

mesures de contrainte dans la vallée d'Aspe

par

F. Buyle-Bodin*,
F.J. Bonnechère** et F.H. Cornet*

Introduction

Depuis quelques années un certain nombre d'études géophysiques (Cisternas et al. 1978, Gagnepain et al. 1981, Lesage 1981) sont menées conjointement pour essayer de mieux comprendre la sismicité ressentie sur un secteur des Pyrénées Atlantiques. Dans ce contexte une campagne d'étude des contraintes régionales affectant les terrains de cette région a été entreprise; elle procède successivement à différentes échelles :

- obtention de mesures ponctuelles (c'est-à-dire affectant un volume variant de quelques cm^3 à quelques m^3 suivant la technique de mesure utilisée).
- interprétation de ces résultats en termes de contraintes locales (c'est-à-dire concernant un volume de quelques milliers de m^3).
- regroupement des contraintes locales dans un modèle représentant un volume de l'ordre de $10\,000 \text{ km}^3$. Le présent exposé est uniquement centré sur les deux premiers points de ce travail.

De nombreuses méthodes de mesures ont été décrites précédemment dans la littérature (par exemple Lee-man 1968, Fairhurst 1968, Rocha et al. 1974, Kovari 1977); parmi celles-ci les techniques basées sur la théorie des inclusions souples permettent une détermination complète du tenseur des contraintes à partir d'un seul forage. En outre, quel que soit la méthode utilisée, une étude systématique de la dispersion des résultats est indispensable (voir par exemple Gray et Toews 1968, White et al. 1978, Paquin et al. 1978), car la part des erreurs qui provient de la méthode de mesure doit être séparée de celle qui est due à l'hétérogénéité du matériau. La cellule « université de Liège » (Bonnechère 1969), qui permet la détermination du tenseur complet des contraintes à partir d'une seule opération de surcarottage, est bien adaptée à la détermination des erreurs causées par l'opération de mesure proprement dite ainsi qu'à l'analyse de la dispersion des résultats causés par l'hétérogénéité du terrain. Elle a été adoptée pour l'étude exposée ci-après.

Seront abordés successivement :

- la description de la méthode de mesure,
- la méthode de dépouillement des résultats utilisée pour déterminer les contraintes locales,
- les résultats obtenus dans le tunnel du Somport et dans une fenêtre de la galerie d'amenée de la centrale hydroélectrique d'Asaspe (Vallée d'Aspe, au Sud d'Oloron Ste Marie).

1 Méthode de mesure

Cette méthode a déjà été décrite (Bonnechère et Cornet 1977, Buyle-Bodin 1980) et ne sera que brièvement rappelée ici.

1.1 Principe

Considérons un matériau homogène, continu, isotrope et linéairement élastique, soumis à un état de contrainte donné à l'infini. Si dans ce matériau un cylindre infiniment long est foré, les champs de contraintes et de déplacements liés à ce cylindre sont bien connus (voir par exemple Hiramatsu et Oka 1968).

En coordonnées cylindriques (voir fig. 1) les contraintes sont données par :

$$\sigma_{rr} = \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right) \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \left(1 - 4 \frac{r^2}{\rho^2} + 3 \frac{r^4}{\rho^4}\right) \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cos 2\theta + \sigma_{12} \sin 2\theta}{2}$$
$$\sigma_{\theta\theta} = \left(1 + \frac{r^2}{\rho^2}\right) \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \left(1 + 3 \frac{r^4}{\rho^4}\right) \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cos 2\theta + \sigma_{12} \sin 2\theta}{2}$$

* Institut de Physique du Globe - Université PARIS VI

** Institut du Génie Civil - Université de Liège

$$(1) \quad \sigma_{zz} = \sigma_{33} - 4\nu \frac{r^2}{\rho^2} \left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos 2\theta + \sigma_{12} \sin 2\theta \right)$$

$$\sigma_{\theta z} = \left(1 + \frac{r^2}{\rho^2} \right) (\sigma_{23} \cos \theta - \sigma_{31} \sin \theta)$$

$$\sigma_{z\rho} = \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2} \right) (\sigma_{31} \cos \theta + \sigma_{23} \sin \theta)$$

$$\sigma_{\rho\rho} = \left(1 + 2\frac{r^2}{\rho^2} - 3\frac{r^4}{\rho^4} \right) \left(\frac{\sigma_{22} - \sigma_{11}}{2} \sin 2\theta + \sigma_{12} \cos 2\theta \right)$$

et les déplacements par :

