



D'après l'état de la technique d'aujourd'hui les méthodes de mesures de contraintes dans les roches peuvent être classées dans les quatre groupes suivants:

- Méthodes de décharge,
- Méthodes de compensation,
- Méthodes d'après la théorie d'inclusion dure,
- Méthodes de la génération de fissures dans les roches.

Les méthodes de décharge profitent du fait qu'un corps chargé est déformé quand il est déchargé. En connaissant préalablement le coefficient d'élasticité et la constante de Poisson de la roche il est possible de calculer les contraintes des déformations.

La méthode de décharge la plus connue est la méthode „doorstopper“ (stoppeur de porte). Ce stoppeur de porte est un élément de support équipé d'une rosette de jauge de déformation. Il est collé en une direction spécifiée sur le fond adouci d'un forage à l'aide d'un dispositif de placement spécial guidé par tiges. Après avoir fait une lecture initiale la surface de mesure, c'est-à-dire le fond du forage, est surcarottée et les déformations de décharge dans la face de la carotte déchargée ainsi formée sont déterminées par une deuxième mesure. Aujourd'hui il est possible d'utiliser cette méthode avec succès dans des forages jusqu'à une profondeur d'env. 30 m.

Les tests de décharge de surcarottage avec la cellule triaxiale suivent une procédure similaire. Des jauges de déformation ou des palpeurs de mesure mécaniques sont utilisés pour mesurer la déformation du flanc du forage quand il est surcarotté. Aujourd'hui cette méthode est utilisée jusqu'à une profondeur de 150 m.

Les méthodes de décharge sont idéales pour déterminer la valeur absolue des contraintes, mais elles sont moins convenables pour observer les changements des contraintes de la roche.

Contrairement aux méthodes de décharge les méthodes de compensation ne demandent pas la connaissance des constantes élastiques de la roche au point de mesure.



Avec la méthode de compensation les déformations qui se produisent pendant une décharge artificielle de la roche sont annulées par une pression de compensation qui est appliquée à l'aide d'un dispositif de charge adéquat. Les contraintes nécessaires correspondent usuellement aux contraintes originales. Cette méthode est surtout utilisée dans des cavités souterraines où la décharge est normalement induite par une entaille réalisée à la scie à diamant.

Les méthodes d'après la théorie d'inclusion dure sont idéales pour mesurer les changements de contraintes et moins convenables pour déterminer les valeurs absolues.

Cette méthode utilise des transducteurs avec un coefficient d'élasticité beaucoup plus haut que celui de la roche au point de mesure. La procédure se fonde sur les relations théoriques suivantes:

Si un transducteur d'un coefficient d'élasticité  $E_M$  est installé par adhérence dans une structure de roche chargée élastiquement d'un coefficient d'élasticité  $E_G < E_M$  la contrainte dans le transducteur se distinguera de celle-ci dans la roche environnante; il y aura des concentrations de contraintes dans le transducteur. Si la relation entre les coefficients  $E_M / E_G$  est connue on peut corriger les contraintes mesurées dans le transducteur.

Car il est difficile d'installer le transducteur par adhérence très épais à la roche dans la plupart des cas on mesure seulement les changements de contraintes avec ces transducteurs. Si un tel transducteur est utilisé dans des roches visqueuses ou plastiquement chargées il y a aussi la chance de mesurer les contraintes primaires. Dans ce cas on peut s'attendre que le transducteur va „croître dans la roche“ par fluage de la roche, i. e. que les contraintes dans la roche se constituent peu à peu dans le transducteur aussi. En raison du fluage de la roche on peut aussi s'attendre à un état de contrainte hydrostatique marqué.

Aujourd'hui on connaît beaucoup de méthodes et d'instruments de mesure se fondant sur la théorie d'inclusion dure, mais beaucoup de ces méthodes ne se distinguent guère. On peut les classer dans des groupes différents caractéristiques qui se distinguent d'après le principe de conversion de valeurs mesurées ou de transmission de valeurs mesurées:



- Principe de mesure hydraulique (vérin plat, cellule de pression)
- Principe de mesure électrique (jauges de déformation, capteurs inductifs)
- Principe de mesure mécanique (corde vibrante, montre-compteurs)
- Principe de mesure optique (matières photo-élastiques)

Avec les cellules de pression hydrauliques GLÖTZL la pression dans le vérin agit sur une membrane et la serre contre une plaque avec deux trous ainsi la membrane les ferme. Une contre-pression appliquée par l'un des trous est augmentée jusqu'à ce que la membrane se lève de la plaque. En ce cas les deux trous sont en contact l'un avec l'autre. Le levage de la membrane est accompagné d'un écoulement du milieu de pression au deuxième trou. La contre-pression nécessaire pour cela correspond à la pression dans la cellule. Des mouvements légers de la membrane sont suffisants pour produire une lecture, l'action de fonctionnement de la cellule est ainsi très dure.

Le stressmètre d'après POTTS se compose de deux pièces de noyau formées identiquement, oblongues, d'acier à résistance élevée, l'une placée sur l'autre qu'un corps de rotation conique se forme. Des rainures peu profondes sont fraisées dans les surfaces de contact produisant un interstice étroit entre les deux moitiés qui est rempli d'une émulsion d'huile-d'eau. Cette pièce de noyau est pressée dans un manchon fissuré d'une forme conique dans l'intérieur aussi. Les deux segments de manchon sont écartés et serrés contre le flanc du forage avec précontrainte définie. Une tête de mesure vissée sur une extrémité de la pièce de noyau transforme la pression dans l'interstice de noyau à un signal électrique par une membrane équipée de jauges de déformation.

La pièce centrale conique est serrée dans le manchon à l'aide d'une petite presse hydraulique construite spécialement pour ce but. Ainsi le transducteur peut être installé dans le forage avec une précontrainte définie et on peut enregistrer des contraintes aussi bien augmentantes que diminuantes.



