

Les contraintes mécaniques dans le sondage GPF d'Échassières (Allier) : leur détermination par fracturation hydraulique

B. Feuga*

Mots-clés : Fracturation hydraulique, Contrainte, Granite, Sondage Allier (Échassières).

Résumé

Les mesures de contraintes par fracturation hydraulique réalisées jusqu'à 650 m de profondeur dans le sondage d'Échassières mettent en évidence une influence marquée de la topographie jusqu'à une profondeur de l'ordre de 350 m. Dans cette tranche de terrain, la direction de la contrainte majeure est N 120-130°E, et les contraintes horizontales sont peu élevées. En dessous de 400 m, la contrainte horizontale majeure prend une direction N 150-170°E, qui est la direction moyenne qui prévaut en profondeur sur l'ensemble du territoire métropolitain en dehors de l'arc alpin. Par ailleurs, si la contrainte horizontale mineure reste faible et inférieure au poids des terrains, la contrainte majeure en dessous de 400 m serait nettement supérieure à celui-ci, dans un rapport de l'ordre de 1,50.

Abstract

Rock stress measurements from hydraulic tests in the « GPF » borehole at Echassieres

Hydraulic-fracturing stress measurements carried out from 100 m to 650 m depth in the Echassieres borehole show that down to approximately 350 m, the stresses are clearly influenced by the topography : the strike of the major principal stress in WNW-ESE, and the stresses are low. From 400-650 m, the strike of the major principal stress is NNW-SSE, which is the average strike of the major stress at depth over the French metropolitan territory, with the exception of the Alps ; the minor principal stress is less than the stress due to the weight of the overburden, whereas the major one is higher than this weight, the ratio being approximately 1.5.

Introduction

Une campagne de détermination des contraintes par fracturation hydraulique a été effectuée par le BRGM dans le sondage GPF d'Échassières en mars et avril 1985.

Les caractéristiques de ce sondage, de 900 m de profondeur, et son contexte géologique sont décrits par ailleurs (M. Cuney et A. Autran, ce volume) et ne sont pas repris dans cette note.

Les mesures ont été réalisées avec du matériel appartenant pour l'essentiel à la société allemande MESY-GmbH et avec l'appui de personnel de cette société et de l'Université de la Ruhr (Bochum).

Deux interprétations en ont été proposées, l'une par M. Bouilleau (1986), l'autre par J. Baumgartner (1987).

L'auteur de cette note tente, sous sa seule responsabilité, de présenter une synthèse de ces interprétations.

Il s'est interdit de critiquer les procédures utilisées par les auteurs des solutions sur lesquelles il s'appuie, d'une part parce qu'il est partie prenante dans l'une d'elles, et d'autre part parce qu'une telle critique — certes nécessaire — relève d'un autre débat, en cours parmi les spécialistes d'une technique trop récente pour que des procédures admises par tous, aussi bien du point de vue de la conduite des essais que de leur interprétation, aient été établies.

Le lecteur ne devra donc pas s'étonner des différences existant entre les deux solutions, et devra plutôt s'attacher à leurs similitudes, qui sont nombreuses et qui permettent de brosser un tableau assez précis des contraintes régnant dans les terrains recoupés par le sondage d'Échassières.

* BRGM, BP 6009, 45060 Orléans, Cédex 2

Description de la méthode

L'opération de base de la fracturation hydraulique, ou de la stimulation hydraulique de fractures, appliquées à la mesure des contraintes, consiste à isoler entre deux obturateurs gonflables une passe de sondage, d'une longueur ne dépassant généralement pas 1 m et à y injecter de l'eau sous pression jusqu'à créer une fracture si la passe testée était initialement vierge, ou à ouvrir une fracture préexistante dans le cas contraire. La pression dans la chambre d'injection est enregistrée en continu pendant l'injection, réalisée à débit constant, et après l'arrêt de celle-ci. Il est, en général, procédé à plusieurs cycles d'injection, à débits croissants.

