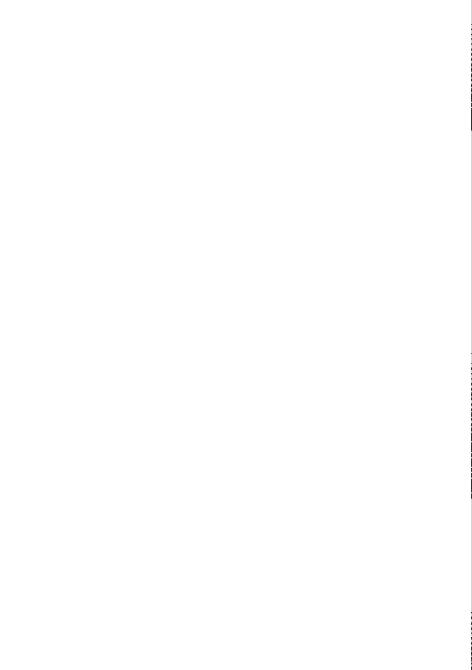


Fracturation hydraulique en laboratoire de blocs de granite de Vire



Yannick DESCANTES (*)

Docteur de l'INSA de Lyon

Ingénieur des Travaux publics de l'Etat

Groupe Mécanique des roches

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

Jean-Pierre MAGNAN

Directeur technique chargé du pôle Géotechnique

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Gérard MAZZOLENI ()**

Ingénieur des Travaux publics de l'Etat

Chef de la section Essais et recherche

Groupe Mécanique des roches

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

Jean-François SERRATRICE

Chargé de recherches

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées

d'Aix-en-Provence

RÉSUMÉ

Cet article présente une étude expérimentale des mécanismes gouvernant la fracturation hydraulique d'échantillons de granite de Vire. Quatre blocs ont subi une injection contrôlée d'eau à différents débits dans un forage rayé. Un suivi de la pression et du volume d'eau injecté dans le forage, de l'extension et de l'ouverture des fractures, a été réalisé. Pour un rayage de profondeur égale au tiers du diamètre du forage, la pression critique est comprise entre 7,7 et 9,9 MPa, soit 30 à 50 % plus faible que la résistance en traction indirecte du granite de Vire. De plus, la pression critique ne varie pas avec le débit d'injection. À débit imposé, les fractures se propagent à pression d'eau constante dans le forage et à vitesse contrôlée. L'ouverture maximale des fractures est de quelques dizaines de micromètres. Toutefois, malgré les symétries géométriques et de chargement des blocs, l'initiation et la propagation des fractures ne sont pas symétriques par rapport au forage d'injection, sauf à très faible vitesse de sollicitation. De plus, les traces des fractures sur les faces des blocs sont rectilignes, mais dévient légèrement du plan de rayage supposé les contenir. Bien que la faible anisotropie du granite de Vire mise en évidence par les mesures de vitesse des ondes longitudinales ait été négligée en première instance, il se pourrait qu'elle ait joué un rôle vis-à-vis des déviations observées.

MOTS-CLÉS : 43 - Éprouvette - Laboratoire - Essai - Eau - Pression - Résistance (matér.) - Rupture - Propagation - Granite - Forage (processus) - Lançage (hydraul.) - Hydraulique (fluide) - Injection (matér.) - Débit (écoulement).

Introduction

La maîtrise de la fracturation artificielle des roches est un enjeu pour plusieurs secteurs de l'industrie, parmi lesquels le secteur des carrières de pierre de taille, le génie civil et l'industrie pétrolière.

Or cette maîtrise n'est pas acquise, à en juger par les résultats de ces secteurs. En effet, seuls 5 à 30 % des blocs produits en carrières de pierre de taille sont commercialisables d'après le mémento des mines et carrières (1995). En génie civil, Héraud et al. (1991) constatent de mauvais découpages de talus, nécessitant des conformements coûteux, et une mauvaise fragmentation de la masse abattue. Selon Boutea et al. (1987), seuls 50 % des opérations de fracturation hydraulique accroissent le rendement de puits de pétrole.

Pour améliorer la maîtrise de la fracturation artificielle des roches, il convient de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu par les principales techniques utilisées, le minage et la fracturation hydraulique. Ces techniques ont en commun l'action d'un fluide sous pression dans un forage pour engendrer une fracturation radiale depuis sa paroi.

(*) Actuellement au Laboratoire central des Ponts et Chaussées.

(**) Actuellement au Centre d'étude des tunnels.

En effet, dans le cas du minage, les fractures sont initiées par l'onde de choc provenant de la violente décomposition d'un explosif (Atchison et al., 1964 ; Nicholls et al., 1966 ; Weber et al., 1971), puis propagées par les produits de cette décomposition, du gaz à hautes température et pression qui s'engouffre dans les fractures (Kutter, 1967 ; Christmann, 1971 ; Fourney et al., 1981 ; Ghosh, 1990). En fracturation hydraulique, la mise en pression d'un ou plusieurs forage(s) par injection d'un liquide assure l'initiation et la propagation des fractures (Zoback et al., 1977 ; Boutéca et al., 1987).

Avec comme fluide un liquide, certains auteurs ont eu une approche expérimentale des mécanismes contrôlant la fracturation artificielle d'un matériau. Ils ont observé les phénomènes suivants :

- la fracturation est initiée avant que la pression n'atteigne sa valeur maximale dans le forage. La pression d'initiation, ou pression critique, dépend du matériau et diminue lorsqu'une préfissuration radiale (rayage, etc.) s'étend depuis le forage (Kutter, 1967) ;
- une ou deux fractures sont initiées et se propagent (Boutéca et al., 1987) ;
- la position des sites d'initiation et de propagation dépend de l'existence d'un confinement ou d'une préfissuration radiale autour du forage (Blair et al., 1990). Une fracture est initiée et se propage dans le plan de la plus longue fissure préalable, sauf en présence d'un confinement où elle se réoriente selon le plan de compression maximale (Zoback et al., 1977) ;
- la propagation des fractures commence par une phase stable, caractérisée par leur faible allongement malgré une forte augmentation de pression dans le forage, suivie d'une phase instable où leur allongement est violent pour un faible accroissement de la pression (Zoback et al., 1977 ; Deflandre et al., 1990 ; Matsunaga et al., 1993). La phase stable dure d'autant plus longtemps que le matériau est peu perméable au liquide d'injection et que l'injection est rapide.

Ces approches expérimentales décrivent des mécanismes observés le plus souvent sur des matériaux non rocheux (verre, plexiglass, mortier de ciment, etc.), plus faciles à instrumenter. Or les roches ont un comportement en général différent de celui de ces matériaux, susceptible de perturber certains des mécanismes gouvernant l'initiation et la propagation des fractures. Pour cette raison, un programme expérimental a été réalisé en laboratoire, visant à contrôler l'initiation et la propagation de fractures dans le granite de Vire par injection d'eau et à suivre l'évolution de la pression dans le forage, de l'ouverture des fractures et de leur vitesse de propagation au cours du temps.

Cet article décrit brièvement les essais réalisés sur des blocs de granite de Vire, leurs résultats et propose une interprétation sommaire.

Description des essais

Principe

Le programme expérimental porte sur quatre blocs cubiques de granite, numérotés de 6 à 9, traversés chacun par un forage centré. Le principe est d'exercer une pression sur la paroi du forage par injection d'eau, afin d'initier et de propager des fractures suivant une orientation imposée et à une vitesse contrôlée. Simultanément, un suivi de la géométrie des fractures, de la pression et du volume d'eau injecté dans le forage est réalisé.

Dispositif expérimental

L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1.