Comme son nom l'indique le stressmètre de fil vibrant d'après HAWKES utilise la relation entre la fréquence d'oscillations d'un fil et sa tension comme principe de mesure. L'élément de mesure se compose d'un tube d'acier durci à paroi épaisse dans lequel un fil d'acier d'une épaisseur de 0,23 mm est bandé verticalement à l'axe de tube. Directement à côté de ce fil se trouve une bobine électro-magnétique qui sert aussi bien à exciter l'oscillation du fil (par impulsion de courant) qu'à enregistrer la fréquence d'oscillations. Le corps de mesure est aplani à un point de sa paroi extérieure pour poser une plaque de pression adaptée au rayon du forage et un coin d'acier. A l'aide d'un dispositif de placement hydraulique spécialement développé il est possible d'insérer et coincer le transducteur dans un forage d'un diamètre de 38 mm. Des changements de contraintes dans les environs du forage provoquent une déformation du corps de tube et ainsi un changement de la tension du fil. Le changement de la fréquence d'oscillations du fil y résultant peut être lu à une boîte de mesure qui est raccordée au transducteur par câble. Pour corriger l'erreur attribuée à la température le corps de mesure est équipé d'une sonde de température électrique dont le signal est aussi transmis par câble. Les pièces électriques sont scellées et rendent l'élément de mesure largement insensible à l'eau. Des plaques de pression de différentes tailles sont disponibles pour s'adapter aux résistances de la roche variables.

Un transducteur développé de ROBERTS et al se fonde sur la photo-élasticité. Il se compose d'un cylindre en verre qui est illuminé par une petite ampoule qui luit par un polaroïd et une plaque de  $\lambda/4$ . Si le transducteur est collé dans le forage les changements de contraintes dans la roche sont transférés à lui. Si on observe le cylindre en verre par un deuxième polaroïd on voit une image isochromatique dont on peut dériver l'état de contrainte dans le verre et par conséquent celui dans la roche environnante.

La stabilité de longue durée est très bonne en raison des propriétés du verre. En combinaison de sondes optiques ou de caméras de forage le transducteur peut aussi être utilisé dans des forages plus profonds.



Parfois l'installation des transducteurs de ce genre s'est cependant trouvée être critique, car des images isochromatiques exactes sont seulement garanties quand le collage est constant et sans contraintes.

Jusqu'à présent on utilise seulement une méthode pour mesurer les contraintes absolues dans des forages d'une profondeur supérieure à 200 m, la méthode de la génération de fissures dans les roches, connue sous le nom „Hydraulic Fracturing“. De ce fait elle était déjà utilisée jusqu'à des profondeurs de 4000 m et plus. Sous réserve que certaines conditions secondaires soient remplies la détermination complète du tenseur de contrainte est possible.

L'utilisation de la technique „Hydraulic Fracturing“ se fonde sur la théorie classique que la roche au point de mesure est élastique, isotrope et pas fissurée, et qu'une des trois contraintes principales est approximativement verticale. Un forage est creusé dans cette direction jusqu'à la profondeur désirée et ensuite la zone de mesure est étanchéifiée par un manchon en caoutchouc gonflable à sa limite haute et un manchon à sa limite basse.

Maintenant un liquide (eau, huile) est pompé dans cette section du forage isolée et sa pression est augmentée peu à peu jusqu'à ce qu'une perte de liquide soudaine et une chute de pression se produisent attribuées à une crevasse de tension dans la paroi du forage. Après avoir fini de pomper la crevasse cesse de s'étendre après un certain temps et un niveau de pression se règle juste pour maintenir la crevasse.

Après un déchargement de pression complet de la section de test la pression nécessaire pour ouvrir la crevasse auparavant produite dans la paroi du forage est déterminée dans un deuxième essai. De ces pressions et de l'orientation de la crevasse indiquée par des impressions dans le caoutchouc on peut dériver la taille et la direction des contraintes principales.

On a prouvé que cette méthode peut aussi être utilisée dans des roches non-élastiques et fissurées (BAUMGÄRTNER et RUMMEL, 1989) et que le forage ne doit pas être parallèle à une des directions de contrainte principale.



Si un forage est fait dans une structure de la roche non chargée et si on la charge ensuite, le forage va changer sa forme. Initialement orbiculaire il va devenir plus petit et en outre il va prendre une section elliptique sous l'influence de différentes pressions latérales.

Le changement du diamètre est une fonction - entre autres - des contraintes, du coefficient d'élasticité et de la constante de Poisson.

La même chose s'applique à l'inverse:

Si un forage est fait dans une structure de la roche chargée et si on la décharge ensuite, la section du forage va changer sa forme aussi, mais en direction renversée. Un déchargement complet des environs d'un forage peut être simplement atteint par un surcarottage coaxiale du forage de mesure avec une couronne de carottage. Pendant ce processus il faut faire attention que le noyau creux surcarotté soit protégé de désintégration mesurable et désagrégation de la structure de la roche et par conséquent de changements du volume inélastiques.

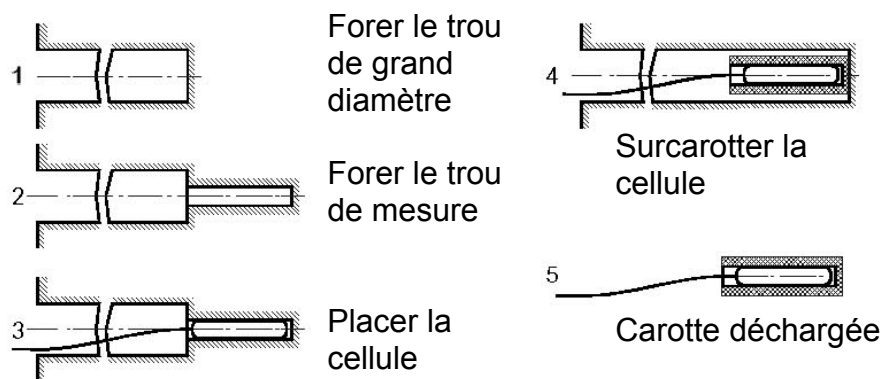


Fig 1 Principe de la méthode de décharge de surcarottage



Depuis 1972 on a développé des cellules de mesure dans plusieurs laboratoires de recherches pour mesurer l'état de contrainte à trois dimensions dans la roche d'après la méthode de décharge de surcarottage. Une de ces cellules, la "Hollow Inclusion Stress Cell" du „Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation“ (CSIRO), est incluse dans notre gamme de produits. Cette cellule triaxiale (brevet australien no. 496712) est produite sous licence de l'entreprise Environmental Systems & Services Pty Ltde, Victoria, Australia, et utilisée en Allemagne par nous.

La cellule HI se compose d'un tube plastique avec neuf jauges de déformations insérées (voir fig 2). Elle est insérée dans un forage EX (d = 39 mm, l = 600 à 700 mm env.) dans une injection plastique. Après le durcissement de l'injection la cellule est surcarottée avec une couronne de surcarottage (d = 146 mm). Les changements du diamètre de forage sont mesurés continuellement avant, pendant et après l'opération de forage.