$$u_\rho = \frac{1+\nu}{E} \left(\frac{1-\nu}{1+\rho} \rho + \frac{r^2}{\rho} \right) \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} - \frac{\nu}{E} \rho \sigma_{33} + \frac{1+\nu}{E} \left(\rho + 4(1-\nu) \frac{r^2}{\rho} - \frac{r^4}{\rho^3} \right) \left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \cos 2\theta + \sigma_{12} \sin 2\theta \right)$$

$$(2)^* \quad u_\theta = \frac{1+\nu}{E} \left(\rho + 2(1-2\nu) \frac{r^2}{\rho} + \frac{r^4}{\rho^3} \right) \left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} \sin 2\theta + \sigma_{12} \cos 2\theta \right)$$

$$u_z = \frac{2(1+\nu)}{E} \left(\rho + \frac{r^2}{\rho} \right) (\sigma_{31} \cos \theta + \sigma_{23} \sin \theta) - \frac{2\nu}{E} z \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22}}{2} + \frac{z}{E} \sigma_{33}$$

où

- E et ν sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau;
- ρ, θ, z sont les coordonnées du point considéré;
- $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots$ sont les composantes du tenseur des contraintes à l'infini exprimées en coordonnées cartésiennes (voir fig. 1).
- r est le rayon du forage.

Dans le cas de matériaux anisotropes la solution a également été calculée (Fairhurst 1968). Toutefois elle n'a pas été utilisée ici, les matériaux rencontrés sur le terrain s'étant avérés isotropes (l'anisotropie, si elle existe, est inférieure aux 5 % de précision des mesures de module).

La méthode de mesure consiste :

- à forer un premier cylindre ($2R = 76$ mm) qui a pour conséquence de générer une concentration de contrainte locale;
- à insérer un appareil de mesure détectant les déplacements tant radiaux que longitudinaux (\varnothing de la cellule 76 mm, longueur totale 44 cm);
- à effectuer un surcarottage de la cellule en place (forage de diamètre plus grand (158 mm) que celui du premier forage et coaxial à celui-ci) afin de relâcher complètement les contraintes autour de la cellule.

La mesure des déplacements liés au relâchement total des efforts permet de calculer l'état de contrainte préexistant dans la roche avant le premier forage. On suppose donc que ce champ de contrainte reste uniforme pour des volumes de roches environ égaux à 15 dm^3 (la concentration de contraintes autour du forage reste sensible pour $\rho \leq 4r$).

1.2 La cellule « Université de Liège »

Cette cellule (Bonnehère 1969) permet de mesurer quatre déplacements diamétraux (RO-RO', R45-R'45, R90-R'90, R135-R'135, disposés à 45° les uns des autres) et six déplacements longitudinaux (L1 à L6) disposés dans deux plans perpendiculaires (voir fig. 2).

* Convention de signe : les tractions sont positives et donc les extensions aussi.

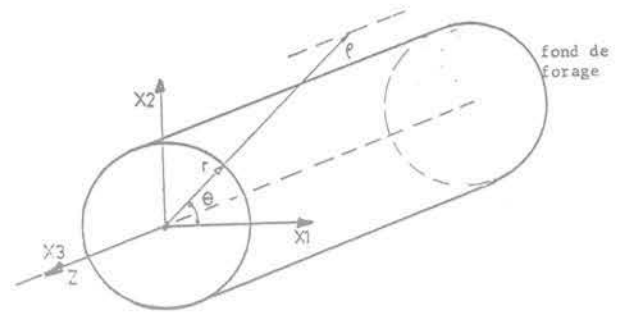
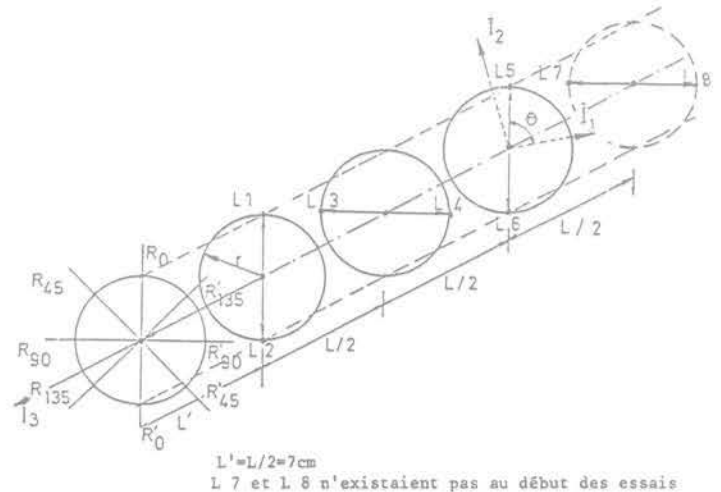


Fig. 1 Repères cartésien et cylindrique



L' = L/2 = 7 cm
L 7 et L 8 n'existaient pas au début des essais

Fig. 2 Disposition des points de mesure

Les palpeurs sont maintenus en contact avec la roche par une pression d'azote égale à 12 bars ce qui assure une parfaite souplesse à l'instrument (les contraintes imposées par la raideur de la cellule et qui s'opposent aux déplacements générés par le surcarottage restent négligeables). Un câble de 22 conducteurs, disposés autour d'un tuyau central pour l'alimentation en gaz, fabriqué spécialement pour ces essais, est utilisé pour mesurer de façon continue les déplacements durant l'opération de surcarottage et contrôler la pression appliquée sur les palpeurs.