Sur les courbes pression-temps obtenues, on distingue plusieurs pressions caractéristiques, en particulier une pression de fracturation (ou de première ouverture de la fracture), une pression de réouverture (à partir du second cycle) et une pression de fermeture instantanée, après arrêt de l'injection. On montre que ces pressions dépendent d'une part de la valeur des contraintes dans le terrain au niveau considéré et d'autre part de l'orientation de la fracture testée.

La détermination des contraintes à partir des pressions caractéristiques n'est donc possible que si l'on connaît l'orientation des fractures testées. La mesure de celle-ci nécessite une opération supplémentaire qui consiste à descendre dans le forage, à leur hauteur, un obturateur spécial, doté d'un système d'orientation, qui permet de prendre l'empreinte de leur trace sur la paroi du trou. Il est alors possible de calculer direction et pendage des fractures.

Pour la détermination des contraintes à Echassières, deux pressions caractéristiques ont été utilisées : la pression de réouverture qui, pour les fractures verticales et dans l'hypothèse, vérifiée dans ce cas, où le poids des terrains est une des contraintes principales, ne dépend que des contraintes horizontales, c'est-à-dire de trois inconnues (deux modules et un angle) ; et surtout, la pression de fermeture instantanée, que l'on peut assimiler à la contrainte normale au plan de la fracture.

Dans le cas le plus général, le champ de contraintes en un point est caractérisé par six inconnues. Sa détermination, à une profondeur donnée, nécessiterait donc de disposer de six valeurs de pression de fermeture instantanée sur six fractures d'orientations différentes, à la même cote. Ceci est évidemment impossible. C'est pourquoi on réalise en général une série d'essais à des cotes différentes, soit sur des fractures naturelles d'orientations variées choisies d'après l'examen des carottes de forage, soit sur des passes vierges. Le calcul montre que dans ce dernier cas, on crée en général des fractures parallèles à l'axe du forage.

Si celui-ci est vertical, ces fractures s'ouvrent perpendiculairement à la contrainte horizontale mineure, ce qui permet de déterminer directement la direction des contraintes. Le fait que les essais soient réalisés à des profondeurs différentes amène, pour l'interprétation, à formuler une hypothèse quant à la forme des variations de contrainte avec la profondeur. (On suppose en général une variation linéaire). Ceci introduit un certain nombre d'inconnues supplémentaires, et accroît par conséquent le nombre de données nécessaires pour la détermination des contraintes.

Profondeur	Direction		Pendage		P réouv.	P ferm. inst.	
	MB	JB	MB	JB		MB	JB
113,5			66	21- 22		24- 25	
121,2 ^{a, **}	128	121	90	90	30- 45	13	28- <u>34</u>
154,8 ^{a, **}	127	117	90	90	48- 59	15-32	39- 45
^a	298	303	46	77		38	
179,7 ^{a, **}	115	117	90	90	79	42	43- 46
193,3 ^a	167	166	54	53	40- 52	30	39- 42
210,2 ^a	198	192	58	57	41- 75	30	34- 35
236,8 ^a	127	135	70?	78		43-49	
^{a, **}	277	292	70?	76	75- 97	43-49	52- 70
262,5 ^{a, **}		142		90	89- 91		53-54-58
		73		73			
270,9 ^{a, **}	132	123	90	90	63- 64	27-33	44-53-55
^a	92	77	47	54		27-33	
287,3 ^{a, **}	127	121	46	50	67- 71	49	58- <u>63</u>
317,7 ^a	193	192	60	59	42- 75	46	51- 57
344,4 ^{a, **}	110	116	83	84	138-146	51-76	64- 87
^a	97		83			51-76	
374,5 ^a	228	229	39	38	53-101	50	48- 53
417,1 ^{a, **}	159	160	90	90	78-106	80	81-85-89
466,6 ^{a, **}	122	124	90	90	140-164	136	141-149
^a	300	292	55	65		136	
554,9 ^a	164	-	90	-	136-148	117	125-132
592,2 ^{a, **}	163	164	81	81	102-125	88	94- 97
626,7 ^{a, **}	156		73		134-139	130	136-139
^a	137	141	90	81			
649,2 ^{a, **}	152	157	90	90	110-115	> 90	<u>118</u>