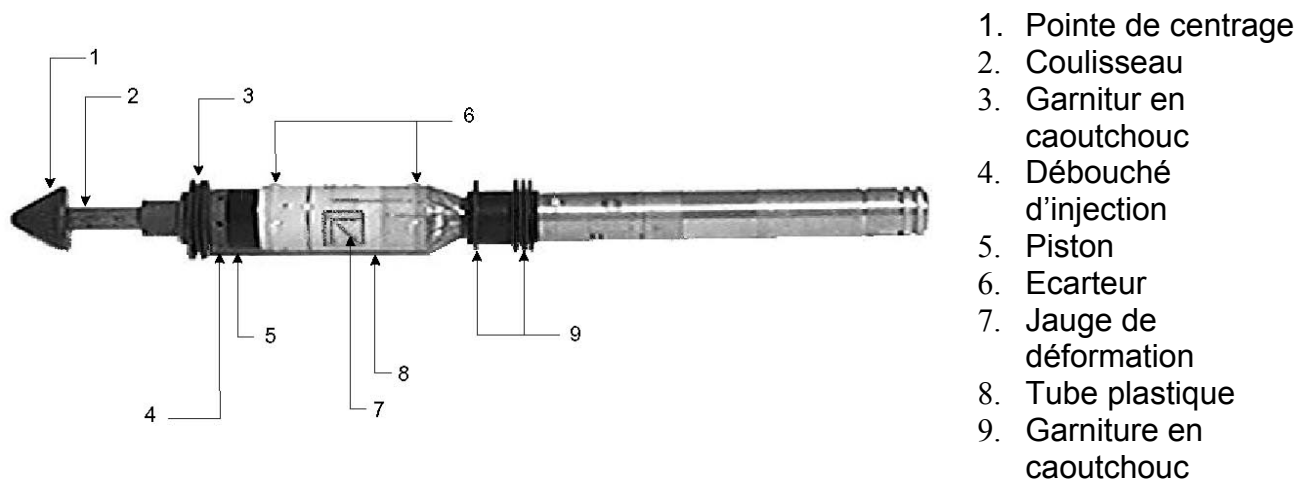


Fig 2 Cellule triaxiale HI pour mesurer les contraintes primaires d'après la méthode de décharge de surcarottage



Dans la cellule HI les trois rosettes de déformation  $45^\circ/90^\circ$  sont placées exactement à  $120^\circ$  l'une à l'autre ainsi que trois jauges se trouvent en direction annulaire, deux en direction axiale et quatre à  $\pm 45^\circ$  de l'axe de forage (voir fig 3). Chaque jauge a une longueur de 10 mm pour être relativement grande comparée à la granulation de la roche. La disposition et la taille garantissent une mesure réaliste du tenseur de contraintes complet.

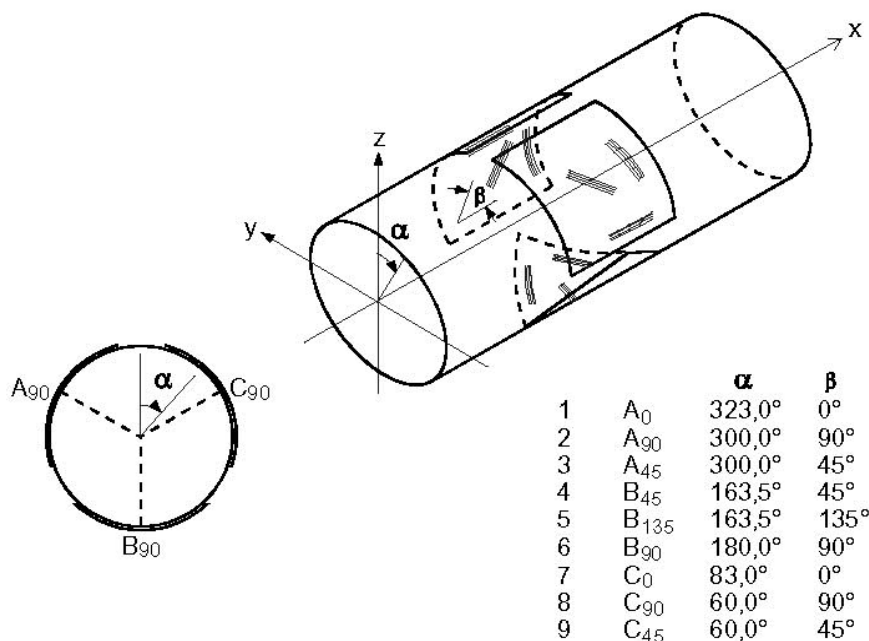


Fig 3 Disposition des rosettes de déformation dans la cellule HI

Pour injecter la cellule HI dans le forage on la remplit avec une colle à deux composants qui est pressée hors des trous à l'aide d'un coulisseau cylindrique pour remplir complètement la cavité entre la cellule et le flanc du forage. L'épaisseur du remplissage est normalement de 1,5 mm, mais le mieux est de la mesurer en ouvrant la section surcarottée par sciage, parce que cette valeur intervient par la calcul du tenseur de contraintes. Le coulisseau peut être opéré soit par déplacement de la cellule vers le fond du trou soit par un déclencheur à câble.





L'utilisation de cette méthode de mesure est limitée à une profondeur de forage de 150 m. Il est vrai qu'en principe des profondeurs plus grandes sont possibles, mais nous les déconseillons à cause de la grande difficulté à propos de l'installation et les limites données à la transmission des valeurs mesurées.

En utilisant un ordinateur de forage fixé directement au-dessus de la cellule on a réussi ces derniers temps à résoudre le problème de transmission, mais la durée de fluidité de la colle plastique est toujours une limite pour la profondeur d'installation. En outre une mesure continue des déformations pendant le surcarottage est facilement possible à l'aide de l'ordinateur de forage. Jusqu'à présent des mesures continues étaient seulement possibles par câble et en utilisant un foret à canon avec tube carottier simple. La profondeur était limitée à env. 30 m et l'entrepreneur de forage a eu beaucoup de travaux supplémentaires. Par conséquent dans la plupart des cas on n'a fait qu'une mesure de décharge après avoir enlevé la carotte. L'ordinateur de forage permet des mesures continues pendant le surcarottage jusqu'à une profondeur maximale de 150 m, où on peut travailler avec un tube carottier double et des équipements de forage standards modernes sans empêcher les travaux de forage. Fig 4 montre un exemple de mesure de la déformation en fonction du progrès de forage.

