

ECOUTE MICROSISMIQUE APPLIQUEE AUX VERSANTS ROCHEUX INSTABLES, EXEMPLE DES ROCHERS DE VALABRES (06)

Cécile CLEMENT¹, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF¹, Clémence DÜNNER¹, Judith SAUSSE²

¹ LAEGO-INERIS, Ecole des Mines, Nancy, France

² UMR CNRS 7566 G2R, Université Henri Poincaré-Nancy 1, Vandœuvre-lès-Nancy, France

RÉSUMÉ – Un réseau microsismique, implanté sur le site expérimental des Rochers de Valabres, a pour objectif de détecter les mécanismes précurseurs d'instabilité du versant. L'activité microsismique du site est significative et concomitante à des sollicitations diverses (séismes régionaux, activités anthropiques, phénomènes météorologiques exceptionnels) qui affectent le massif. La localisation des foyers sismiques a été figurée sur un géomodèle gOcad®, où sont également représentées la topographie et la fracturation du versant.

1. Introduction : le site laboratoire des Rochers de Valabres

1.1. Présentation du site

Le site des Rochers de Valabres est implanté dans une gorge encaissée de la vallée de la Tinée (Alpes-Maritimes). C'est un escarpement rocheux, d'une hauteur de 1000 m environ, taillé dans un gneiss migmatique du socle hercynien. Le site est façonné par des éboulements successifs qui ont menacé des équipements hydroélectriques EDF et la Route Départementale 2205, surplombés par le versant.

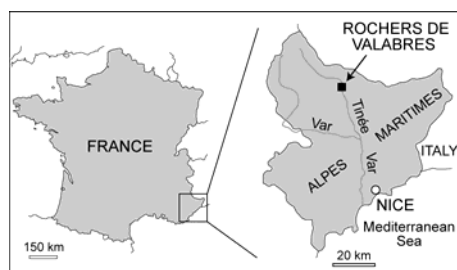


Figure 1. Localisation des Rochers de Valabres

Le versant a été choisi comme site laboratoire (Gunzburger, 2004) et instrumenté depuis 2003, grâce à un partenariat entre l'INERIS, le LAEGO, Géosciences Azur et Géosciences Besançon. Le versant est aujourd'hui équipé d'un dispositif expérimental important, composé de cibles tachéométrique, de sondes microsismiques et de mesures géotechniques. Les résultats de l'auscultation microsismique sont présentés dans cet article.

1.3. La fracturation et la géométrie du versant

La zone étudiée correspond à un affleurement rocheux de 200 m de hauteur. L'étude de la fracturation du site a mis en évidence un réseau de discontinuités regroupées en huit familles (cf. figure 2, Gunzburger, 2004). La géométrie du site est marquée par la présence de dalles rocheuses à pendage vers la vallée (représentées en rouge sur la figure 2) séparées par un réseau dense de fractures à pendage subvertical. Le relevé topographique de cette géométrie a été réalisé au moyen d'un scanner laser haute-résolution (système RIEGL LMS-Z420i, développé par la société ATM). Ce scanner, de précision inférieure à 1 cm (Delacourt et al. 2006) a permis d'acquérir un Modèle Numérique tridimensionnel de Terrain (MNT), qui a été

représenté dans le géomodeleur gOcad® (Earth Decision Sciences, LIAD-ENSG) pour le traitement et la visualisation (Mallet 2002).

