

Estimation de l'incertitude sur les mesures de contraintes par sur-carottage dans un versant rocheux

Cécile Clement, Véronique Merrien-Soukatchoff, Clémence Dunner, Yann Gunzburger

► **To cite this version:**

Cécile Clement, Véronique Merrien-Soukatchoff, Clémence Dunner, Yann Gunzburger. Estimation de l'incertitude sur les mesures de contraintes par sur-carottage dans un versant rocheux. THOREL, Luc; SOUBRA, Abdul-Hamid; DANO, Christophe; HICHER, Pierre-Yves; GARNIER, Jacques; RIOU, Yvon. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur "Insertion des grands ouvrages dans leur environnement. Bulletin n°1" (JNGG'08), Jun 2008, Nantes, France. LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Paris, pp.661-668, 2008. <ineris-00973307>

HAL Id: ineris-00973307

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973307>

Submitted on 4 Apr 2014

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.

ESTIMATION DE L'INCERTITUDE SUR LES MESURES DE CONTRAINTES PAR SUR-CAROTTAGE DANS UN VERSANT ROCHEUX

ANALYSIS OF SCATTERING OF STRESS MEASUREMENT USING OVER-CORING TEST CONDUCTED ON A LARGE FRACTURED ROCK SLOPE

Cécile CLEMENT¹, Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF², Clémence DÜNNER³, Yann GUNZBURGER²

1 LAEGO-INERIS, Nancy-Université, Parc de Saurupt CS 14234 F-54042 Nancy

2 LAEGO, Nancy-Université, Parc de Saurupt CS 14234 F-54042 Nancy

3 INERIS, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, CS 14234 F-54042 Nancy

RÉSUMÉ – Des mesures de contraintes par sur-carottage ont été réalisées au pied d'un versant rocheux potentiellement instable. Afin d'évaluer l'influence des nombreuses sources d'incertitudes affectant les données d'entrée, une démarche de plan d'expérience a été entreprise. Cette analyse révèle un profil des contraintes non-linéaire et des magnitudes élevées, en dépit de la proximité de la surface libre. Cet article se concentrera sur le traitement des mesures et l'impact des incertitudes sur leur interprétation.

ABSTRACT – A field experiment of stress measurement using over-coring method has been performed in a rock slope prone to rockfalls. In order to evaluate input data uncertainties, an experimental design has been performed. The paper will focus on data process and impact of uncertainties on stress measurement interpretation. Moreover the results indicate a non-linear stress distribution with depth and high values of the principal stresses, despite the vicinity of the surface.

1. Introduction : réalisation des mesures et objectifs

Le site des Rochers de Valabres est un versant rocheux situé 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 migmatitique, fortement folié et anisotrope. Le site a été affecté par deux éboulements successifs (2000 et 2004). Depuis 2002, celui-ci fait l'objet d'investigations expérimentales (Gunzburger et al., 2005, Merrien-Soukatchoff et al., 2006, Dünner et al., 2007). Des mesures de contraintes par surcarottage ont été réalisées par l'INERIS, entre 2 et 18 m de profondeurs, dans un forage sub-horizontal localisé en pied du versant (Figure 1).

La technique de surcarottage est une méthode de détermination des contraintes par relaxation des terrains. Les déformations mesurées lors du surforage d'une cellule CSIRO sont inversées pour obtenir les contraintes naturelles dans la zone de mesure. Cette inversion nécessite de formuler des hypothèses sur la géométrie du problème et la rhéologie du matériau.

Tout en permettant de juger la faisabilité de la mesure, déployée en milieu montagnard, l'objectif de l'expérimentation était de fournir une estimation de l'état de contraintes à faible profondeur et dans le cas d'une surface pentée. Dans le cas du site de Valabres, les instabilités se sont produites dans la zone superficielle du versant, c'est-à-dire dans un état de contraintes hétérogène, particulièrement sensible à

la topographie, à la fracturation et aux variations de températures (Haimson, 1979, Amadei et Stephansson, 1997). La connaissance de l'état de contraintes sera utile pour la suite de l'étude, car les mesures pourront être comparées aux résultats de calculs analytiques et numériques, ainsi qu'aux variations de contraintes, notamment thermiques, affectant la zone.