1.3 Mode opératoire

Un premier forage carotté ($\varnothing 76$ mm) est effectué afin d'identifier les zones de roche saine (3 à 4 m de longueur). L'étude détaillée des carottes permet de déterminer les zones fissurées. Seules sont retenues pour les mesures les zones non fracturées dans lesquelles des carottes intactes d'au moins 40 cm de long peuvent être prélevées. Lorsqu'une zone s'avère satisfaisante, un forage de gros diamètre est réalisé jusqu'aux abords de cette zone. La cellule est mise en place, sa position soigneusement relevée, et le câble de mesure, passé à travers les tiges et la tête d'injection de la carotteuse, est connecté aux appareils enregistreurs. Le surcarottage est alors effectué avec un carottier simple; un matériel spécial (burin, pelles, etc.) du être mis au point pour le prélèvement de la carotte de gros diamètre. Lorsque la zone de roche saine est suffisamment grande, un deuxième surcarottage peut

être immédiatement effectué ce qui simplifie les manœuvres de mise en place de la cellule et permet un gain de temps sérieux. Pour les forages de plus de quatre mètres il est indispensable d'utiliser des guides pour assurer d'une part le soutien des tiges, d'autre part une coaxialité satisfaisante des deux forages. En effectuant des mesures de 2 à 5 m de profondeur, une quinzaine de surcarottages peuvent être réalisés en 10 jours (y compris le temps d'installation de la carotteuse). Pour les mesures plus profondes la procédure est un peu plus longue du fait de la légèreté de la foreuse utilisée (180 kg) : seules des passées de 55 cm peuvent être forées. Une amélioration de la technique de forage, a permis néanmoins avec le même matériel de réaliser des mesures à 10 m sans difficulté (Buyle-Bodin 1980).

2 Méthode d'interprétation des mesures

2.1 Détermination des déplacements

La cellule est équipée de capteurs assurant une relation qui peut être considérée linéaire entre déplacements et différences de potentiel (1 mV/ μm pour les déplacements longitudinaux mesurés au moyen de capteurs à variation d'induction, 0,4 $\mu\text{V}/\mu\text{m}$ pour les déplacements diamétraux mesurés au moyen de jauges de déformation montées en pont complet, ce qui élimine les problèmes de stabilité thermique).

La forme théorique des courbes déplacement-avancement du surcarottage peut être établie au moyen d'une méthode numérique (éléments finis par exemple : Blackwood 1978, voir figure 3); elle permet d'apprécier la qualité des mesures effectuées (par comparaison avec les mesures continues obtenues sur le terrain). En particulier les courbes doivent débiter par un palier horizontal et se terminer par un palier horizontal (preuve de stabilité électrique, de relaxation complète des contraintes, et d'un comportement élastique); la différence entre les deux paliers fournit évidemment la lecture recherchée. Ceci implique que les longueurs surcarottées avant le premier capteur et après le dernier point de mesure soient suffisamment grandes pour bien identifier ces paliers. Il importe donc de bien contrôler l'enfoncement de la cellule dans le forage de petit diamètre avant le début du surcarottage.

Toutefois il est fréquent qu'une ou plusieurs mesures de déplacement ne satisfassent pas à ces critères de qualité. Par exemple, un saut peut apparaître simultanément sur tous les capteurs, il est alors aisé de diagnostiquer un mouvement d'ensemble de la cellule et d'effectuer les corrections nécessaires (accident relativement rare sauf en fin de surcarottage). La non conformité entre courbe théorique et courbe observée pour un ou deux capteurs est souvent plus délicate à interpréter (fissure locale, hétérogénéité de la roche). Nous avons ainsi été amenés à affecter une note à chaque mesure de déplacement. Chaque note résulte de la somme de trois nombres, le premier, de 0 à 4, caractérise la stabilité initiale, le second de 0 à 2 caractérise la bonne conformité aux courbes théoriques des courbes de relâchement observées, le troisième, de 0 à 4, caractérise la stabilité finale (c'est-à-dire avant et après relâchement des contraintes). Ces notes bien que subjectives, permettent d'effectuer un premier classement des résultats prenant en compte la qualité des mesures : aucune courbe ayant obtenu une note inférieure à 5 ne peut être retenue. Cette appréciation, qualitative et graduelle, permet de sélectionner les mesures de déplacement retenues

