

**inversion de données inclinométriques
obtenues au cours de deux expériences
de fracturation hydraulique**

**inversion of tiltmeter data obtained
during two hydraulic fracturing experiments**

Ph. JULIEN*

Ingénieur géologue et géophysicien
étudiant en doctorat de géophysique interne
Institut de Physique du Globe, Laboratoire de Sismologie.

B. SALEH*

Ingénieur des travaux géographiques, étudiant en doctorat de géophysique appliquée
Institut de Physique du Globe, Laboratoire de Sismologie

P.A. BLUM*

Physicien adjoint à l'Institut de Physique du Globe
Laboratoire de Sismologie

D. DESPAX**

Ingénieur chez Total (Compagnie Française des Pétroles)

Résumé

Deux expériences de fracturation hydraulique horizontale ont été effectuées à Tranqueville (Lorraine) grâce à des injections d'eau sous forts débits. Les déformations du sol induites ont été mesurées par des inclinomètres en silice très sensibles et présentant une très faible dérive instrumentale. Le modèle de fracture choisi est une zone de rupture circulaire horizontale. Une inversion probabiliste des inclinaisons a permis de vérifier la profondeur de propagation de la cassure et de déterminer les dimensions et la migration de la fracture créée. Lors de la deuxième manipulation, l'évolution du rayon de la rupture a été suivie grâce au traitement des mesures de trente-deux inclinomètres.

Abstract

Two hydraulic fracturing experiments at high pumping rates were carried out at Tranqueville (Lorraine, France). Ground surface deformations resulting from the injections were measured using very sensitive silica based tiltmeters with a very low instrumental drift. A horizontal penny shaped crack model was used to interpret the results. Based on a probabilistic inversion of tiltmeter data it was possible to calculate the depth of the rupture as well as determine the extent of the hydraulically induced fracture. In the second experiment it was possible to follow the evolution of the crack front by inverting the measurements recorded on thirty-two tiltmeters.

* Institut de Physique du Globe, Laboratoire de Sismologie
Tour 24 - 4^e étage, Université Pierre et Marie Curie, 4, place
Jussieu, 75230 PARIS cedex 05.

** Compagnie Française des Pétroles, Département Production,
Tour Chenonceau, 204, rond-point du pont de Sèvres, 92516
Boulogne Billancourt cedex.

INTRODUCTION

Lors d'une expérience de fracturation hydraulique, il est souvent difficile de définir les zones d'écoulement du fluide injecté. Afin de mieux déterminer les caractéristiques géométriques de la fracture induite (dimensions, position...), de telles opérations sont surveillées par des mesures inclinométriques (EVANS, 1981) ou plus fréquemment par une écoute sismo-acoustique (RALEIGH et coll., 1972; ALBRIGHT et coll., 1980; PEARSON, 1981; CORNET et coll., 1983). Une méthode probabiliste d'inversion est utilisée ici pour interpréter les variations d'inclinaisons du sol mesurées au cours d'injections à forts débits. Les résultats sont cohérents avec la théorie et les données. La présentation du calcul sera précédée de la description des différentes expériences.

1. DESCRIPTION DES EXPÉRIENCES ET ACQUISITION DES DONNÉES

Deux injections furent réalisées en novembre 1981 et septembre 1982 à Tranqueville (Lorraine, France) par une association regroupant l'Institut Français des Pétroles (I.F.P.), Gaz de France (G.D.F.), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) et la Compagnie Française des Pétroles (TOTAL), cette dernière étant opératrice. On a foré deux sondages verticaux TRA1 (puits tubé) et TRA2 (forage en découvert), distants de 60 m. L'injection d'eau dans le premier puits est destinée à le relier au second par une fracture hydraulique horizontale. Cette liaison devrait par la suite permettre la combustion in situ de schistes bitumineux. Lors de la première manipulation, 100 m³ d'eau furent injectés dans TRA1 pour induire une cassure de la roche à la profondeur de 224,5 m. Les déformations superficielles ont été mesurées par un réseau d'inclinomètres en silice (fig. 1). Les courbes

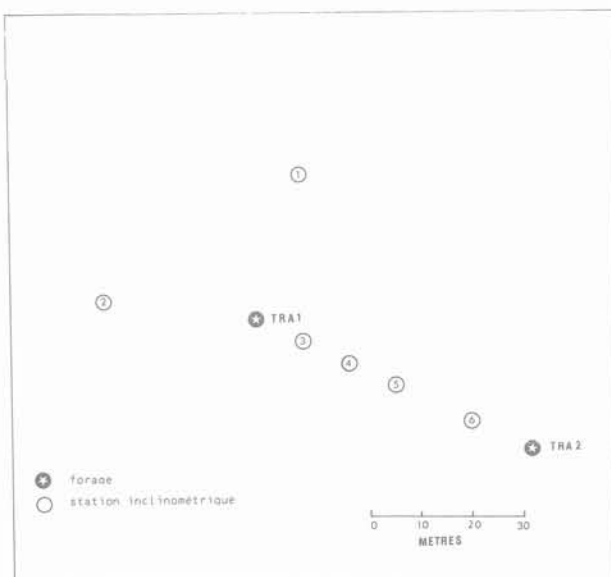


Fig. 1. — Réseau d'inclinomètres (Tranqueville, novembre 1981).

finales obtenues, après suppression de la dérive, présentent une variation maximale d'inclinaison de 3 μ rad (fig. 2). Cette expérience n'ayant pas permis la jonction avec le puits TRA2, il a été décidé de réaliser à la même profondeur une nouvelle injection de 1 000 m³ d'eau qui serait surveillée par un réseau plus conséquent d'inclinomètres, ces derniers s'étant révélés parfaitement adaptés aux mesures considérées.