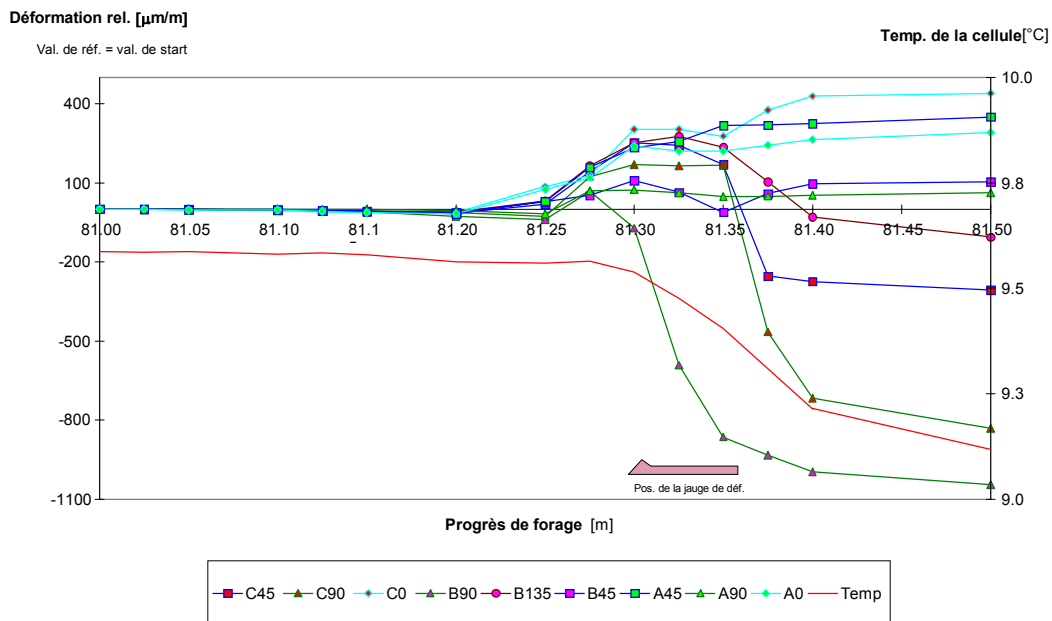


Fig 4 Signaux pendant le surcarottage



Des applications sous-marines de la cellule triaxiale sont possible car l'injection plastique utilisée peut aussi durcir en présence de l'eau. Pour recevoir des résultats satisfaisants l'espacement des joints au point de mesure doit être plus grand que 250 mm et la cellule de mesure doit être dans un bloc élémentaire plus grand.

Les paramètres élastiques de la roche doivent être connus pour calculer l'état des contraintes primaires. Ceux-ci sont convenablement déterminés directement à la section surcarottée par un test biaxe. La section surcarottée avec la cellule triaxiale collée dans la chambre biaxe est radialement chargée et les déformations qui s'y produisent sont mesurées. A l'aide d'une pompe hydraulique la pression est mise sur la carotte enveloppée de néoprène. Le protocole des déformations mesurées se fait aux étapes de 0,25 - 0,5 MPa. Dans les valeurs de mesure on peut conclure à la qualité du collage de la cellule triaxiale.

Les paramètres d'entrée suivants doivent être connus pour calculer le tenseur de contraintes complet dans les résultats de mesure de la cellule CSIRO:

- Magnitudes de déformation de la cellule par suite de la décharge de la roche
- Orientation à trois dimensions de la cellule
- Propriétés élastiques de la roche

Les jauges de déformation de la cellule CSIRO sont séparées de la paroi du forage EX par un interstice d'env. 1,5 mm rempli d'araldite. Par conséquent les déformations mesurées en direction annulaire et en directions 45 ° et 135 ° se distinguent des valeurs actuelles. A cause de cela WOROTNICKI et WALTON (1976) ont déterminé quatre coefficients de correction qui peut être utilisés pour calculer les déformations qui se produisent à la paroi du forage dans les valeurs mesurées. Ces coefficients de correction sont considérés dans le programme d'évaluation. Des formules convenables à calculer l'état de contrainte en raison des déformations de la paroi du forage mesurées par suite de surcarottage ont été publiées par LEEMANN (1971). En général six mesures de déformation mutuellement indépendantes sont nécessaires pour déterminer le tenseur de contraintes complet. La cellule CSIRO toutefois donne neuf valeurs de déformation en huit différentes directions. Avec cette redondance des valeurs mesurées il est possible de sélectionner les résultats à l'aide d'une calculation de régression d'après le principe des carrés les plus petits. Dans le premier pas la valeur de déformation en saillie du profil total est déterminée et éliminée. Un autre pas d'itération peut être fait avec les huit



valeurs mesurées restantes. Au maximum trois itérations sont possibles, parce qu'au minimum six valeurs de déformations doivent être évaluées. En outre il est possible d'assurer la qualité d'un article au moyen des valeurs caractéristiques statistiques qui sont calculées du programme d'ordinateur.

Mais on devrait considérer que la calculation multiple de régression contient certaines supposition - en ce qui concerne les données - et qu'elle donne une solution strictement optimisée au point de vue statistique. Par conséquent on devrait continuer à faire un jugement définitif de l'importance de valeurs mesurées individuelles à partir de valeurs empiriques. A côté des valeurs caractéristiques statistiques les facteurs résultant des conditions individuelles pendant le test jouent un rôle important.

L'état de contrainte dans la roche est calculé à l'aide du programme STRESS 91, un programme qui a été développé par MILLER (1983) en Australie et qui utilise la méthode d'itération décrite ci-dessus. Dans chaque pas d'itération la valeur de déformation avec la déviation la plus grande est éliminée pour obtenir la solution du carré le plus petit. L'opérateur peut aussi extraire des valeurs mesurées individuelles si elles semblent être inutilisables pour n'importe quelle raison.