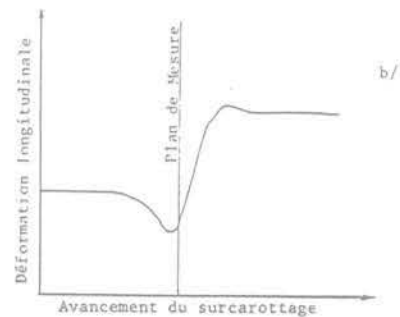
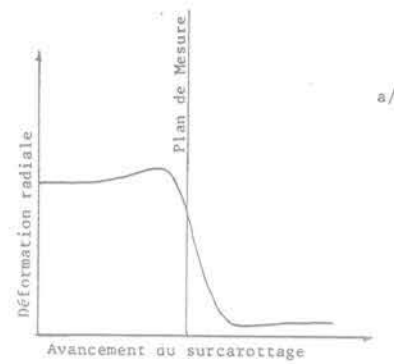


Fig. 3 Etude par éléments finis de la déformation d'un forage causée par un surcarottage (d'après Blackwood, 1978)

- a) déformations radiales
- b) déformations longitudinales

pour calculer les contraintes, de déterminer le type de dépouillement le mieux approprié pour ce calcul (cf. paragraphe ci-après), d'apprécier la qualité de l'opération de surcarottage.

2.2 Calcul des contraintes

Les relations (2) permettent de déterminer complètement le tenseur des contraintes à partir de 6 mesures de déplacement (3 diamétraux et 3 longitudinaux) effectuées en des points disposés correctement :

$$\begin{aligned}
 \sigma_{11} &= -\frac{E}{8r(1-\nu^2)} \left(3u_r^0 + u_r^{90} + 4\nu r \frac{\Delta u_z}{L} \right) \\
 \sigma_{22} &= -\frac{E}{8r(1-\nu^2)} \left(u_r^0 + 3u_r^{90} + 4\nu r \frac{\Delta u_z}{L} \right) \\
 (3)^* \quad \sigma_{33} &= -\frac{E}{2(1-\nu^2)r} \left(\nu u_r^0 + \nu u_r^{90} + 2r \frac{\Delta u_z}{L} \right) \\
 \sigma_{12} &= -\frac{E}{8(1-\nu^2)r} \left(-u_r^0 + 2u_r^{45} - u_r^{90} \right) \\
 \sigma_{23} &= \frac{E}{8(1+\nu)r} \left(u_z^{90} - u_z^{270} \right) \\
 \sigma_{31} &= \frac{E}{8(1+\nu)r} \left(u_z^0 - u_z^{180} \right)
 \end{aligned}$$

* Dans ce système d'équations quatre mesures longitudinales interviennent car seules les différences deux à deux de ces mesures sont utilisées.

où u_r^0 est la valeur du déplacement radial pour la génératrice θ (exprimée en degrés) et Δu_z est le déplacement longitudinal mesuré entre deux points situés sur une même génératrice et distants l'un de l'autre de L (voir fig. 2). ($\Delta u_z = U_z^0 - U_z^0$, U_z^0 est mesuré en L1, U_z^{90} est mesuré en L2, U_z^{90} est mesuré en L3, etc.).

La cellule pouvant fournir dans les meilleures conditions de surcarottage, 10 valeurs de déplacement, des redondances existent qui permettent d'apprécier les erreurs de mesure.

Deux méthodes de résolution ont été appliquées :

- la première utilise les redondances comme moyen de vérification du bon déroulement du surcarottage et non comme génératrices d'équations supplémentaires. Un système de 6 équations à 6 inconnues est ainsi obtenu et résolu algébriquement (équation 3);
- la deuxième méthode traite chaque mesure de déplacement comme une donnée indépendante; le système d'équation, qui peut alors être surabondant, est résolu par moindres carrés, ce qui permet une appréciation quantitative de la précision de la mesure.