1.1. Présentation du modèle et détermination du nouveau réseau de capteurs

SNEDDON (1946) et SUN (1969) ont calculé le déplacement vertical du sol lors de l'ouverture à une profondeur h d'une fracture circulaire, horizontale, pressurisée uniformément, de section elliptique, de volume V et de rayon a (modèle de fracture en forme de pièce de monnaie ou « penny shaped crack model »).

A la distance r du puits d'injection, le soulèvement (SUN, 1969) est :

$$W(r) = \frac{8(1 - \nu^2)(P - \gamma h)a}{\pi E} \left[\sqrt{k} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{h}{a\sqrt{k}} \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (0)$$

où :

- ν est le coefficient de Poisson,
- E est le module de Young,
- P est la pression dans la fracture hydraulique,
- γ est la masse spécifique moyenne de la roche (humide),
- h est la profondeur de la fracture hydraulique (par rapport à la surface du sol),

$$k = \left[X^2 + \left(\frac{2h}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$X = \frac{r^2}{a^2} + \frac{h^2}{a^2} - 1,$$

$$\text{et } \tan \theta = \frac{2h}{Xa} \text{ avec } \theta \in [0, \pi]$$

soit :

$$\theta = \arctg \frac{2h}{Xa}$$

Compte tenu de $V = \frac{2\pi a^2 e}{3}$ donnant le volume de la fracture, de $e = \frac{4(P - \gamma h)(1 - \nu)a}{\pi \mu}$ (EVANS,

et de la formule classique $\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ reliant le module de rigidité μ au module de Young, on transforme aisément la formule (0) en :

$$W(r) = \frac{3V}{2\pi a^2} \left[\sqrt{k} \sin \frac{\theta}{2} - \frac{h}{a\sqrt{k}} \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (1)$$

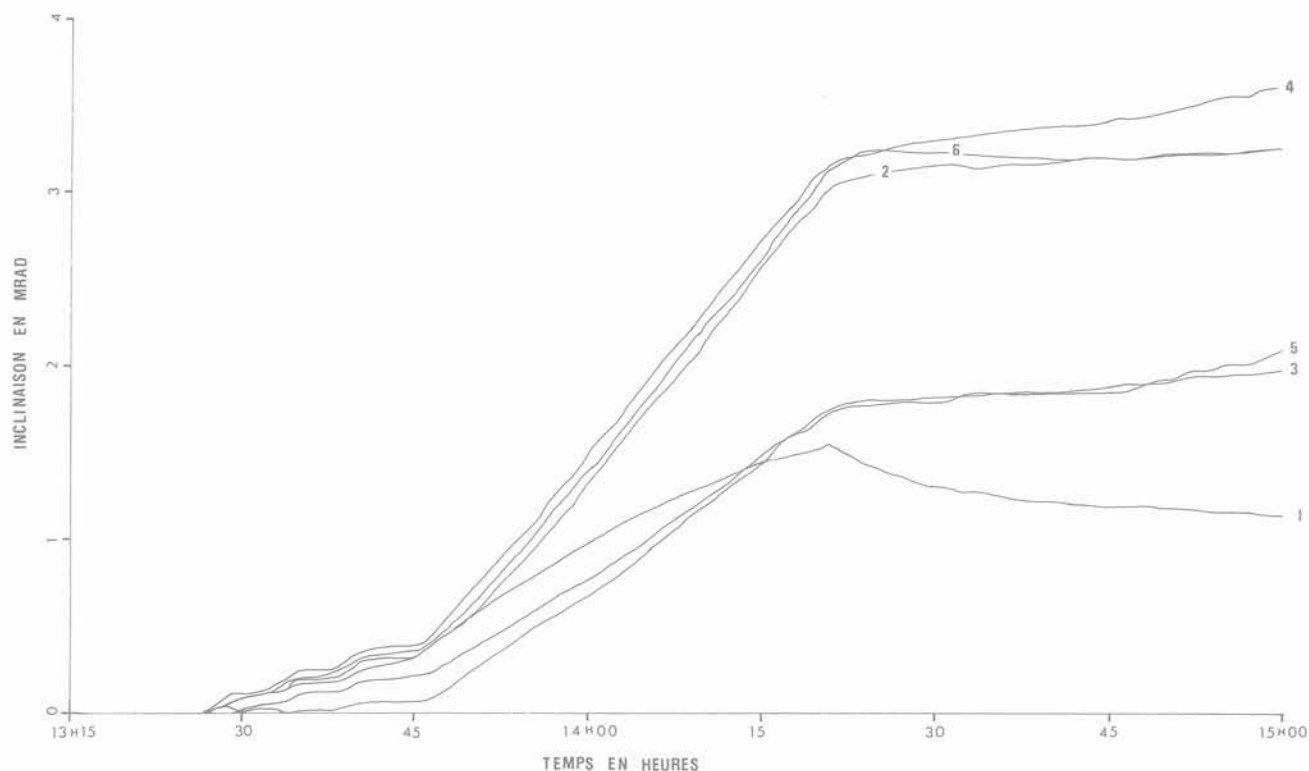


Fig. 2. — Courbes inclinométriques obtenues à Tranqueville (novembre 1981).
Les valeurs positives des inclinaisons représentent ici une pente du sol descendante à partir du puits d'injection.

où n'apparaît aucune des constantes élastiques du milieu.