Le programme a besoin des données d'entrée suivantes:

- Informations générales pour identifier le test
- Orientation du forage
- Coefficient d'élasticité et constante de Poisson de la roche
- Valeurs de déformation et position spatiale des jauges de déformation

La sortie du programme (voir exemple d'évaluation suivant) se compose:

- de trois directions principales et magnitudes de contrainte
- de trois composants orthogonaux et trois composants de cisaillement relatifs au système de référence
- de valeurs caractéristiques statistiques pour évaluer la fiabilité des résultats de mesure

**Informations Commerciales**

- 13.1.1 Cellule triaxiale CSIRO HI (modèle modifié système GIF) avec 9 points de mesure et thermistance intégrée pour mesurer la température
- 13.1.2 Epoxy-résine pour sceller la cellule triaxiale CSIRO HI, quantité adaptée à une cellule, pour gammes de température de la roche de + 4 à + 10°C, + 10 à + 18°C, + 18 à + 25°C, + 25 à + 32°C, + 32 à + 45°C, + 45 à + 60°C (indiquez s.v.p.)
- 13.1.3 Dispositif de placement et de centrage pour forages de test d'un diamètre de 146 mm et de forages pilotes d'un diamètre de 39 mm (version horizontale ou verticale)
- 13.1.4 Tige de placement en aluminium avec des dispositifs d'accouplement rigides à la torsion en acier inoxydable, longueur 2 m
- 13.1.5 Ordinateur de forage pour enregistrer les déformations pendant le surcarottage (wireless-version) avec sonde de boussole et inclinomètre pour déterminer la direction d'installation de la cellule triaxiale
- 13.1.6 Chambre biaxe pour déterminer les valeurs caractéristiques des matières à la section surcarottée avec pompe manuelle et manomètre de précision pour un diamètre de la carotte de  $101 \pm 2$  mm (autres diamètres sur demande)
- 13.1.7 Manuel d'installation CSIRO
- 13.1.8 Programme d'évaluation STRESS 91



Cette méthode est fondée sur une décharge artificielle de la roche avec une entaille réalisée à la scie à diamant en mesurant en même temps la déformation s'y produisant. Cette déformation est annulée par une pression de compensation qui est chargée avec des installations convenables. Usuellement les contraintes nécessaires pour ce processus correspondent aux contraintes originales. Contrairement aux méthodes fondées sur une décharge cette méthode ne demande pas la connaissance des constantes élastiques de la roche au point de mesure.

La méthode de compensation a été utilisée la première fois par MAYER et al (1951) et simplifiée et améliorée plus tard par ROCHA et al. (1966). Son principe et les opérations sont illustrées dans la fig 1. Comme première opération des boulons de mesure sont scellés à la surface du composant dans un arrangement convenable aux deux cotés de l'entaille projetée. Les distances entre les boulons sont enregistrées par des capteurs électriques de déplacement ou par des extensomètres (précision de lecture  $\pm 1 \mu\text{m}$ ).

Comme suite à la lecture initiale une entaille usuellement 400 mm de large et 5 mm de haut est sciée avec une scie à diamant. Un vérin plat en forme de demi-lune est placé exactement dans l'entaille et relié avec une pompe hydraulique pourvue d'un manomètre de haute précision de la catégorie 1.0. Finalement le vérin plat est chargé jusqu'à ce que les déformations de décharge soient compensées.

La méthode possède beaucoup d'avantages:

- elle ne présume pas de roche d'une élasticité linéaire
- elle ne demande pas la connaissance des caractéristiques de déformation de la roche
- les grandes dimensions de test minimalisent l'importance des manques d'homogénéité de la roche

Mais cette méthode ne fonctionne pas si elle est confrontée avec des contraintes, ce qui se produit très rarement en pratique.

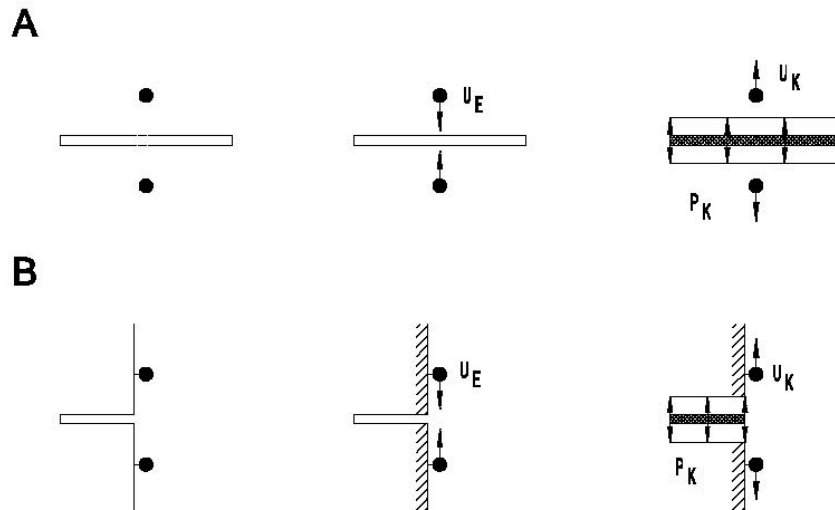


Fig 1 Méthode de compensation  
 A = projection, B = coupe transversale  
 $U_E$  déformations de décharge  
 $U_K$  compensation de les déformations de décharge  
 $P_K$  pression de compensation

L'évaluation des résultats de test obtenus par la méthode de compensation se fonde sur l'équation suivante:

$$\sigma_n = p \cdot K_m \cdot K_a$$

$p$  = Pression d'huile dans le vérin à compensation complète

$K_m$  = Constante de forme du vérin utilisé

$K_a$  = Rapport entre surface du vérin et surface de coupe

Les contraintes déterminées avec cette équation correspondent aux contraintes tangentielles à une distance de 5 cm du bord extérieur de la surface rocheuse.



A condition que des capteurs de déplacement soient installés dans les vérins ou que le volume du liquide hydraulique injecté pour gonfler le vérin puisse être mesuré à une précision de  $1 \text{ cm}^3$ , les tests de compensation peuvent être utilisés aussi pour déterminer le module de déformation de la roche. Mais pour se conformer aux recommandations no. 7 du groupe de travail 19 - technologie d'essais de la roche - de la Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (1984) et Suggested Method for Deformability Determination using a Large Flat Jack Technique de ISRM (1986) il est normalement nécessaire en ce cas d'utiliser des grandes entailles avec des vérins d'env.  $1000 \times 1000 \text{ mm}$  (LFJ). D'après la théorie d'élasticité pour un espace semi-infini homogène isotrope, sujet à une charge uniformément répartie, l'équation suivante est valable:

$$E = (1 - \nu^2) \frac{K}{\Delta s} \Delta p$$

$\nu$  = Constante de Poisson

$K$  = Coefficient de forme avec la dimension d'une longueur

$p$  = Pression d'huile dans le vérin

$s$  = Déplacement

A cause de cela il est possible de déterminer le module de déformation de la roche si le coefficient  $K$  est connu. Fig 2 montre les valeurs  $K$  pour des vérins d'une largeur de  $1000 \text{ mm}$  et d'une longueur totale de  $1250 \text{ mm}$ . Nous voulons attirer votre attention sur les publications de LOUREIRO-PINTO (1981) mentionnant d'autres possibilités pour calculer des valeurs  $K$ .