Tabl. 1. — Données utilisées pour le calcul des contraintes
Data used for the stress determination

Prof. : profondeur (m)

* : Essai retenu par M. Bouilleau (MB)

** : Essai retenu par Baumgärtner pour le calcul utilisant la pression de fermeture instantanée (JB)

La direction est définie suivant la convention du pendage à main droite (de 0 à 360°, en tournant vers l'Est).

P_{réouv.} : Pression de réouverture. Sont indiquées les valeurs minimale et maximale pour les différents cycles.

P_{ferm. inst.} : Pression de fermeture instantanée. Dans la colonne JB sont indiquées la valeur minimale et la valeur maximale pour les différents cycles. La valeur retenue pour les calculs est soulignée.

En pratique, une vingtaine d'essais suffisent pour une détermination complète des contraintes dans les terrains recoupés par un sondage.

Données brutes issues des mesures

Vingt niveaux différents ont été testés.

Les données de base ayant servi pour le calcul des contraintes figurent dans le tableau 1.

On constate que les données utilisées par Bouilleau et Baumgärtner ne sont pas exactement les mêmes, à différents points de vue :

— les fractures effectivement retenues pour les calculs ne sont pas les mêmes pour les deux auteurs. Seules 12 fractures sont communes aux deux solutions fondées sur la pression de fermeture ;

— les directions et pendages peuvent varier légèrement d'un auteur à l'autre, pour les mêmes fractures. Ceci résulte du fait que les traces relevées sur l'obturateur à empreinte correspondent rarement à une surface parfaitement plane, et que le

calage d'un plan sur ces traces revêt une certaine part d'appréciation personnelle ;

— les pressions de fermeture instantanée retenues par Bouilleau sont nettement plus basses que celles retenues par Baumgärtner. La détermination de cette pression constitue sans doute un des points les plus délicats de la méthode et il existe actuellement plusieurs écoles dont les doctrines diffèrent sur cette question. L'écart observé dans le cas présent en est une illustration.

Comme on pourra le vérifier, il résulte évidemment de cette différence d'appréciation que les valeurs de contraintes déterminées par Baumgärtner sont plus élevées que celles calculées par Bouilleau.

Interprétation des mesures

L'interprétation réalisée repose sur l'hypothèse que l'une des contraintes principales est verticale. Le relief de la zone d'Échassières étant peu accidenté, on peut admettre que cette contrainte correspond à peu de choses près au poids des terrains (de densité moyenne égale à 2,65).

Toutes les fractures verticales testées sont des fractures artificielles. Selon la théorie, leur direction est celle de la con-

trainte horizontale majeure σ_{h0} , et leur pression de fermeture est égale à la contrainte horizontale mineure σ_{h1} .

Sur la figure 1 sont représentées, en fonction de la profondeur, la direction et la pression de fermeture des neuf fractures verticales retenues par Bouilleau dans son interprétation. On constate que jusqu'à 300 m, les directions sont très groupées, entre 115 et 132°, cependant qu'en dessous de 400 m, une plus grande dispersion apparaît (122-164°). Cette observation a amené les deux auteurs à faire l'hypothèse d'une discontinuité des contraintes entre 300 et 400 m et à traiter séparément les données correspondant à la tranche 100-300 m et celles correspondant à la tranche 300-650 m (100-350 m et 400-650 m pour Baumgärtner).