A la distance r , le sol s'est donc incliné de :

$$I(r) = \frac{dW(r)}{dr} \left(1 + \frac{dU(r)}{dr} \right)^{-1} \approx \frac{dW(r)}{dr}$$

car la valeur relative du mouvement horizontal d'un point est négligeable devant 1. Une fracture centrée sur l'axe du puits induit donc en surface une inclinaison radiale (par rapport au forage d'injection) ayant pour amplitude :

$$I(r) = \frac{3Vr}{2\pi a^4 (\sqrt{k})^3} \left[X \left(\sin \frac{\theta}{2} + \frac{h}{ka} \cos \frac{\theta}{2} \right) - \frac{2h}{a} \left(\cos \frac{\theta}{2} + \frac{h}{ka} \sin \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (2)$$

Cette formule est correcte s'il n'y a pas de perte de charge dans la fissure et si les terrains supérieurs sont homogènes.

Afin de définir l'emplacement du nouveau réseau de surveillance, et en l'absence d'autres renseignements, on a supposé que la profondeur de propagation de la fracture était proche de celle d'amorçage de la rupture (hypothèse vérifiée par la suite). C'est pourquoi les déformées d'une surface initialement horizontale et les

courbes inclinométriques correspondantes ont été calculées pour une profondeur de 200 m avec des valeurs croissantes du rayon et les volumes d'eau nécessaires pour l'obtention des valeurs précédentes (fig. 3). On en déduit alors la courbe (fig. 4) reliant le volume de fluide injecté, à la distance séparant le puits du maximum d'inclinaison observé. Pour des quantités de liquide comprises entre 100 et 1 000 m³, la position de ce maximum se situe à une distance du puits d'injection variant entre 100 et 200 m. Les capteurs ont donc été approximativement placés sur trois cercles centrés sur le forage TRA1, de rayons respectifs 100, 150 et 200 m et comportant quatre plots bétonnés pour les deux cercles extrêmes et huit plots pour le cercle intermédiaire (fig. 5).

1.2. Description des inclinomètres et calcul de leur sensibilité

Les instruments utilisés (BLUM et coll., 1971) sont constitués par un pendule de Zollner bifilaire dont la masse porte un miroir (fig. 6). Cette partie mobile est soutenue par un bâti à trois pieds et protégée par une cloche, munie d'une fenêtre optique et vidée au préalable par une pompe à deux étages. L'originalité et l'avantage de ce capteur viennent du fait que toutes les parties intervenant dans la stabilité de l'appareil sont en silice et sont soudées entre elles. Il en résulte

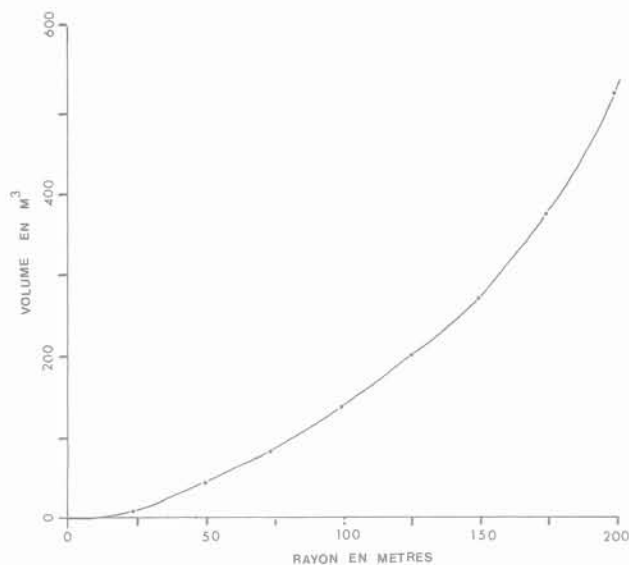


Fig. 3. — Courbe approximative reliant rayons et volumes pour une fracture hydraulique circulaire. Cette figure a été empiriquement tracée à partir de données et formules présentées par Evans (1981).

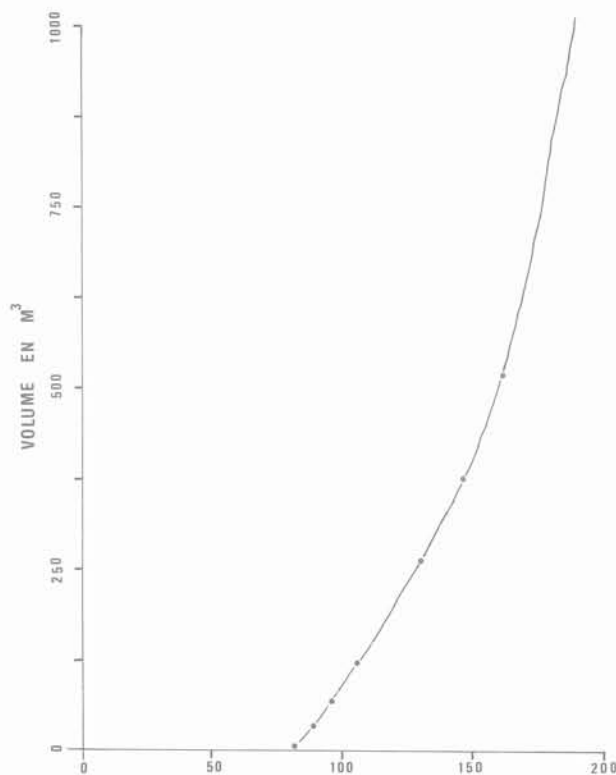


Fig. 4. — Courbe reliant le volume d'eau injecté à la distance séparant le puits du maximum d'inclinaison observé.

