

# Application de la méthode d'inversion à la détermination des contraintes *in situ* en milieux anisotropes

A. MISBAHI

J.-F. SHAO

J.-P. HENRY

Laboratoire de Mécanique  
de Lille  
URA n° 1441, CNRS  
59655 Villeneuve-d'Ascq  
Cedex

## Résumé

Dans le but de déterminer les contraintes *in situ* dans les milieux rocheux anisotropes, une approche probabiliste utilisant la théorie des problèmes inverses et la technique de surcarottage (cellule USBM) est développée. Le problème direct qui consiste à modéliser le surcarottage est résolu par la méthode des Discontinuités de Déplacements (code DISDEPAN). La connexion entre la méthode d'inversion et DISDEPAN est alors établie (code SINVERS). La validation de ce code est réalisée à l'aide d'essais de compression simple sur des cubes de schiste. L'étude de sensibilité des résultats aux caractéristiques élastiques du matériau a montré leur importance dans la détermination des contraintes *in situ*. Un exemple d'utilisation du code SINVERS dans une galerie expérimentale à 430 m de profondeur est présenté. Les comparaisons des résultats obtenus avec ceux donnés par d'autres méthodes ont montré la performance de la méthode d'inversion.

# Application of the inverse method to *in situ* stress determination in anisotropic media

## Abstract

In order to determine *in situ* stresses in anisotropic rocks, a probabilistic approach using the inverse problems theory and the overcoring technique (USBM cell) was developed. The direct problem consisting in modelling the overcoring tests is solved by the Displacement Discontinuity Method (DISDEPAN code). The connection between the inverse method and DISDEPAN code is then established (SINVERS code). The validation of this code is realized through simple compression tests on cubic samples of schistose rock. The sensibility study of the results to the elastic constants of material showed their importance in the determination of *in situ* stresses. An application example of the code SINVERS in case of an experimental gallery at 430 m of depth is presented. Comparisons of the obtained results with those given by other methods allow to show good performance of the inverse method.

## Introduction

La détermination des contraintes *in situ* revient le plus souvent à inverser un jeu de valeurs qui sont en relation plus ou moins complexes avec les contraintes *in situ*. En théorie, et dans le cas de la cellule USBM par exemple, Bonnechère (1971) a montré que la détermination complète du tenseur de contraintes nécessitait l'utilisation de trois forages d'orientations différentes, et qu'il suffisait de prendre six valeurs de déplacement indépendantes pour avoir un problème parfaitement déterminé.

Cette approche déterministe pose quelques problèmes, notamment celui de la stabilité de la solution par rapport, par exemple, aux erreurs expérimentales et à la qualité des valeurs des modules élastiques des roches.

Pour minimiser les erreurs expérimentales, on peut augmenter le nombre de mesures. Il se pose alors le problème de l'inversion avec des données surabondantes. Une méthode simple, de type déterministe consiste à résoudre le système en injectant, successivement des ensembles de données, et à optimiser les résultats obtenus par la méthode des moindres carrés. Cette méthode ne prend malheureusement pas en compte l'aspect positif des données surabondantes et des dispersions expérimentales.

Nous proposons dans ce travail une inversion globale des données en utilisant les techniques d'inversion utilisées en diagraphies (Tarantola, 1987). Dans une première partie, nous présentons la méthode de calcul qui sera validée ensuite sur des essais en Laboratoire. Enfin, dans la dernière partie, nous présenterons un exemple d'application de la méthode développée en mine dans une galerie expérimentale.

## Présentation de la méthode de calcul

### Méthode des discontinuités de déplacements pour problèmes élastiques anisotropes plans

La méthode de calcul des contraintes développée se compose d'une méthode numérique de calcul des déplacements autour d'un forage et d'une procédure d'optimisation basée sur la méthode d'inversion. La méthode numérique utilisée pour le premier problème dit direct est la méthode des discontinuités de déplacements initialement mise au point par Crouch (1976) pour les milieux élastiques linéaires isotropes. Cette méthode intégrale de frontière a été étendue par Morel (1987) aux milieux anisotropes en utilisant une approche par champ complexe (Lekhnitski 1963). Un logiciel de calcul baptisé DISDEPAN a été mis au point pour la résolution des problèmes élastiques anisotropes plans.

### Méthode d'inversion basée sur une approche probabiliste

Selon le principe de la cellule USBM, le calcul des déplacements radiaux qui est fonction des contraintes, du comportement du matériau, de la géométrie du problème et des conditions aux limites constitue un problème direct pouvant être décrit par la relation suivante :

$$D = F(P, C) \quad (1)$$

où  $F$  représente la relation entre les déplacements  $D$  et les contraintes *in situ* qui sont en fait les paramètres du problème à déterminer que l'on désigne par le vecteur  $P$ . Le vecteur  $C$  représente l'ensemble des facteurs tels que la loi de comportement de la roche, la géométrie du problème et les conditions aux limites.