Avant de passer aux résultats des calculs effectués, notons que les pressions de fermeture (assimilées à σ_{h1}) déterminées par Bouilleau pour les fractures verticales s'alignent assez bien (fig. 1) sur une droite d'équation :

$$\sigma_{h1} = 0,25.z - 18$$

(σ_{h1} en bar, z profondeur en mètres)

Cette formule n'est toutefois pas cohérente avec les pressions de fermeture évaluées pour les fractures obliques, et Bouilleau en voit la cause dans une surestimation des pressions de fermeture sur les fractures verticales.

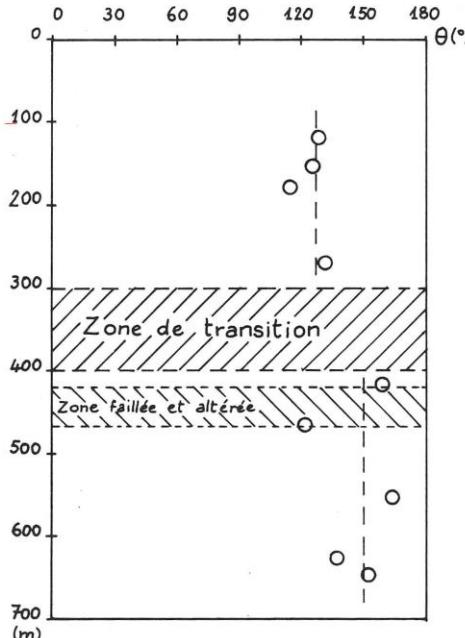


Fig. 1 a. — Direction θ des fractures (artificielles) verticales en fonction de la profondeur. Cette direction peut être assimilée à celle de la contrainte horizontale majeure.

Direction of vertical artificial fractures as a function of depth. This direction can be considered as representative of that of the major principal stress.

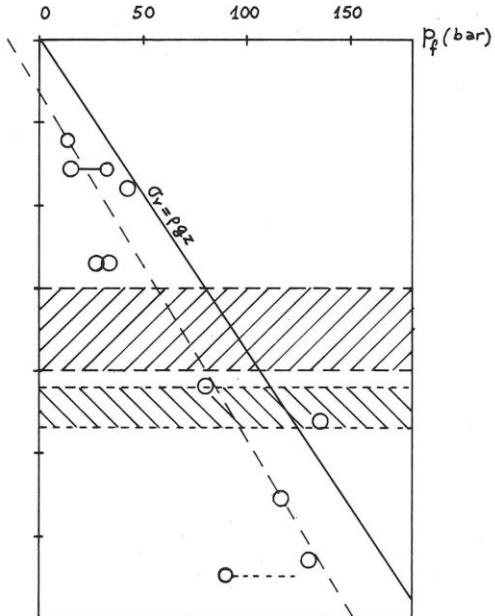


Fig. 1 b. — Pression de fermeture instantanée p_f suivant les fractures verticales. Cette pression peut être assimilée à la contrainte horizontale mineure (d'après Bouilleau, 1986).

Instantaneous shut-in pressure for vertical fractures. This pressure can be regarded as representative of the minor principal stress. (after Bouilleau, 1986).

Le calcul qu'il effectue, en prenant en compte la totalité des fractures (verticales et obliques), repose sur l'utilisation de la seule pression de fermeture instantanée. Le programme utilisé, qui est un programme d'inversion directe, permet de déterminer les contraintes principales horizontales et leur direction pour un ensemble de quatre fractures. Il repose sur l'hypothèse que les contraintes varient linéairement avec la profondeur, en fonction d'un seul et même paramètre. L'inversion est effectuée pour toutes les combinaisons possibles de quatre fractures, sur une tranche de profondeur donnée.

Bien que très fruste, ce programme de calcul s'est révélé donner des résultats comparables à ceux de programmes d'inversion plus complexes et mieux fondés théoriquement.