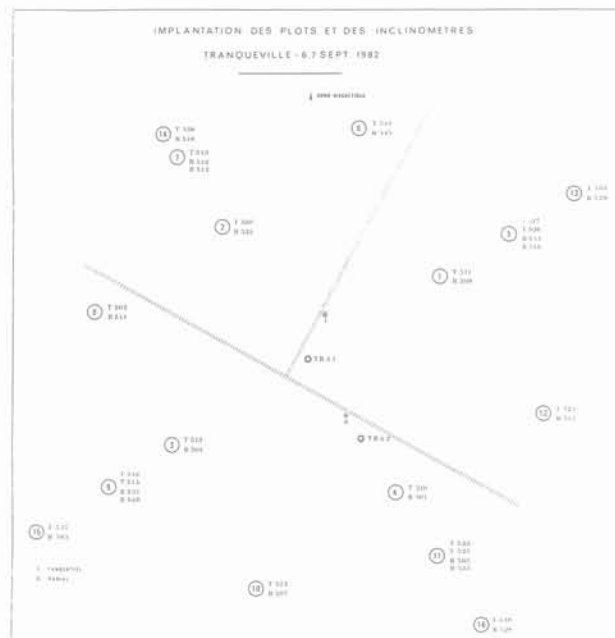


Fig. 5. — Réseau d'inclinomètres (Tranqueville, septembre 1982).

aussi bien un coefficient thermique qu'une dérive par fluage exceptionnellement faibles.

L'angle ξ de rotation de la masse est relié à l'angle ε de l'inclinaison du sol par la relation :

$$\xi = \frac{g T^2}{4 l \pi^2} \varepsilon$$

où T est la période du mouvement pendulaire, l la longueur réduite du pendule et g la constante de l'attraction terrestre.

Le mouvement de la masse est amplifié par un système optique : une lanterne envoie sur le miroir un rayon lumineux qui vient former l'image d'un diaphragme rectangulaire sur une cellule double photo-résistante. Le déplacement d du spot lumineux sur la cellule est défini par :

$$d = 2 K L T^2 \varepsilon \quad (3)$$

où K est la constante de l'appareil et L la distance séparant le miroir de la cellule.

Le calcul de la sensibilité des capteurs a été effectué de manière à pouvoir enregistrer la plus grande inclinaison. (Le spot doit rester dans le champ de la cellule en fin d'expérience). La valeur maximale prédite est obtenue grâce aux courbes inclinométriques résultant de la programmation de la formule (2). Elle est prévue pour les volumes les plus élevés et au niveau des inclinomètres les plus éloignés et doit être proche de 20 μ rad. En reportant les valeurs $d = 5$ mm, $K = 19$ et $L = 110$ mm dans la formule (3), le réglage de la période du mouvement de la masse est alors fixé à 8 secondes environ. Physiquement, cette période mesure la proximité de l'axe de rotation du pendule et de la verticale du lieu considéré.

1.3. Déroulement de l'essai et présentation des données

Quarante inclinomètres ont été placés sur les seize plots: douze plots supportent deux inclinomètres chacun: un inclinomètre mesurant les variations d'inclinaison du sol dans la direction du puits d'injection (inclinomètre radial noté R) et un inclinomètre opérant dans la direction perpendiculaire (inclinomètre tangentiel noté T) (fig. 5). Quatre plots situés à 150 m environ du puits comprennent quatre capteurs (deux radiaux et deux tangentiels) afin de vérifier la cohérence des enregistrements. Dans la pratique, trente-deux inclinomètres fonctionnèrent convenablement. L'acquisition des données a été réalisée sur enregistreurs analogiques par la société TELEMAT.

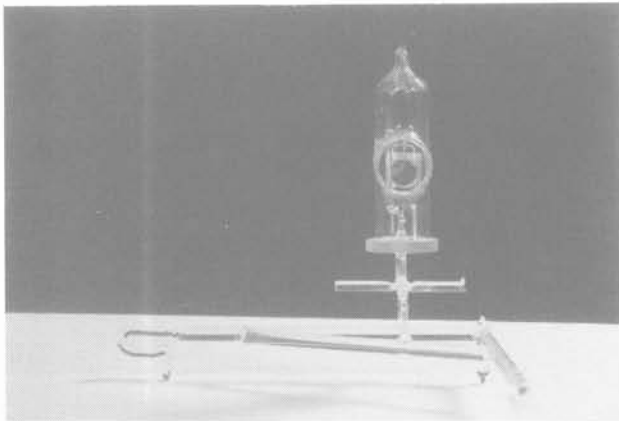


Fig. 6. — Inclinomètre bifilaire en silice construit par P.A. Blum.

L'injection commença le 6 septembre 1982 à 14 h 40. Après une injection de 8 m^3 d'eau engendrant une variation moyenne de $0,4 \mu\text{rad}$ sur les inclinomètres les plus proches, le pompage fut volontairement arrêté deux fois. Vers 17 h, 100 m^3 étaient déjà injectés et un débit de pompage de $100 \text{ m}^3/\text{heure}$ était maintenu par la suite. La communication avec TRA2 fut établie pour un volume de 400 m^3 . L'injection s'arrêta à 24 h après un pompage de 800 m^3 mais les mesures de déformations du sol continuèrent encore pendant plusieurs heures.

Les plots étaient posés sur la roche mais latéralement en contact avec la terre. Il semble que ce contact ait entraîné une certaine instabilité des blocs de béton. Malgré la protection thermique des plots et des instruments, et de bonnes conditions climatiques (temps stable et nuageux), la plupart des inclinomètres présentèrent une dérive instrumentale de faible amplitude, probablement due à l'instabilité des plots. Cette dérive est évaluée pour chaque capteur aux deux arrêts de pompage et à l'issue de l'injection. Dans l'impossibilité de pouvoir précisément la quantifier, elle a été supposée constante (ou linéaire) durant les essais. Les résultats de l'inversion témoignent a posteriori du bien-fondé de cette hypothèse.

Après numérisation des enregistrements de 14 h 00 le 6 septembre à 2 h 30 le 7 septembre (pas d'échantillonnage égal à deux minutes), la valeur de la dérive

est soustraite aux données brutes de manière à obtenir pour chaque inclinomètre les différentes courbes corrigées (fig. 7).

