



Mesures de contraintes dans un versant rocheux prédisposé aux instabilités

Clémence Dünner, Pascal Bigarre, Véronique Merrien-Soukatchoff

► To cite this version:

Clémence Dünner, Pascal Bigarre, Véronique Merrien-Soukatchoff. Mesures de contraintes dans un versant rocheux prédisposé aux instabilités. Risques géotechniques et environnement liés à l'aménagement, 2006, Lyon, pp.III_209-216. ineris-00089024

HAL Id: ineris-00089024

<https://ineris.hal.science/ineris-00089024>

Submitted on 9 Aug 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MESURES DE CONTRAINTES DANS UN VERSANT ROCHEUX PREDISPOSE AUX INSTABILITES

Clémence DÜNNER¹, Pascal BIGARRE¹, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF².

1 CENARIS, LAEGO-INNERIS, Ecole des Mines, Nancy, France

2 LAEGO-INNERIS, Ecole des Mines, Nancy, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre de l'expérimentation VAL-STRESS3D, visant à caractériser les champs de contraintes naturelles et de déformations thermomécaniques sur le Site Laboratoire Pilote des Rochers de Valabres, un profil de contraintes naturelles a été réalisé depuis la surface vers l'intérieur du versant sur une profondeur d'investigation supérieure à celle des masses d'éboulements elles-mêmes. L'article présente les résultats préliminaires de ces mesures.

1. Introduction

Malgré leur impact socio-économique important sur le développement en zones montagneuses, les éboulements rocheux constituent un risque naturel dont les mécanismes sont encore mal compris. Ils constituent un risque permanent tant pour les personnes (La Réunion, Aussois en 2006) que pour les biens et les infrastructures. Le caractère soudain du phénomène constitue une difficulté majeure en terme de prédiction même à court terme. Aucune méthode ne permet à ce jour de prévoir précisément, sur un site reconnu à risque, la localisation exacte de la prochaine occurrence, son ampleur et sa date probable. Cette difficulté est liée à la complexité de la géostructure, en particulier dans sa zone « superficielle » objet des décrochements et éboulements, c'est-à-dire à la multiplicité des facteurs en jeu et à leurs interactions.

Dans le but d'améliorer la compréhension des mécanismes d'instabilités rocheuses, le Site Laboratoire Pilote (SLP) des Rochers de Valabres, localisé dans les Alpes Maritimes et surplombant la vallée de la Tinée, fait l'objet depuis 2002, de travaux d'étude et de recherche conduits notamment par l'INNERIS, les laboratoires du LAEGO, de Géosciences Azur et de Géosciences Besançon (Clément et al., 2006 et Gunzburger et al., 2004). Ce versant a été progressivement équipé par les partenaires de dispositifs de télémesures composés de capteurs météorologiques, de cibles tachéométriques, ainsi que de capteurs microsismiques (Merrien-Soukatchoff et al., 2005) et géotechniques.

L'objectif de cette démarche instrumentale est double. En premier lieu, il s'agit de quantifier et mieux comprendre l'impact des sollicitations naturelles externes sur les mécanismes de déformation et d'altération lents, dans une structure faisant l'objet d'une reconnaissance approfondie régulière. En second lieu, le SLP permet également de tester des techniques de télémesure et de bénéficier d'un retour d'expérience important sur les aspects de métrologie, fiabilité et performance des méthodes déployées en conditions réelles particulièrement difficiles.

Ainsi, le champ local des contraintes naturelles qui s'exerce dans les vingt premiers mètres d'une telle géostructure, hétérogène et altérée à l'échelle de l'aléa étudié, est un des paramètres importants faisant l'objet d'incertitudes. L'INNERIS a démarré, en 2005, l'expérimentation VAL-STRESS3D intégrant différents essais de mesures, portant sur :

- le champ de contraintes naturelles, fonction de nombreux paramètres géologiques, géométriques et rhéologiques ;
- le champ de déformation engendré par des variations climatiques de température (Gunzburger, 2004).

Une première campagne d'essais de mesures de contraintes naturelles a été réalisée en novembre 2005. Les résultats préliminaires obtenus sont décrits et discutés ci-après.