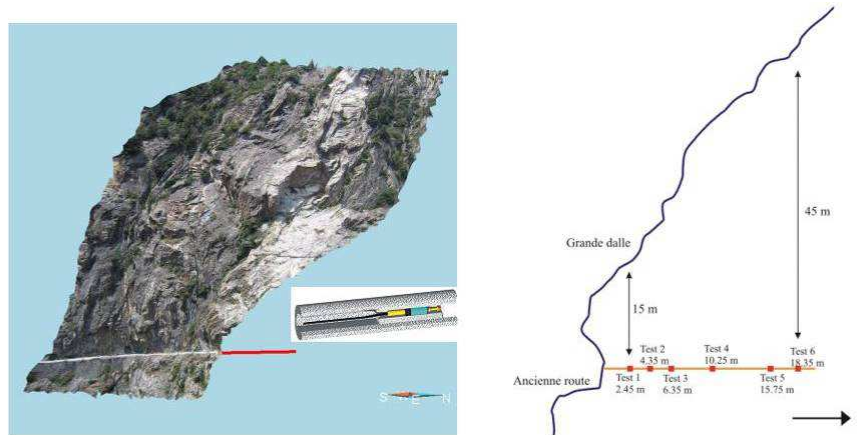


Figure 1. Position du forage, des points de mesures et de la topographie 2D.

2. Acquisition des données d'entrées

Préalablement à l'inversion des mesures, il est nécessaire de déterminer la nature pétrographique de la roche et les propriétés mécaniques du volume rocheux investi. Une analyse pétrographique, conduite sur l'ensemble des carottes du forage, a permis de détecter 5 zones de texture différentes, décrites en Figure 2.

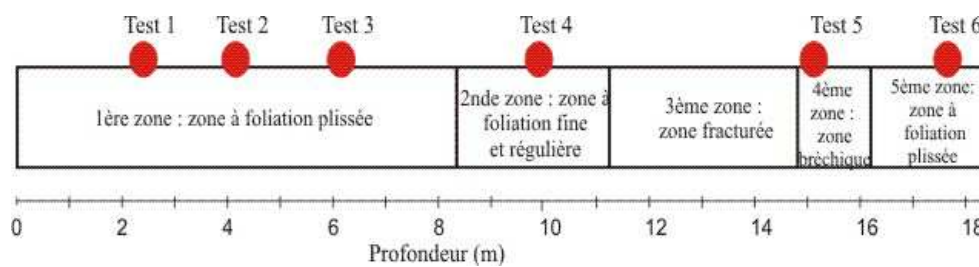


Figure 2 : Description pétrographique du forage

Les paramètres mécaniques ont été obtenus par essais biaxiaux et uniaxiaux. Les essais biaxiaux ont été réalisés sur deux carottes (essai 1 à 2,45 m et essai 5 à 15,75 m) directement extraites lors du sur-carottage (diamètre : 120 mm, longueur : 600 mm) et correspondant à l'échelle d'investigation de la mesure ($\sim 10^{-3} \text{ m}^3$). Néanmoins, les essais biaxiaux ne permettent d'obtenir que les paramètres élastiques apparents (E_{eq} et ν_{eq}), sous l'hypothèse d'isotropie, puisque ces essais ne sont pas menés dans des directions normales et parallèle au plan de foliation. L'hypothèse d'isotropie est valable pour l'essai 5, réalisé dans une zone bréchique. Elle n'est pas valable pour l'essai 1 ni pour les autres essais (2, 3, 4 et 6) qui ont clairement été menés dans une zone isotrope transverse.

Des essais uniaxiaux complémentaires ont donc été réalisés sur des échantillons (diamètre : 38 mm, longueur : 76 mm) extraits à la cote 2,88 m. Ceux-ci ont permis la détermination de l'ensemble des paramètres isotropes transverses (E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{23} et G_{12}) mais ne correspondent pas à l'échelle investiguée. Les paramètres obtenus sont indiqués en Tableau I.