L'amplitude des inclinaisons tangentielles est faible devant celle des inclinaisons radiales: ceci indique l'absence de grandes irrégularités dans les contours de la rupture et un bon centrage de la fracture autour du puits d'injection. Les schémas vectoriels synthétiques (fig. 8) représentent l'évolution des inclinaisons au cours de l'expérience.

2. INTERPRÉTATION DES DONNÉES: INVERSION DES INCLINAISONS

Les courbes inclinométriques tracées d'après la formule (2) ont servi de référence au cours des essais et ont permis, par comparaison avec les mesures de terrain, de suivre l'évolution globale de la fracture durant l'expérience. Toutefois, cette approche repose sur une hypothèse peu justifiée. En effet, la courbe de la figure 3, juste dans le cas où elle a été établie, ne devient que très approximative dans de nouvelles conditions. Seule une inversion correcte des données peut alors fournir des résultats satisfaisants. Il faut cependant que la méthode utilisée soit bien adaptée à la résolution de problèmes non linéaires mais surtout instables. Intuitivement, on conçoit bien qu'une fracture profonde de faible diamètre engendre une déformation du sol presque identique à celle induite par une fracture superficielle de même volume mais de rayon plus important. En d'autres termes, une faible variation des inclinaisons peut être à l'origine d'un changement radical des paramètres recherchés.

Il sera successivement présenté l'algorithme de la méthode et les résultats des deux expériences de fracturation hydraulique.

2.1. Principe de la méthode

Tout système physique est déterminé par un nombre de variables se subdivisant en paramètres représentatifs du problème (profondeur, rayon, volume, position du centre... de la fracture) et en données mesurées. TARANTOLA et VALETTE (1982) considèrent le problème inverse comme une combinaison d'informations. La connaissance a priori du système est constituée par une information a priori sur les données (connaissance des mesures d'inclinaisons et des erreurs qui leur sont liées) et sur les paramètres (connaissance de la profondeur d'amorçage de la rupture, du volume de la fracture — si l'on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de percolation matricielle dans les schistes —, ...). On dispose aussi d'une information théorique sur la réalité physique: il s'agit du modèle choisi reliant entre elles toutes les variables du problème (formule (2)). La conjonction de toutes ces connaissances permet d'obtenir une vision a posteriori du système qui est la solution du problème inverse. La question ayant été résolue dans le cas général, on ne montrera ici que l'algorithme de calcul dans le cadre strict du modèle choisi (inversion de N inclinaisons radiales lors de la création d'une fracture circulaire centrée sur le puits d'injection). La présentation qui suit ne détermine que

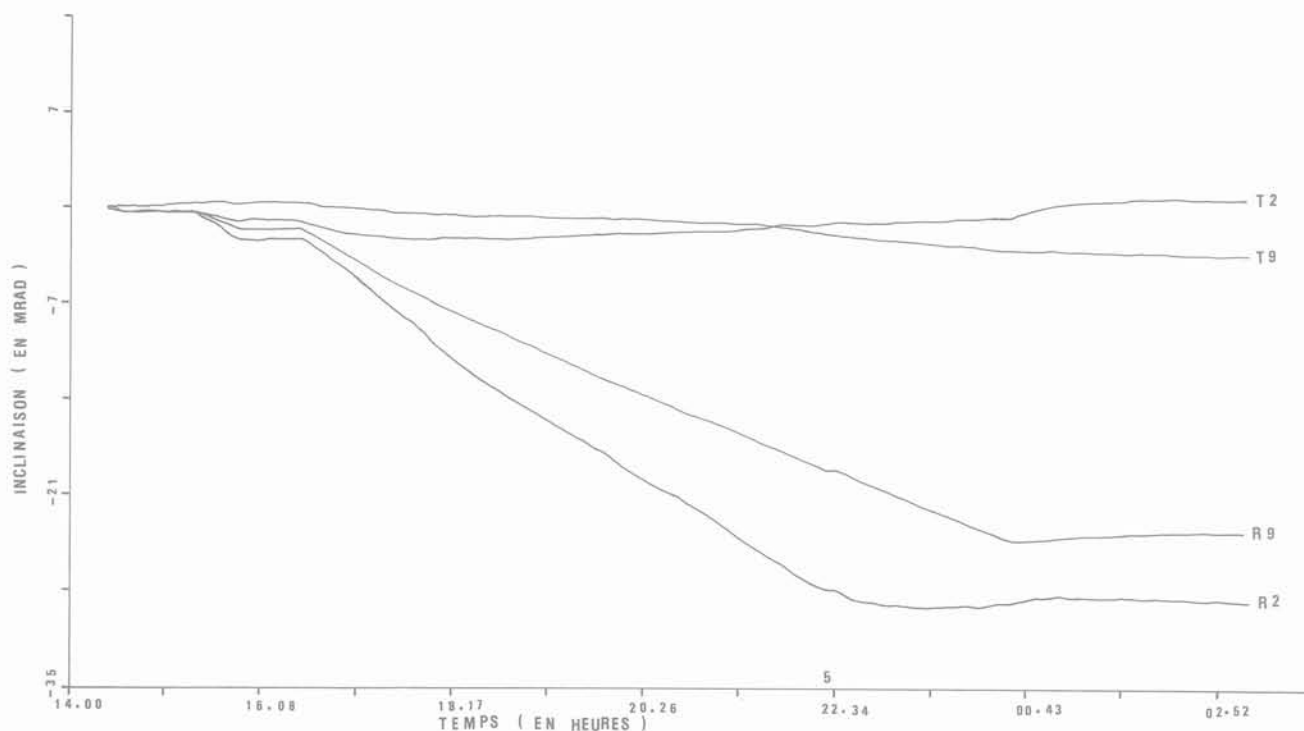


Fig. 7. — Exemples de courbes inclinométriques (Tranqueville, septembre 1982). Les deux arrêts de pompage en début d'injection sont bien visibles. Les valeurs négatives des inclinaisons représentent ici une pente du sol descendante à partir du puits d'injection.

deux paramètres, notés par exemple A et B, mais se généralise aisément dans les autres cas.