2. Conception de la campagne de mesures de contraintes

Cette campagne a consisté à réaliser un profil de mesures de contraintes absolues depuis la surface vers le cœur du versant, visant à quantifier le champ de contraintes et son hétérogénéité.

Le forage de mesure a été réalisé à partir d'une voie d'accès en encorbellement (altitude 700 m) située au-dessus de la vallée.

Les mesures de contraintes ont été effectuées le long du forage subhorizontal en direction de la plus grande pente par rapport au relief surplombant la zone d'essai. Six essais de mesures de contraintes par surcarottage ont été réalisés avec l'avancement du forage. La cellule de déformations utilisée est de type CSIRO Hi12 à inclusion souple. Cette cellule permet de mesurer un tenseur de déformation complet et d'estimer les contraintes principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) locales (Duncan Fama et Pender, 1980).

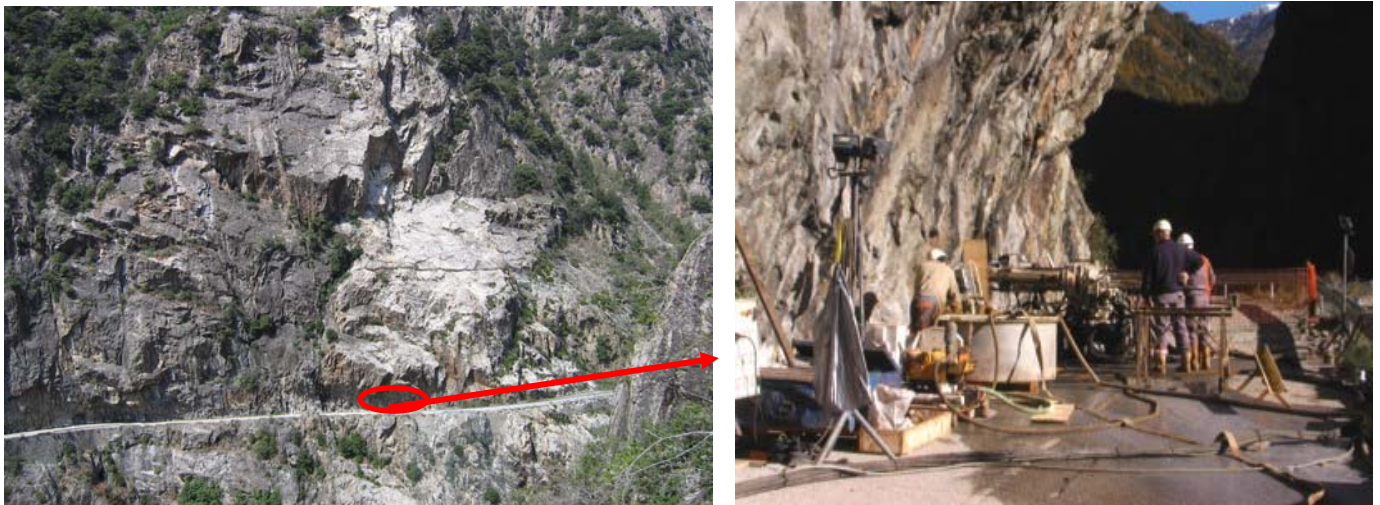


Figure 1. A gauche, vue générale de face du SLP des Rochers de Valabres, photo prise depuis le versant opposé. Le cercle figuré au niveau de la voie d'accès, localise la zone d'essai. A droite, photo du chantier de forage et de mesures depuis la voie d'accès (photos INERIS).

2.1. Localisation du SLP des Rochers de Valabres

Le SLP des Rochers de Valabres est localisé dans la vallée de la Tinée, dans les Alpes Maritimes. Ce versant rocheux est taillé dans les gneiss migmatiques du socle hercynien dont le point culminant est à 2254 m d'altitude. L'histoire récente de l'activité des Rochers de Valabres (dont l'altitude est comprise entre 700 et 900 m) est marquée par deux éboulements importants qui se sont produits en mai 2000 et octobre 2004.