Dans ce tableau, les moyennes et écart-types calculés pour les essais biaxiaux proviennent des mesures issues de jauges différentes, implantées sur une même carotte. Pour les essais uniaxiaux, les valeurs proviennent des mesures réalisées sur des échantillons différents.

Tableau I. Paramètres mécaniques obtenus lors des essais

Essai biaxiaux				
Paramètres élastiques apparents	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
Test 1 (2,45 m)				
E_{eq} : module de Young (GPa)	18,2	33,6	27,5	5,6
ν_{eq} : coefficient de Poisson	0,06	0,19	0,12	0,07
Test 5 15,75 m				
E_{eq} : module de Young (GPa)	23,1	42,1	29,7	7,8
ν_{eq} : coefficient de Poisson	0,05	0,06	0,05	0,003
Essai uniaxiaux				
Paramètres anisotropes. Point 2m88	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
E_1 (GPa)	32,2	48,50	41	5,2
E_2 (GPa)	56,20	60,37	58	1,5
ν_{12}	0,09	0,15	0,13	0,02
ν_{23}	0,12	0,17	0,15	0,02
G_{12} (GPa)			20	

Outre des problèmes d'échelle d'investigation, ces essais ont mis en évidence des paramètres mécaniques dispersés. Pour la suite de l'étude, les paramètres choisis sont déduits des hypothèses suivantes :

- dans le cas des essais 1, 2, 3, 4 et 6 (comportement isotrope transverse) les paramètres mécaniques seront déduits des 2 types d'essais mécaniques menés sur la carotte de l'essai 1. Les paramètres isotropes transverses sont déduits des paramètres apparents E_{eq} et ν_{eq} et du rapport d'anisotropie $R (=E_2/E_1)$ (Clément et al., 2008) ;
- dans le cas de l'essai 5 (comportement isotrope), les paramètres mécaniques obtenus par essai biaxiaux seront conservés.

3. Traitement des données par plan d'expérience

L'inversion des mesures de contraintes nécessite d'introduire les paramètres mécaniques et géométriques (orientation du plan de foliation, dans le cas d'un comportement isotrope transverse). Toutefois, les sources d'incertitudes sur ces données sont nombreuses. On distingue ainsi :

- l'incertitude sur l'orientation du plan de foliation, due à la présence d'une foliation plissée ;

- la dispersion intrinsèque des propriétés mécaniques, due à l'importante hétérogénéité de la roche, indépendamment du type d'essai effectué pour les déterminer ;
- l'incertitude sur la détermination des propriétés mécaniques, liée à l'utilisation de deux types d'essai ;
- l'incertitude sur les propriétés des essais 2, 3, 4 et 6 qui ont été extrapolées à partir des données de l'essai 1.

Les deux premières sources correspondent à la variabilité naturelle de la roche. Les deux dernières aux incertitudes de mesures.

Afin de quantifier l'impact de ces incertitudes et de fournir des intervalles de confiance des résultats, une démarche de plan d'expérience a été appliquée. Cette méthode permet d'explorer les réponses possibles en fonction des paramètres d'entrée, dont les variations sont issues de simulations judicieusement choisies. Les variables de sortie (réponses) forment des surfaces dans l'espace des paramètres d'entrée.

La démarche adoptée a donc consisté à réaliser des séries d'inversion des mesures, en introduisant des données d'entrée variables, générées par simulation de Monte Carlo. Les données d'entrée variables correspondent aux paramètres mécaniques et à la position du plan de foliation (2 angles). Après chaque série de simulation, les données de sortie observées sont les contraintes principales, c'est-à-dire leurs magnitudes, azimuts et pendages.

Dans le cas des essais à comportement isotrope transverse, sept données d'entrées sont nécessaires : cinq paramètres mécaniques (E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{23} et G_{12}) et deux paramètres géométriques (azimut et pendage du plan de foliation). Afin de réduire ce nombre de données d'entrées, les hypothèses suivantes ont été émises :

- le module de cisaillement G_{12} a été calculé par l'approximation de St Venant (Amadei, 1996) ;
- E_1 et E_2 sont déduits de E_{eq} , ν_{eq} , et du rapport d'anisotropie R ;
- E_{eq} et ν_{eq} sont fixés tel que $E_{eq} = 27,5$ GPa et $\nu_{eq} = 0,12$ tandis que R est variable.

