

CARACTERISATION DYNAMIQUE D'UNE ECAILLE CALCAIRE (CHAMOUSSET, VERCORS)

THE DYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE CHAMOUSSET ROCK COLUMN (VERCORS, FRANCE)

Clara LEVY¹, Laurent BAILLET², Denis JONGMANS³, Philippe MOUROT⁴, Didier HANTZ⁵

¹ *Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Grenoble, France*

² *Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique*

³ *Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique*

⁴ *MYOTIS*

⁵ *Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique*

RÉSUMÉ –L'étude du bruit sismique enregistré avant l'effondrement d'une écaille rocheuse à Chamousset (Vercors Sud) montre que ses premières fréquences propres diminuent significativement avant la chute. Des modélisations 2D d'éboulements montrent que cette baisse dépend de la raideur du contact écaille/massif, contrôlée par les ponts rocheux restant.

ABSTRACT –The study of seismic noise recorded prior the Chamousset rock fall (Vercors, French Alps) revealed that low resonance frequencies significantly decrease before the collapse. 2D modelling of rock falls pointed out that this decrease depends on the column-to-mass contact stiffness, which is controlled by the remaining rock bridges.

1. Introduction

L'évaluation du risque d'éboulement nécessite la détection des volumes instables et la prédiction de la phase de rupture (Crosta et Agliardi, 2003).

Les techniques de mesures à distance terrestres et aéroportées sont de plus en plus utilisées pour générer des Modèles Numériques de Terrains (MNT) et extraire des informations sur les discontinuités affectant la masse rocheuse (Jaboyedoff et al., 2004; Deparis et al., 2008). Cependant, ces mesures ne fournissent pas d'information sur la structure interne de la masse rocheuse. Or, l'analyse retour de 25 éboulements dans les falaises calcaires des Alpes françaises (Frayssines et Hantz, 2006) a montré que ces événements étaient initiés par la fracturation de ponts rocheux et que la persistance de ces joints était le principal paramètre à prendre en compte pour des calculs de stabilité. Des auteurs (Jeannin et al., 2006; Deparis et al., 2007) ont utilisé des méthodes géophysiques pour caractériser et cartographier ces joints à l'intérieur de la masse rocheuse. L'utilisation du radar à pénétration de sol a permis d'obtenir les meilleurs résultats (Jeannin et al., 2006; Deparis et al., 2007; Deparis et al., 2008). Hélas, cette technique n'est applicable que pour des cas spécifiques où la falaise est accessible et le milieu est résistif.

Ce papier présente une étude de l'information contenue dans le bruit sismique afin d'évaluer le degré d'instabilité d'une écaille rocheuse. Depuis une vingtaine d'années, les enregistrements de bruits sismiques sont utilisés pour l'analyse modale des bâtiments en génie civil (Michel et al., 2008). Clinton et al. (2006) a

utilisé ce type d'enregistrements pour mettre en évidence la décroissance des fréquences propres des bâtiments avec la diminution de la rigidité du système résultant de l'endommagement de la structure après séismes. Pareillement, lorsqu'une écaïlle rocheuse se détache du massif, la rigidité globale du contact diminue avec la rupture de ponts rocheux, entraînant une évolution des fréquences propres. Nous proposons d'utiliser des enregistrements de bruit sismique pour étudier l'évolution des fréquences propres d'une écaïlle rocheuse jusqu'à sa chute. Cette méthode a d'abord été testée sur des cas synthétiques simulant l'effondrement d'une colonne rocheuse 2D. Nous l'avons ensuite appliquée à la falaise calcaire de Chamousset (Vercors Sud) où un réseau sismique enregistré du bruit sismique (avec quelques périodes sans données) durant une période de 6 mois jusqu'à deux semaines avant un effondrement de 21000 m³. Une diminution significative de la 1^{ère} fréquence propre de l'écaïlle a été observée.