La détermination des contraintes *in situ* consiste à trouver  $P$  à partir des mesures *in situ* des déplacements radiaux, notées  $D_m$ . Ceci revient à définir un problème inverse tel que :

$$P = F^{-1}(D_m, C) \quad (2)$$

La résolution explicite de ce problème d'inversion est en général très délicate. Il est nécessaire d'utiliser un processus d'optimisation. Le problème consiste donc à déterminer un vecteur  $P$  tel que :

$$D_c = F(P, C) \text{ et } |D_m - D_c| \leq \lambda \quad (3)$$

où  $D_c$  est le vecteur des déplacements radiaux calculés à l'aide du code DISDEPAN et  $\lambda$  le seuil de tolérance.

Afin de résoudre le problème inverse par un processus d'optimisation, nous allons utiliser une approche statistique. Les mesures de déplacement réalisées *in situ* par la cellule USBM sont effectuées avec un certain degré d'incertitude. Par conséquent nous associons au vecteur expérimental  $D_m$  utilisé dans la relation (2) qui représentent en fait la moyenne, un vecteur d'écart type. Ainsi, le vecteur des déplacements calculés  $D_c$  est considéré comme une variable aléatoire. Nous faisons l'hypothèse que la variable aléatoire vérifie la distribution de Gauss. Nous définissons en conséquence la fonction de densité de probabilité suivante :

$$f_1(P) = P_1 = \kappa_1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left[(D_c - D_m)^t C_d^{-1} (D_c - D_m)\right]\right]$$

Dans cette relation,  $C_d$  est la matrice de covariance calculée à partir des écarts types (Tarantola 1987) et  $\kappa_1$  une constante. Étant donné que  $D_c$  est fonction de  $P$ , le problème est donc de trouver  $P$  tel que  $D_c$  donne le maximum de  $P_1$ . Ceci revient alors à minimiser la quantité  $S_d$  :

$$S_d = (D_c - D_m)^t C_d^{-1} (D_c - D_m) \quad (5)$$

La résolution de ce problème de minimisation donne parfois plusieurs solutions possibles. Comme les contraintes *in situ* varient dans une marge de valeurs physiquement acceptables, il est nécessaire d'éliminer des solutions qui sont purement mathématiques. Ceci nous amène à définir un domaine physique des paramètres à partir des connaissances *a priori* sur les valeurs de ces paramètres, par exemple les contraintes normales *in situ* en profondeur sont en général de compression. Pour ce fait, nous utilisons comme valeurs de référence des paramètres la moyenne du domaine physique des paramètres notée  $P_0$  en lui associant les écarts types. En utilisant de nouveau la distribution de Gauss, on obtient la fonction de densité de probabilité suivante :

## Validation de la méthode à partir d'essais en laboratoire

Après avoir établi la méthode, il est important de la valider sur des jeux de données parfaitement définis. Des tests de compression simple ont été réalisés sur un bloc percé d'un trou dans lequel la cellule USBM est installée. Les déplacements radiaux à la paroi du trou sont mesurés en fonction de la contrainte appliquée. Le principe de la validation est de retrouver la valeur de la contrainte à l'aide de la méthode d'inversion à partir des déplacements mesurés.

### 3.1

## Essais de compression simple sur cube de schiste

La roche ayant servi à la validation est un schiste ardoisier qui a fait l'objet de nombreuses études de caractérisation mécanique (Hammade, 1992; Boehler, 1975). Cette roche en provenance des carrières de Trélazé (Maine-et-Loire) se caractérise par son anisotropie structurale due essentiellement à la schistosité et date de l'Ordovicien moyen. Le schiste appartient à la catégorie des roches à anisotropie planaire dans une direction. Le développement de la schistosité ardoisère constitue un phénomène complexe au cours duquel plusieurs mécanismes peuvent concourir : un raccourcissement des minéraux perpendiculairement au plan de clivage, et une recristallisation des minéraux qui tendent à se disposer à plat dans le plan ( $S_2, S_3$ ) (voir Fig. 2). Signalons que la stratification et la schistosité se confondent et ne forment qu'un seul plan. Des études utilisant, soit la technique des ondes ultrasonores (Homand *et al.*, 1993), soit les jauges d'extensométrie (Hammade, 1993; Morel, 1987), ont montré que ce matériau était isotrope dans le plan ( $S_2, S_3$ ).

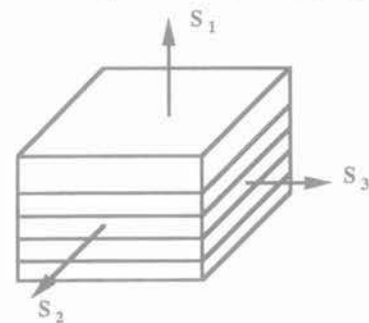


FIG. 2 Définition du repère de structure pour le schiste.  
Definition of the structural system for schist.

Le cube de schiste (40 cm x 40 cm x 40 cm) a été percé de part en part d'un trou de 4 cm de diamètre en son centre dans lequel la cellule USBM est installée. Afin de ne pas fissurer le bloc, le chargement de compression simple a été effectué modérément (100MPa) et perpendiculairement au plan de schistosité.