Par conséquent, le nombre de paramètres mécaniques est réduit à trois (R , ν_{12} , ν_{23}) au lieu des cinq paramètres initialement prévus (E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{23} et G_{12}). Leurs intervalles de variation dépend de la variabilité mesurée en laboratoire (cf. Tableau II). La variabilité des deux paramètres géométriques (azimut et pendage du plan de foliation), correspondent à la variabilité mesurée sur les carottes.

Tableau II : Intervalles de variation des paramètres mécaniques

Paramètres mécaniques	Min	Max
Tests 1, 2, 3, 4 et 6 (isotrope transverse)		
$R = E_2/E_1$	1,16	1,9
ν_{12}	0,06	0,19
ν_{23}	0,12	0,17
Test 5 (isotrope)		
E (GPa)	23,1	42,1
ν	0,05	0,06

4. Résultats : Profil de tenseur de contraintes et interprétation

L'application du plan d'expérience aboutit à des surfaces de réponse dont un exemple, représentant la variabilité de σ_1 pour l'essai 1 en fonction de R et v_{12} , est donné sur la Figure 3. Excepté pour l'essai 5, l'analyse a révélé que le facteur d'anisotropie, ainsi que la position du plan de foliation ont un impact significatif sur le tenseur des contraintes : La variabilité (représentée par l'écart-type) sur la magnitude produite par le traitement est d'environ +/- 0,5 MPa (essai 1 à 3) jusqu'à +/- 0,9 MPa (essais 4, 5 et 6), soit un coefficient de variation (COV) moyen de 0,13.

Les six tenseurs de contraintes (magnitudes et orientation des contraintes principales), ainsi que les variations obtenues, sont présentés au Tableau III.

Tableau III : Résultats des mesures de contraintes :
Valeurs moyennes, écart types des magnitudes et orientations des contraintes

	Contraintes Principales	Magnitudes (MPa)	Azimut (°N)	Pendage (°)
Test 1	σ_1	6.3 +/- 0.8	290 +/- 15	56 +/- 15
	σ_2	5.3 +/- 0.6	90 +/- 10	32 +/- 16
	σ_3	2.2 +/- 0.2	184 +/- 5	9 +/- 6
Test 2	σ_1	5.5 +/- 0.7	265 +/- 30	58 +/- 12
	σ_2	4.5 +/- 0.6	86 +/- 7	32 +/- 12
	σ_3	1.3 +/- 0.2	176 +/- 6	2 +/- 2
Test 3	σ_1	6.6 +/- 0.9	272 +/- 16	51 +/- 16
	σ_2	5.2 +/- 0.6	107 +/- 11	38 +/- 16
	σ_3	1.9 +/- 0.2	12 +/- 3	6 +/- 4
Test 4	σ_1	10 +/- 1.2	80 +/- 4	37 +/- 4
	σ_2	7.1 +/- 1	301 +/- 23	42 +/- 10
	σ_3	4.4 +/- 0.5	203 +/- 40	24 +/- 9
Test 5	σ_1	7.6 +/- 1.3	284 +/- 0.1	37 +/- 0.01
	σ_2	6.3 +/- 1.1	100 +/- 0.03	53 +/- 0.01
	σ_3	2 +/- 0.3	193 +/- 0.05	2 +/- 0.01
Test 6	σ_1	11.8 +/- 1.4	89 +/- 18	66 +/- 5
	σ_2	9.5 +/- 1.3	230 +/- 46	19 +/- 9
	σ_3	5.9 +/- 0.6	301 +/- 71	9 +/- 6

Par ailleurs, les résultats de la simulation peuvent être représentés sur des diagrammes polaires (avec OX : Nord, OZ : Est). L'essai 1 est illustré en Figure 3. Les différentes positions calculées de la contrainte majeure (la plus compressive σ_1) sont représentées par un nuage de triangles bleus, la contrainte intermédiaire (σ_2) par des losanges verts et la contrainte mineure (σ_3) par des carrés rouges. On observe sur ce diagramme un regroupement des simulations de σ_1 et σ_2 . Leurs positions sont confondues en un seul plan N 90 – N 270, dans lequel les pendages sont variables et les modules proches.