2. Le site expérimental de Chamousset, l'éboulement de 21000 m³

Le site de Chamousset est situé au sommet d'une falaise urgonienne de 300 m qui délimite le Sud Vercors (figure 1a). La partie supérieure de la falaise (100 m), d'orientation Nord-Sud, est composée de bancs calcaires sub-horizontaux de quelques décimètres, tandis qu'une alternance marno-calcaire en constitue sa partie inférieure, moins pentée. A l'échelle hectométrique, le massif est découpé par des fractures verticales d'orientation N160° (figure 1b) qui contrôlent l'orientation de la falaise aux alentours du site.

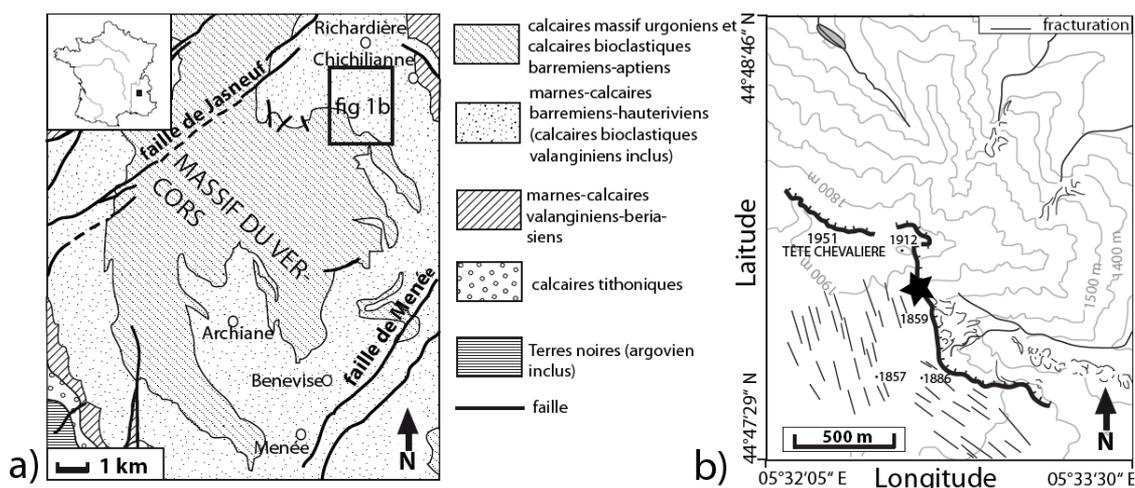


Figure 1. Localisation du site expérimental a) sur la carte géologique du Vercors Sud (d'après Gidon, 1977) et b) sur une carte topographique (localisée par un rectangle en figure 1a). Le site (étoile) est en bord de falaise (b).

Une écaïlle de 21000 m³ s'est détachée de la partie supérieure de la falaise le 24/11/2007 (communication d'un habitant de Chichilianne, figure 1a). L'éboulement s'est produit en hiver, alors que le plateau (d'altitude variant entre 1850 m et 1950 m dans cette zone, figure 1b) était recouvert de neige. Les gardes du Parc Régional des Hauts-Plateaux du Vercors avaient préalablement détecté la zone instable en observant l'ouverture progressive d'une fracture de 30 m longeant le bord de falaise. Deux scans LIDAR hélicoptérés ont été réalisés en octobre et décembre 2007, avant

et après l'éboulement. Ils ont permis de déterminer la géométrie de l'écaille, ainsi que la morphologie du plan de rupture (figure 2).

L'écaille faisait environ 90 m de haut, 30 m de large et 2 à 10 m d'épaisseur. La surface de rupture est complexe avec 2 excroissances de part et d'autre d'une zone principale (figure 2b). La partie supérieure de la cicatrice, relativement lisse comparée au reste, est verticale sur une trentaine de mètres. Le reste de la surface de rupture est légèrement incliné, mise à part une partie en surplomb en pied (zone blanche en pied de la cicatrice sur la figure 2b). Après l'effondrement, les ponts rocheux ont été repérés lors d'une descente en rappel (figure 2b). Deux zones présentaient des traces de rupture fraîches : un banc calcaire de 6 m d'épaisseur situé 30 m sous le plateau et un polyèdre d'environ 15 m de haut situé 75 m sous le plateau et qui présente une partie en surplomb. Des ponts rocheux ont pu être manqués dans l'excroissance Sud de la surface de rupture qui n'était pas observable depuis le trajet de descente en rappel.