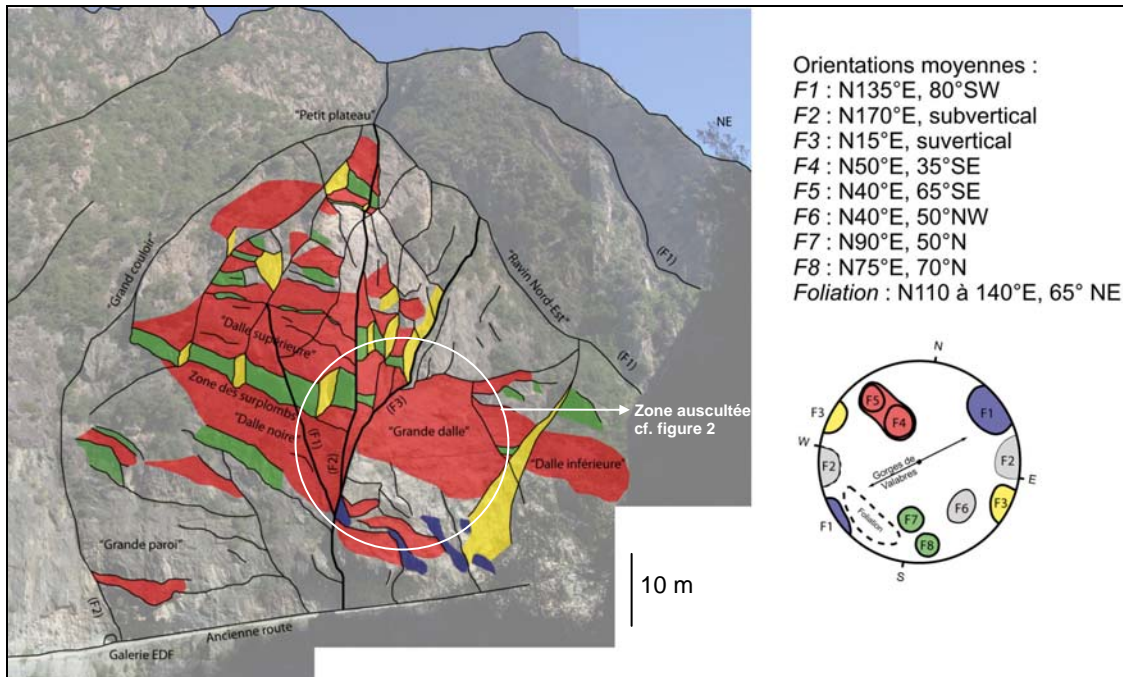


Figure 2. Géométrie et fracturation du versant (Gunzburger, 2004).

2. Le réseau d'auscultation microsismique

Les techniques d'écoute microsismique sont déployées, avec succès, dans la prévention des risques souterrains, notamment dans le cadre de l'exploitation de matières premières (Oye et Roth, 2003), de la surveillance des mines abandonnées (Senfaute et al., 2000) ou des travaux d'excavation (Cai et al., 2001). L'utilisation de ce type d'instrumentation se développe actuellement dans l'étude des versants rocheux où une activité microsismique accrue a pu être détectée, préalablement à un effondrement (Senfaute et al., 2003).

L'écoute microsismique est une instrumentation de grande sensibilité, qui permet d'assurer une auscultation volumétrique d'un ouvrage alors que l'instrumentation géotechnique est en général surfacique ou linéaire (dans un forage).

2.2. Caractéristiques du réseau

Le réseau microsismique de Valabres (Merrien-Soukatchoff et al. 2005) est opérationnel depuis août 2003. Il est implanté dans une zone qui a subi un écoulement important en mai 2000. Le dispositif est constitué de cinq sondes de mesure (cf. figure 3) :

- quatre sondes de type géophone unidirectionnel (VG1, VG2, VG3 et VG4), de bande passante comprise entre 40 Hz et 1 kHz, implantées dans des forages horizontaux (1 m de profondeur environ).
- une sonde de type accéléromètre tri-directionnel (VA), plus sensible, implantée dans un forage vertical. Sa bande passante est comprise entre 1 Hz et 10 kHz.

Les sondes sont raccordées à un coffret de jonction, placé sur la route surplombée par le versant, qui assure l'alimentation et la commande des sondes. Le coffret est lui-même relié à une centrale d'acquisition, située dans une galerie EDF, pour enregistrement et télétransmission des données au CENARIS (Centre NATIONAL de Surveillance des RISques du Sol et du Sous-sol) à l'INERIS-Nancy.

Le fonctionnement de la chaîne de mesure est assuré par les logiciels SYTMIS®, développés par l'INERIS, qui assurent l'acquisition, la visualisation et le traitement des données microsismiques (cf. Couffin et al., 2003)

2.3. Etude de la propagation des ondes dans le massif

Le massif rocheux de Valabres est un gneiss fracturé et anisotrope, du fait d'une foliation hercynienne marquée, ce qui conditionne fortement la propagation des ondes dans le massif. Des essais acoustiques en laboratoire, ainsi qu'une expérimentation in situ ont été menés afin d'analyser la propagation des ondes dans cette roche.