La caractérisation du champ de déformation du cube a été réalisée à l'aide des jauges d'extensométrie (longueur 20 mm), la position des jauges sur le bloc est décrite sur la figure 3 :

$$f_2(P) = P_2 = \kappa_2 \exp\left(-\frac{1}{2}\left[(P - P_0)^t C_p^{-1}(P - P_0)\right]\right)$$

Dans cette relation,  $C_p$  est la matrice de covariances calculée à partir des écarts types (Tarantola 1987) et  $\kappa_2$  une constante. La résolution du problème d'inversion consiste alors à trouver le vecteur  $P$  dans le domaine physique et satisfaisant à la condition (3). Ceci revient à définir l'intersection de  $P_1$  et  $P_2$ , donc une fonction globale de densité de probabilité.

$$f(P) = P_1 P_2 = \kappa \exp(-S) \quad (7)$$

avec :

$$S = \frac{1}{2}\left[(D_c - D_m)^t C_d^{-1}(D_c - D_m) + (P - P_0)^t C_p^{-1}(P - P_0)\right]$$

où  $\kappa$  est une constante. Ainsi la résolution du problème inverse est transformée sur la maximisation de  $f(P)$  donc sur la minimisation de la quantité  $S$ . Le vecteur des contraintes à déterminer est celui qui minimise  $S$ .

Il existe différentes méthodes de résolution d'un problème de minimisation (Fletcher, 1980; Tarantola, 1987). Nous avons choisi la méthode de Gauss Newton qui est considérée comme la plus puissante et la plus utilisée pour les problèmes où la fonction  $D_c(P)$  est dérivable, ce qui est le cas ici. Par conséquent, cette méthode est retenue pour cette étude.

Le programme de calcul pour la détermination des contraintes est composé de deux modules principaux : le module concernant l'optimisation, et celui associé à la résolution du problème direct par la méthode des discontinuités de déplacements. La structure générale du programme est résumée sur la figure 1.

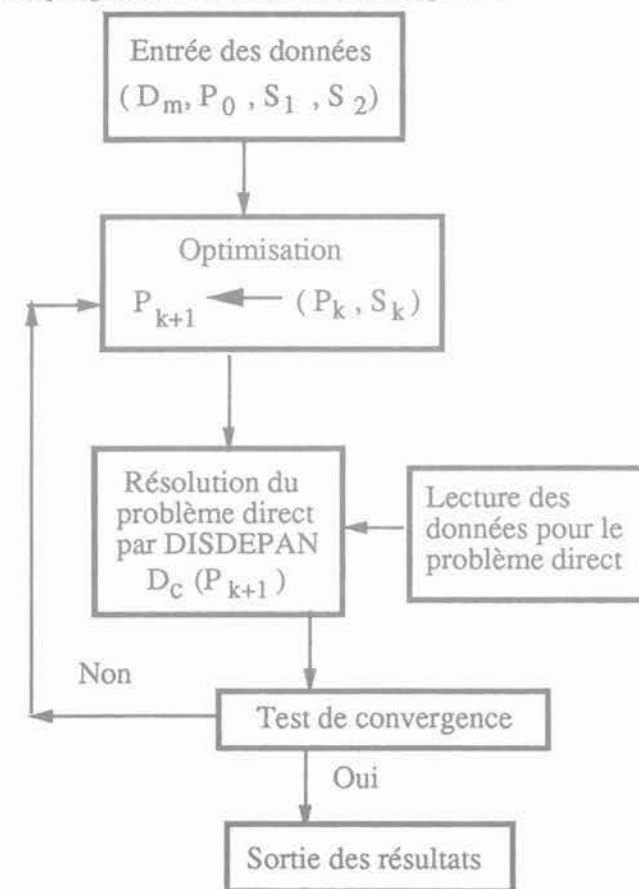


FIG. 1 Structure générale du logiciel SINVERS.  
General presentation of the code SINVERS.

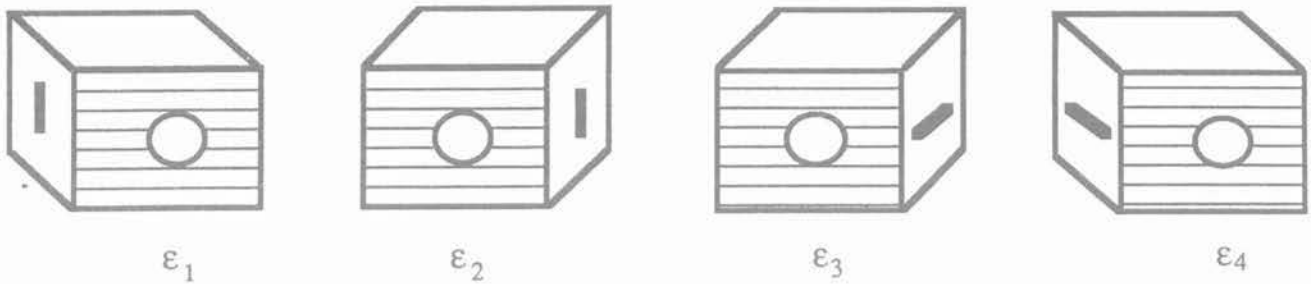


FIG. 3 Disposition des jauges d'extensométrie sur le cube.  
Arrangement of extensometric gauges.

- deux jauges notées  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont placées parallèlement à l'axe de chargement, et au milieu des faces non percées du cube, loin de toute perturbation que peut engendrer le trou. Grâce à l'enregistrement en continu des signaux, les jauges  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  suivent les déformations axiales du bloc au cours de l'essai;
- deux jauges notées  $\epsilon_3$  et  $\epsilon_4$  placées perpendiculairement à l'axe de chargement et au milieu des faces non percées du bloc, enregistre en continu les déformations transversales du bloc en cours de l'essai.