On choisit un intervalle de variation $[A_1, A_n]$ où on est sûr de trouver la valeur de A cherchée et dans lequel A varie avec un pas constant entre A_1 et A_n . De même, $B \in [B_1, B_m]$. Pour tout couple (A_i, B_j) où $A_i \in [A_1, A_n]$ et $B_j \in [B_1, B_m]$, on calcule par la formule (2) l'inclinaison théorique I_k en chaque site de mesure et on définit une densité de probabilité par :

$$F(A_i, B_j) = \exp - \sum_{k=1}^N \frac{|S_{k_{mes}} - I_k(A_i, B_j)|}{\sigma_k} \quad (4)$$

où k est un indice indiquant le numéro de l'inclinomètre ($k \in [1, N]$), $S_{k_{mes}}$ est l'inclinaison mesurée par l'instrument n°k et σ_k l'erreur affectée à la mesure $S_{k_{mes}}$. La visualisation discrète de la relation (4) est facile sur une grille à deux dimensions représentant l'espace des paramètres A et B et aux nœuds de laquelle apparaissent les différentes valeurs de la fonction F. On définit ainsi un nuage de valeurs non nulles délimitant bien le domaine où se trouve le couple (A,B) recherché. Comme la plupart du temps, on a :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F(A_i, B_j) \neq 1$$

il est en fait plus exact de parler de densité de mesure pour F bien que par abus on emploie souvent le terme de « probabilité ». Cette densité — que l'on peut du reste normaliser à son gré — est alors exploitée en traçant les courbes de densité de mesure marginale relatives à chaque paramètre (fig. 9). Les valeurs désirées sont alors calculées par des estimateurs centraux (moyenne dans notre cas). Le degré de confiance que l'on peut accorder à ces résultats est précisé par des estimateurs de dispersion (écart-type σ ici). On peut enfin étudier les relations éventuelles des deux paramètres en déterminant leur coefficient de corrélation linéaire.

Cette formulation reste valable avec un problème sous-déterminé ou surdéterminé. Elle semble donc parfaitement indiquée lorsque le nombre de capteurs de déformation disposés en surface est limité. D'autres méthodes d'inversion (moindres carrés par exemple) peuvent facilement conduire à un résultat erroné dans le cas de problèmes aussi instables du fait de leur convergence vers une solution unique locale (mais pas toujours absolue). L'approche probabiliste en revanche a l'avantage de présenter pour chaque paramètre une courbe de densité de mesure marginale permettant de discuter le résultat obtenu.