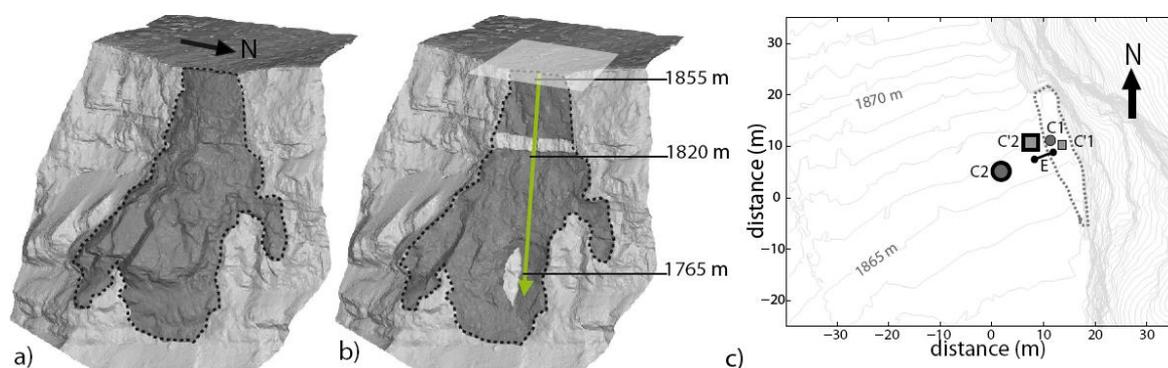


Figure 2. Modèles numériques de terrain de la falaise déduit des mesures LIDAR, avant (a) et après (b) l'éboulement. La face supérieure de l'écaille (a), ainsi que la surface de rupture (b) sont en gris foncé. Les zones de ponts rocheux sont en blanc (b). Le réseau sismique (figure 2c) est localisé par un parallélogramme blanc transparent (b). Le trajet de descente en rappel est figuré par une flèche verte (b). c)

Localisation partielle de l'instrumentation à Chamousset, vue de dessus. Les géophones 2 Hz (C1 et C2) ont été déployés du 13/07/2007 au 10/10/2007. Les géophones 4,5 Hz (C'1 et C'2) ont été déployés du 01/08/2007 au 26/11/2007. L'extensomètre E a fonctionné entre le 01/08/2007 et le 26/11/2007. Les géophones 3C sont représentés plus gros. Les limites de l'écaille sont en ligne grise pointillée.

Un réseau sismique, ainsi que deux extensomètres ont été installés sur le site de Chamousset entre juillet et novembre 2007 (figure 2c). Un géophone vertical (2 Hz) était placé sur l'écaille, tandis que 5 autres géophones verticaux (2 Hz) et un géophone 3 composantes (2 Hz) étaient déployés sur le plateau avec une ouverture d'environ 70 m. Durant les deux derniers mois d'enregistrement, les géophones 2 Hz ont été remplacés par des géophones 4,5 Hz. L'acquisition était en mode déclenché avec une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz, et une longueur d'enregistrement minimum de 2 min. L'acquisition s'est arrêtée le 10 novembre 2007 (14 jours avant l'éboulement), après que les panneaux solaires ont été recouverts par la neige. De nombreux problèmes de maintenance liés à l'altitude élevée du site n'ont pas permis un enregistrement continu des données.

Deux profils sismiques de 30 m ont été réalisés parallèlement et perpendiculairement à la falaise en septembre 2008. Un modèle sismique avec une

couche de sol de 2 m d'épaisseur sur un demi-espace en a été tiré. Les vitesses des ondes P et S sont, respectivement, de 430 m/s et 180 m/s pour la couche de sol et de 2800 m/s et 960 m/s pour le substratum.