Les déformations mesurées nous ont permis de déterminer le module de Young  $E_1$  et le coefficient de Poisson  $\nu_{12}$  à grande échelle (Misbahi, 1994). En associant avec les résultats des essais triaxiaux sur petites éprouvettes, les valeurs caractéristiques élastiques du matériau sont  $E_1 = 35\,000$  MPa;  $E_2 = 107\,000$  MPa;  $\nu_{12} = 0,3$ ;  $G_{12} = 10\,000$  MPa.

Les déplacements radiaux  $U_r$  à la paroi du trou ont été mesurés à l'aide de la cellule USBM. Quatre essais ont été effectués suivant deux séries de mesures (a) et (b) présentées sur la figure 4:

- la série (a) est composée de deux groupes de mesures de  $U_r$  (essais 1 et 3) suivant les orientations ( $30^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $150^\circ$ ) (Fig. 4a);
- la série (b) est elle aussi composée de deux groupes de mesures de  $U_r$  (essais 2 et 4) suivant les orientations ( $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ) (Fig. 4b).

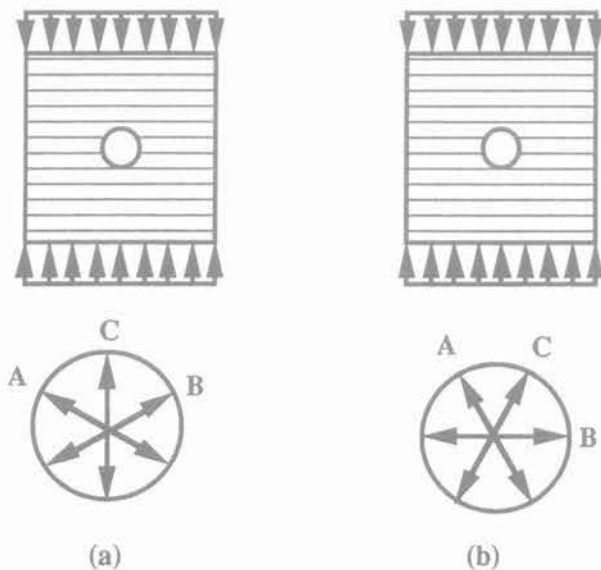


FIG. 4 Disposition de la cellule USBM: (a) pour les tests 1 et 3; (b) pour les tests 2 et 4.  
Arrangement of the USBM cell: (a) for the tests 1 and 3; (b) for the tests 2 and 4.

### 3.2

## Calcul de la contrainte à l'aide de la méthode d'inversion

Les contraintes déterminées à l'aide de la méthode d'inversion sont présentées dans les tableaux I et II. Les résultats présentés tiennent compte des deux séries de mesures expérimentales (série 1 = essai 1 + essai 2, série 2 = essai 3 + essai 4) qui sont, notons-le, chacune surabondante dans l'approche déterministe. A ces deux séries, on a ajouté une autre série, notée n° 3, qui tient compte de toutes les mesures (série 3 = série 1 + série 2). Notons que dans ce cas, nous avons deux valeurs de convergence par orientation et que, par conséquent, nous pouvons en déduire une valeur moyenne et une

TABEAU I Valeur de la contrainte obtenue à l'aide du code SINVERS en utilisant les différentes séries de mesures

Value of the stress determined by means of SINVERS code from different series of data.

	Série n° 1	Série n° 2	Série n° 3
Nombre de paramètres à déterminer	1	1	1
Paramètre à déterminer	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)
Valeur exacte	5	5	5
Valeur par SINVERS	4,93	5,8	5,42
Nombre d'itérations	12	9	8
Pourcentage d'erreur	1,4 %	16 %	8 %

TABEAU II Influence de la valeur de démarrage sur la contrainte obtenue.

Influence of the starting value on the determined stress.

	Série n° 3	
Nombre de paramètres à déterminer	1	1
Paramètre à déterminer	$\sigma$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)
Valeur exacte	5	5
Valeur de démarrage	5	3
Valeur inversée	5,42	5,45
Nombre d'itérations	8	12

première estimation de l'écart type. La valeur initiale de contrainte injectée dans les calculs est de 5 MPa. On peut noter la bonne précision de la méthode utilisée. Le nombre d'itérations reste faible. Le tableau II présente les résultats pour la série n°3 pour laquelle le démarrage du calcul est fait à  $\sigma = 3$  MPa au lieu de  $\sigma = 5$  MPa. Ceci a été fait dans le souci de vérifier si l'on trouve la même valeur de contrainte (non existence d'autres minima), et de déterminer le nombre d'itérations supplémentaires, si l'on injecte une valeur initiale éloignée de la valeur optimale.

• Étude de l'influence des coefficients élastiques sur la valeur optimale

Afin de connaître la perturbation que peut engendrer l'utilisation des différents coefficients élastiques obtenus à partir de différents essais (essais triaxiaux sur petits échantillons, essais à grande échelle sur cube à 40 x 40 x 40 cm, essais *in situ* ou essais ultra soniques sur petites éprouvettes), une étude de l'influence de ces coefficients sur les contraintes recherchées s'impose surtout que ces caractéristiques de la roche anisotrope sont généralement difficiles à mesurer avec certitude sur le terrain.