2.2. Principe de la méthode de surcarottage

La méthode de surcarottage de cellule type CSIRO est utilisée depuis de nombreuses années, en particulier dans l'industrie minière profonde (Lahaie et al., 2004). Les principes sont rappelés ci-après.

Il s'agit d'une méthode de détermination des contraintes par relaxation des terrains. Elle consiste à réaliser dans le massif un premier forage (forage principal) de large diamètre jusqu'à la zone de mesure visée. Un forage pilote, coaxial et de plus petit diamètre, prolonge le premier.

Une cellule de mesure de déformation (cellule CSIRO) est ensuite fixée dans le trou pilote (Souley et al., 2005). Il s'agit d'une cellule composée d'un corps creux en époxy dont la paroi comporte 12 jauges de déformations de directions différentes (Figure 2). Le surcarottage de la cellule libère les contraintes au parement du forage pilote. Ceci induit des déformations

enregistrées par les jauges de la cellule. Il s'agit d'un essai destructif, avec une mesure très locale, à l'échelle de la carotte. Cette opération se prête donc très bien à des mesures de gradients ou de champs perturbés très locaux à partir d'un unique forage.

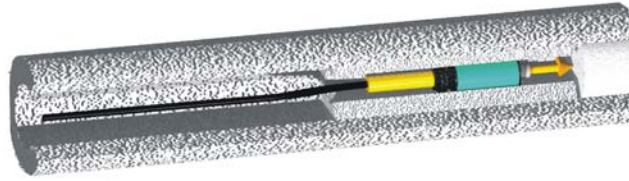


Figure 2. Coupe schématique 3D de la cellule de mesure collée dans le forage pilote coaxial au forage principal avant surcarottage.

Après l'opération de surcarottage, la carotte extraite est examinée puis testée en cellule biaxiale pour vérifier, à pression contrôlée, le comportement des jauges et déterminer les paramètres élastiques du système cellule – carotte.

2.3. Données brutes de déformations

L'acquisition des données de déformation est réalisée par une chaîne d'acquisition SYTGEO[®], avec une précision et une résolution respectivement de $\pm 1\%$ EM et ± 2 microdéformations. Les mesures sont enregistrées en déformations relatives après un point zéro avant le démarrage du surcarottage.

Un exemple de courbes de mesures obtenues est présenté dans la figure 3. On constate que ces courbes ont une allure très satisfaisante, avec une phase transitoire qui correspond au passage du carottier au niveau de la cellule, puis une stabilisation complète des mesures sur une valeur plateau bien définie (avant rupture provoquée de la carotte) qui coïncide avec le relâchement total des contraintes locales liées au massif.