3. Simulation numérique de la réponse dynamique d'une écaille rocheuse

La réponse dynamique d'une écaille élastique qui se détache d'une masse rocheuse a été simulée en 2D (hypothèse de déformations planes) à partir du code en éléments finis avec un schéma d'intégration dynamique explicite Plast 2 (Baillet et Sassi, 2006). Nous souhaitons observer l'évolution des fréquences propres de cette écaille avec la diminution du nombre de ponts rocheux.

La géométrie de l'écaille est simple : 80 m de haut, 20 m de large. Elle surplombe 120 m de falaise (figure 3a).

La simulation reproduit les ruptures successives de ponts rocheux suivant une interface prédéfinie (figure 3a). Ces ponts rocheux, matérialisés par des nœuds de l'écaille, sont solidaires du massif en début de simulation. Ils totalisent 21 % de la surface totale de l'interface et sont répartis de manière aléatoire. Ils suivent un critère de Mohr-Coulomb et chaque 100 s, la cohésion du pont rocheux le plus contraint est diminuée jusqu'à sa rupture. Le reste de l'interface suit une loi de contact avec frottement de type Coulomb.

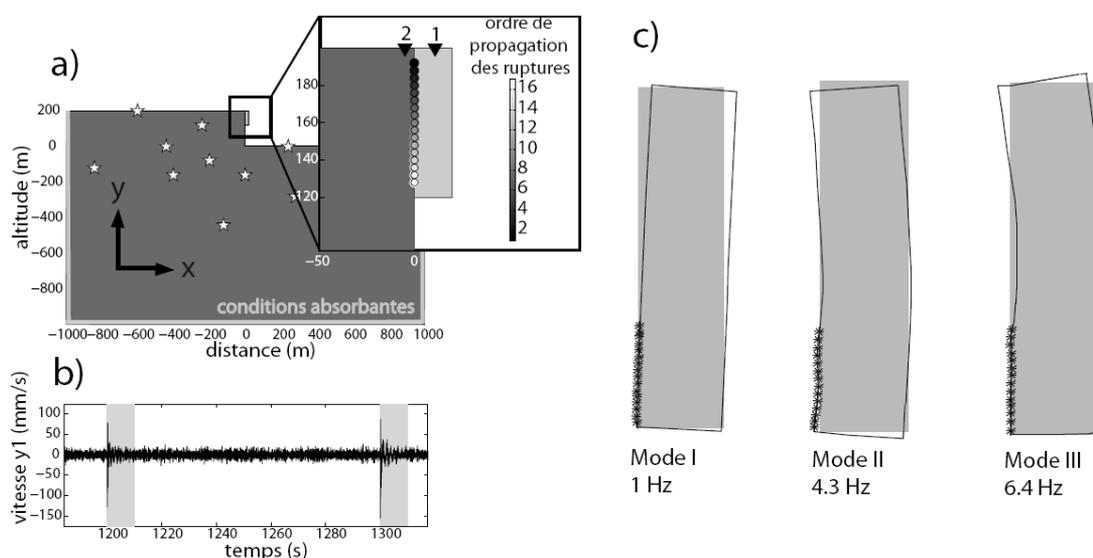


Figure 3. a) Géométrie de la masse rocheuse (gris foncé) et de l'écaille (gris clair).

Les sources de bruit blanc sont au sein du massif (étoiles). Les 2 capteurs (triangles), ainsi que les ruptures de ponts rocheux se produisant durant la simulation (cercles) sont localisés dans le rectangle de zoom. b) Vitesse verticale du capteur 1 durant une partie de la simulation. Le bruit sismique (fenêtres blanches) est utilisé pour calculer les spectres. Des signaux de ruptures de ponts rocheux sont visibles dans les fenêtres grises. Les ruptures de ponts rocheux sont imposées toutes les 100 s. c) Déformées modales de l'écaille obtenues en analyse linéaire. Les points d'appuis ($K_x=K_y=3e8$ N/m) sont placés sur 24 m (astérisques noires). Cette géométrie reproduit la distribution des ponts rocheux de la simulation à 1200 s.

Les propriétés mécaniques du massif et de l'écaïlle sont inspirées des vitesses d'ondes P et S mesurées à Chamousset (voir partie 2) : module d'Young de $0,69 \times 10^4$ MPa, masse volumique de 2600 kg/m^3 et coefficient de Poisson de 0,43.