Une éprouvette de gneiss, issue des travaux d'installation du réseau et présentant une foliation parallèle à son axe, a été réduite à un diamètre de 64 mm puis équipée de sept transducteurs électro-mécaniques, dont 3 en mode émission et 4 en mode réception (protocole établi par Wassermann et al, 2003). Les vitesses des ondes P, estimées selon les différentes orientations de la foliation, sont les suivantes :

V_{axiale} (parallèle à la foliation) = 5036 m/s

V_{radiale} (parallèle à la foliation) = 4295 m/s

V_{radiale} (perpendiculaire à la foliation) = 3457 m/s

Afin d'estimer la vitesse et l'atténuation des ondes à l'échelle du massif et d'intégrer l'influence de la fracturation, une campagne d'acquisition, basée sur l'enregistrement des ondes émises par l'impact d'un marteau de Schmidt (de grande dimension), a été réalisée sur le versant. Douze points d'impact ont été répartis autour du réseau. Un capteur de surface, positionné à proximité de l'impact, a permis l'enregistrement du temps origine. La vitesse moyenne des ondes P dans le massif, déduite de cette campagne, est de 4300 m/s. Toutefois, les mesures réalisées dans les différentes directions de l'espace, ont mis en évidence l'influence majeure des grandes discontinuités. Ainsi, les ondes enregistrées par la station VG3 (cf. figure 3) et dont le trajet a croisé une faille séparant deux dalles rocheuses, est d'environ 4100 m/s. Cette valeur croît à 4700 m/s pour un trajet d'ondes n'interceptant pas de discontinuité majeure. Par ailleurs, l'atténuation mesurée est significative : on observe en moyenne une diminution de 65% de l'amplitude du signal sur 4.5 mètres.

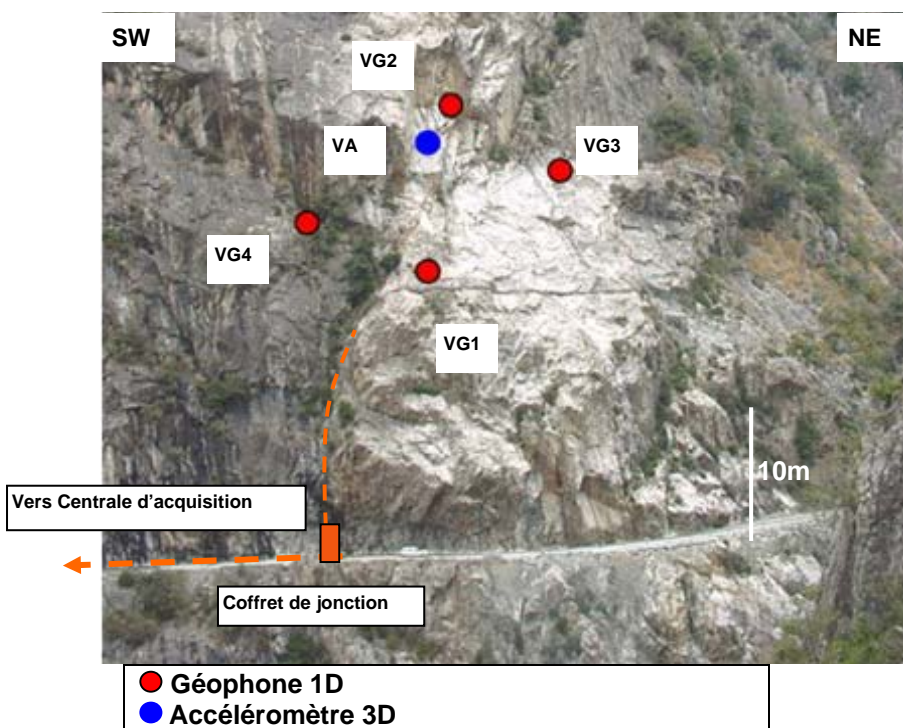


Figure 3. Implantation du réseau microsismique



Figure 4. Essais acoustiques en laboratoire, Système d'acquisition

3. Bilan des enregistrements microsismiques

Depuis sa mise en service opérationnelle en août 2003, le réseau microsismique de Valabres présente une activité importante. Plus de 5000 signaux ont été détectés puis re-transmis au CENARIS à Nancy. Parmi ces signaux, 3326 ont été classés comme événements microsismiques, c'est à dire considérés comme relatifs à la création ou la propagation de la fracturation. Le suivi du réseau nécessite donc un filtrage régulier et une classification de ces enregistrements.