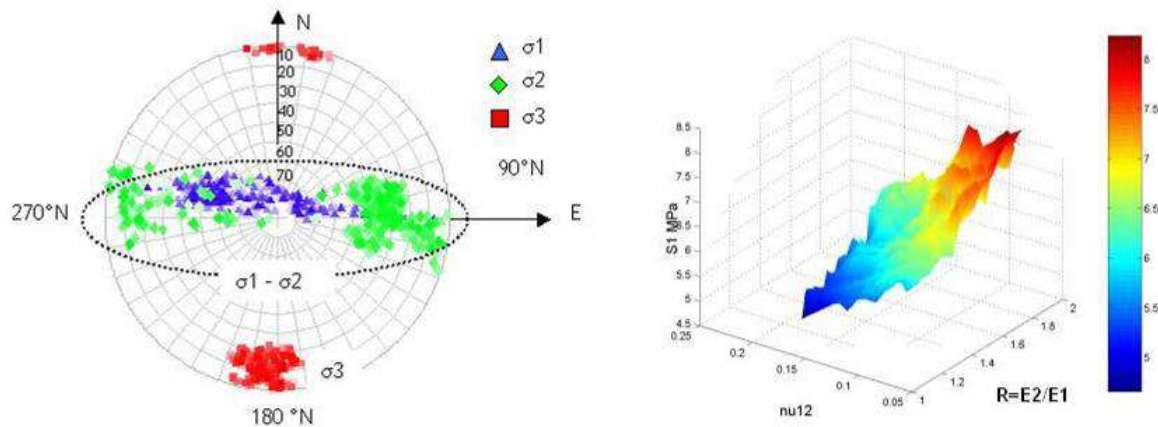


Figure 3. A gauche : Diagramme polaire – Essai 1 (2m45).
A droite : Surface de réponse du module de S_1 en fonction de R et ν_{12} .

Le profil de contraintes, calculé par plan d'expérience et illustré en Figure 4, peut être détaillé de la manière suivante :

- les *magnitudes* de la contrainte principale σ_1 varient de 6 à 11 MPa de la surface jusqu'à l'extrémité du forage. σ_2 varient de 5 à 9 MPa et σ_3 de 2 à 6 MPa. Ces magnitudes sont élevées puisqu'ils sont 10 fois supérieurs au poids vertical des terrains mais correspondent néanmoins à la charge produite par l'ensemble du versant jusqu'à sa crête, comme démontré par modélisations numériques aux éléments finis (Clément et al., 2008). Par ailleurs, le profil n'augmente pas de manière monotone : on observe une augmentation marquée à l'essai 4 puis une chute au niveau de l'essai 5. Ces variations sont perceptibles malgré les intervalles d'erreur introduits ;
- les *tenseurs des contraintes aux essais 1 à 3* sont relativement homogènes. σ_3 est orientée horizontalement, perpendiculairement à la surface libre tandis que les σ_1 et σ_2 se confondent dans un plan vertical E-W, dans lequel les azimuts et pentages sont variables et les modules proches. Ce plan vertical est sub-parallèle à la surface libre ;
- le *tenseur des contraintes à l'essai 4* est plus singulier. Il est marqué par une forte augmentation des modules et un changement des orientations, qui ne correspondent à aucune orientation de discontinuités ou à une orientation topographique préférentielle ;
- le *tenseur à l'essai 5* correspond à une chute des modules, qui peut être expliquée par une double particularité géologique : une importante zone fracturée (3^{ème} zone, cf. Fig. 2) précède la zone bréchique (4^{ème} zone) dans laquelle l'essai a été mené. A cause de ces perturbations et du traitement isotrope de l'essai, celui-ci a été considéré comme une singularité dans le profil ;
- A l'*essai 6*, l'orientation du tenseur des contraintes devient litho-statique : σ_1 devient quasi-verticale tandis que σ_2 et σ_3 se confondent dans un plan horizontal.