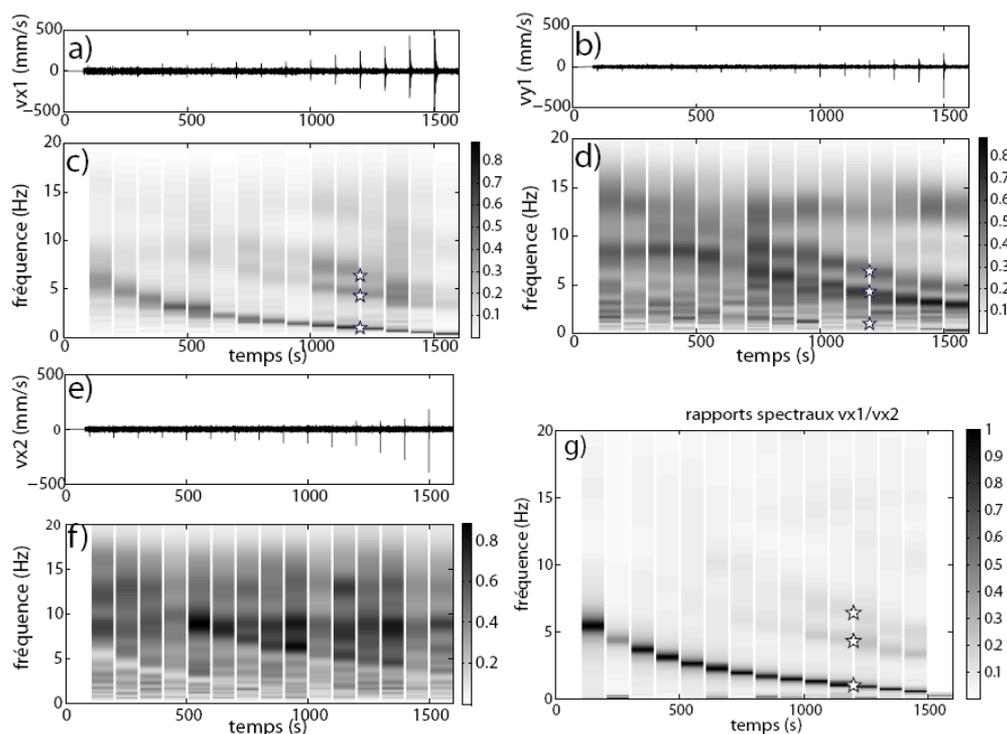


Figure 4. Signal sismique et évolution du spectre normé pour le capteur 1 (sur l'écaïlle) dans la direction horizontale (a et c) et dans la direction verticale (b et d). Signal sismique et évolution du spectre normé pour le capteur 2 (sur le massif) dans la direction horizontale (e et g). Rapports spectraux normalisés entre l'écaïlle et le massif (capteurs 1 et 2) dans la direction horizontale (g). Les fréquences des modes 1, 2 et 3 trouvés par l'analyse linéaire (figure 3c) sont indiquées par des étoiles (figures c, d et g). Les bandes blanches verticales correspondent aux ruptures de ponts rocheux.

Le milieu est constamment excité par des sources de bruit blanc situées sur des nœuds du massif préalablement choisi (figure 3a). A chaque pas de temps, un incrément de déplacement aléatoire (calculé par le logiciel de Matsumoto et Nishimura, 1998) est imposé pour ces nœuds. Le signal sismique est sauvegardé pour 2 nœuds du modèle (figure 3a). Un délais de 100 s est laissé entre chaque rupture afin d'obtenir des fenêtres de bruit entre les signaux de rupture (figure 3b). Ce bruit est utilisé pour faire des spectres (figure 4). Les spectres de bruit du capteur situé sur l'écaïlle (figures 4c et 4d) présentent des pics aussi bien dans la direction verticale que horizontale. Les valeurs de ces pics décroissent avec le temps et le nombre de ponts rocheux. Bien que ces pics aient les mêmes valeurs en fréquence dans les 2 directions, leur amplitude dépend de la direction d'enregistrement. Ainsi, le pic le plus bas (qui évolue de 6 Hz à 1 Hz) est beaucoup plus énergétique dans la direction horizontale (figure 4c) que dans la direction verticale (figure 4d). Les spectres de bruit du capteur situé sur le massif montrent un aspect général très différent de ceux de l'écaïlle (figure 4f), sans l'émergence nette de pics. En effet, le massif simulé a un grand nombre de fréquences propres difficiles à isoler les unes

des autres car elles couvrent de manière quasi continue la bande de fréquence étudiée.