Dans le tableau III est présentée l'influence du module d'Young perpendiculaire au plan de schistosité  $E_1$ . On peut constater que ce module influence nettement le résultat obtenu. Rappelons qu'en milieu isotrope uniformément chargé à l'infini ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ ), nous avons :

$$\frac{U_r}{r} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma$$

soit :

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} = \frac{\Delta E}{E}$$

ce qui est à peu près le cas ici. Notons que nous venons d'étudier l'influence de l'incertitude sur  $E_1$ , alors que la contrainte est également appliquée dans la direction 1, ce qui représente, à notre sens, le cas le plus défavorable.

**TABLEAU III** Étude de l'influence de  $E_1$  sur la valeur de la contrainte obtenue.  
Study of the influence of  $E_1$  on the determined stress value.

$E_1$ (MPa)	30000	35000	40000	45000
$\sigma$ (MPa) exacte	5	5	5	5
$\sigma$ (MPa) inversée	4,62	4,93	5,95	6,5

En ce qui concerne le coefficient de Poisson  $\nu_{12}$ , son influence est présentée sur le tableau IV. On trouve à peu près la même influence qu'en milieu isotrope, à savoir :

$$\frac{\Delta \nu}{1 + \nu} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma}$$

D'après le tableau V qui présente l'influence du module perpendiculaire à l'axe de chargement  $E_2$ , il semble que l'erreur sur les contraintes ne soit pas symétrique par rapport à l'erreur sur  $E_2$ ; une augmentation de  $E_2$  influe moins qu'une diminution.

**TABLEAU IV** Étude de l'influence de  $\nu_{12}$  sur la valeur de la contrainte obtenue.  
Study of the influence of  $\nu_{12}$  on the determined stress value.

$\nu_{12}$	0,2	0,3	0,4
$\sigma$ (MPa) exacte	5	5	5
$\sigma$ (MPa) inversée	4,44	4,93	5,41

**TABLEAU V** Étude de l'influence de  $E_2$  sur la valeur de la contrainte obtenue.  
Study of the influence of  $E_2$  on the determined stress value.

$E_2$	90000	100000	107000	115000	130000
$\sigma$ (MPa) exacte	5	5	5	5	5
$\sigma$ (MPa) inversée	5,61	5,28	4,93	4,91	4,90

L'influence de  $G_{12}$  est présentée sur le tableau VI. Il semble que la variation de  $G_{12}$  influe peu sur les résultats. Ceci peut être expliqué par le fait que l'essai de compression a été mené perpendiculairement à la schistosité, et donc mobilise peu de cisaillement.

**TABLEAU VI** Étude de l'influence de  $G_{12}$  sur la valeur de la contrainte obtenue.  
Study of the influence of  $G_{12}$  on the determined stress value.

$G_{12}$ (MPa)	4000	6000	8000	10000	12000
$\sigma$ (MPa) exacte	5	5	5	5	5
$\sigma$ (MPa) inversée	4,50	4,68	4,79	4,93	4,94

Cette étude expérimentale en laboratoire nous a permis de nous familiariser avec la cellule USBM dans le cas des milieux anisotropes, de valider le logiciel de calcul, et d'étudier l'influence des caractéristiques élastiques de la roche qui sont difficiles à connaître avec certitude sur le terrain. Nous présentons maintenant un exemple d'application de la méthode d'inversion à la détermination des contraintes *in situ* dans une galerie expérimentale de mine.

4

## Application à la détermination des contraintes sur site

4.1

### Le site

Le site d'essai, à une profondeur d'environ 430 m dans le schiste, a les dispositions géométriques suivantes (Fig. 5) :

– la schistosité est légèrement inclinée par rapport à la verticale ;

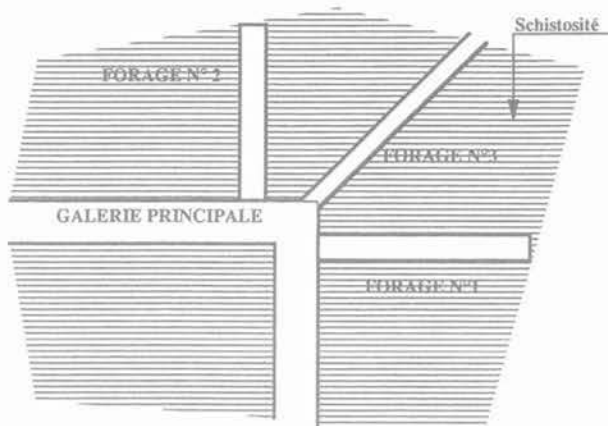


FIG. 5 Présentation du site d'essai.  
Presentation of *in situ* test.