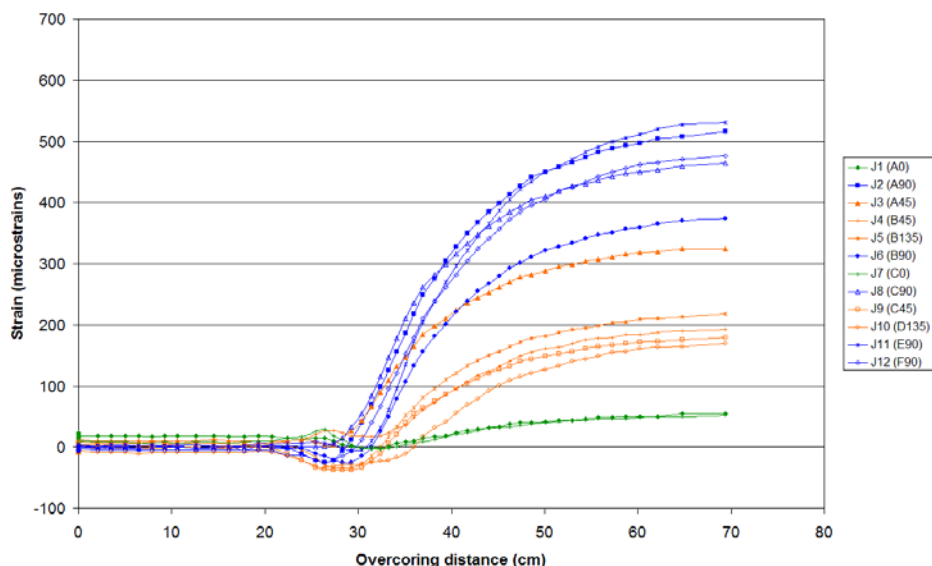


Figure 3. Exemple de courbes de déformations (axe Y - µdéf.) enregistrées en fonction de l'avancement du surcarottage (axe X - cm) pour une cellule implantée à la cote 15,75 m. *En vert, les mesures des jauges 1 et 7 parallèles à l'axe de la cellule sont identiques, en rouge les jauges à 45° et 135° et en bleu les jauges circonférentielles à 90°.*

Les valeurs finales stabilisées de déformations obtenues ε_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) sont alors inversées pour déterminer l'état des contraintes locales au niveau de la zone de mesure.

2.4. Inversion des mesures de déformations

L'inversion repose essentiellement sur l'hypothèse de comportement élastique linéaire isotrope ou orthotrope (Amadei, 1983) de la roche, supposée homogène à l'échelle de la cellule de mesure, et sur la connaissance de la matrice d'élasticité.

Le système est surdéterminé puisqu'il comporte plus de données que d'inconnues. Il peut alors être inversé par des outils classiques d'inversion de systèmes linéaires, pour déterminer l'état des contraintes dans la zone de mesure. Pour réaliser cette inversion, nous avons utilisé le logiciel SYTGEOstress[®], qui met en œuvre la méthode des moindres carrés.

Le résultat de chaque inversion (Figure 4) est une estimation, pour un jeu de données d'entrée, des six composantes du tenseur des contraintes cartésiennes au point de mesure considéré, exprimé dans un repère local (X, Y, Z) (Figure 5) tel que :

- l'axe X est horizontal ;
- l'axe Y est vertical et le plan vertical OYX contient l'axe du forage ;
- l'axe Z est horizontal et perpendiculaire à l'axe du forage