Nous avons calculé les rapports spectraux entre l'écaïlle et le massif. Les spectres de Fourier ont d'abord été lissés (Konno et Ohmachi, 1998) pour éviter des valeurs de diviseur irréalistes. Ces rapports permettent d'améliorer la résolution de la réponse dynamique de l'écaïlle (i.e. les pics en fréquence) en s'affranchissant de l'influence du massif. Afin d'identifier ces pics en fréquence, une analyse modale linéaire par éléments finis de l'écaïlle a été réalisée avec les caractéristiques géométriques à 1200 secondes. Cette analyse prouve que les 3 pics trouvés en analyse dynamique correspondent aux fréquences des 3 premiers modes de l'écaïlle (1 Hz, 4,3 Hz et 6,4 Hz), dont les déformées modales sont présentées en figure 3c. La diminution de ces fréquences propres au cours de la simulation dynamique résulte de la rupture de ponts rocheux, et donc, de la perte de rigidité de l'interface écaïlle/massif. Cette évolution est un paramètre indicateur du degré de découplage d'une écaïlle rocheuse par rapport au massif. Elle pourrait servir à la surveillance de sites instables. Les déformées modales (figure 3c) montrent cependant que certains modes vibrent parfois dans une direction privilégiée. En particulier, le 1^{er} mode présente un déplacement plus important dans la direction horizontale que verticale, ce qui est cohérent avec les spectres calculés en analyse dynamique. Il sera donc plus prudent d'utiliser des capteurs 3 composantes sur le terrain.

4. Analyse fréquentielle des données in situ (Chamousset)

Après avoir montré numériquement que l'observation des fréquences propres d'une écaïlle rocheuse est pertinente pour suivre l'évolution vers l'éboulement, une validation expérimentale sur le site de Chamousset est proposée.

Le bruit sismique enregistré in situ a été utilisé pour calculer des spectres de Fourier. Ces spectres sont sommés par jour d'enregistrement pour le géophone vertical installé sur l'écaïlle (C1 et C'1, figure 2c), ainsi que pour la voie verticale du géophone 3-composantes installé sur le massif (C2 et C'2). Une nette différence de contenu fréquentiel a pu être observé pour les spectres de bruit ambiant enregistrés sur le plateau (figure 5b) et ceux enregistrés sur l'écaïlle (figure 5a). Comme prévu (cf. résultats de l'étude numérique en partie 3), des pics d'énergie sont observés sur l'écaïlle pour des valeurs autour de 3 Hz, 8 Hz et 44 Hz. A l'inverse, aucun pic n'est visible pour le capteur installé sur le plateau (figure 5b). Cette différence révèle l'important découplage entre l'écaïlle et le massif. De plus, les fréquences de ces pics diminuent avec le temps, illustrant le détachement progressif de l'écaïlle. Le rapport spectral écaïlle/massif (figure 5c) améliore l'identification des fréquences propres de l'écaïlle. En effet, un pic d'énergie vers 20 Hz au début de la campagne d'instrumentation (01/08/2007), qui diminue ensuite vers 10 Hz, a pu être mis en évidence. Le rapport spectral n'a pas été calculé pour les données enregistrées après le 10/10/2007, car le couplage des géophones 4,5 Hz n'était pas de la même qualité sur l'écaïlle et sur le plateau.