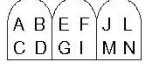

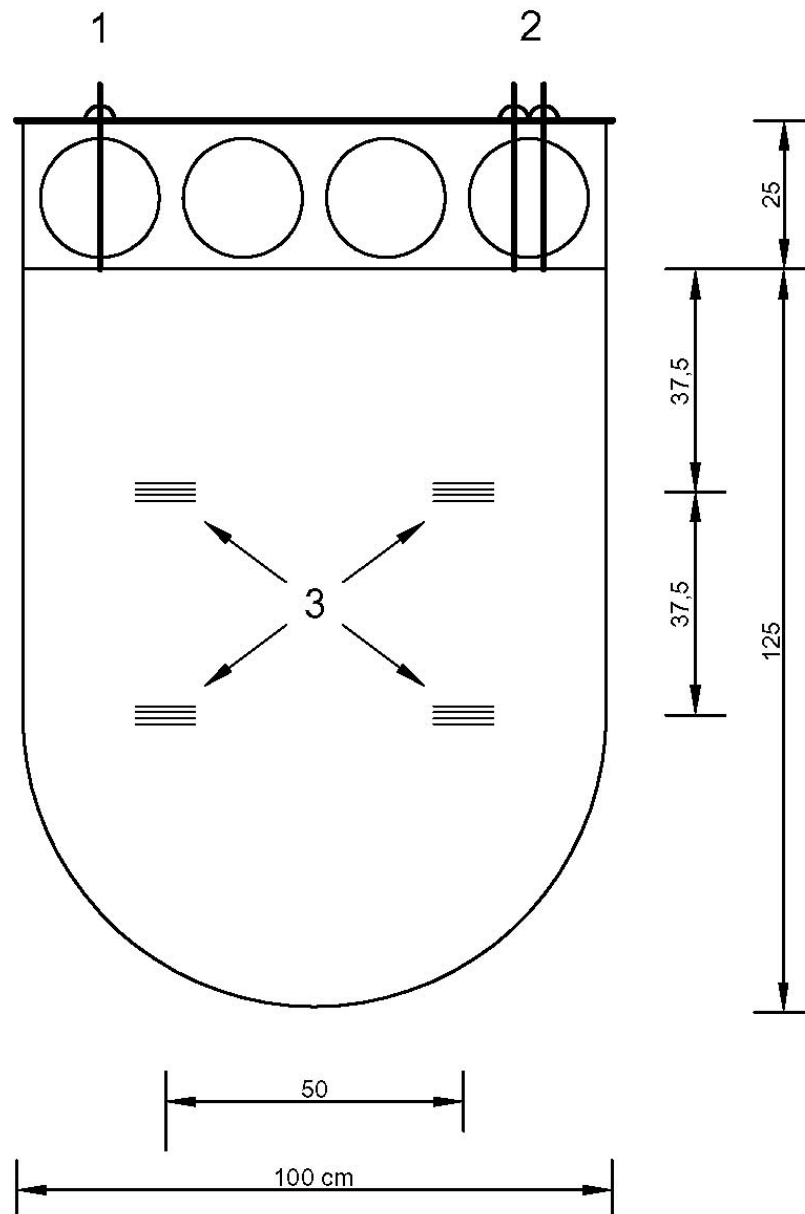
Configuration des vérins plats	Position	K[cm]	Position	K[cm]
	A, B C, D	131 136		
	A, F B, E	150 191	C, I D, G	160 215
	A, L B, J C, N	155 202 167	D, M E, F G, I	231 216 249
	A, P B, O C, R D, Q	157 206 170 237	E, L F, J G, N I, M	223 228 259 267

Fig 2 Valeurs  $K$  pour différentes combinaisons de vérins plats de DGEG (1984)



1 = Entrée d'huile, 2 = Raccords pour jauges de déformation, 3 = Deformetres





Avec la méthode d'inclusion dure des capteurs de contraintes en général à haute rigidité sont placés dans un forage pour enregistrer des changements de contraintes. Cette méthode utilise des transducteurs avec un coefficient d'élasticité plus haut que celui de la roche au point de mesure. La procédure se fonde sur les relations théoriques suivantes:

Si un transducteur d'un coefficient d'élasticité  $E_M$  est installé par adhérence dans une structure de roche chargée élastiquement d'un coefficient d'élasticité  $E_G < E_M$  la contrainte dans le transducteur se distinguera de celle-ci dans la roche environnante; il y aura des concentrations de contraintes dans le transducteur. Si la relation entre les coefficients  $E_M/E_G$  est connue on peut corriger les contraintes mesurées dans le transducteur.

Il est possible de distinguer entre plusieurs méthodes selon leur principe de conversion de valeurs mesurées ou de transmission de valeurs mesurées:

- Principe de mesure hydraulique
- Principe de mesure électrique
- Principe de mesure mécanique
- Principe de mesure optique

Des vérins plats d'une rigidité standard ont particulièrement fait leurs preuves comme capteurs de contraintes. Les transducteurs de pression (fig 1) sont installés nettement orientés dans les forages de mesure. Les composants de contraintes sont mesurés en direction orthogonale aux vérins.

Pour produire la connexion par adhérence entre les vérins et la roche les forages sont remplis d'un mortier convenant aux caractéristiques de la roche. Une précontrainte par injection à haute pression d'époxy-résines peut avoir lieu une fois le mortier durci.

Cette méthode convient aussi à mesurer les changements de contraintes relativement petits. Dans des zones de la roche visqueuses ou plastiquement chargées on peut s'attendre à ce que le transducteur va „croître dans la roche“ par fluage de la roche, c'est-à-dire que les contraintes dans la roche se constituent aussi peu à peu dans le transducteur. Dans ces conditions de roche et avec le mortier de remplissage bien



choisi il est aussi possible de déterminer les magnitudes actuelles des composants de contraintes orthogonales additionnellement aux changements de contraintes.