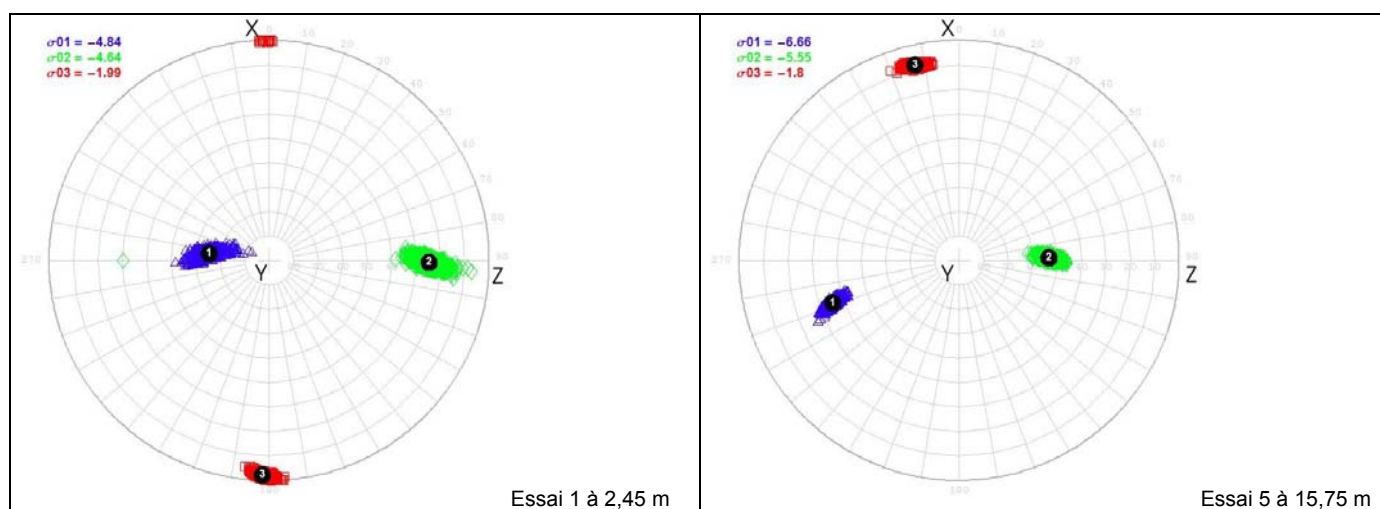


Figure 4. Exemple de résultats synthétiques d'inversion relatifs aux essais de surcarottage 1 et 5. Les points 1, 2 et 3 représentent l'orientation moyenne des contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 en projection hémisphérique supérieure. Les nuages denses de points : bleus, rouges et verts sont issus de simulations numériques d'erreurs a priori estimées sur l'orientation des contraintes principales à partir de celles inversées initialement dans un référentiel cartésien, compte tenu de la relation non linéaire qui lie les deux. Dans les deux cas illustrés, l'estimation de la précision des orientations peut être qualifiée d'excellente. Notons dans le cas de l'essai 1, réalisé pratiquement au parement du rocher, l'orientation parfaite de la contrainte principale mineure σ_3 vers la surface libre sub-vorticale et perpendiculaire à l'axe horizontal X.

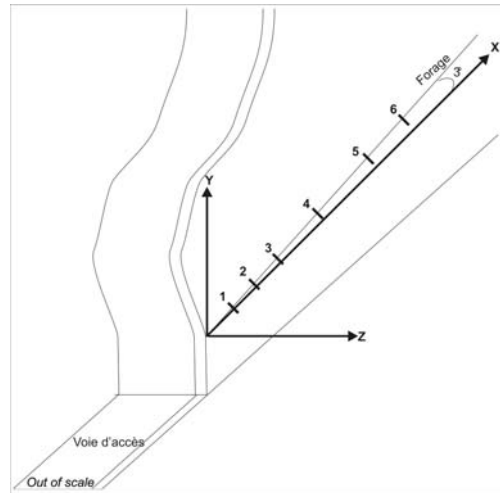


Figure 5. Repère local (X, Y, Z) défini pour les essais de l'expérimentation VAL-STRESS3D.
Attention : l'axe Y correspond à la verticale.

2.5. Détermination des propriétés des roches surcarottées

L'inversion des déformations nécessite la détermination des paramètres élastiques de la roche. Plusieurs sources de données ont été considérées :

- les résultats d'essais biaxiaux. Deux carottes surforées ont pu être soumises à un essai biaxial : il s'agit des carottes des essais de surcarottage n°1 et 5 (cellules implantées respectivement aux cotes 2,45 m et 15,75 m). L'essai biaxial ne permettant pas de déterminer directement les 5 paramètres d'une roche isotrope transverse, des essais complémentaires en laboratoire ont été menés ;
- les résultats d'essais géomécaniques uniaxiaux (parallèles, perpendiculaires à la foliation et clinotropes) réalisés en laboratoire. Des prélèvements au plus proche de plusieurs zones de mesures ont été effectués pour une caractérisation fine de l'anisotropie.

Les valeurs suivantes ont été retenues (Tableau 1) :

Essais	E1 (GPa) moyen	E2 = E3 (GPa) moyen	G12 (GPa) moyen	G23 (GPa) moyen	ν_{12} moyen	Isotropie transverse
1 à 4	23,3	31,2	10,7	13,8	0,13	marquée
5 à 6	28,6	28,6	13,5	13,5	0,06	non marquée

Tableau 1. Valeurs retenues pour traiter les mesures de déformations.

3. Résultats des mesures de contraintes

L'expérimentation VAL-STRESS3D de caractérisation des contraintes naturelles du versant rocheux de Valabres a consisté à réaliser six essais de surcarottage successifs, le long d'un forage subhorizontal, d'un pendage de 3° et d'un linéaire total de 19 m environ.

L'ensemble des données brutes (déformations) des six essais de surcarottage a pu être inversé et interprété (Tableau 2).