La roche

La roche utilisée est le granite de Vire, provenant de la formation granodioritique de la Mancellia dans le Calvados. Ce granite à grain moyen, homogène et relativement sain est une roche très dure et très peu poreuse. Il présente, entre autres, la particularité de pouvoir être poli avec une très grande précision, de l'ordre du micromètre. Ses principales caractéristiques physiques sont :

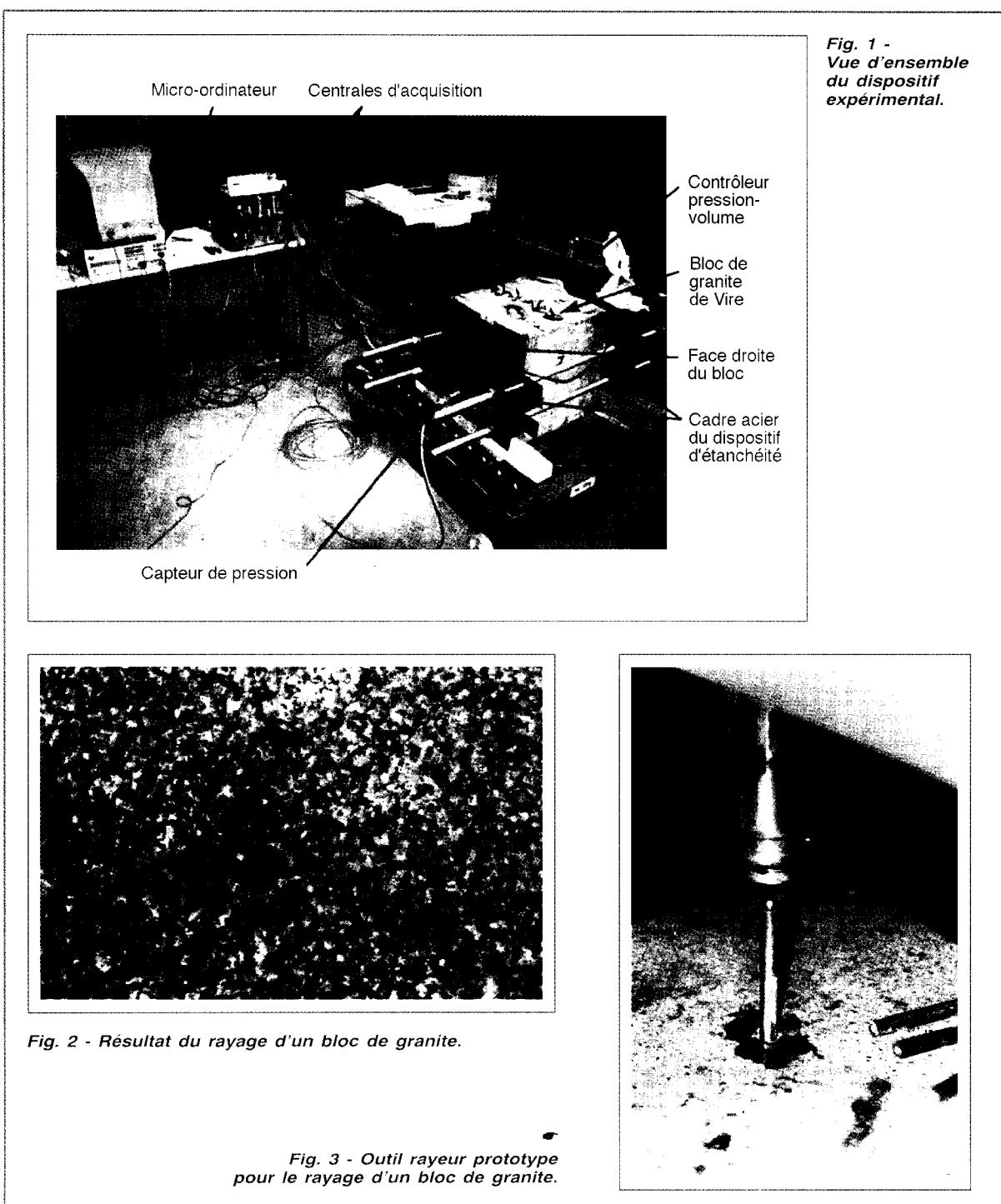
- vitesse des ondes longitudinales V_p : 5 000 m/s,
- masse volumique : 2 700 kg/m³,
- résistance à la compression simple R_c : 180 MPa,
- résistance à la traction indirecte R_{tb} : 15 MPa,
- porosité n : 0,4 %.

Il est extrait à la poudre noire par dalles de grandes dimensions, qui sont ensuite sciées au fil enduit de carbure de tungstène. La taille finale est opérée à la scie à diamant pour obtenir les cubes de 40 cm d'arête demandés.

La foration et le rayage

Le forage d'injection de 12 mm de diamètre a été réalisé par carottage, afin de limiter la micro-fissuration, depuis le centre d'une face du bloc cubique jusqu'au centre de la face opposée.

Pour maîtriser l'orientation des fractures, une préfissuration radiale a été effectuée sur toute la hauteur du forage, par rayage diamétral suivant un plan de symétrie commun à la géométrie et au chargement du bloc. La figure 2 montre ce rayage qui a la forme d'un « V » de hauteur 4 mm et d'ouverture 2 mm. Sa réalisation a nécessité la mise au point de l'outil rayeur prototype représenté sur la figure 3. Il comprend un guide en acier de diamètre extérieur 12 mm, dans lequel s'ajustent quatre tailles de morceaux de lames de



scie, et quatre rallonges. La technique consiste à opérer le rayage branche par branche et par passes successives, en enfonçant l'outil rayeur dans le forage d'injection à l'aide d'une presse et des rallonges.

Le dispositif d'injection

Pour contrôler la vitesse de propagation des fractures, l'injection d'eau doit être lente et maîtrisée, ce qui nécessite d'éliminer l'élasticité parasite du circuit d'injection. Par conséquent, un dispositif d'injection constitué d'une seringue mécanique asservie à

un microprocesseur a été utilisé. Ce dispositif, appelé contrôleur pression-volume (CPV), permet d'injecter de l'eau désaérée à pression ou débit imposé, avec des résolutions de l'ordre du millimètre cube et du kilopascal. L'injection dans le forage est réalisée via deux flexibles de 60 MPa de capacité, reliés aux deux embouts du prototype d'obturateur de forage en acier inoxydable représenté sur la figure 4. Ces embouts sont vissés sur une tige de 6 mm de diamètre traversant le forage rayé et possèdent des joints pour assurer l'étanchéité contre les surfaces d'appui.

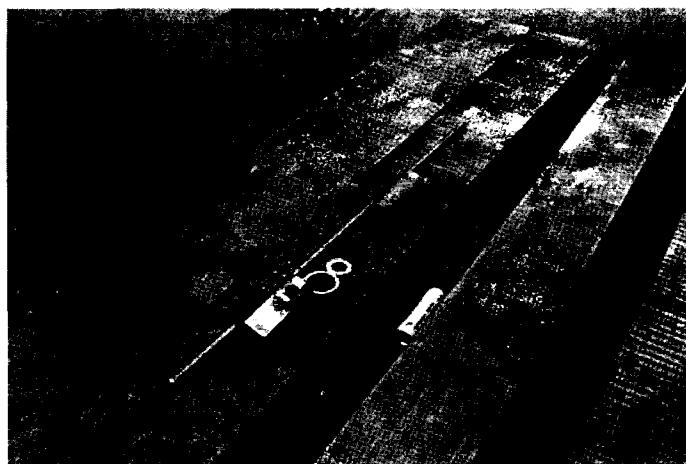


Fig. 4 - Obturateur de forage.

Le dispositif d'étanchéité

Les premiers essais de mise au point (réalisés sur les blocs numérotés de 1 à 5) ont montré que les fractures se propageaient sur les deux faces des blocs sur lesquelles s'appuient les embouts de l'obturateur de forage (faces « gauche » et « droite »). Les fuites engendrées par ces fractures gênant la maîtrise de l'injection, un dispositif prototype d'étanchéité a été conçu. Ce dispositif symétrique comporte un cadre en acier (fig. 1), deux plaques en acier dont la géométrie est dessinée sur la figure 5 et deux joints toriques. Pratiquement, le cadre permet de serrer les plaques contre les faces gauche et droite préalablement rectifiées au micromètre, assurant ainsi l'étanchéité des deux zones délimitées par une plaque, une face et un joint torique de forme allongée suivant le plan de rayage.