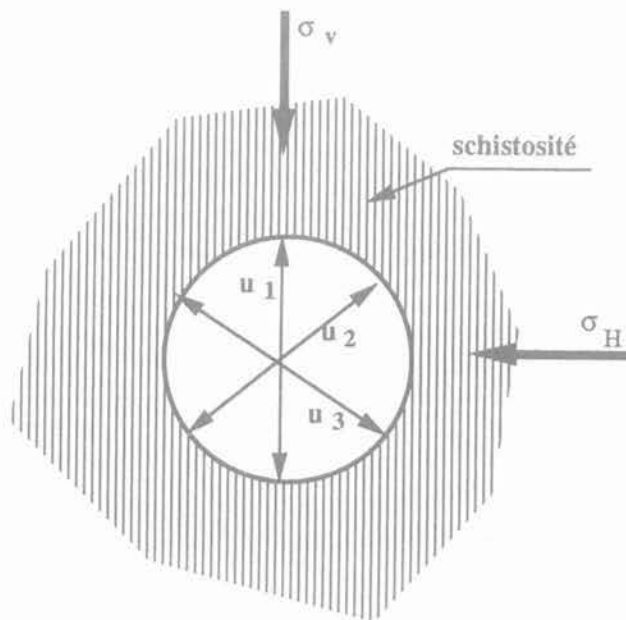


FIG. 6a Forage n° 1 avec la position de la cellule USBM.  
Arrangement of USBM cell in drilling n° 1.

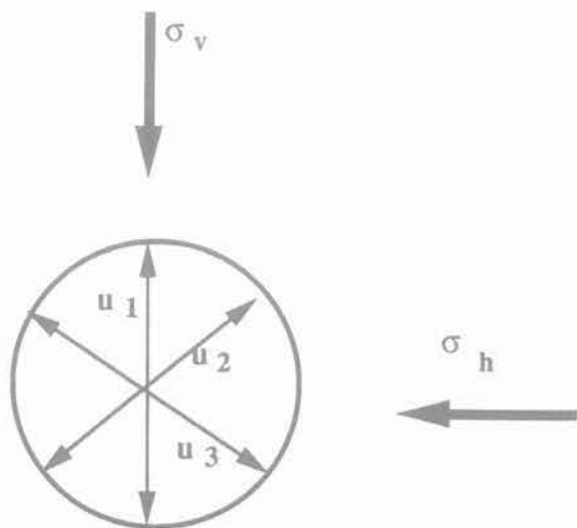


FIG. 7a Forage n° 2 avec la position de la cellule USBM.  
Arrangement of USBM cell in drilling n° 2.

– une galerie principale subhorizontale a été exécutée avec une première partie perpendiculaire à la schistosité, et une seconde parallèle au plan de schistosité;  
– trois forages horizontaux sont réalisés.

#### 4.2

### Détermination des contraintes

Seuls les forages 1 et 2 sont modélisés du fait que le code DISDEPAN ne traite que des problèmes plans. Les mesures données par la cellule USBM (Fig. 6b et 7b) nous ont permis de déterminer à l'aide du code SINVERS les contraintes  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  pour le forage 1 et  $\sigma_v$  et  $\sigma_h$  pour le forage 2. Nous pouvons donc obtenir  $\sigma_v$ ,  $\sigma_h$  et  $\sigma_3$ . Si l'on suppose que  $\sigma_v$  est égale au poids de terrains, et si les différentes hypothèses émises ne sont

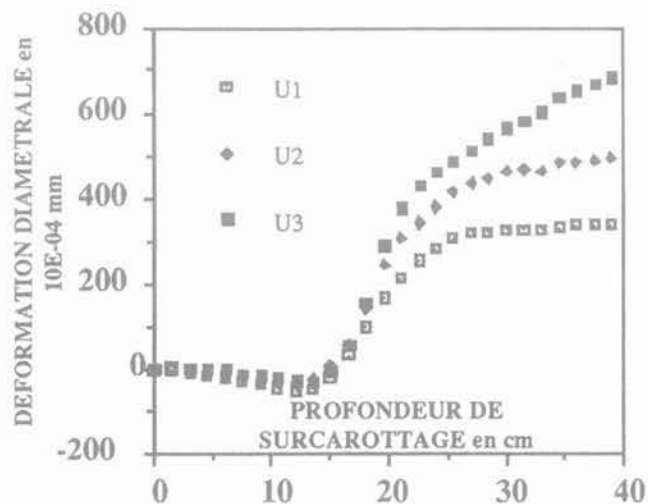


FIG. 6b Mesures des déplacements par la cellule USBM en fonction de la profondeur de surcarottage pour le forage n° 1.  
Displacements measured using USBM cell versus overcoring depth pour drilling n° 1.

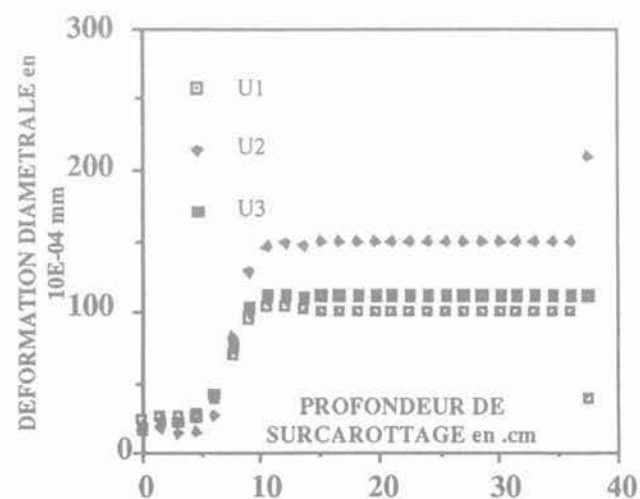


FIG. 7b Mesures des déplacements par la cellule USBM pendant le surcarottage pour le forage n° 2.  
Displacements measured using USBM cell during overcoring depth pour drilling n° 2.