Parmi les enregistrements du réseau, des séismes régionaux, de magnitude comprise entre 1 et 3,5 sont régulièrement détectés. Les foyers de ces séismes sont situés dans la vallée de la Tinée, région particulièrement sismique, dans un rayon souvent inférieur à 15 km. Des séismes très locaux peuvent affecter la commune de Roure où est implanté le site expérimental. Les séismes régionaux sont enregistrés par les capteurs pendant 2 à 20 secondes, avec une fréquence basse, inférieure à 60 Hz et sont donc facilement identifiables.

Des émissions acoustiques engendrées par des tirs dans les carrières environnantes (vallée de la Tinée ou région de Cunéo, Italie) sont aussi détectées par le système de mesure. Les tirs génèrent des signaux de fréquence plus élevée (entre 60 et 100 Hz) que les séismes. Ces déclenchements d'origine externe au versant, montrent la sensibilité du système de mesure et permettent de détecter les sollicitations sismiques et anthropiques qui affectent le versant.

Les signaux classés microsismiques se distinguent par leur fréquence élevée, supérieure à 100 Hz, et leur courte durée (inférieure à 0,1 s). Ils peuvent être enregistrés par une unique sonde ou par l'ensemble du réseau. Le système est donc capable de détecter des émissions attribuées à la microfissuration, à proximité des capteurs, mais aussi des phénomènes affectant l'ensemble du massif rocheux.

Les signaux enregistrés par les géophones présentent une fréquence moyenne de 300 Hz. La sonde accélérométrique, plus sensible, détecte des événements plus brefs et impulsifs, de fréquence moyenne d'environ 8 kHz. La sonde accélérométrique est composée de 3 capteurs. Cette singularité permet d'estimer l'azimut et le pendage du rai sismique émergent par la technique de rotation d'onde (Abdul-Wahed, 2001). Les ondes enregistrées par la station accélérométrique présentent généralement un pendage quasi-vertical (70-90°), donc orienté vers les plans de discontinuités repérés sous la station, entre 1 et 3 m de profondeur.

4. Localisation des foyers sismiques et représentation tridimensionnelle

4.1. Localisation des foyers microsismiques

Une sélection d'événements microsismiques peut faire l'objet d'une localisation des foyers. Les signaux concernés ont été détectés par un minimum de quatre stations et présentent un rapport signal sur bruit correct. Aussi, ces critères limitent les localisations à 29 signaux de forte énergie ($5 \cdot 10^{-5}$ Joules environ).

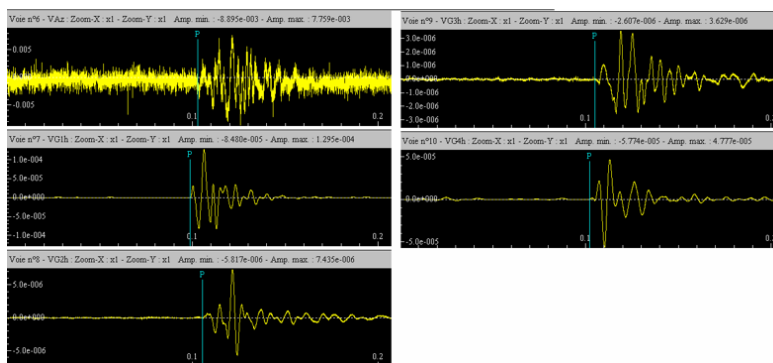


Figure 5. Événement microsismique du 13/03/05, visualisé sous SYTMISView ®.

La méthode de localisation employée est la méthode de CHEAP (Calcul Hypocentral avec Etablissement Automatique de Probabilité, Tarantolo, 1982), intégrée dans le logiciel SYTMISAuto®, développé par l'INERIS. La technique de CHEAP est une méthode inverse itérative non linéaire, basée sur l'exploration systématique de l'espace des foyers et la maximisation de la densité de probabilité de présence.

La sélection de signaux a été traitée par pointé manuel (cf. figure 5) des temps de première arrivée de l'onde P, et en insérant un modèle de vitesse d'une couche de 4300 m/s (correspondant à la vitesse moyenne mesurée in situ).