Le suivi instrumental

Le volume d'eau injecté dans le forage est déterminé par un capteur mesurant le déplacement du piston du contrôleur pression-volume (CPV) dans la seringue de diamètre constant. La pression de l'eau dans le forage est mesurée par un capteur de pression fixé sur l'un des embouts de l'obturateur de forage. La géométrie des fractures est suivie par une instrumentation disposée à l'intérieur et en surface de chaque bloc (fig. 6).

L'ouverture et la position des extrémités des fractures en surface de bloc sont déduites des mesures de déformations de jauge linéaire (J-SURFn) et de rosaces (Rn-p-q) collées sur les faces gauche et droite, à l'intérieur de chaque zone étanche. Ces instruments sont disposés symétriquement par rapport au forage et à cheval sur le plan de rayage (fig. 7).

L'ouverture des fractures à l'intérieur des blocs est déduite des mesures de déformations des extensomètres prototypes de la figure 8. Ils sont constitués d'une lame d'acier à ressort de longueur utile 100 mm, de largeur 8 mm et d'épaisseur 0,1 mm, sur laquelle est collée une jauge linéaire de déformation, et d'un dispositif de scellement. Les extensomètres sont scellés dans des forages instrumentaux d'axe perpendiculaire au plan de rayage, la lame d'acier étant tendue à cheval sur le plan de rayage.

L'acquisition des mesures au cours du temps est opérée par une ou deux centrales reliées à un micro-ordinateur (fig. 1). L'utilisation de deux centrales d'acquisition améliore la précision des mesures en réduisant le nombre d'instruments interrogés par chaque centrale.

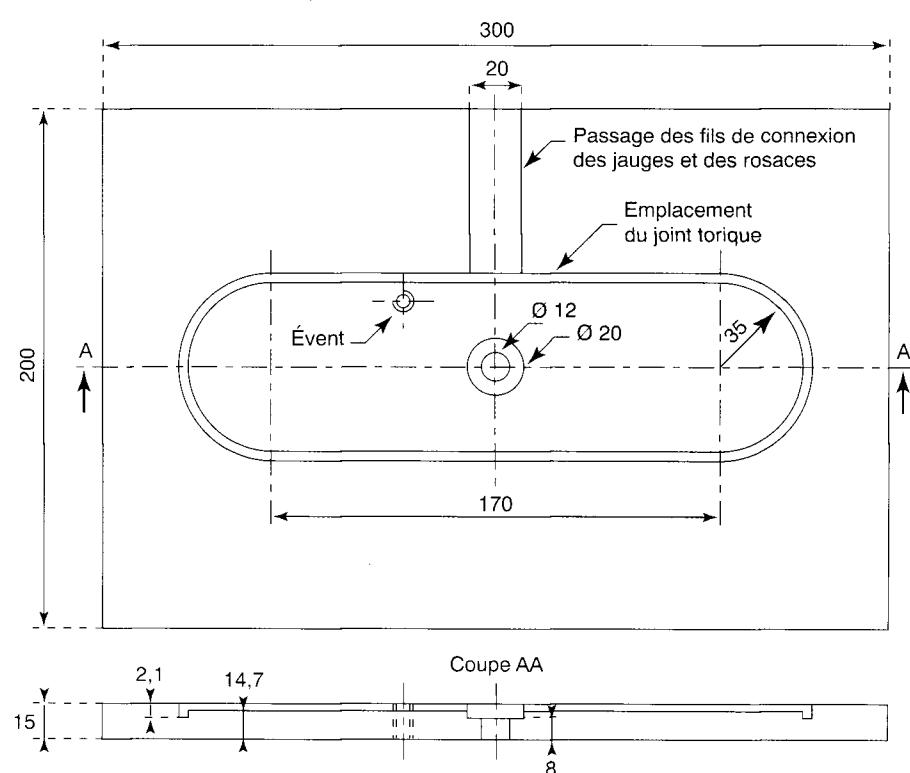


Fig. 5 - Vues de face et de profil des plaques en acier du dispositif d'étanchéité (dimensions en millimètres).

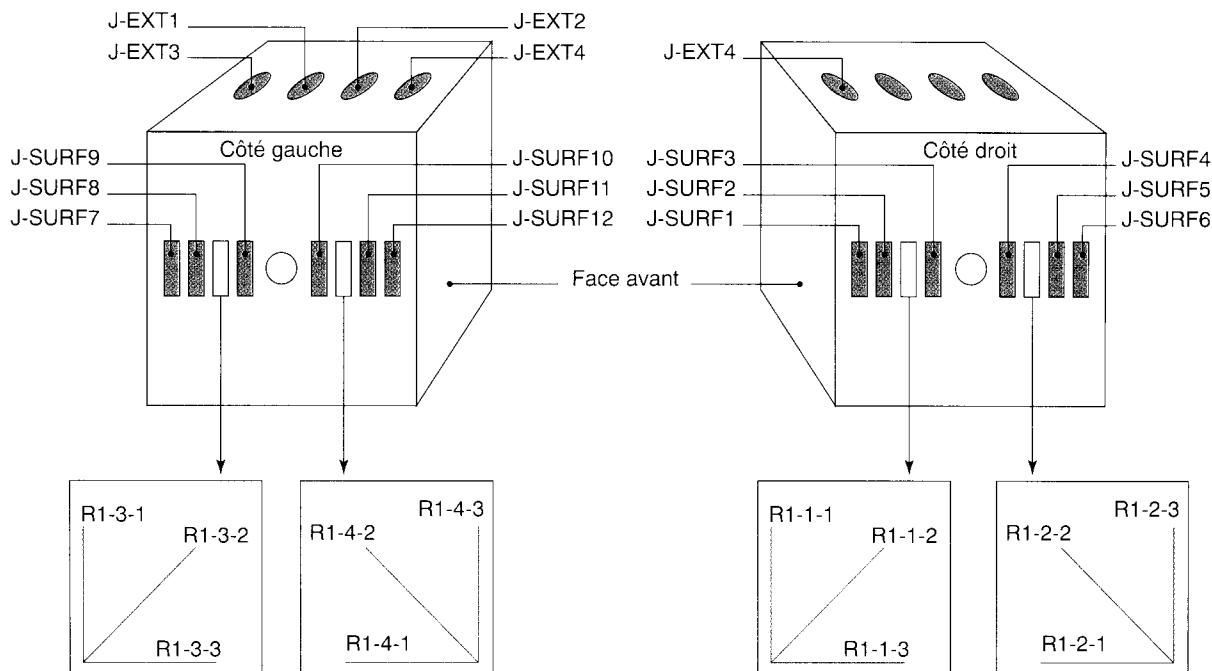


Fig. 6 - Schéma de repérage de l'instrumentation extensométrique de chaque bloc.

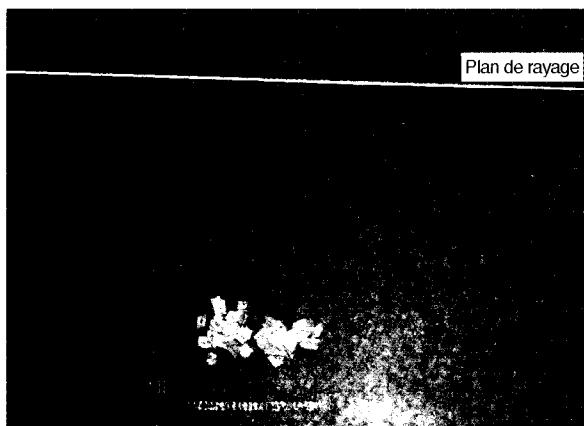


Fig. 7 - Jauge extensométriques et rosaces de déformation collées en surface de bloc.