pas trop inexactes, on devrait alors trouver des valeurs identiques pour  $\sigma_v$  à partir des deux forages et sensiblement égales au poids des terrains. En effet, l'utilisation de la méthode d'inversion a donné les valeurs des contraintes suivantes :

- forage 1 :  $\sigma_v = 10,5$  MPa ,  $\sigma_H = 15,2$  MPa
- forage 2 :  $\sigma_v = 11$  MPa ,  $\sigma_H = 12,4$  MPa

On remarque donc que les valeurs de  $\sigma_v$  sont sensiblement identiques et proches du poids des terrains (10,7 MPa), estimé pour une profondeur de 430 m. Les hypothèses émises ne sont donc pas trop fausses, et l'on peut en première approximation représenter l'état de contrainte *in situ* par la figure 8.

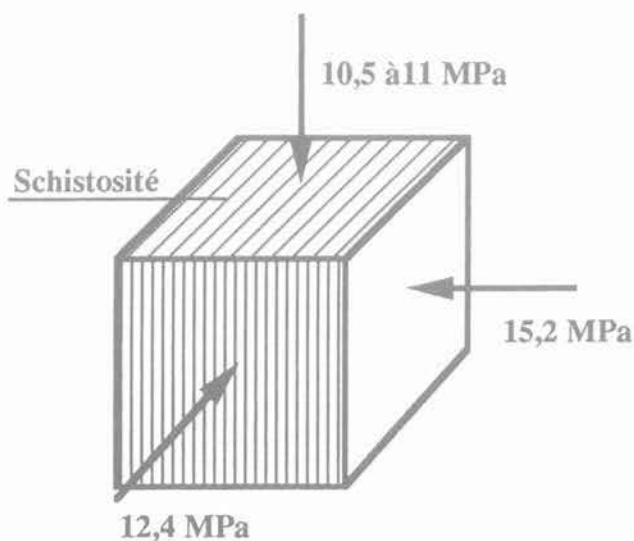


FIG. 8 Valeurs des contraintes *in situ* obtenues par la méthode d'inversion globale. The obtained *in situ* stresses using the proposed inverse method.

5

## Étude comparative de l'état des contraintes *in situ*

Afin d'apprécier les performances de la méthode d'inversion que nous venons d'appliquer à la détermination des contraintes, une confrontation avec une autre technique de calcul a été utilisée. En effet, lors de la campagne de mesures des contraintes naturelles dans le schiste, il a été décidé en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique de terrain de l'INERIS, de mettre en œuvre deux méthodes de mesures :

- la méthode de surcarottage avec les cellules USBM et CSIRO ;
- la méthode de fracturation hydraulique.

On cherche, d'une part, à confronter les résultats obtenus à l'aide de différentes techniques de mesures (méthode de surcarottage avec les cellules USBM et CSIRO, méthode de fracturation hydraulique) quelque soit le mode de dépouillement utilisé, d'autre part, à commenter ces différents modes de calcul utilisés (type déterministe : méthode des moindres carrés ou type probabiliste : méthode d'inversion) pour des essais de surcarottage avec la cellule USBM. Les caractéristiques mécaniques de la roche sont les mêmes que ceux utilisés pour les calculs précédents.

5.1

## Comparaison des résultats pour différentes techniques de mesures

Le tableau VII présente les valeurs de contraintes obtenus sur le même site par différentes méthodes. Globalement, on peut constater que les résultats obtenus par surcarottage avec la cellule USBM sont assez proches de ceux obtenus par fracturation hydraulique (Baroudi 1991). Par contre, les valeurs des contraintes obtenues par surcarottage avec la cellule CSIRO apparaissent comme singulières par rapport aux autres résultats. Ces valeurs sont supérieures aux autres et sont très dispersées. Ceci peut être expliqué, soit par la complexité de la mise en œuvre de la cellule, ce qui entraîne une mauvaise utilisation sur le terrain, par conséquent une mauvaise qualité d'enregistrement des données, soit par une influence de la localisation des mesures.

TABLEAU VII Comparaison des contraintes obtenues par les différents techniques de mesures. Comparison of stress values obtained using different measuring techniques.