4.2. Représentation des foyers et du réseau de fractures sous gOcad®

Le logiciel gOcad®, vise à représenter et traiter les objets géologiques. Il est utilisé depuis peu en géophysique pour caler les données aux formations géologiques (Kemp, 2000).

Le Modèle Numérique de Terrain, élaboré en 2003 par photogrammétrie sur le site de Valabres, a servi de base à la création, sous gOcad®, d'un géomodèle du site. Ce modèle représente dans l'espace tri-dimensionnel la surface du versant et les équipements de mesure (cf. figure 6). Les facettes structurales, visibles en surface, ont été prolongées en profondeur, selon leur direction moyenne ce qui permet de visualiser le réseau de fractures dans le massif (cf. figure 7). Le prolongement n'est toutefois envisageable que sur quelques dizaines de mètres, la structure tridimensionnelle du réseau n'étant pas connue de manière déterministe (Gunzburger, 2004).

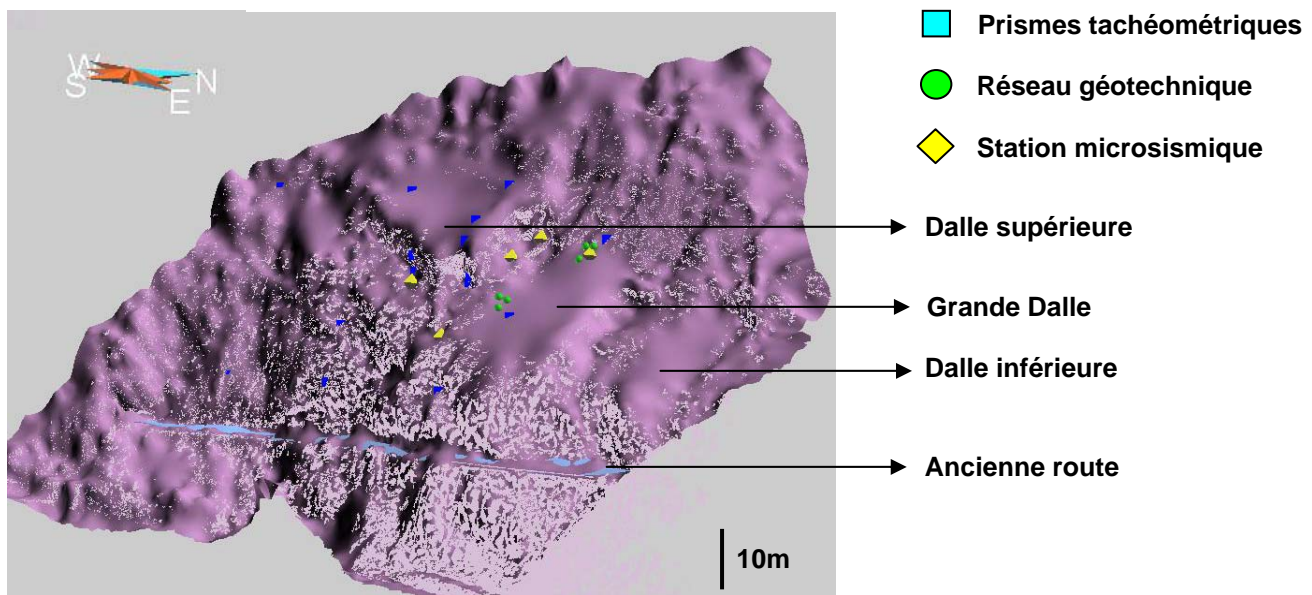


Figure 6. Géomodèle gOcad du site.

L'implantation des foyers sismiques dans le géomodèle permet la corrélation entre les discontinuités et l'activité microsismique du massif. On observe ainsi deux zones, où se regroupent les foyers :

- un escarpement rocheux au-dessus de la grande dalle et des capteurs VG2 et VG3 (cf. figure 3). Cette zone est complexe car elle correspond à un réseau dense de discontinuités et de blocs. Les foyers sont regroupés en amas autour de plans moyens de même orientation que les familles F4-F5. Ils pourraient s'agir du prolongement dans le massif de ces dalles topographiques, principalement du prolongement de la « Grande Dalle » (cf. figure 8). Notons que F4-F5 sont des plans de glissement potentiels vers la vallée, qui ont joué un rôle majeur lors des écroulements survenus sur le site.