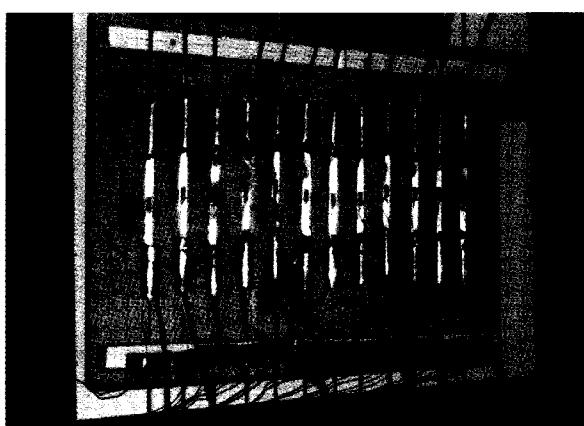


Fig. 8 - Extensomètres prototypes.

Procédure expérimentale

Pour chacun des blocs testés, l'essai est réalisé en deux temps :

① tout d'abord, des paliers de pression préliminaires sont effectués, à des pressions maximales de 5 à 6 MPa. Ils permettent d'accélérer la saturation du système d'injection, de détecter d'éventuelles fuites et de contrôler le bon positionnement du dispositif d'étanchéité ;

② ensuite, l'essai proprement dit est mené à un débit imposé, différent pour chaque bloc (les débits utilisés pour les blocs 6 à 9 valent respectivement 1, 2, 4 et 10 mm³/s). Les phases de sollicitation relatives aux blocs 6, 8 et 9 sont résumées respectivement dans les tableaux I, II et III. Pour chaque phase numérotée dans la deuxième colonne de ces tableaux, les trois colonnes suivantes définissent la sollicitation et sa période d'application, tandis que la dernière colonne commente le déroulement de l'essai.

Après chaque essai, de l'eau colorée au bleu de méthylène est introduite dans le forage et poussée dans les fractures avec une pompe, afin de marquer les surfaces fracturées par l'eau. Puis les dispositifs d'injection et d'étanchéité sont démontés et un produit de ressusage est pulvérisé sur les faces rectifiées, afin de révéler les traces de fractures. Enfin, le fendage du bloc est achevé mécaniquement, pour observer les surfaces des fractures.

TABLEAU I
Phases de sollicitation du bloc 6

Bloc	Phase	Solicitation	Début (h:min:s)	Fin (h:min:s)	Commentaires
6 (une centrale)	1	rampe 0-5 MPa	20:53	20:57	- contrôle de l'ajustage du dispositif d'étanchéité pour resserrage éventuel
	2	palier de pression 5 MPa	20:57	21:26	- saturation complète du circuit (le débit injecté tend vers 0) - panne de la centrale SA70 Utilisation de la SA120 seule
	3	rampe 0-5 MPa	21:30	21:32	- resserrage et redémarrage
	4	palier de pression 5 MPa	21:32	21:34	- le débit d'injection se stabilise vers 0
	5	rampe 5 MPa-6 MPa	21:34	21:35	
	6	palier de pression 6 MPa	21:35	21:44	- le débit d'injection se stabilise vers 0
	7	débit d'injection constant 1 mm ³ /s	21:43:20	23:22:18	- bruit sur les courbes de déformation (le chiffre des centaines est le premier chiffre significatif) - arrêt de l'injection ($P = 8,2$ MPa) pour freiner la croissance des déformations des extensomètres J_EXT1 et J_EXT2
	8	aucune	23:22:18	23:23:50	- les déformations des extensomètres sont maximales pendant 30 s puis diminuent. La pression tombe à 8,1 MPa
	9	débit d'injection constant 1 mm ³ /s	23:23:50	23:33:41	- la pression décroît légèrement Détente des extensomètres
	10	débit d'injection constant 2 mm ³ /s	23:33:41	23:36:33	- la pression décroît légèrement. Détente des extensomètres - très légère fuite par l'extensomètre J_EXT2
	11	débit d'injection constant 4 mm ³ /s	23:36:33	23:38:08	- la pression décroît légèrement
	12	débit d'injection constant 10 mm ³ /s	23:38:08	23:45:05	- la pression remonte - l'instrumentation de la face droite réagit de part et d'autre du forage. Les mesures des extensomètres ne varient pas - la pression chute et des fuites apparaissent, puis la fracture atteint la face arrière
	13	CPV en mode vidange	23:45:05	23:49:03	- la pression stagne à 2 MPa. Fuites importantes. Arrêt

TABLEAU II
Phases de sollicitation du bloc 8

Bloc	Phase	Solicitation	Début (h:min:s)	Fin (h:min:s)	Commentaires
8 (deux centrales)	1	rampe 0-4 MPa	10:23	10:31	- contrôle de l'ajustage du dispositif d'étanchéité - saturation du circuit d'injection - décharge pour resserrage du dispositif d'étanchéité
	2	rampe 0-4 MPa	10:31	10:35	
	3	palier de pression 4 MPa	10:35	10:41	- stabilisation du débit d'injection vers 0
	4	rampe 4-5 MPa	10:41	10:42	
	5	palier de pression 5 MPa	10:42	11:02	- stabilisation du débit d'injection à 0,2 mm ³ /s
	6	débit d'injection constant 4 mm ³ /s	11:01:34	11:43:28	- jeu de 0,5 mm entre la face gauche du bloc et la plaque en acier, en partie supérieure - vers 11:35, réaction de l'extensomètre J_EXT2 - vers 11:42, la pression, qui valait 7,7 MPa, chute. La face droite est fracturée avec d'importantes fuites
	7	CPV en mode vidange	11:43:28	11:45:33	- la pression ne dépasse pas 2,2 MPa. Arrêt

TABLEAU III
Phases de sollicitation du bloc 9

Bloc	Phase	Sollicitation	Début (h:min:s)	Fin (h:min:s)	Commentaires
9 (une centrale)	1	rampe 0-2 MPa	10:05	10:12	- contrôle de l'ajustage du dispositif d'étanchéité
	2	palier de pression 2 MPa	10:12	10:28:34	- stabilisation du débit d'injection à 0,25 mm ³ /s - la grille R1_4_1 de la rosace 4 ne fonctionne pas
	3	débit d'injection constant 10 mm ³ /s	10:28:34	11:24:43	- bruit sur les courbes de déformation (50 à 60 µdéf) - à 10:42, perturbation bien nette sur la courbe de pression, due à la pose d'un serre-joint - à 11:19, réaction de l'extensomètre J_EXT1 de pression, due à la pose d'un serre-joint - la pression chute de 10 à 1 MPa, alors qu'apparaît une fracture en face avant, à gauche du forage. Fuites. Arrêt

Résultats des essais

Les essais ont permis de suivre l'initiation et la propagation de fractures dans trois des quatre blocs. Des difficultés expérimentales ont empêché la fracturation du quatrième (bloc 7), qui sera ignoré dans tout ce qui suit.

Traces de fractures sur les faces polies

Malgré la symétrie des dispositifs d'injection et d'étanchéité, une seule des deux faces rectifiées de chaque bloc comporte des traces de fractures, ainsi que l'indiquent les figures 9, 10 et 11. L'observation des traces établit que les fractures sont initiées aux extrémités du rayage. Par ailleurs, ces traces sont relativement rectilignes et dévient de quelques degrés du plan de symétrie supposé les contenir.

Surfaces de fracture

Les figures 12, 13 et 14 montrent la géométrie des surfaces de rupture de chaque bloc. Bien que le marquage au bleu de méthylène soit peu visible par endroits, un examen direct des blocs montre que les surfaces fracturées par l'eau sont relativement planes, les hors profils étant dus à l'achèvement mécanique du fendage des blocs.

Dépouillement du suivi expérimental

Pour chaque bloc, les courbes de variations au cours du temps du volume d'eau injecté (assimilé au déplacement du piston du CPV), de la pression dans le forage et des mesures de déformations sont tracées sur le même graphe. Les figures 15a, b et c se concentrent sur les portions significatives des trois graphes ainsi obtenus et ne représentent que les courbes des instruments ayant réagi. Par souci de clarté, les conventions de couleur suivantes ont été respectées :

- capteur de déplacement (DEPL) en rouge,
- capteur de pression (P95) en bleu foncé,
- extensomètres (J_EXT1 et J_EXT2) respectivement en vert et bleu ciel.