Notons que la qualité des mesures et des résultats est basée sur :

- l'aspect des courbes de déformation enregistrées lors du surcarottage. Des indicateurs qualitatifs précis tels que l'aspect général de la carotte extraite, la phase transitoire des déformations, la stabilisation des mesures ou encore la similitude des mesures associées aux jauges 1 et 7, permettent une qualification préliminaire relativement fiable ;
- lors de l'inversion des données, le logiciel SYTGEOstress[®] calcule et édite une série d'indicateurs statistiques (tests de Cook, de Snedecor, écart type, etc.) permettant

d'apprécier la qualité des résultats, ainsi que l'influence de chaque jauge sur ceux-ci. En particulier, l'indicateur global CoV (Coefficient de Variation) exprime l'écart relatif entre les valeurs de déformation mesurées et les valeurs théoriques prédites par le modèle d'élasticité utilisé. Un indice CoV faible indique que le modèle de rhéologie utilisé pour l'inversion explique bien les mesures brutes obtenues.

Le tableau 2 fait mention d'un indicateur synthétique de qualité des mesures et des résultats, établi sur la base de l'analyse statistique des données et de l'expérience des auteurs sur ce type de mesures.

Zone de mesure	1	2	3	4	5	6
Cote (m)	2,45	4,35	6,35	10,25	15,75	18,35
Qualité des mesures et résultats	●●●●●	●●●●○	●●●●○	●●●●○	●●●●●	●●●●●
Nb. jauges utilisées pour l'inversion	12	12	12	11	11	11
σ_1 (MPa)	-4,8	-4,6	-5,7	-5,8	-6,7	-9,9
σ_2 (MPa)	-4,6	-4,0	-5,0	-5,0	-5,6	-7,6
σ_3 (MPa)	-2,0	-1,9	-2,7	-2,9	-1,8	-4,6
σ_v (MPa)	-4,8	-4,1	-5,5	-5,6	-5,9	-9,8
$(\sum \sigma_i)_{\text{mes. J}} / (\sum \sigma_i)_{\text{mes. 1}}$	1,00	0,92	1,18	1,20	1,24	1,94

Tableau 2. Synthèse des résultats du profil de contraintes.

Au vu des données disponibles de terrain, les résultats du profil obtenu (Figure 6) peuvent être commentés comme suit :

- une première zone très fracturée, située entre 0 et 1,3 m, n'a pas permis de réaliser d'essai de mesure ;
- une seconde zone située entre 1,3 et 5 m, caractérisée par une contrainte σ_3 de 2 MPa horizontale et de même azimuth que la direction de plus grande pente du versant, et des contraintes principales σ_1 et σ_2 de 5 MPa, situées dans un plan sub-vertical ;
- une troisième zone située entre 5 et 15 m, d'un niveau plus fort en terme de contrainte moyenne avec un gradient faible mais cohérent avec les calculs numériques (Merrien-Soukatchoff et al., 2006) ;
- une augmentation marquée et forte de l'état de contraintes pour l'essai 6, à 18 m de profondeur avec une orientation des contraintes similaire à celle des zones de mesures moins profondes. Des données complémentaires relatives en particulier à la fracturation majeure présente et la surface complexe du versant située localement juste au-dessus de la zone du forage sont nécessaires pour essayer de comprendre l'origine de cette surcontrainte ;
- pour toutes les zones de mesure, les contraintes (σ_1, σ_2) sont dans un plan situé à 0°-10° du plan vertical (Figure 7), alors que localement la pente moyenne du versant est de 60-70°. Cette orientation, qui ne correspond pas en affleurement à celle de la géométrie de la pente locale moyenne du versant, pourrait être expliquée par les familles de fractures verticales présentes dans le massif (Gunzburger et al., 2005) ;
- dans tous les cas, les contraintes ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) restent très en deçà des seuils de résistance de la matrice rocheuse pour laquelle la résistance à la compression R_c en laboratoire a été estimée à 80 MPa.

