSSION

Le système LiDAR permet des analyses structurales très intéressantes, mais sa précision pluricentimétrique rend difficile la détection de mouvements précurseurs dans un massif caractérisé par des mécanismes de rupture fragile. L'interférométrie radar, grâce à sa précision, à l'absence de pose de réflecteurs et à sa distance d'acquisition performante (plus de 1,5 km), et ce en toutes conditions climatiques, est la meilleure méthode actuelle pour le monitoring de grandes instabilités rocheuses, avec toutefois quelques réserves. Contrairement à un système LiDAR, le système radar ne peut mesurer que les mouvements de rapprochement ou d'éloignement mesurés sur l'axe de visée entre le système et la paroi observée. Le positionnement du radar par rapport aux instabilités et à la direction de leurs mouvements supposés doit dès lors être soigneusement évalué, de manière à ne pas conduire à une sous-estimation systématique des déplacements. D'autre part, du fait du principe interférométrique de la mesure, des mouvements de rapprochement ou d'éloignement de $\lambda/2$ (± 4.4 mm) apparaissant entre 2 images successives ne peuvent pas être différenciés, car ils entraînent un déphasage identique. Des mouvements supérieurs à λ ($=8.8$ mm) qui interviennent sur une durée inférieure au temps d'acquisition entre deux images (5 minutes) ne peuvent pas non plus être correctement évalués par le système GB-InSAR, et conduisent à une sous-évaluation systématique ou à des phénomènes de décorrélation. L'évaluation de seuils d'alerte impose une rigueur importante ainsi qu'une période d'observation suffisante, car les différentes zones des parois présentent des comportements différents et des mouvements qui ne doivent pas systématiquement être considérés comme inquiétants.

CONCLUSION

Au cours de leur histoire, les carrières d'Arvel ont dû faire face à plusieurs éboulements, liés en partie aux conditions d'exploitation et en partie aux caractéristiques structurales du site. Suite à l'éboulement de décembre 2008, une analyse détaillée des instabilités a été réalisée. Un monitoring par LiDAR a été mis en place et a ensuite été complété par un système radar GB-InSAR et une station météorologique locale opérés en continu. Après plus d'une année de suivi, ce dispositif a montré de très bons résultats en termes d'analyse des instabilités et de suivi de leurs déplacements. Malgré leurs performances excellentes, les limites de chacune de ces méthodes doivent toutefois être prises en compte au moment du choix de la ou des solutions de monitoring des instabilités rocheuses. Un plan de réduction du risque a été proposé à Carrières d'Arvel. Après définition des zones exposées et des déficits de protection par analyses trajectographiques, une modification des accès aux chantiers a été mise en place. Un système de gestion du risque basé sur des indicateurs quantifiables a été instauré. Grâce aux travaux réalisés, l'accès aux zones de production a pu être assuré dans des conditions de risque tolérables. Sur la base des études réalisées et du monitoring de l'ensemble des parois de la carrière, un programme d'assainissement des instabilités les plus préoccupantes a pu être établi.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Bernard Streiff, directeur de Carrières d'Arvel S.A., ainsi que Carlo Rivolta et Davide Leva de la société Ellegi S.R.L pour leur aide et leur disponibilité.

RÉFÉRENCES

- HOEK E. & BROWN E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 1165–1186.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM), 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15: 319–368.
- ITASCA (2000). UDEC-Universal Distinct Element Code. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, USA.
- MARINOS V., MARINOS P. & HOEK E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64: 55–65.
- ROCSCIENCE, 2006. Swedge 5.0, Rocscience Inc., Toronto, Ontario.
- JABOYEDOFF M., METZGER R., OPIKOFER T., COUTURE R., DERRON M.-H., LOCAT J. & TURMEL D., 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software, *in*: Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands, Proceedings of the 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium.
- OPIKOFER T., JABOYEDOFF M. & KEUSEN H. R., 2008. Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps, *Nature Geoscience*, 1: 531–535.
- OPIKOFER T., JABOYEDOFF M., BLIKRA L., DERRON M.-H. & METZGER R., 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1003–1019.
- PEDRAZZINI A., OPIKOFER T., JABOYEDOFF M., GUELLI PONS M., CHANTRY R. & STAMPFLI E., 2010. Assessment of rockslide and rockfall problems in an active quarry: case study of the Arvel quarry (Western Switzerland). *Eurorock 2010 conference*, Lausanne.