Les figures 15a et 15c font apparaître du bruit sur les courbes de mesures de déformations, dû à l'auscultation de tous les instruments par une seule centrale d'acquisition, la seconde ayant été déconnectée après une panne.

L'amplitude maximale de ce bruit étant de l'ordre de 100.10⁶, cette valeur sera prise comme seuil de réaction des instruments. Néanmoins, ce seuil est plus bas pour les courbes de la figure 15b, l'essai ayant été suivi par les deux centrales d'acquisition. L'examen des figures 15a, b et c conduit respectivement aux tableaux IV, V et VI, qui comportent chacun onze colonnes. Pour chaque instrument nommé dans la première colonne, le tableau caractérise le franchissement du seuil de réaction (heure, valeur, pression dans le forage), la déformation maximale (heure, valeur, pression dans le forage) et l'heure de rupture ou la déformation résiduelle en fin de phase. Les trois dernières colonnes caractérisent les maxima de pression dans le forage (heure à laquelle un maximum est atteint, valeur de ce maximum, heure à laquelle la pression commence à décroître).

Interprétation

Initiation des fractures

Critère d'initiation

Le critère d'initiation de fractures retenu est celui du premier instrument de mesure de déformations à franchir le seuil de réaction. Le choix de ce critère expérimental repose sur trois considérations : tout d'abord, des jauge et des extensomètres sont situés le long du forage rayé, à proximité des extrémités du rayage où les fractures sont initiées (respectivement à 1,25 et 2 cm) ; puis, ces instruments peuvent détecter d'infimes déformations ; enfin, les figures 15a, b et c montrent que l'évolution de la pression avec le temps est très lente.

Traces de fractures sur les faces polies

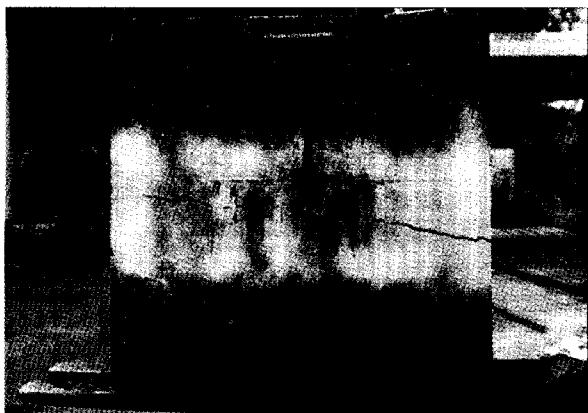


Fig. 9 - Bloc 6. Face droite.

Géométrie des surfaces de rupture

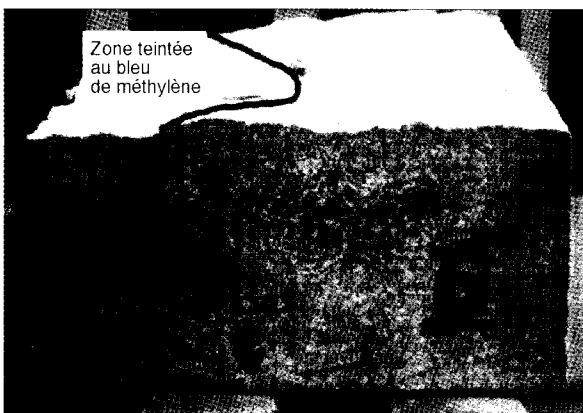


Fig. 12 - Bloc 6.

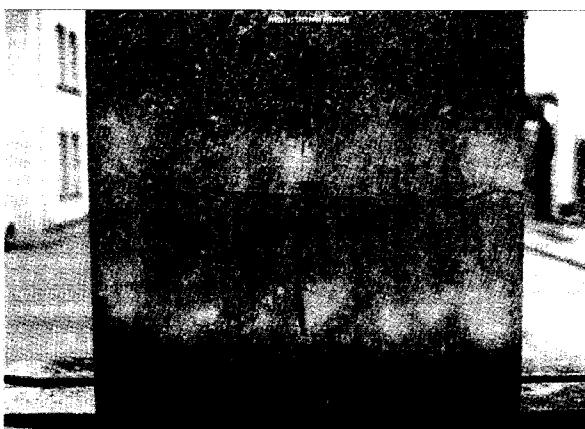


Fig. 10 - Bloc 8. Face droite.

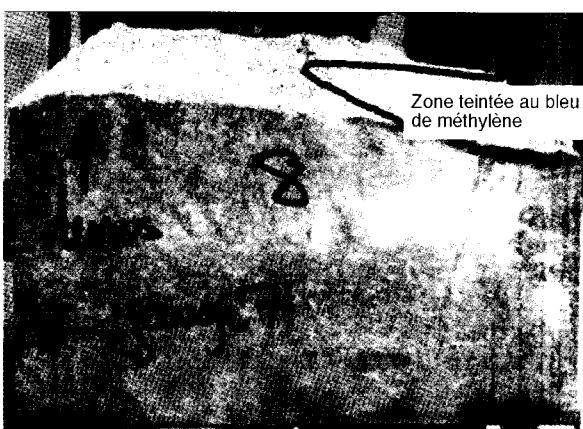


Fig. 13 - Bloc 8.

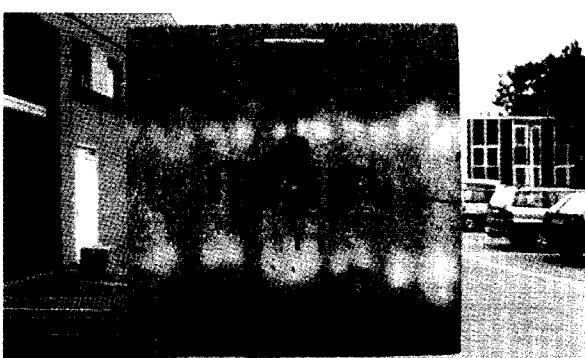
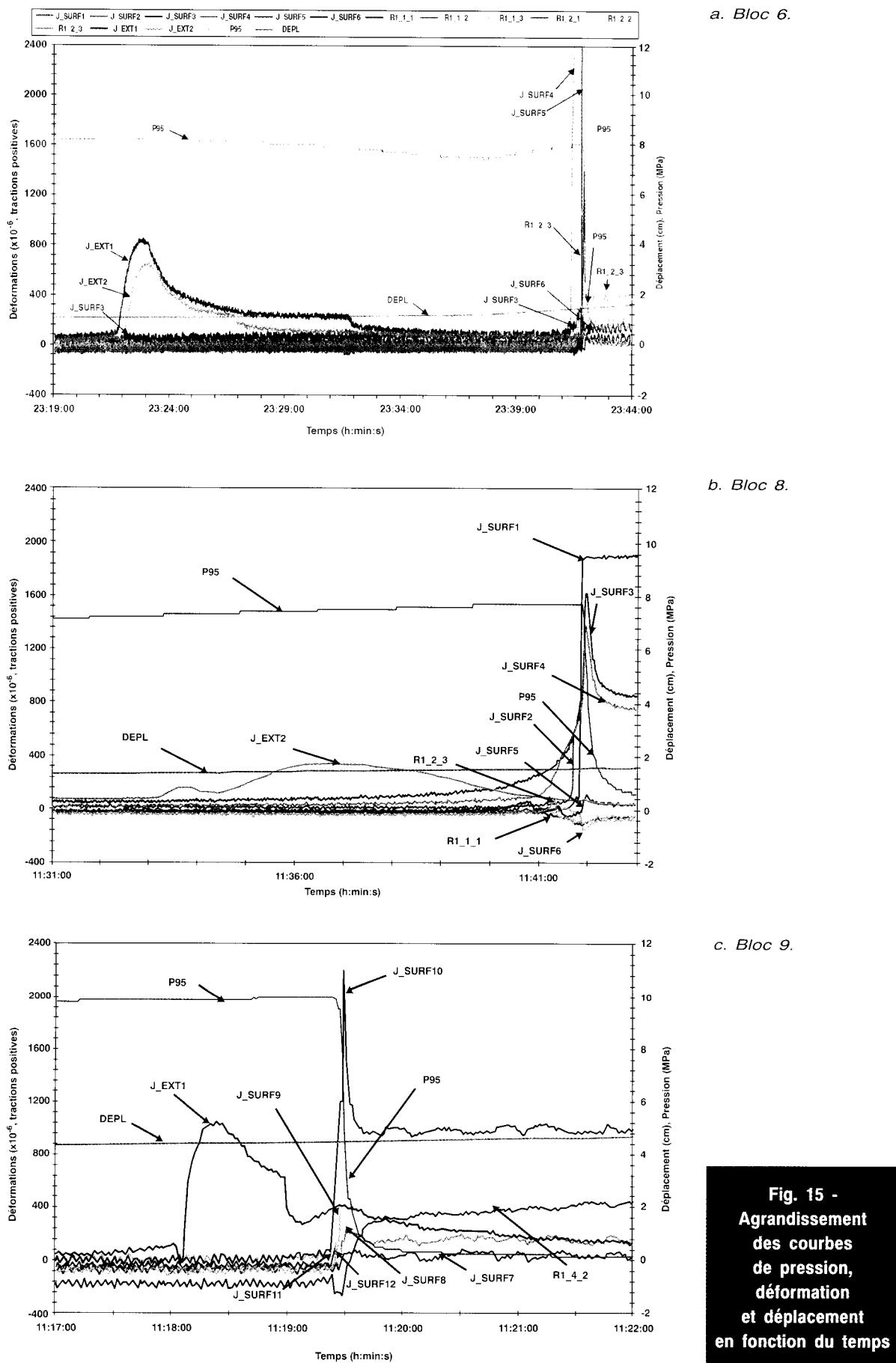