Contraintes principales Nature de l'essai	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_H$ (MPa)	$\sigma_h$ (MPa)
Fracturation hydraulique	13	13,6	12,3
Surcarottage « USBM »	10,5	15,2	12,4
Surcarottage « CSIRO » parallèle à la schistosité	$7,3 \pm 1$	$23 \pm 2$	$10 \pm 2$
Surcarottage « CSIRO » perpendiculaire à la schistosité	$10 \pm 1$	$21 \pm 3$	$18,5 \pm 4$

5.2

## Comparaison des résultats pour différentes méthodes numériques

Pour les deux techniques de mesures les plus utilisées actuellement, le surcarottage et la fracturation hydraulique, déterminer le tenseur de contraintes  $\sigma$  revient le plus souvent à résoudre un système d'équations linéaires de type ( $Y = A\sigma$ ). Pour cela, plusieurs méthodes de dépouillement existent. Le tableau VIII présente une comparaison entre un dépouillement de type probabiliste (méthode d'inversion) et un dépouillement de type déterministe (méthode combinatoire, méthode des moindres carrés Chambon, 1986) pour des essais de surcarottage avec la cellule USBM sur le même site à 430 m de profondeur dans les schistes. Globalement, les valeurs obtenues par les deux modes de dépouillement ne sont pas trop éloignées les unes des autres, sauf pour  $\sigma_h$  où on obtient une nette différence. La seule remarque qu'on peut faire, est que la valeur de  $\sigma_h$  obtenue par la méthode d'inversion est proche de celle obtenue par fracturation hydraulique (Tableau VII).

TABLEAU VIII

**Comparaison des contraintes obtenues par deux modes de dépouillement; la méthode d'inversion et celle des moindres carrés.**

Comparison of stress values obtained using two interpretation methods; the inverse one and the least square one.

	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_{H1}$ (MPa)	$\sigma_{H2}$ (MPa)
Surcarottage avec « USBM » « Logiciel SINVERS »	10,5 ± 0,5	15,2 ± 0,5	12,4 ± 0,5
Surcarottage avec « USBM » « Méthode des moindres carrés »	11 ± 2	33 ± 5	11 ± 2

6

## Conclusion

Une méthode d'inversion globale est proposée pour la détermination des contraintes *in situ* dans le cadre des techniques de surcarottage. La validation de la

méthode sur des essais en laboratoire a montré sa grande efficacité. La méthode proposée est ensuite appliquée à la détermination des contraintes *in situ* dans les schistes. En comparaison avec d'autres méthodes de détermination de contraintes, *in situ*, les performances de la méthode d'inversion ont été démontrées. En effet, cette méthode basée sur une approche statistique permet de prendre en compte de façon optimale l'aspect positif des données expérimentales surabondantes. Les résultats obtenus ont montré qu'il est nécessaire de désorienter la cellule de surcarottage d'un essai à l'autre et d'augmenter le nombre de mesures afin d'augmenter la fiabilité des résultats. De plus, en utilisant la méthode d'inversion proposée, il est possible d'étudier facilement la sensibilité des résultats aux variations des caractéristiques mécaniques des matériaux qui sont, souvent délicates à déterminer pour les roches anisotropes. Enfin, cette méthode peut être facilement étendue aux problèmes de détermination des contraintes en milieux ayant un comportement non linéaire.

## Bibliographie

- Boehler J.-P. (1975) – Contributions théoriques et expérimentales à l'étude des milieux plastiques anisotropes, Thèse de Docteur ès Sciences, Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- Boehler J.-P. (1978) – Lois de comportement anisotrope des milieux continus, *Journal de Mécanique*, vol. 17, n° 2, pp. 153-190.
- Bonnechère F. (1978) – Contribution à la détermination de l'état de contraintes des massifs rocheux, Thèse de Docteur ès Sciences, Université de Liège.
- Bonnechère F., Fairhurst C. (1971) – Determination of regional stress field from Doorstopper measurements, Proc. Int. Symp. on the determination of stresses in rock masses, Lisbon, pp. 307-333.
- Chambon C., Revalor R. (1986) – Statistic analysis applied to rock stress measurements, Int. Symp. of Rock stress-Rock stress measurements, SENTEK (ed), Stockholm.
- Crouch S.L. (1976) – Solution of plane elastic problems by the displacement discontinuity method, *Int. J. Num. Math. in Eng.*, vol. 10, pp. 301-343.
- Crouch S.L., Starfield A.M. (1983) – Boundary Element Method in Solid Mechanics with applications in rock mechanics and geological engineering, University of Minnesota, 1983.
- Fletcher R. (1980) – Practical methods of optimization, John Wiley and sons.
- Hammade A. (1992) – Étude expérimentale du comportement d'un matériau anisotrope (schiste ardoisier): caractérisation de la rupture et détermination des paramètres élastiques, Thèse de Doctorat à l'Université de Lille I.
- Homand F., Morel E., Henry J.-P., Cuxac P., Hammade A. (1993) – Characterization of the moduli of elasticity of an anisotropic rock using dynamic and static methods, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, vol. 30 n° 5, pp. 527-535.
- Lekhnitskii S.G. (1963) – Theory of elasticity of an anisotropic elastic body, Hoden Day Inc., San Francisco.
- Misbahi A. (1994) – Contribution à la détermination des contraintes *in situ* dans les milieux rocheux anisotropes, Thèse de Doctorat à l'Université de Lille I.
- Morel E. (1987) – Contribution à l'étude de la propagation des discontinuités dans les roches anisotropes. Mise au point d'une technique de calcul utilisant l'intégrale de Cauchy et étude expérimentale d'un schiste ardoisier, Thèse de Doctorat à l'Université de Lille I.
- Shao J.-F., Dahou A., Henry J.-P. (1991) – Application de la théorie des problèmes inverses à l'estimation des paramètres des modèles rhéologiques, *Revue Française de Géotechnique*, 57, 75-80.
- Tarantola A. (1987) – Inverse problem theory, Elsevier, New York.