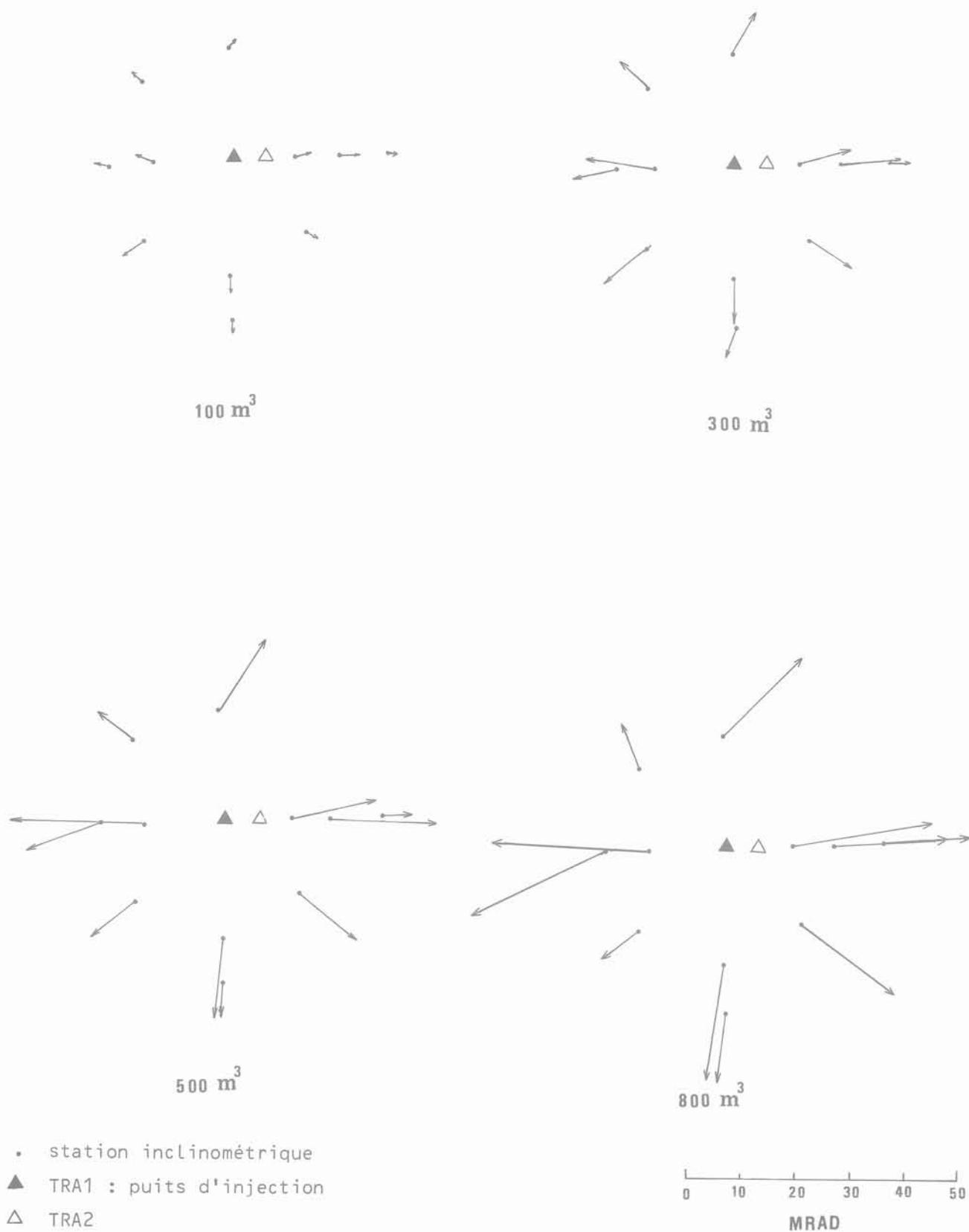


Fig. 8. — Schémas vectoriels synthétiques montrant l'évolution des inclinaisons (Tranqueville, septembre 1982).

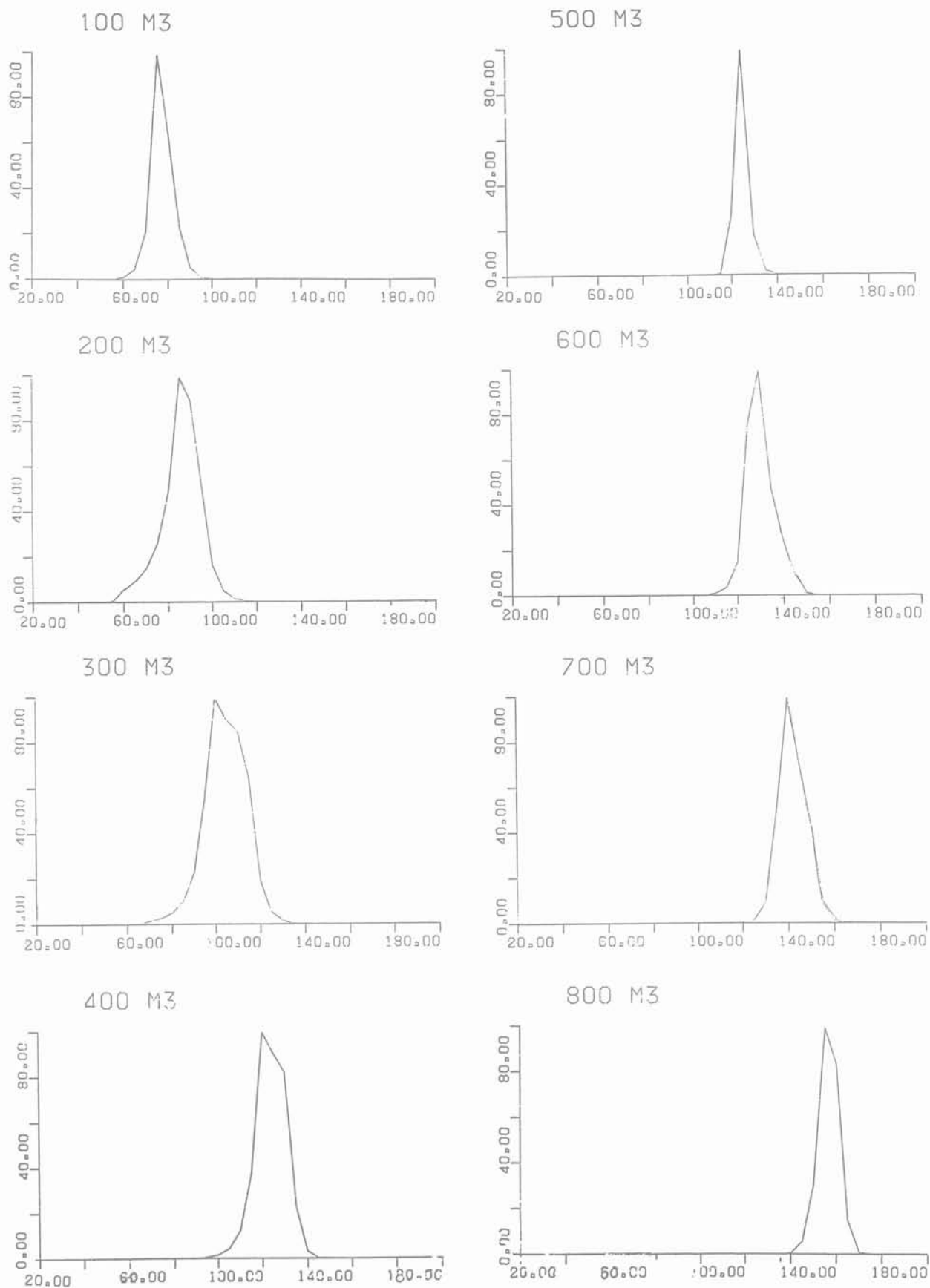


Fig. 9. — Courbes des densités de mesure marginales relatives au rayon.