Fig. 11 - Bloc 9. Face gauche.



Fig. 14 - Bloc 9.



**Fig. 15 -
Agrandissement
des courbes
de pression,
déformation
et déplacement
en fonction du temps**

TABLEAU IV
Analyse des résultats de l'essai sur le bloc 6 (débit d'injection de 1 mm³/s, puis 10 mm³/s à 23:38:08)

Nom	Franchissement du seuil de réaction			Déformations maximales mesurées			Heure de rupture/déformation résiduelle (10 ⁻⁶)	Maxima de pression		
	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)		Début (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Fin (h:min:s)
J_EXT1	23:21:47	129	8,2	23:22:52	847	8,2	< 100	23:17:52	8,2	23:22:59
J_EXT2	23:22:06	106	8,2	23:22:59	659	8,1	< 100			
J_SURF4	23:41:22	140	7,9	23:41:40	6161	8	23:41:41			
J_SURF3	23:41:23	141	7,9	23:41:58	1382	6,1	23:41:59			
R1_2_3	23:41:38	108	8	23:41:55	1153	7,8	380			
J_SURF5	23:41:49	156	8	23:41:52	14176 (?)	8	23:41:53	23:41:26	8	23:41:53
R1_1_1	23:41:52	136	8	23:41:55	1087	7,8	23:41:56			
J_SURF6	23:41:55	234	7,8	23:41:55	234	7,8	103			
J_SURF2	23:41:56	144	7,5	23:41:56	144	7,5	23:41:57			
J_SURF1	23:41:57	cassée	7,5	***	***	***	23:41:57			

TABLEAU V
Analyse des résultats de l'essai sur le bloc 8 (débit d'injection de 4 mm³/s)

Nom	Franchissement du seuil de réaction			Déformations maximales mesurées			Heure de rupture/déformation résiduelle (10 ⁻⁶)	Pression maximale		
	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)		Début (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Fin (h:min:s)
J_EXT2	11:33:18	102	7,3	11:36:43	348	7,5	< 100			
J_SURF3	11:38:28	105	7,6	11:41:56	1617	5,9	797			
J_SURF4	11:40:52	106	7,7	11:41:57	1387	5,4	720	11:39:37	7,7	11:41:51
J_SURF2	11:41:40	149	7,7	11:41:42	564	7,7	11:41:43			
J_SURF1	11:41:50	269	7,7	11:41:58	1901 (?)	4,9	1770			

TABLEAU VI
Analyse des résultats de l'essai sur le bloc 9 (débit d'injection de 10 mm³/s)

Nom	Franchissement du seuil de réaction			Déformations maximales mesurées			Heure de rupture/déformation résiduelle (10 ⁻⁶)	Pression maximale		
	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)	Heure (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Pression (MPa)		Début (h:min:s)	Valeur (10 ⁻⁶)	Fin (h:min:s)
J_EXT1	11:18:07	122	9,9	11:18:19	1004	9,9	< 100			
J_SURF10	11:19:24	216	10	11:19:30	2197	4,7	1000			
J_SURF11	11:19:25	100	9,9	11:19:25	100	9,9	11:19:26			
J_SURF12	11:19:26	124	9,9	11:19:26	124	9,9	11:19:27	11:18:45	10	11:19:24
J_SURF9	11:19:27	121	9,5	11:19:28	340	9,5	11:19:29			
J_SURF8	11:19:29	136	7,2	11:19:31	226	3,2	138			

TABLEAU VIII
Premier franchissement du seuil de réaction par une jauge extrême et début de la chute de pression

TABLEAU VII
Pression critique et pression maximale mesurées dans les blocs 6, 8 et 9

Bloc	Débit d'injection (mm ³ /s)	Pression critique (MPa)	Pression maximale (MPa)
6	1	8,2	8,2
8	4	7,3	7,7
9	10	9,9	10

Bloc	Premier franchissement du seuil de réaction par une jauge extrême		Heure du début de la chute de pression (h:min:s)
	Nom	Heure (h:min:s)	
6	J_SURF6	23:41:55	23:41:53
8	J_SURF1	11:41:50	11:41:52
9	J_SURF12	11:19:26	11:19:25

Sites d'initiation

L'examen des tableaux IV à VI indique que l'initiation des fractures se produit au niveau des extensomètres, donc au centre du bloc. De plus, elle n'est pas symétrique de part et d'autre du forage, sauf à faible débit ($1 \text{ mm}^3/\text{s}$, fig. 15a) où les extensomètres J_EXT1 et J_EXT2 réagissent quasi simultanément.

Pression critique

La pression critique correspond à la pression régnant dans le forage lorsque le critère d'initiation de fractures est atteint. Le tableau VII indique les valeurs de la pression critique et de la pression maximale dans chaque bloc, en rappelant le débit d'injection. D'après ce tableau, la pression critique est comprise entre 7,3 et 9,9 MPa, pour un rayage de profondeur égale à un tiers du diamètre du forage. Elle tend à être légèrement plus faible que la pression maximale et ne dépend pas du débit d'injection. Zoback et al. (1977) font le même constat pour un gabbro et l'attribuent à la faible perméabilité de cette roche au liquide d'injection.

Propagation des fractures

Mode de propagation

Les figures 15b et c indiquent qu'un seul des extensomètres disposés symétriquement de part et d'autre du forage d'injection des blocs 8 et 9 a réagi. Par conséquent, la propagation des fractures n'est pas symétrique par rapport à ce forage, en dépit des symétries géométriques et de chargement. De plus, la littérature relative aux expériences de fracturation hydraulique de matériaux non rocheux ne mentionne pas de déviations de fractures similaires à celles observées sur les faces polies du granite de Vire. Par conséquent, ce phénomène pourrait être dû à la nature polycristalline du granite de Vire, l'orientation préférentielle de certains cristaux pouvant être source d'anisotropie.

Enfin, les figures 15a, b et c montrent une détente des extensomètres avant que les fractures n'aient atteint les faces libres des blocs, indiquant que les fractures se referment. Boutéca et al. (1987) ont observé ce phénomène, qui traduit une propagation des fractures suivant l'axe du forage.