La plus basse fréquence propre était mesurée à 3,6 Hz en juillet 2007, avant de décroître légèrement à 3,4 Hz début octobre, pour finalement chuter à 2,6 Hz deux semaines avant l'éboulement en novembre (figure 5d). En même temps, l'ouverture de la fracture augmentait (figure 5d), avec une accélération des déplacements à la mi-octobre. Ces mesures, bien que discontinues, illustrent la dynamique de l'endommagement progressif de l'interface écaïlle/massif.

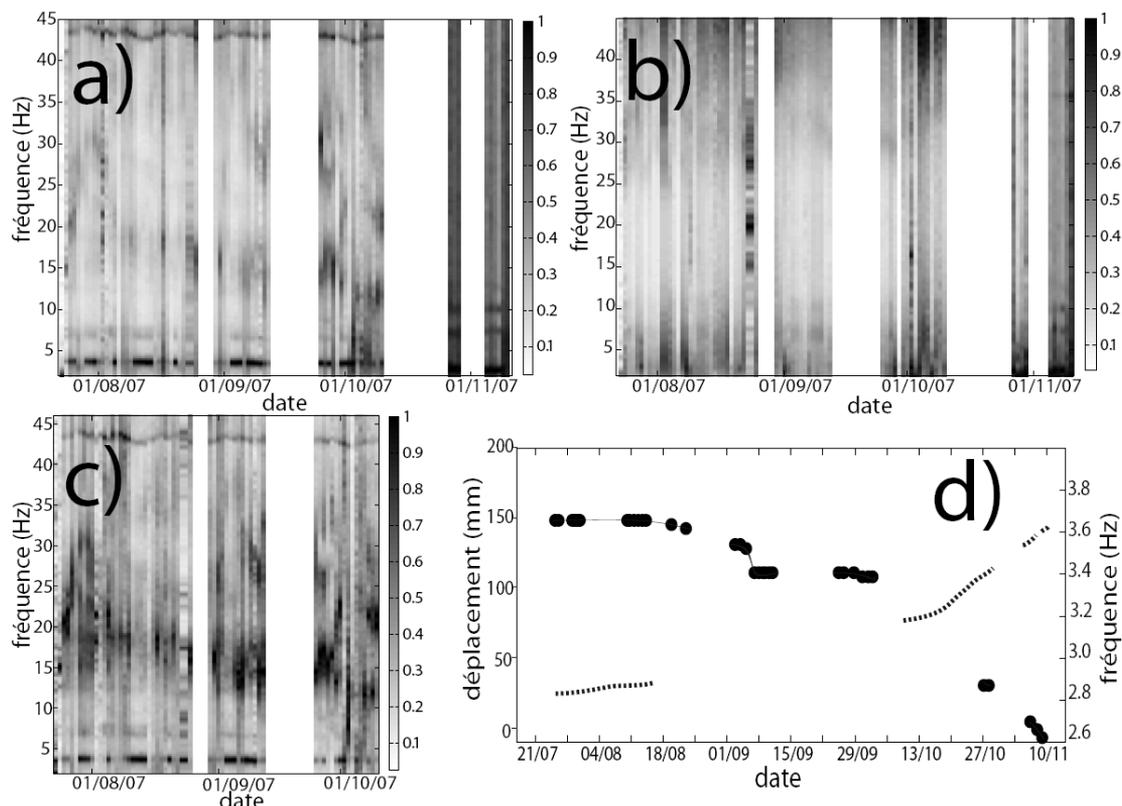


Figure 5. a) Spectres normés en fonction du temps pour les géophones verticaux (C1 ou C'1) sur l'écaille de Chamousset. b) Spectres normés en fonction du temps pour les géophones verticaux (C2 ou C'2) sur le massif. c) Rapports spectraux normalisés entre l'écaille et le massif (C1 et C2) en fonction du temps. d) Evolution de la plus basse fréquence propre (ligne avec des cercles) et de l'ouverture de la fissure (ligne pointillée) en fonction du temps pour l'écaille de Chamousset.