- une zone plus profonde, au centre du réseau microsismique, où des discontinuités majeures séparent la « Grande Dalle » de la « Dalle supérieure » et traversent le réseau. Des foyers sismiques sont ainsi localisés à proximité des fractures appartenant aux familles F2-F3 et F7-F8 (cf. figure 9).

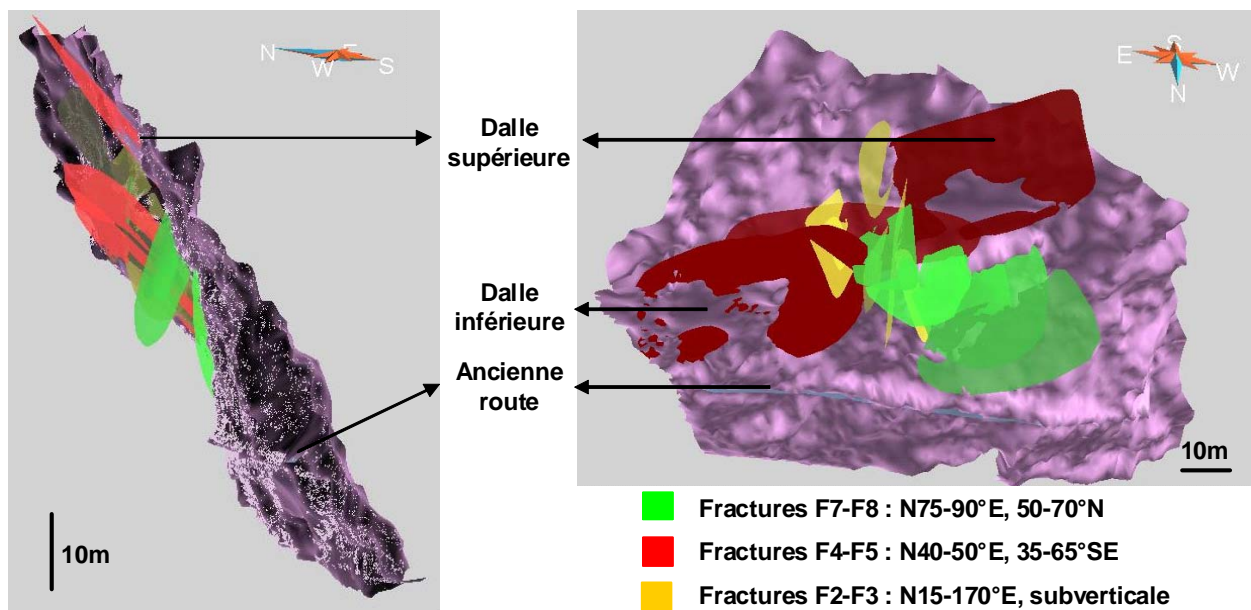


Figure 7. Prolongement du réseau de fractures en profondeur. A gauche : vue de coté, en direction du NE. A droite : vue de derrière

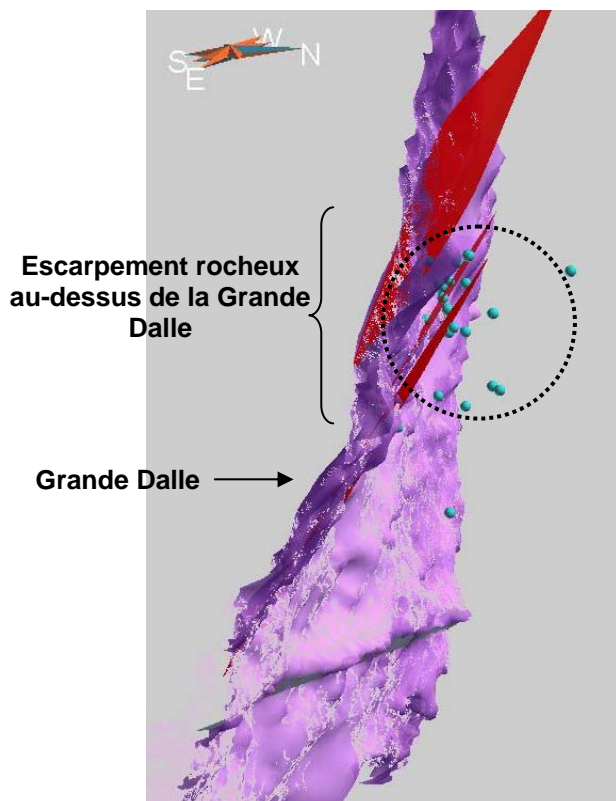


Figure 8. Localisation des foyers et des discontinuités F4-F5. Vue en direction du SW