Vitesse de propagation des fractures

La maîtrise de l'injection a permis de contrôler la vitesse de propagation des fractures. En effet, les figures 16a, b et c retracent l'évolution des fractures au cours du temps sur les faces polies des blocs. À un instant donné, la fracture est représentée par un trait reliant l'extrémité du rayage aux jauge et rosaces ayant réagi. Ces figures montrent que la vitesse de propagation des fractures augmente avec le débit d'injection.

Pression de propagation

Les tableaux IV à VI montrent que l'ensemble des instruments de mesure de déformations relatifs à un même bloc franchissent le seuil de réaction sans variation de la pression dans le forage. Par conséquent, la propagation de fractures n'en-gendre pas de chute de pression, contrairement aux affirmations de Blair et al. (1990).

Les chutes de pression constatées en fin de propagation sont en fait dues à l'apparition de fuites d'eau par les fractures. En appelant « jauge extrême » les quatre jauge les plus excentrées par rapport au forage (resp. J_SURF1, J_SURF6, J_SURF7 et J_SURF12, voir fig. 6), le tableau VIII montre en effet que la première de ces jauge franchit le seuil de réaction coïncide avec le début de la chute de pression. Compte tenu de l'emplacement de ces jauge, la chute de pression concorde donc avec la propagation d'une fracture à l'extérieur de la zone étanche, qui s'accompagne de fuites.

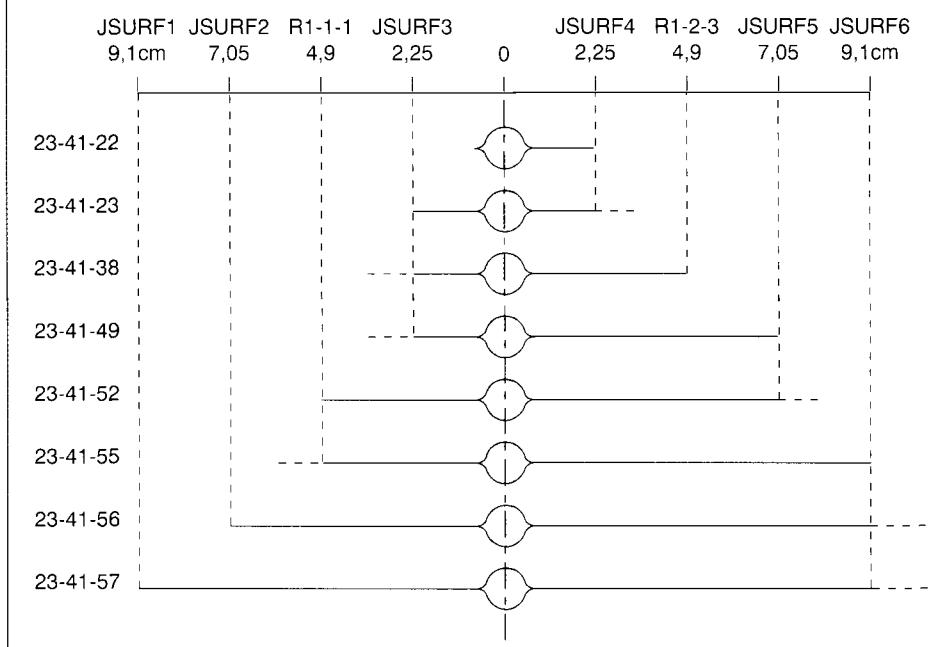
Action de l'eau dans les fractures

Plusieurs auteurs (Zoback et al., 1977 ; Deflandre et al., 1990 ; Matsunaga et al., 1993) ont affirmé que la pénétration du liquide d'injection dans les fractures était responsable de leur propagation. Les essais sur le granite de Vire justifient expérimentalement cette affirmation. Tout d'abord, l'apparition de fuites d'eau par les fractures dès qu'elles se propagent au-delà de la zone étanche montre que l'eau est présente dans les fractures pendant leur propagation. Ensuite, les tableaux IV à VI indiquent que l'allongement des extensomètres est maximal dans chaque bloc avant que les jauge de surface n'aient réagi et tandis que la pression est maximale dans le forage. Enfin, l'injection quasi statique d'eau dans le forage ralentit fortement la propagation des fractures et l'évolution de la pression et des déformations mesurées. Ainsi, ces conditions permettent à la pression régnant dans le forage de pousser l'eau dans les fractures d'ouverture maximale et de les mettre lentement en pression, avant même que les jauge de surface n'aient réagi.

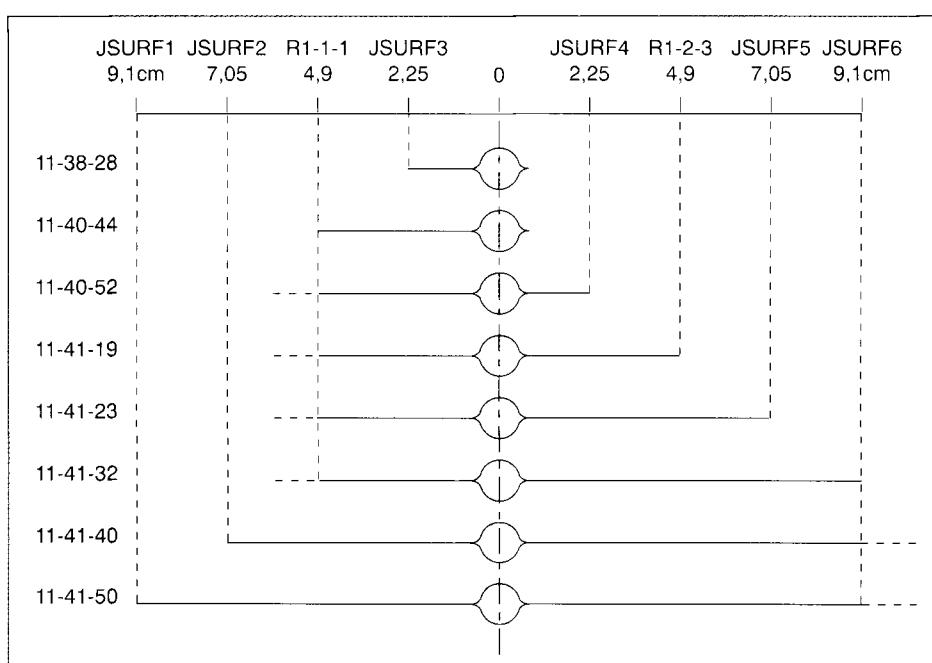
Ouverture des fractures

Le tableau IX indique les allongements correspondant aux déformations maximales mesurées par les extensomètres et par les jauge de chaque bloc. Ces allongements sous-estiment l'ouverture des fractures, car les déformations mesurées par chaque instrument résultent de la somme algébrique de deux termes : la déformation correspondant à l'ouverture de la fracture, à laquelle vient se soustraire la déformation matricielle de compression du granite due à la pression de l'eau sur les

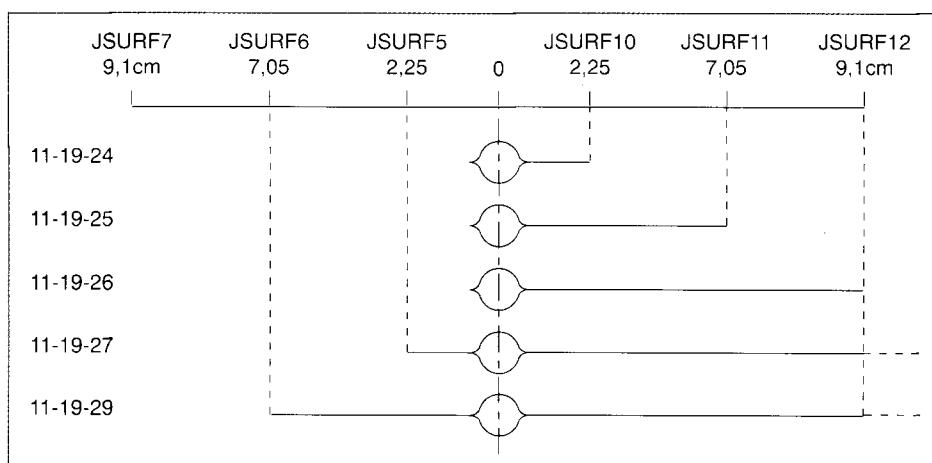
Fig. - 16
Évolution des fractures
au cours du temps
sur les faces polies



a. bloc 6.
Face droite
(débit d'injection porté à 10 mm³/s
depuis 23:38:08).



b. Bloc 8.
Face droite
(débit d'injection de 4 mm³/s).



c. Bloc 9.
Face gauche
(débit d'injection de 10 mm³/s).

lèvres de la fracture. Pour calculer l'ouverture de fracture au droit d'un instrument, les allongements du tableau IX doivent donc être corrigés de la déformation matricielle du granite de Vire.