Le capteur standard de contraintes de la roche se compose de:

Trois vérins plats d'acier orientés directionnellement avec trois cellules, type BB 10/20 KF 50 chacune tournée de 120°. Capacité de charge 0 - 50 bars (si nécessaire aussi plus haute). Conduite d'injection autour des vérins et raccordement carré de tiges. Câbles de raccordement pour la mesure des cellules et conduites d'injection pour l'injection subséquente.

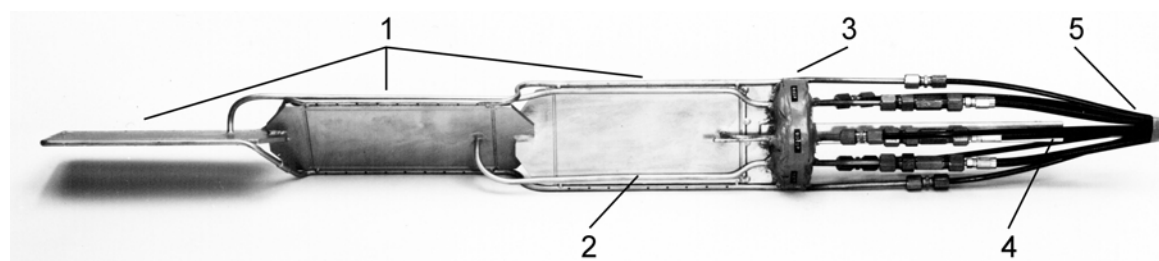


Fig 1 Transducteur de pression avec trois vérins plats

- |                          |                               |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 Vérins plats           | 2 Conduite d'injection        |
| 3 Cellules               | 4 Raccordement carré de tiges |
| 5 Câbles de raccordement |                               |

La pression dans les vérins est mesurée soit hydrauliquement par des cellules du système Glötzl soit électriquement par des capteurs de pression. La contrainte dans les vérins peut être lue directement sur l'instrument en bars.

Les conduites d'injection à haute pression perforées, placées autour du bord des vérins, sont fermées avec une bande adhésive pour empêcher l'infiltration du mortier pendant l'installation. Une fois le matériau de remplissage durci des résines synthétiques ou des matériaux semblables peuvent être injectés par ces conduites pour pré-contraindre le matériau de remplissage et les capteurs de contrainte y insérés.



La décharge d'entaille avec la sonde d'entaille de forage (Borehole Slotter) est une méthode de mesure de contraintes primaires à deux dimensions. Elle se fonde sur le principe de décharge de contraintes locales dans un forage. A l'aide d'une scie à diamant pneumatiquement commandée des entailles de décharge sont sciées parallèle à l'axe de forage (Fig. 1). Les entailles sont d'une largeur d'env. 1 mm et d'une profondeur jusqu'à 20 mm.



Fig. 1 Sonde d'entaille de forage (borehole slotter) à la tête du forage

A proximité directe de l'entaille un capteur d'allongement de contact spécialement développé est pressé contre le flanc du forage avec une force spécifiée pendant l'entaillage (Fig. 2). Sa fonction est de mesurer l'allongement tangentiel du flanc du forage pendant l'entaillage. Dans le schéma de la Fig. 3 il y a une décharge de la contrainte locale complète le long de l'entaille dans le flanc du forage suivie d'un allongement proportionnellement tangentiel.

Normalement les forages sont d'abord examinés avec une caméra pour éliminer des sections de forage inadaptées.



Au point de mesure sélectionné des entailles sont sciées l'une après l'autre aux différentes directions. Au moins trois entailles, placées alternativement à  $120^\circ$ , permettent la détermination de l'état de contrainte à deux dimensions. Mais normalement pour une mesure de contrainte trois essais d'entaille additionnels sont encore exécutés dans un endroit de forage 10 cm plus bas ou plus haut (Fig. 4) pour vérifier les résultats par dimensionnement redondant.



Fig. 2 Capteur d'allongement à côté de la lame de scie à diamant

La redondance résultante des données de mesure permet une quantification de la qualité des données, p.ex. sous forme d'un coefficient de corrélation. Cette possibilité du contrôle interne des données de mesure s'est produit comme extrêmement avantageuse en exécutant et interprétant les essais d'entaille de forage. Si p.ex. la consistance interne des résultats de mesure se présente insuffisamment basse pendant l'exécution de l'essai, on peut directement scier des entailles additionnelles jusqu'à ce qu'une tendance suffisamment constante se produit.



Pour l'évaluation la zone d'essai est supposée comme linéaire élastique, homogène et isotrope. A l'aide du modèle de disque perforé l'état de contrainte primaire est recalculé avec les équations de KIRSCH de la décharge de l'état de contrainte secondaire pendant l'entaillage dans le forage. Comme valeurs d'entrée le coefficient d'élasticité et la constante de Poisson doivent être déterminés par des tests de pression unidimensionnels aux carottes prises du forage.