Les calculs réalisés par Bouilleau l'amènent à proposer les résultats partiels suivants :

entre 200 et 300 m :

$$\begin{aligned} 26 \text{ bar} < \sigma_h < 35 \text{ bar} \\ 43 \text{ bar} < \sigma_{II} < 56 \text{ bar} \end{aligned}$$

à 500 m :

$$\begin{aligned} 75 \text{ bar} < \sigma_h < 85 \text{ bar} \\ 122 \text{ bar} < \sigma_{II} < 132 \text{ bar} \end{aligned}$$

A titre de comparaison, la contrainte verticale à 250 m et 500 m est respectivement de 66 bar et 132 bar.

Les contraintes horizontales seraient donc plus faibles que le poids des terrains et caractérisées par une anisotropie, rapport de la contrainte horizontale majeure sur la contrainte horizontale mineure, de 1,55 à 1,65.

Baumgärtner, quant à lui, a effectué ses calculs suivant deux méthodes différentes : une méthode utilisant également les pressions de fermeture instantanée, mais dans laquelle le programme de calcul prend en compte l'ensemble des données. Le calcul a donc été réalisé, avec cette méthode, pour l'ensemble des fractures de la tranche 100-350 m, puis de la tranche 400-650 m.

L'autre méthode, dite « classique », s'intéresse aux seules fractures verticales ou subverticales, chacune d'elles étant prise individuellement. Elle suppose connue la direction des contraintes (voir plus haut dans ce paragraphe), et nécessite la prise en compte non seulement de la pression de fermeture instantanée, mais également de la pression de réouverture, dans l'expression de laquelle interviennent les deux contraintes principales horizontales. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes sont très voisines, et sont représentés graphiquement figure 2.

L'examen de cette figure montre que s'il n'y a pas de discontinuité marquée dans l'évolution du module de la contrainte horizontale mineure du haut en bas du forage, une telle discontinuité se manifeste par contre pour la contrainte majeure. Elle se traduit en particulier par une augmentation importante de l'anisotropie, qui passe de 1,40 environ à 250 m à 2,10 environ à 500 m.

Notons également que, contrairement à la solution proposée par Bouilleau, si la contrainte horizontale mineure calculée par Baumgärtner est inférieure au poids des terrains (en dessous de 150 m de profondeur), en revanche la contrainte majeure lui est toujours supérieure, le rapport passant de 1,20 à 250 m à 1,55 à 500 mètres.

Discussion et conclusion

Les solutions proposées par Baumgärtner et Bouilleau présentent un certain nombre de points communs qui permettent de considérer comme quasi certains les résultats suivants :

- il existe une discontinuité des contraintes entre la tranche 100-350 m et la tranche 400-650 m ;
- dans la tranche 100-350 m, la contrainte horizontale majeure est orientée N 120-130°E (WNW-ESE), cependant qu'en dessous de 400 m, cette orientation est N 150-170° (NNW-SSE).

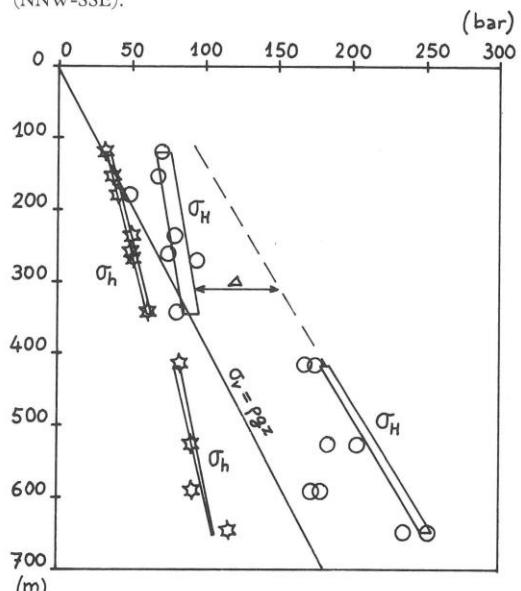


Fig. 2. — Le champ de contraintes dans le complexe granitique d'Echassières (d'après Baumgärtner, 1987).