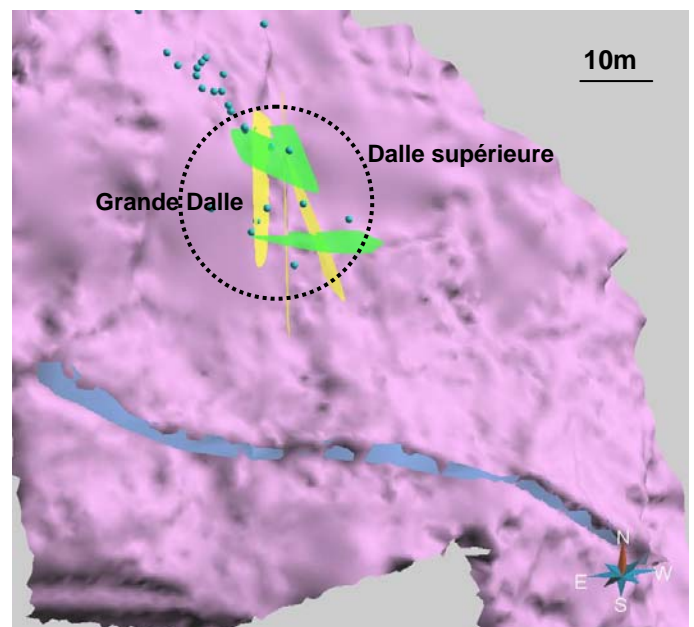


Figure 9. Localisation des foyers et des discontinuités F2-F3 et F7-F8. Vue de derrière

5. Influence des sollicitations extérieures sur l'activité microsismique du site

La vallée de la Tinée est un territoire de moyenne montagne du sud de la France (800 m d'altitude moyenne). Au niveau des Rochers de Valabres, la vallée de la Tinée est nettement plus encaissée et forme une gorge étroite. Le site expérimental est affecté par des sollicitations climatiques importantes : les variations thermiques journalières sont élevées (20°C maximum), les rafales de vent importantes (jusqu'à 45 m/s) et les pluies abondantes (jusqu'à 100 mm/jour). Le versant connaît des périodes de gel (21% de jours/an). Par ailleurs, la vallée de la Tinée est une région particulièrement sismique : 45 séismes régionaux ont été recensés par le RéNass (Réseau National de Surveillance Sismique, Strasbourg).

Depuis sa mise en service opérationnelle, le réseau d'auscultation microsismique semble répondre quantitativement à ces sollicitations climatiques et sismiques. Régulièrement, des périodes, qualifiées de crises microsismiques, apparaissent, avec une moyenne de 200 enregistrements (cf. tableau 1). Ces crises correspondent systématiquement à des périodes sismiques ou orageuses, ou à grandes variations thermiques. L'action du vent est ici indirecte ; les enregistrements, reçus lors des fortes rafales de vent, sont probablement liés aux vibrations des filets de protection ancrés dans la dalle rocheuse.

L'analyse précise des signaux doit se poursuivre afin de déterminer s'il est possible de discriminer différentes typologies de signaux en fonction des sollicitations qui affectent le versant.

Tableau I. Crises microsismiques

Date	Nombre d'évènements	Sollicitations observées
07 au 08/10/03	606	Rafale de vent (31 m/s)
31/10/03	18	Rafale de vent (24 m/s) + Pluviométrie abondante (100 mm)
21 au 23/12/03	73	Rafale de vent (22 m/s)
12 au 13/01/2004	233	Rafale de vent (44 m/s)
20 au 21/02/2004	118	Rafale de vent (17 m/s) + Gel
30/03/04	23	Rafale de vent (17 m/s)
04 au 20/06/04	64	Ecart thermique (15,8 °C)
21 au 30/08/04	82	Ecart thermique (18,8 °C)
15 au 16/12/04	76	Gel + séisme
26/12/04	1223	Gel + séisme
13 au 14/02/2005	90	Rafale de vent (27 m/s) + Gel
20 au 30/05/05	68	Ecart thermique (15,2°C)
09 au 21/06/05	64	Ecart thermique (12,6°C)
29/07/05 au 11/08/05	140	Ecart thermique (16,2 °C)