L'état de contraintes mesuré est donc fortement influencé par le relief et les hétérogénéités texturales. L'influence de la topographie est particulièrement sensible pour les essais 1 à 3, dont les tenseurs s'orientent en fonction de la surface libre. A l'essai 6, l'orientation du tenseur de contraintes devient litho-statique, ce qui confirme l'hypothèse d'une décroissance de l'influence topographique avec la profondeur.

L'effet des « hétérogénéités » peut être remarqué à l'essai 5, qui correspond à une rupture dans le profil. Bien qu'il soit difficile d'exprimer une relation de causalité exacte entre les perturbations géologiques et la dispersion du profil, nous pouvons supposer que ces zones ont un effet réel sur les mesures et doivent être prises en compte.

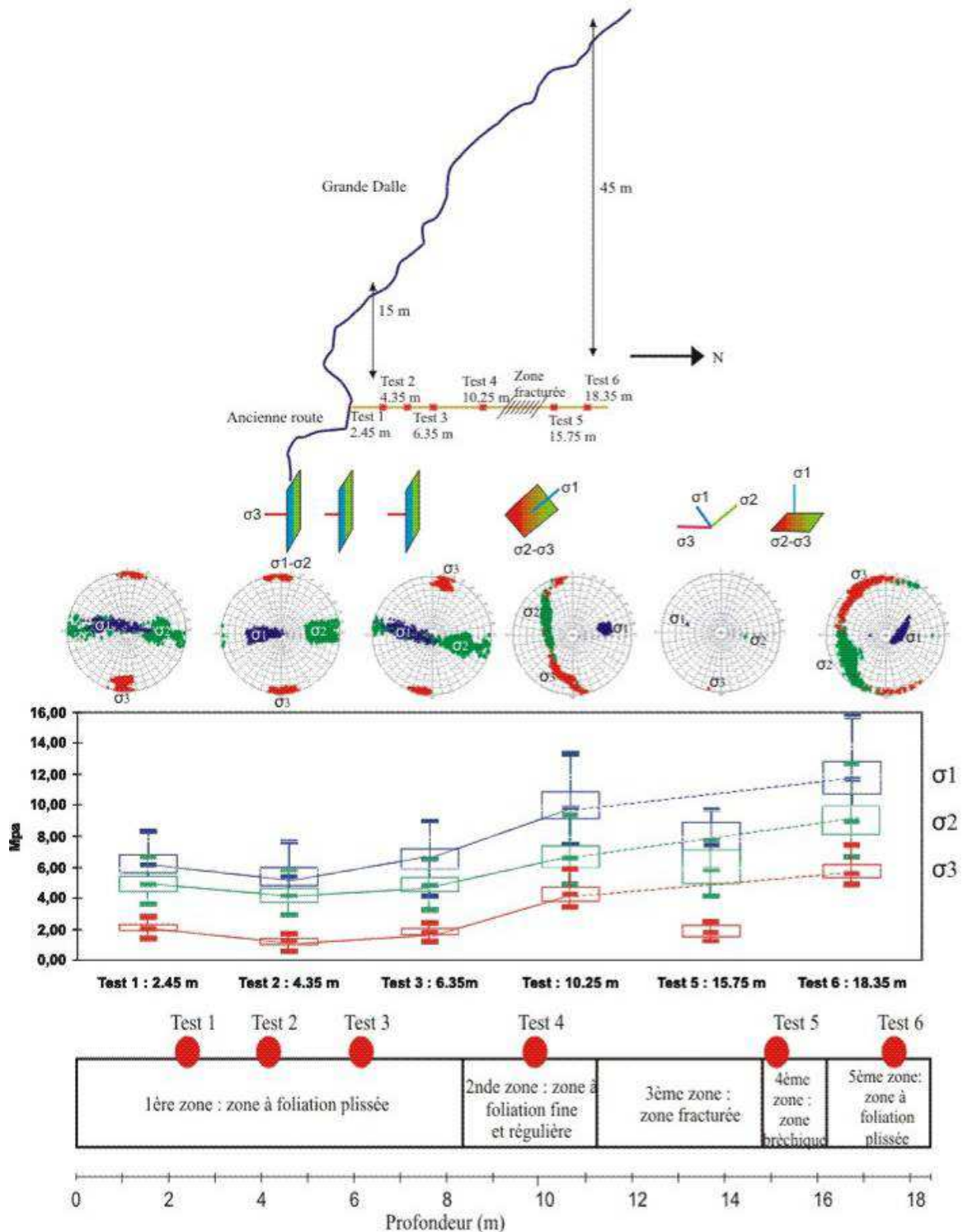


Figure 4. Topographie, représentation schématique des tenseurs, stéréogrammes, profil de contraintes et description pétrographique du forage

5. Conclusions

Les mesures de contraintes, réalisées sur le versant de Valabres, sont un apport pour la connaissance du versant et présentent un intérêt pour la suite de l'étude. Les mesures ont permis de mieux caractériser la « zone superficielle » du versant. En effet, la zone investiguée (2 à 18 m) correspond à une zone de surface, hétérogène et marquée par une forte rotation des axes principaux des contraintes. Cependant, il est difficile de définir une limite où ces effets de surface disparaissent (c'est-à-dire où les orientations se stabilisent). Les résultats des mesures révèlent aussi que les hétérogénéités ont un rôle majeur sur l'état de contraintes. Leur présence induit une chute de plusieurs MPa sur le profil des contraintes. Il semble donc nécessaire de prendre en compte ces possibles variations de contraintes liées aux hétérogénéités pour la suite de l'étude.

Outre une meilleure connaissance de la zone superficielle du massif, les mesures de contraintes sont une donnée d'entrée pour les modélisations numériques. En effet, la variabilité des résultats doit être comparée à la précision recherchée lors de la modélisation. Rappelons que les écarts types moyens obtenus sur les mesures sont compris entre +/- 0,5 MPa et +/- 0,9 MPa, soit 15 à 25% des modules.