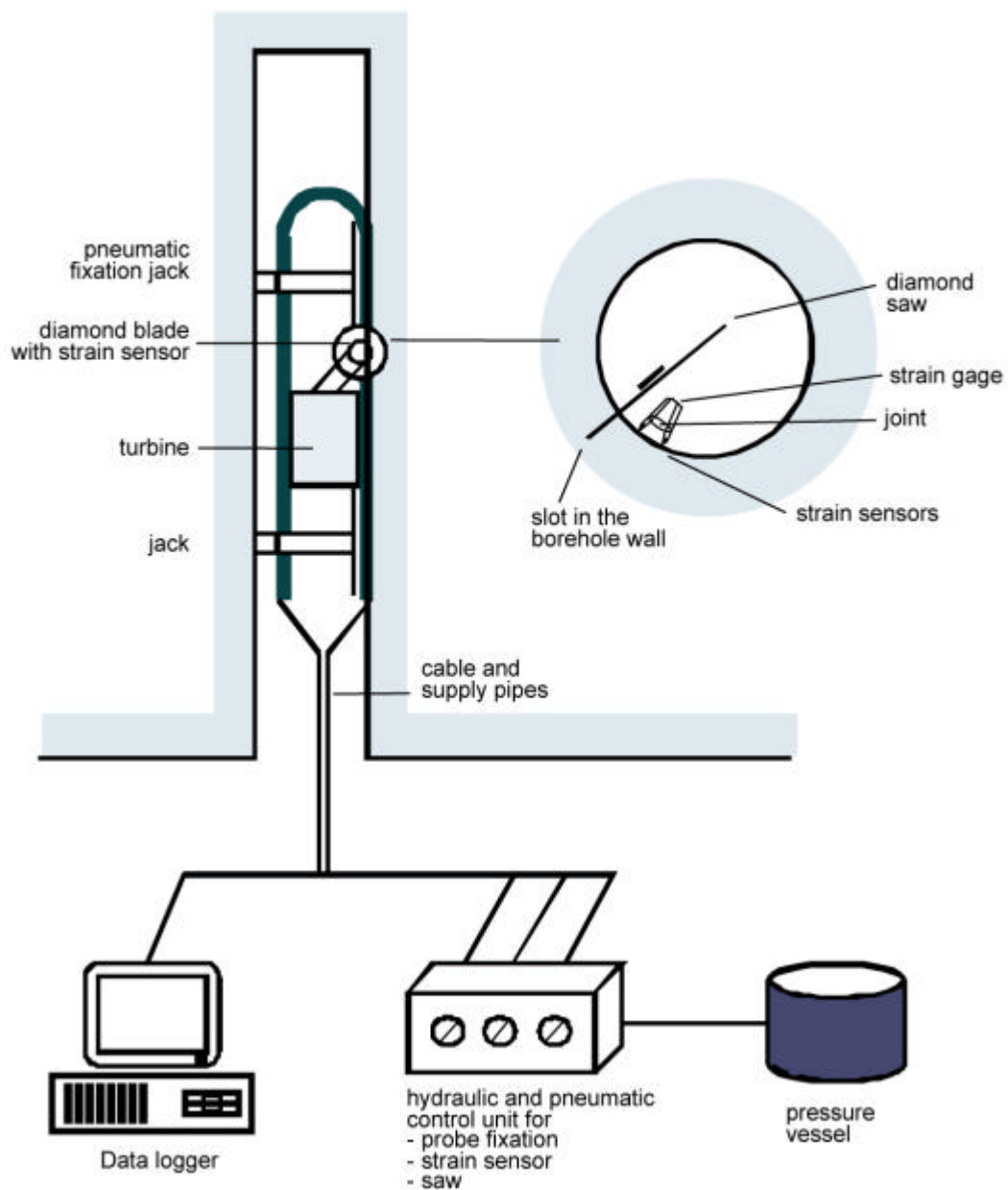


Fig. 3 Schéma d'un équipement d'entaillage (Borehole Slotter)



La précision de la mesure de contraintes primaires avec la sonde d'entaille dépend du coefficient de roche et de la sensibilité du capteur d'allongement. Pour une roche d'un coefficient d'élasticité de 40 GPa la précision est env. +/- 0,5 Mpa, la résolution du capteur est env. 1 microstrain.

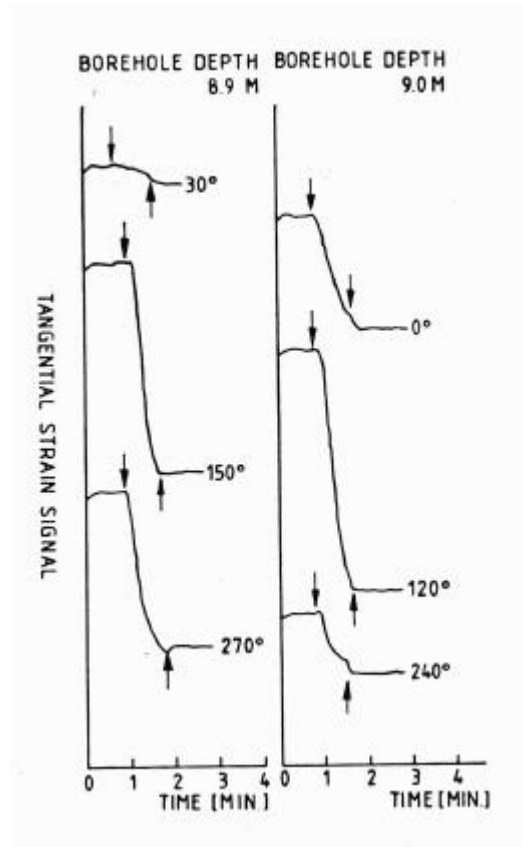


Fig. 4 Diagramme temps – allongement de 6 tests d'entaille, ensemble résultant dans une seule mesure de contraintes à deux dimensions redondante

Pour déterminer l'état de contrainte à trois dimensions dans la roche, la procédure doit être exécutée dans trois forages aux azimuts et aux angles d'incidence différents. Les directions et les inclinaisons des forages qui doivent être si proche que possible sont à mesurer exactement, car ces valeurs entrent dans le calcul du tenseur de contrainte.

Comme forages des carottages sont nécessaires car le coefficient d'élasticité et la constante de Poisson de la roche doivent être déterminés par essais de laboratoire à chaque point de mesure pour évaluer l'état de contrainte.





## Caractéristiques Techniques

### Conditions d'application

- L'exploration des forages géologiques est possible jusqu'à une profondeur maximale de 30 m.
- La méthode n'est pas applicable sous l'eau; il est donc recommandé que les forages sont orientés légèrement vers le haut ou vertical. Une orientation typique des forages pour déterminer l'état de contrainte à trois dimensions serait:  
 Forage 1: Sous-horizontale, env. 5° vers le haut (rectangulaire au forage 2 si possible)  
 Forage 2: Sous-horizontale, env. 5° vers le haut (rectangulaire au forage 1 si possible)  
 Forage 3: Vertical vers le haut
- Diamètre de forage des carottages: 96 – 103 mm. Le forage doit être foré avec une couronne de fleuret à diamant.
- En mesurant en bas d'un tunnel ou d'une galerie les mesures doivent seulement être exécutées à partir d'une profondeur de 1.5– 2 fois du diamètre de la cavité.
- Le forage doit être toujours au minimum 1m plus profond que la plus grande profondeur de mesure désirée.
- Le plan de travail devant le forage doit être au moins 2 x 2 m à cause des tiges de poussée.

### Dimensions

Sonde d'entaille (Borehole Slotter)	L = 1300 mm, dia = 90 mm
Tiges de poussée	LxIxH 1500x20x20 mm
Dispositif de commande hydraulique / pneumatique	LxIxH 660x390x650

### Poids

Sonde d'entaille (Borehole Slotter)	13,5 kg
Tiges de poussée	1,0 kg / coup
Dispositif de commande hydraulique / pneumatique	28,0 kg