La correction est plus importante pour les extensomètres, car ils sont environ trois fois plus longs que les jauge. Un calcul simple mené en élasticité linéaire isotrope permet de majorer cette correction par la valeur de $15 \mu\text{m}$, en supposant que la pression du liquide dans les fractures est en tout point égale à la pression dans le forage.

L'ordre de grandeur de l'ouverture des fractures est donc de quelques dizaines de micromètres.

TABLEAU IX
Allongements maximaux
subis par les extensomètres et les jauge
des blocs 6, 8 et 9

Bloc	Extensomètre/jauge	Allongements maximaux des extensomètres (10^{-6} m)	Allongements maximaux des jauge (10^{-6} m)
6	J_EXT1/rupture	79	> 180 (?)
8	J_EXT2/J_SURF3	31	49
9	J_EXT1/J_SURF10	94	66

Conclusion

Les résultats d'un programme d'essais visant à contrôler la fracturation hydraulique de quatre échantillons de granite de Vire viennent d'être présentés. Trois des quatre échantillons ont été fracturés par injection d'eau à débit imposé. Pour un rayage de profondeur égale au tiers du diamètre du forage, la pression critique est comprise entre 7,7 et 9,9 MPa, soit 30 à 50 % plus faible que la résistance en traction indirecte du granite de Vire. De plus, la pression critique ne varie pas avec le débit d'injection. À débit imposé, les fractures se propagent à pression d'eau constante dans le forage et à vitesse contrôlée. L'ouverture maximale des fractures est de quelques dizaines de micromètres. Toutefois, malgré les symétries géométriques et de chargement des blocs, l'initiation et la propagation des fractures ne sont pas symétriques par rapport au forage d'injection, sauf à très faible vitesse de sollicitation (débit de $1 \text{ mm}^3/\text{s}$). De plus, les traces des fractures sur les

faces des blocs sont rectilignes, mais dévient légèrement du plan de rayage censé les contenir. Bien que la faible anisotropie du granite de Vire mise en évidence par les mesures de vitesse des ondes longitudinales ait été négligée en première instance, Descantes (1998) établit qu'elle a pu jouer un rôle vis-à-vis des déviations observées.

Ce travail constitue une première étape, au cours de laquelle des matériaux ont été mis au point et des mécanismes liés à la fracturation hydraulique appréhendés qualitativement et quantitativement. Ces matériaux pourraient permettre, dans une seconde étape, de raccorder les expériences au domaine du découpage par minage, tout d'abord en remplaçant le liquide par un gaz, ensuite en pratiquant deux forages débouchant dans les zones étanches et en simulant une expérience de découpage à l'aide d'un liquide puis d'un gaz.

Remerciements. Les auteurs remercient M. H. Héraud, Chef du groupe Sols et roches au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, M. L. Rochet, Chargé de mission pour le secteur Mécanique des roches au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon, ainsi que les agents de la section Essais et recherche dirigée par G. Mazzoleni, MM. D. Rozier, P. Coulon, L. Fania et J.-C. Richard pour leur précieuse contribution à la mise au point et à la réalisation des essais.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ATCHISON T.C., DUVAL W.I., PUGLIESE J.M. (1964). *Effect of decoupling on explosion generated strain pulses in rock*, US Bureau of Mines, rapport RI 6333, 49 pages.
- BLAIR S.C., THORPE R.K., HEUZE F.E. (1990). Propagation of fluid-driven fractures in jointed rock. Part 2 - Physical tests on blocks with an interface or lens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 27, 4, pp. 255-268.
- BOUTÉCA M., SARDA J.-P. (1987). État de l'art en fracturation hydraulique, *Revue de l'Institut français du Pétrole*, Vol. 42, 1, pp. 39-75.
- CHRISTMANN W. (1971). Le mécanisme du tir au rocher, *Industrie Minérale*, N° spécial du 15 novembre, pp. 134-145.
- DEFLANDRE J.-P., SARDA J.-P. (1990). Hydraulic fracturing of rock samples and monitoring of the associated acoustic activity, In *Rock Mechanics, Proceedings of an international symposium*, Golden, 18-20 june 1990, Rotterdam, Balkema, pp. 711-718.
- DESCANTES Y. (1998). *Étude expérimentale et théorique des mécanismes gouvernant l'initiation et la propagation contrôlées de fractures dans le granite de Vire par injection quasi statique d'eau*, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 189 pages.

- FOURNEY W.L., BARKER D.B., HOLLOWAY D.C. (1981), Model studies of explosive well stimulation techniques, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 18, 2, pp. 113-127.
- GHOSH A. (1990), *Fractal and numerical model of explosive rock fragmentation*, Ph.D. Thesis, University of Arizona, 491 pages.
- HÉRAUD H., RAT M., REBEYROTTE-LAVESTE A., ROCHE L. (1991), Optimisation du découpage des massifs rocheux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 175, pp. 67-75.
- KUTTER H.K. (1967), *The interaction between stress wave and gas pressure in the fracture process of underground explosion in rock, with particular application to presplitting*, Ph.D. Thesis University of Minnesota, 203 pages.
- MATSUNAGA I., KOBAYASHI H., SASAKI S., ISHIDA T. (1993), Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring, In *Rock Mechanics, Proceedings of an international symposium*, Madison, 27-30 june 1993, Rotterdam, Balkema, pp. 909-912.
- NICHOLLS H.R., DUVALL W.I. (1966), *Presplitting rock in the presence of a static stress field*, US Bureau of Mines, rapport RI6843, 19 pages.
- Société de l'Industrie minérale (1995), *Mémento des Mines et Carrières*, nouvelle série, 1, Section 4 L'industrie des roches ornementales.
- WEBER P., PANET M. (1971), Découpage et prédecoupage à l'explosif. Aspects théoriques. Aspects pratiques, *Revue de l'Industrie minérale*, N° spécial du 15 juillet, pp. 89-98.
- ZOBACK M.D., RUMMEL F., JUNG R., RALEIGH C.B. (1977), Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 14, 2, pp. 49-58.

ABSTRACT

Hydraulic fracturing of Vire granite blocks in the laboratory

Y. DESCANTES - J.-P. MAGNAN - G. MAZZOLENI - J.-F. SERRATRICE

An experimental study of the mechanisms that govern the hydraulic fracturing of Vire granite samples is presented. Four blocks were subjected to controlled injection of water in a grooved borehole. The pressure and volume of the injected water and the length and width of the fractures were monitored. When the depth of the grooving was one third of the diameter of the borehole, the critical pressure was between 7.7 and 9.9 MPa, i.e. 30 to 50% lower than the indirect tensile strength of Vire granite. Furthermore, the critical pressure does not vary with the rate of injection. At constant rate of flow, the fractures propagate at constant pressure in the borehole and at a constant rate. The maximum opening of the fractures was a few tens of micrometres. However, despite the fact that the geometry and loading of the blocks were symmetrical, fracture initiation and propagation were not symmetrical with respect to the injection borehole, except at a very low rate of stress. In addition, the fracture lines on the sides of the blocks were rectilinear, but deviating slightly from the grooving plane that is meant to restrict them. Although at the outset the slightly anisotropic nature of Vire granite as revealed by the speed of longitudinal waves was not taken into account, this may have been responsible for the observed deviations.