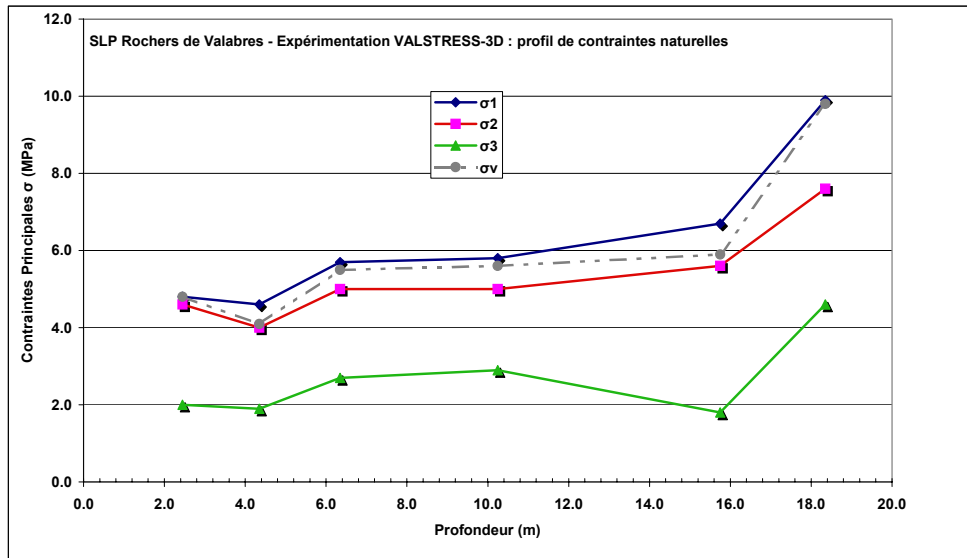


Figure 6. Profil des contraintes principales (σ_1 , σ_2 et σ_3) et verticale σ_v estimées.

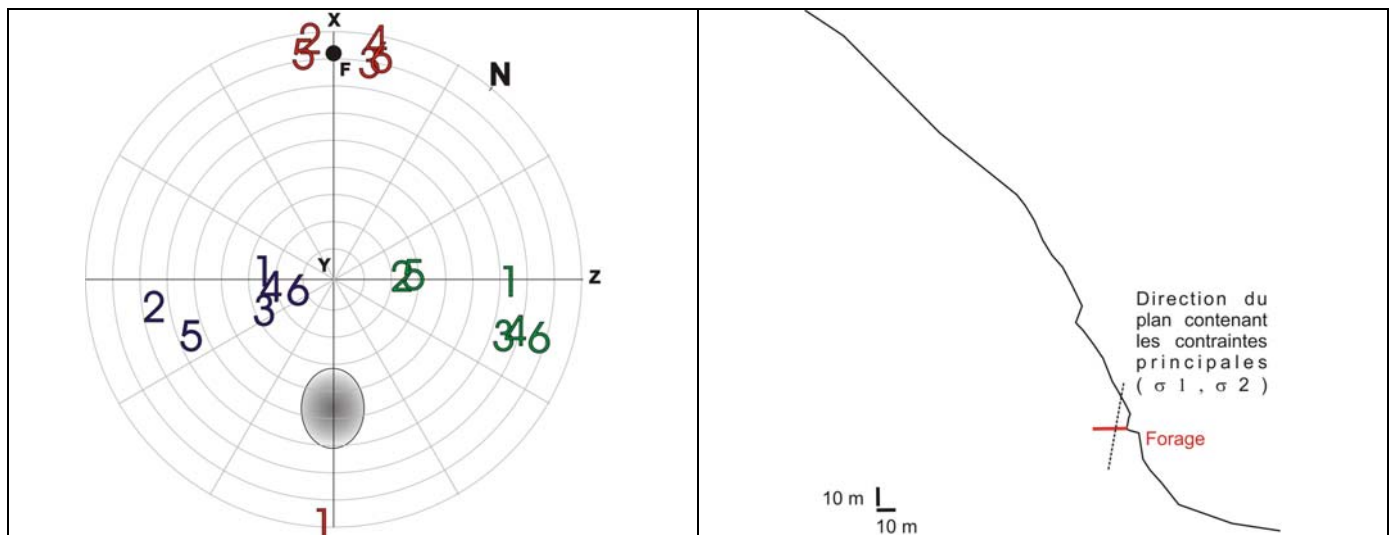


Figure 7. Synthèse de l'orientation des contraintes principales σ_1 , σ_2 , σ_3 , pour les six essais (pour chaque essai indicé de 1 à 6 sont figurées en rouge σ_3 , en vert σ_2 et en bleu σ_1). Le point *F* représente l'axe du forage. L'ellipse grisée figure l'orientation moyenne N45°E-40°SE d'une famille importante de fractures, reconnues sur le site.