On est amené à créer un système d'équations qui peut se représenter, dans le cas le plus général, sous la forme d'un produit de matrices :

$$[A] \cdot [B] \cdot [C] \{X\} = \{E\} \quad (4)$$

où $\{E\}$ est un vecteur dont les composantes sont les mesures de déplacements sélectionnées exprimées dans un repère lié à la cellule;

$\{X\}$ est un vecteur dont les composantes sont celles du tenseur des contraintes défini dans le repère géographique;

[A] correspond aux relations contraintes-déplacements exprimées dans un repère lié à la cellule. Cette matrice est obtenue pour les déplacements diamétraux à partir des équations (2), pour les déplacements longitudinaux, soit à partir des différences 2 à 2 de ces équations de façon à éliminer les mouvements rigides de la cellule qui ont pu se produire durant le surcarottage, soit simplement à partir des équations (2);

[B] correspond au changement de repère qui permet de passer du repère géographique dans lequel σ est défini, au repère lié à la cellule;

[C] correspond à l'influence de la cavité (galerie ou tunnel), dans laquelle les mesures sont effectuées, sur la distribution des contraintes locales. Cette matrice peut être calculée dans certains cas simples (galeries circulaires, élasticité linéaire par exemple).

Théoriquement, la résolution du système (4) permet de déterminer le tenseur des contraintes locales à partir de mesures de déplacements effectuées à diverses profondeurs et à partir de forages orientés dans des directions variées. Pratiquement, la matrice (C) n'est que rarement déterminable et l'on ne traite que des déplacements mesurés en des points situés sur une même parallèle à l'axe du tunnel. Dans le cas des galeries de faible section, la technique de forage actuelle permet d'atteindre des zones non perturbées par la galerie, ce qui fournit donc une détermination directe de la contrainte locale.

(1) 8 mesures de déplacement radial et 7 mesures de déplacement longitudinal.

(2) brèche volcanique métamorphisée.

La première méthode de dépouillement est utilisée sur le terrain pour diriger au mieux la campagne de mesure. La deuxième nécessite l'utilisation d'un ordinateur. Elle permet en particulier de retenir toutes les mesures satisfaisantes (note supérieure à 5), et seulement celles-ci, sans avoir à entacher le résultat final des erreurs de manipulation. Ceci n'est évidemment pas le cas avec la première méthode puisqu'un minimum de 6 mesures est nécessaire pour effectuer une détermination complète à partir d'un seul surcarottage.

La prise en compte de l'hétérogénéité du matériau est discutée ci-après dans le cadre de l'exposé des résultats.

3 Résultats

Une première étude (25 surcarottages) a été effectuée dans le tunnel de chemin de fer du Somport (de longueur 7,8 km, de section en fer à cheval et de hauteur 6 m). En particulier, 3 forages établis dans trois directions différentes, de longueur variant de 7 à 8 m ont permis 10 surcarottages à 2,6 km de l'entrée du tunnel et sous 220 m de recouvrement. La roche rencontrée était un calcaire dolomitique carbonifère fortement tectonisé (module d'Young 24000 MPa, coefficient de Poisson 0,21). Une deuxième étude (15 surcarottages) a été entreprise dans la fenêtre d'Électricité de France à Bedous (de longueur 220 m, de section en fer à cheval et de hauteur 2,50 m), creusée dans un calcaire jurassique (module d'Young 9000 MPa coefficient de Poisson 0,20) au pied d'une structure anticlinale qui dominait l'entrée de la galerie (située au fond de la vallée) de plus de 1000 m avec une pente de 100 %. Sur ces 40 surcarottages, une dizaine a dû être rejetée pour cause d'incidents en cours de mesure (bris de carotte, panne d'appareillage de mesure). Les 300 mesures de déplacement restantes ont été soumises à l'analyse précédemment décrite. Si un certain nombre a pu être retenu (notes supérieures à 5, voir figure 4) certains défauts ont été néanmoins retrouvés fréquemment :

- stabilité initiale manquante,
- évolution saccadée en cours de relaxation des contraintes,
- stabilité finale manquante,
- absence complète de déplacement.

Finalement 80 mesures de déplacement ont été retenues pour le tunnel du Somport et 70 pour la galerie de Bedous.

Ces résultats sont en nombre suffisant pour permettre théoriquement une détermination de l'état de contrainte local.

Une grande dispersion étant encore observée sur les mesures sélectionnées pour cette détermination, il est apparu utile d'établir des critères permettant d'éliminer les mesures incohérentes du fait de l'hétérogénéité du terrain. (nombreuses fractures ou failles). Pour ce faire, la forme de la section transversale des forages après relâchement des contraintes est déterminée d'après les mesures de déplacements diamétraux sur la base de la théorie de l'élasticité linéaire pour chaque opération de surcarottage. Pour un matériau homogène les grands axes des courbes ainsi obtenues pour des surcarottages effectués dans un même forage doivent se superposer. Si aucune courbe ne permet cette superposition on en déduit que l'hétérogénéité du terrain est telle que les mesures ne sont pas significatives. Si seules une ou deux courbes n'obéis-