Cercles : σ_{II} Etoiles : σ_h Résultats du calcul « classique »

Les trapèzes en traits pleins représentent les résultats du calcul fondé sur la pression de fermeture instantanée. La ligne en tiretés représente la prolongation, vers la surface, de la contrainte majeure profonde (400-650 m). L'écart Δ donne une idée de la décompression due à l'effet de relief et à la structure du massif.

In situ stress field in the granitic complex of Echassières (after Baumgärtner, 1987).

Circles : σ_{II} Stars : σ_h Results of the « classical » method

Full lines represent the stresses determined with the instantaneous shut-in pressures only.

Il est intéressant de noter que cette direction est celle mesurée par Cornet (1986) dans les forages du Mayet-de-Montagne, à l'est du fossé de la Limagne, et que c'est également la direction de la contrainte majeure déduite de l'étude des mécanismes au foyer des séismes et des mesures de con-

traintes superficielles sur la majorité du territoire français métropolitain en dehors du domaine alpin.

L'incertitude pèse toutefois sur les modules des contraintes. On doit cependant admettre que les grandes tendances mises en évidence par Baumgärtner sont valables.

Ces tendances sont les suivantes :

— au-dessus de 350 m, les contraintes horizontales sont faibles et augmentent faiblement avec la profondeur. Cette observation, reposant sur des valeurs de contraintes calculées dont on peut penser qu'elles sont surestimées, mais certainement pas sous-estimées, permet d'avancer qu'il existe dans cette tranche de terrain une certaine tendance au relâchement des contraintes.

— en dessous de 400 m, au contraire, la contrainte principale majeure augmente nettement, la contrainte principale mineure ne connaissant pas une évolution aussi marquée. Rappelons que les deux contraintes tournent de 30 à 40° vers le sud entre la tranche 100-350 m et la tranche 400-650 m.

Ces particularités s'expliquent très bien si l'on considère les caractéristiques topographiques du site du forage. Celui-ci se trouve dans la partie sud d'une zone élevée, la colline de la Bosse, qui culmine à 771 m. L'altitude diminue assez rapidement vers l'Est, en direction de la Limagne d'Ebreuil, avec une dénivellation de 400 m sur une distance de 6 km. Dans les autres directions, la pente est beaucoup plus faible. Il existe donc, dans la frange superficielle des terrains, une tendance à la décompression orientée suivant la ligne de plus grande pente, qui est justement celle de la contrainte majeure profonde. Ceci explique la diminution relative de la con-

trainte horizontale suivant cette direction et le fait que la contrainte majeure ait tendance à tourner pour s'aligner sur une direction suivant laquelle la forme du relief n'a pas tendance à entraîner de diminution.

Cette rotation peut également trouver sa cause au moins en partie dans la présence d'un important accident subvertical d'orientation N 30°E, qui recoupe le forage dans la zone 420-465 m. Au niveau du forage, cet accident est caractérisé par deux failles récentes imparfaitement colmatées et associées à une très forte altération hydrothermale en argile, où le granite est devenu très plastique (le sondage s'est d'ailleurs refermé à ce niveau au bout de quelques mois). Une rotation des contraintes au passage de cet accident est plausible.

Références bibliographiques

BAUMGÄRTNER J. (1987). — Anwendung des Hydraulic-fracturing-Verfahrens für Spannungsmessungen im geklüfteten Gebirge, dargestellt anhand von Messergebnissen aus Tiefbohrungen in der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich und Zypern. Berichte des Instituts für Geophysik der Ruhr Universität Bochum. Reihe A - Nr. 21.

BOUILLEAU M. (1986). — Mesure de contraintes mécaniques in situ par fracturation hydraulique dans le sondage GPF d'Échassières (Allier). Rapport BRGM n° 86 SGN 368 GEG.

CORNÉT F.-H. (1986). — Stress determination from hydraulic tests on pre-existing fractures. The H.T.P.F. method. Proc. Int. Symp. Rock Stress and Rock Stress Measurements. Stockholm. Centek ed., pp. 301-312.