4. Conclusions

A ce stade de l'expérimentation VAL-STRESS3D, les essais de mesure de contraintes naturelles conduits en affleurement du Site Laboratoire Pilote des Rochers de Valabres sont originaux d'un point de vue méthodologique et scientifique car ils démontrent la possibilité de caractériser de manière précise des champs de contraintes en milieu complexe, et ce à des échelles très locales. A la connaissance des auteurs, la méthode de surcarottage de cellules de contraintes type CSIRO, répandue en contexte d'ouvrages souterrains, n'avait a priori jamais été appliquée aux mesures à faible profondeur dans un tel contexte.

L'ensemble des données d'entrée obtenues a permis d'obtenir des résultats d'une très bonne qualité. Les valeurs des contraintes obtenues montrent une bonne cohérence globale avec les ordres de grandeurs attendus.

Ces résultats confirment que le champ de contraintes local dans un tel volume ausculté est affecté d'une variabilité très significative, mettant en évidence les rôles probables à la fois des

discontinuités présentes, de la morphologie locale de la surface, des variations de faciès et d'anisotropie, sans qu'il soit aisé à ce stade de pondérer leurs rôles respectifs.

Des relevés complémentaires au niveau des carottes du forage, ainsi qu'une diagraphie ultrasonique du forage, sont d'ores et déjà envisagés pour apporter des éléments de réponse.

Ces résultats préliminaires confirment la complexité relative du champ de contraintes à une échelle locale mais sans aucun doute également à l'échelle plus globale du versant. Ils attestent aussi la difficulté à introduire des conditions initiales dans les modèles numériques thermo-hydromécaniques de telles géostructures.

Les contraintes élevées en zone de mesure 6 soulèvent naturellement l'intérêt d'une reprise des mesures en profil sur le même forage, au moins dans la zone de 20 à 30 m.

Les auteurs remercient toutes les personnes qui ont contribué à cette étude conduite dans le cadre du programme d'Etude et d'Appui Technique du CENARIS, Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-Sol.

5. Références bibliographiques

- Amadei, B. (1983). Rock anisotropy and the theory of stress measurements, Eds. Brebbia, C.A. & Orszag, S.A., Springer-Verlag.
- Clément C., Merrien-Soukatchoff V., Dünner C., Sausse J. (2006). Ecoute Microsismique appliquée aux versants rocheux instables. Exemple des Rochers de Valabres (06), JNGG 2006, Lyon, 27-29 juin 2006.
- Duncan Fama M.E. & Pender M.J. (1980). Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in situ rock stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, 137-146,.
- Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y (2005). Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France). International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 42, n°3 (April 2005), pp. 331-349.
- 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-INERIS, Ecole des Mines, INPL, France, 17/12/2004, 174 p. + Annexes.
- Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Senfaute G., Pigué JP., Guglielmi Y. (2004). Field investigations, monitoring and modeling in the identification of rock fall causes. Landslides : evaluation and stabilization, Proceeding of the Ninth International Symposium on landslides, June 28 to July 2, 2004, Rio de Janeiro, pp. 557-563.
- Lahaie F., Bigarré P., Al Heib M., Josien J.P. and Noirel J.F. (2003). Large-scale 3D characterisation of in-situ stress field in a complex mining district prone to rockbursting, Proc. Of the 10th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM) Vol. 2, Sandton, South Africa, 8-12 September, pp. 689-694, Ed SANIRE & SAIMM (ISBN 1-919783-52-0).
- Merrien-Soukatchoff V., Sausse J., Dünner C. (2006). Influence of topographic roughness on the stress state in a sloped rock-mass. EUROCK 2006 " Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics, Liège (Belgium) 9-12 mai 2006.
- 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.
- Souley M., Lahaie F., Bigarré P., Armand, G. (2005). Numerical study of the optimum cell position for overcoring stress determination in argillite rocks, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Tours, 14-18 march.