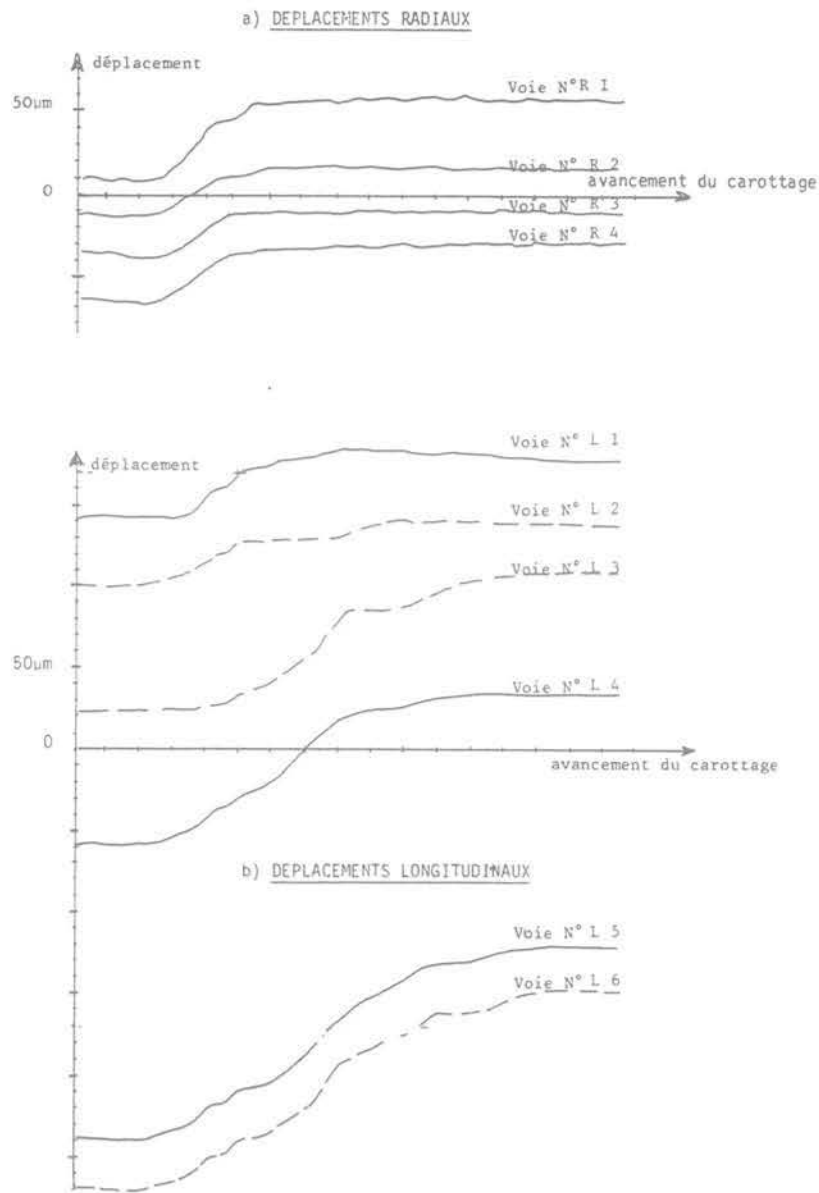


Fig. 4 Exemple de courbes de déplacement obtenues in situ (notes variant de 8 à 10)

sent pas à cette superposition, le surcarottage correspondant est écarté car supposé affecté par une hétérogénéité locale.

De plus, une fois l'état de contrainte déterminé par la méthode globale proposée en 2.2, ce résultat est utilisé pour calculer les déplacements diamétraux théoriques correspondants. Par comparaison avec les courbes précédentes (déduites directement des mesures) une certaine appréciation de l'homogénéité des résultats peut alors être obtenue.

Il est ainsi apparu que dans le tunnel du Somport, seuls quatre surcarottages étaient homogènes entre eux, les autres, trop rapprochés de la paroi libre, ayant été probablement effectués dans la zone dite plastique (mécanique de blocs). De ces quatre surcarottages seuls deux étaient à la même distance de la paroi libre (5 m) et il n'a donc pas été possible d'effectuer une détermination des contraintes locales satisfaisante. Il apparaît que des mesures plus profondes sont nécessaires pour ce tunnel.