5. Conclusions et perspectives

Les fréquences propres d'une écaille rocheuse peuvent être facilement déduites d'enregistrements de bruit sismique, en calculant les spectres de Fourier des mouvements en tête d'écaille. Ces fréquences sont toutefois mieux identifiables lorsqu'il est possible de réaliser le rapport spectral écaille/massif. Bien que les fréquences propres aient été mesurées sur le site de Chamousset avec des géophones verticaux, les simulations montrent que la plus basse fréquence propre est plus facilement identifiable sur une composante horizontale. Les mesures in situ et les simulations confirment que les fréquences propres d'une écaille rocheuse diminuent fortement avant son éboulement. Les simulations montrent que cette diminution dépend de la raideur globale de l'interface écaille/massif, qui est contrôlée par la proportion de ponts rocheux. De plus, la 1^{ère} fréquence propre, mesurée entre 2 et 4 Hz à Chamousset, dépend du volume de l'écaille et peut être inférieure à 1 Hz pour des écailles plus volumineuses. Aussi, la configuration instrumentale minimale pour ce genre d'étude serait d'au moins 2 capteurs large bande 3-composantes installés sur l'écaille et le massif.

Contrairement à des précurseurs qui se manifestent localement comme l'ouverture des fissures en surface, la diminution des fréquences propres témoigne de l'état général de détérioration de l'interface écaïlle/massif. Les applications seront multiples. Si le volume instable peut être estimé et la 1^{ère} fréquence propre mesurée, alors il serait possible, avec l'aide de simulations, d'estimer le pourcentage de ponts rocheux et l'état de stabilité à un instant donné. Les réseaux sismiques pourront aussi servir à la détection de sites instables, ainsi qu'à la délimitation de volumes instables dans les cas où les fractures en bordures ne sont pas visibles. Si l'enjeu est suffisamment important, un système d'enregistrement pourra être installé et la chute de la 1^{ère} fréquence propre constituera un précurseur fiable d'éboulement. Les résultats de cette étude ont été obtenus pour une roche dure et fragile (du calcaire), avec une écaïlle bien délimitée et découplée de la masse rocheuse. L'application de cette technique sur des roches plus tendres affectées par des mécanismes de déformations complexes doit encore être testée.

6. Remerciements

Ce travail a en partie été financé par l'ANR Triggerland et par V.O.R (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques). Nous remercions R. Béthoux, G. Cougoulat, la société Myotis, les gardes et le responsable du Parc Régional des Hauts-Plateaux du Vercors pour leur aide. Les simulations ont été réalisées sur le calculateur ICARE de l'Observatoire de Grenoble.

7. Références bibliographiques

- Baillet L., Sassi T. (2006) Mixed finite element methods for the Signorini problem with friction. *Numerical Methods for Partial Differential Equations* 22 (6), 1489-1508.
- Clinton J. F., Bradford S. C., Heaton T. H., Favela J. (2006) The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of the Seismological Society of America* 96 (1), 237-257.
- Crosta G., Agliardi F. (2003) Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Can. Geotech. J.* 40, 176-191.
- Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemin T., Effendiantz L., Mathy A. (2008) Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potential unstable cliff site (Vercors Massif, France). *Journal of Geophysics and Engineering* 5, 147-157.
- Deparis J., Garambois S., Hantz D. (2007) On the potential of Ground Penetrating Radar to help rock fall hazard assessment of a limestone scale. *Engineering Geology* 94, 89-102.
- Frayssines M., Hantz D. (2006) Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Eng. Geology* 86, 256-270.
- Gidon M. (1977) Carte géologique simplifiée des Alpes occidentales, du Léman à Digne, au 1/250.000°, éditée par Didier & Richard et B.R.G.M.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Philipposian, F., Rouiller J.-D. (2004) Assessing the fracture occurrence using the "Weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability hazard. *NHESS* 4, 83-93.
- Jeannin M., Garambois S., Grégoire C., Jongmans D. (2006) Multi-configuration GPR measurements for geometrical fracture characterization in limestone cliffs (Alps). *Geophysics* 71 (3), B85-B92.
- Konno K., Ohmachi T. (1998) Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 (1), 228-241.
- Matsumoto M., Nishimura T. (1998), Mersenne twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation* 8 (1), 3-30.
- Michel C., Gueguen P., Bard P.-Y. (2008) Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28, 593-604.