La mesure de contrainte par surcarottage est donc une mesure intéressante puisqu'elle permet de définir un ordre de grandeur des contraintes, de juger l'importance du poids des terrains et des hétérogénéités. Toutefois, la mesure soulève le problème persistant de la représentativité de la mesure et de sa transposition à l'ensemble du versant puisque la mesure par surcarottage n'investigue qu'un volume assez réduit (10^{-3} m^3). Pour donner plus de sens à cette mesure, il peut être intéressant de la combiner avec d'autres techniques de reconnaissance et d'élaborer des modélisations numériques permettant de tester les différentes hypothèses.

6. Références bibliographiques

- Amadei B., Stephansson O. (1997). *Rock stress and its measurements*. London : Chapman and Hall.
- Amadei B. (1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33, 3, pp 293-325.
- Clement C., Merrien-Soukatchoff V., Gunzburger Y., Dünner C. (2008). Stress measurement by overcoring at shallow depth in a rock slope: scattering of input data and results. In preparation for *Rock Mech. and Rock Eng.* (Springer-Verlag Wien).
- Dünner C., Bigarre P., Clement C., Merrien-Soukatchoff V., Gunzburger Y. (2007). Field natural and thermal stress measurements at "Rochers de Valabres" Pilot Site Laboratory. *ISRM 2007, 9-13th July 2007, Lisbon, Portugal*.
- 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), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42-3,, pp. 331-349.
- Haimson B.C. (1979). New hydro-fracturing measurements in the Sierra Nevada mountains and the relationship between shallow stresses and surface topography. In *Proc. 20th US Symp. Rock Mech.*, Austin, Center for earth Sciences and Eng. Publ., Austin, 675-82.
- Merrien-Soukatchoff V., Sausse J., Dünner C. (2006). Influence of topographic roughness on the stress state in a sloped rock-mass. *Eurocks, Liege (Belgique) 9-12 Mai 2006*.