Dans la galerie de Bedous, une plus grande cohérence a été observée (voir fig. 5); (3 surcarottages à peu près homogènes fournissent 15 mesures de déplacement (1) ayant des notes supérieures à 5). Le résultat obtenu donne :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2,9 \text{ MPa} \pm 0,8; & \theta_A &= \text{N}277^\circ\text{E} & \theta_p &= +51^\circ \\ \sigma_2 &= 2,3 \text{ MPa} \pm 0,7; & \theta_A &= \text{N}07^\circ\text{E} & \theta_p &= 0^\circ \\ \sigma_3 &= 1,4 \text{ MPa} \pm 0,4; & \theta_A &= \text{N}76^\circ\text{E} & \theta_p &= -39^\circ \end{aligned}$$

(θ_A = azimuth, θ_p = angle avec l'horizontale; les angles sont déterminés à $\pm 15^\circ$).

Les directions observées pour σ_1 et σ_3 correspondent aux directions que l'on attend au pied d'une pente (σ_3 est perpendiculaire à la surface libre, σ_1 lui est à peu près parallèle).

A la suite de ces essais, un certain nombre d'améliorations ont été apportées à la technique de mesure :

- adjonction de deux capteurs pour la mesure des déplacements diamétraux afin d'assurer une parfaite symétrie à la cellule;

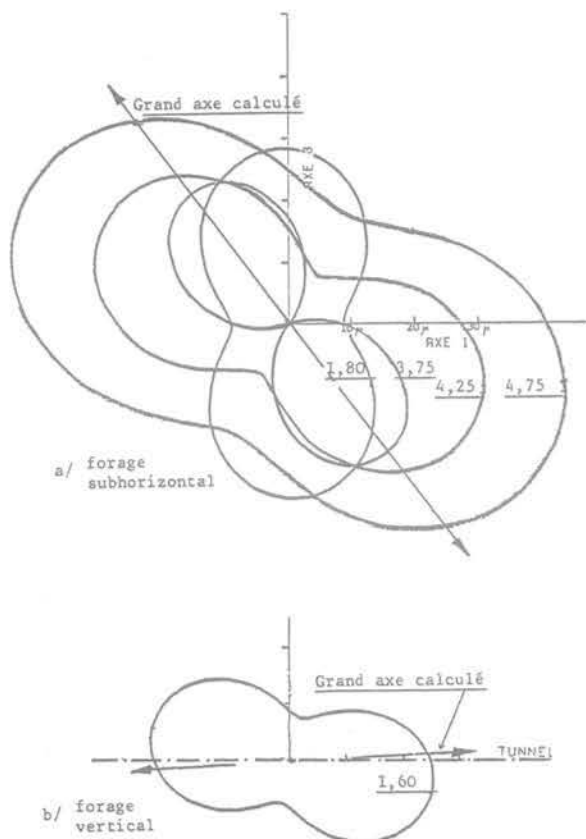


Fig. 5 Résultats obtenus dans la galerie de Bedous (diamètre : 2,50 m)

- a) «déformée» d'un forage, subhorizontal et perpendiculaire à l'axe de la galerie, établie par des mesures à 1,80 m, 3,75 m, 4,25 m et 4,75 m de la paroi
 b) «déformée» d'un forage, établie d'après une mesure à 1,60 m

La direction du grand axe obtenue pour la déformée de chacun des forages à partir de l'état de contrainte moyen calculé par la méthode globale est indiquée. On appelle «déformée» la section transverse des forages après relâchement des contraintes.

- utilisation de guides de nylon pour les forages de plus de 5 m;
- adaptation de la méthode de forage pour les mesures verticales;
- enregistrement automatique des données sur bandes magnétiques pour faciliter le traitement sur le terrain.

L'efficacité technologique de ces améliorations a pu être testée lors d'essais dans une galerie située dans les Vosges (Tunnel d'Urbes). Malheureusement pour ce site, le grand diamètre de la galerie (10 m) et l'hétérogénéité du matériau (2) ne nous ont pas permis, du fait de la trop courte période d'essais (3 semaines), d'obtenir suffisamment de résultats pour déterminer le tenseur complet des contraintes. Cinq surcarottages ont pu être effectués dans des conditions apparemment satisfaisantes en ce qui concerne l'homogénéité de la roche. Toutefois la présence de microfissure très locales n'a pas permis de mesures de déplacements longitudinaux en nombre suffisant :

Pour être assurées de succès les campagnes de mesure doivent probablement durer 5 à 6 semaines et nécessitent la présence d'au moins trois personnes (deux pour les opérations de mise en place de la cellule et de forage, une pour l'acquisition des données).

Conclusion

Cette méthode paraît maintenant pouvoir être utilisée pour la détermination de l'état de contrainte local à partir de cavités souterraines de faibles diamètres (la petite sondeuse utilisée n'est pas adaptée aux forages de plus de 15 m de profondeur).