6. Conclusions

Le réseau d'écoute de Valabres a montré sa capacité à enregistrer de nombreux signaux microsismiques, dont une sélection peut être associée aux discontinuités visibles sur le versant. Le suivi nécessite un filtrage et une classification précise, du fait des nombreux bruits sismiques et anthropiques qui affectent le versant. L'activité microsismique, proprement dites, est abondante et concomitante des sollicitations climatiques et sismiques. L'application de techniques statistiques prédictives sur les séries temporelles permettra de vérifier les corrélations. La connaissance et l'identification des signaux régulièrement enregistrés sur ce site en période d'activité "normale" permettra à terme de détecter des signaux inhabituels, (pathologiques) potentiellement précurseurs d'instabilités.

Le réseau présente l'avantage d'assurer une auscultation volumétrique du versant. Toutefois, la forte atténuation des ondes dans le massif, fortement fracturé, réduit le rayon d'écoute des capteurs. Une extension du nombre de sondes accélérométriques, prévue en 2006/2007, augmentera la performance du système.

7. Références bibliographiques

- Abdul Wahed M. (2001). Etude de la microsismicité induite à partir des sismogrammes tridirectionnels. *Thèse, LAEGO, Ecole des Mines, INPL, France.*
- Cai M., Kaiser P.K., Martin C.D. (2001). Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 38, Issue 8, 1 December 2001, Pages 1135-1145.*
- Couffin S., Bigarré P., Bennani M., Josien J.P. (2003). Permanent real time microseismic monitoring of abandoned mines for public safety. *FMGM 2003. 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 15-18 September 2003, Oslo, Norway, pp 437-444.*
- Delacourt C., Allemand P., Berthier E., Raucoules D., Casson B., Grandjean P., Pambrun, Varel E. (2006). Remote-sensing techniques for landslides surface displacement analysis, *soumis au Bulletin de la Société Géologique de France.*
- Gunzburger Y. (2004) Rôle de la thermique dans la prédisposition, la préparation et le déclenchement des mouvements de versants complexes. Exemple des Rochers de Valabres (Alpes-Maritimes). *Thèse, LAEGO, Ecole des Mines, INPL, France, 17/12/2004, 174 p. + Annexes.*
- Kemp E. (2000). 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. *Computers & Geosciences, Volume 26, Issue 5, 1 June 2000, Pages 509-530.*
- Mallet J.L. (2002). *Geomodeling. Applied Geostatistics.* Oxford University Press.
- Merrien-Soukatchoff V., Clément C. Senfaute G., Gunzburger Y. (2005). Monitoring of a potential rockfall zone: The case of "Rochers de Valabres" site, International Conference on Landslide Risk Management. 18th Vancouver Geotechnical Society Symposium, May 31-June 3, 2005.
- Oye V., Roth M. (2003). Automated seismic event location for hydrocarbon reservoirs. *Computers & Geosciences, Volume 29, Issue 7, August 2003, pp 851-863.*
- Senfaute G., Abdul Wahed M., Piguet J.P., Josien J.P. (2000). Techniques d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain. *Revue Française de Geotechnique, 92, pp 57-62.*
- Senfaute G., Merrien-Soukatchoff V., Morel J., Gourry J.C. (2003). Microseismic monitoring applied to prediction of chalk sides collapses and contribution of numerical modelling. *Proc. Intern. Conf. on fast slope movements, 11-13 Mai 2003, Naples, Italie, Picarelli L. (éd.), Pàtron editore, Bologna, Italie.*
- Tarantola A., Valette B. (1982). Generalized Nonlinear Inverse Problems Solved Using the Least Squares Criterion. *Reviews of geophysics and space physics, vol.20.*
- Wassermann J., Amitrano D., Senfaute G., Homand F. (2003). Damage evolution during uniaxial compressive tests evaluated by acoustic emission monitoring. *Int. Symp. on Geotech. Measurements and Modelling (GTMM), Karlsruhe, Allemagne.*