L'enregistrement continu des déplacements permet d'éliminer les mesures entachées d'erreurs techniques. L'abondante redondance des mesures satisfaisantes du point de vue mécanique assure une estimation de la dispersion des résultats (de 20 à 30 équations pour 6 inconnues). Lorsque cette dispersion est très grande elle peut être attribuée avec certitude à l'hétérogénéité ou à la discontinuité du matériau géologique traité et donc permettre de préciser les hypothèses rhéologiques nécessaires à une modélisation mécanique ultérieure du massif considéré. La bonne cohérence des résultats obtenus dans la galerie de Bedous démontre la valeur de cette méthode de détermination des contraintes locales; dans le cas du tunnel du Somport il est clairement apparu que les mesures effectuées à moins de 5 m de la paroi libre n'avaient aucun sens du fait de l'abondante fracturation du matériau. Ce résultat présente au moins l'intérêt de fournir une estimation de l'étendue de la zone non élastique autour de ce tunnel percé il y a plus de cinquante ans.

Remerciements

M. Houten (Laboratoire du Génie Civil de l'Université de Liège) a participé très efficacement à l'obtention des mesures sur le terrain, qu'il en soit vivement remercié. Nous remercions également la S. N. C. F. et E. D. F. pour nous avoir donné l'autorisation de travailler dans leurs galeries de la Vallée d'Aspe. Ce travail a été financé par l'Institut National d'Astronomie et de Géophysique, action risque sismique. Durant la réalisation de ce travail, M. Buyle-Bodin était boursier B. R. G. M.

Références bibliographiques

- BLACKWOOD R.L. 1978 «Diagnostic stress relief curves in stress measurements by overcoring»; Int. Jou. Rock. Mech. Min. Sc.; vol. 15, n° 4, p. 205.
- BONNECHERE F.-J. 1969 «La cellule "Université de Liège" de mesure des déformations d'un forage»; Symp. Int. Détermination des contraintes dans les massifs rocheux; Lisbonne.
- BONNECHERE F.-J. et CORNET F.H. 1977 «In situ stress measurements with a borehole deformation cell». Field Measurements in Rock Mechanics; Int. Symp. in Rock Mech.; Zürich; Kovari éditeur.
- BUYLE-BODIN F. 1980 «Mesures des contraintes in-situ dans les massifs rocheux»; Thèse Ingénieur-Docteur Univ. Paris VI; Rapport méthodologique B. R. G. M. n° 81 SGN 254 GEG.

CISTERNAS A., GAGNEPAIN J. et RUEGG J.-C. 1978 « Étude de la microsismicité et surveillance sismique de la région d'Arette »; 5th European Geophys. Soc. Meeting; Strasbourg.

FAIRHURST C. 1968 « Methods of determining in situ rock stresses at great depths »; Technical report n° 1-68; Missouri River Division, Corps of Engineers Omaha, Nebraska.

GAGNEPAIN J., CISTERNAS A., J.-C. RUEGG, VADEL M., MODIANO T., HATZFELD D., MEZCUO J. 1981 « Sismicité de la région d'Arette (Pyrénées Atlantiques) et Mécanismes au foyer »; à paraître dans Annales de Géophysique.

GRAY W.M. and TOEWS M.A. 1968 « Analysis of accuracy in the determination of the ground stress tensor by means of borehole devices » 9th U.S. Symp. on Rock Mech., Golden Colorado; p. 45.

HIRAMATSU Y. and OKA Y. 1968 « Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations. » Int. jour. of rock Mech. vol. 5, July 68.

KOVARI K. 1977 « Field Measurements in Rock Mech. »; Int. Symp. Zürich; Balkema.

LEEMAN E.R. 1968 « The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole. Laboratory and underground measurements »; Int. Jou. Rock Mech. Min. Sc., vol. 5, pp. 31-51.

LESAGE P. 1981 « Développement de méthodes en vue de l'étude des déformations sismo-tectoniques du sous-sol »; Thèse 3^e Cycle; Univ. Paris VI.

ROCHA M., SILVERIO A., PEDRO J.O. and DELGADO J.S. 1974 « A new development in the L. N. E. C. Stress tensor Gauge »; Proc. Third Int. Soc. Rock Mech. Congress, Denver, pp. 464-467.

PAQUIN C., FROIDEVEAUX C. et SOURIAU M. 1978 « Mesures des contraintes tectoniques en France septentrionale »; Bull. Soc. Géol. France; tome XX, n° 5.

WHITE J.M., HOSKINS E.R., NISSEN T.J. 1978 « Primary stress measurements at Eisenhower Memorial Tunnel, Colorado »; Int. Jou. Rock Mech. Min. Sc., vol. 15, n° 4, p. 179.