2.2. Interprétation des données de la première expérience (novembre 1981)

Les six inclinaisons radiales obtenues à l'issue de l'injection ont été d'abord inversées pour déterminer le rayon et la profondeur de la fracture. Le nuage des valeurs non nulles de la densité de mesure s'étire dans la grille des paramètres de la zone des fractures profondes à faibles rayons jusqu'au domaine des fractures superficielles à grandes extensions. Ceci vérifie a posteriori l'instabilité de notre problème. Cependant la bonne qualité des mesures permet de définir dans la grille des paramètres le couple de valeurs ayant parmi toutes les possibilités envisagées la plus forte densité de mesure: $h = 230$ m et $R = 40$ m. Le calcul des estimateurs centraux donne respectivement h moy. = 229 m (avec $\sigma_h = 14$ m) et R moy. = 46 m (avec $\sigma_R = 23$ m). Il est immédiat que la profondeur de propagation de la rupture est très proche de celle d'amorçage de la fissure (224,50 m). Compte tenu des erreurs de mesure et de manière à mieux contraindre la détermination du rayon, on pourra donc supposer sans crainte par la suite que la fracture se propage à sa profondeur d'amorçage.

En outre, l'enregistrement de l'inclinomètre n° 1 (pas de stabilisation à l'arrêt du pompage) laisse présager une migration de la rupture et par conséquent un excentrement de celle-ci par rapport à TRA1. C'est pourquoi le programme a été modifié afin de calculer le rayon de la fracture et la position finale de son centre C. Ce dernier est défini par ses coordonnées horizontales X_c et Y_c dans un repère orthogonal direct centré sur TRA1 et dont l'axe des abscisses est la ligne des deux puits. Dans ce repère, l'inclinomètre du site n° i de coordonnées $(X_i(i), Y_i(i))$ se trouve à une distance $r' = ((X_i(i) - X_c)^2 + (Y_i(i) - Y_c)^2)^{1/2}$ du centre C. La valeur de l'inclinaison engendrée au point n° i par la fracture est alors $I(r')$ (formule (2)). On dispose dès lors d'une inclinaison mesurée I_{mes} dans la direction du puits et d'une inclinaison $\bar{I}(r')$ calculée angulaire, on compare ces vecteurs en soustrayant la valeur de l'inclinaison mesurée à l'amplitude de la projection $PIR(r') = \cos(\bar{I}(r'), \bar{I}_{mes})$. $I(r')$ de $\bar{I}(r')$ sur $\bar{I}_{mes}$. Moyennant cette modification du problème direct, l'algorithme d'inversion reste le même. Comme on cherche trois paramètres, les densités de mesure sont représentées sur une grille à deux dimensions (X_c et Y_c) pour le centre et par sa courbe marginale pour le rayon. On obtient les résultats suivants:

X_c = abscisse moyenne du centre C = -2 m
avec $\sigma_{X_c} = 5$ m
 Y_c = ordonnée moyenne du centre C = 12 m
avec $\sigma_{Y_c} = 4$ m
 R = rayon moyen final de la fracture = 47 m
avec $\sigma_R = 18$ m

On observe clairement une migration de la fracture vers l'inclinomètre n° 1: la décroissance initiale de l'inclinaison à l'arrêt de l'injection indique donc bien une fuite de liquide à ce niveau. Le centre de la fracture est connu avec une bonne précision.

Le rayon de 47 m confirme le premier résultat obtenu et n'est pas en contradiction avec l'expérience. On sait en effet que la rupture n'a pas atteint TRA2 qui se trouve à 60 m de TRA1. Toutefois, l'écart-type σ_R est grand. Cette imprécision peut être due au nombre limité de mesures (six capteurs seulement), à la disposition particulière des inclinomètres (quatre instruments sur le même axe) et à l'inexactitude du modèle (fracture horizontale circulaire) face à la réalité probablement plus complexe. C'est en particulier pour mieux cerner la forme amiboïde de la fracture que des inclinomètres tangentiels sont installés lors de l'injection suivante.

2.3. Interprétation des données de la deuxième expérience (septembre 1982)

On rappelle que quarante inclinomètres (vingt radiaux et vingt tangentiels) ont été disposés sur le site (fig. 5) pour mesurer les déformations du sol dues à une injection de 800 m³ en 9 h 20 min à une profondeur de 224,5 m. La prise en compte des mesures inclinométriques tangentielles nous amène à encore modifier notre formulation du problème direct. On doit comparer en chaque site inclinométrique l'inclinaison théorique $\bar{I}(r')$ (radiale par rapport à C) non seulement à l'inclinaison mesurée $\bar{I}_{mes}$ (radiale par rapport au puits) mais aussi à l'inclinaison tangentielle enregistrée I_{mes} . Cette dernière peut être orientée dans un sens ou dans l'autre. Après avoir arbitrairement choisi une convention de signe et défini un être mathématique qui assure la projection PIT(r') de $\bar{I}(r')$ sur $\bar{I}_{mes}$ en respectant cette convention, on calcule pour chaque triplet de paramètres (X_c, Y_c, R) la densité de mesure:

$$F(X_c, Y_c, R) = \exp - \left[\sum_{k=1}^N \frac{|PIR_k(X_c, Y_c, R) - I_{r_{mes}}|}{\sigma_{r_k}} + \sum_{k=1}^N \frac{|PIT_k(X_c, Y_c, R) - I_{t_{mes}}|}{\sigma_{t_k}} \right] \quad (5)$$

où k est un indice indiquant le numéro des plots supportant les inclinomètres et où σ_{rk} et σ_{tk} représentent les erreurs que l'on peut affecter aux mesures respectivement radiale et tangentielle effectuées sur le plot n° k .

On obtient les résultats suivants:

— La fracture est restée centrée sur le puits d'injection pendant toute l'expérience.

— Pour des volumes croissants de liquide injecté, les courbes de densité de mesure marginale relatives au rayon ont été tracées (fig. 9). On en tire les estimations moyennes correspondantes (tableau 1) d'où l'on déduit la courbe traduisant l'évolution du rayon de la fracture, en fonction du volume pompé, au cours de l'injection (fig. 10).

On constate que pour une injection de 100 m³, le rayon de la fracture est plus grand que celui obtenu lors de la première expérience. Ceci est normal puisque dans le deuxième cas, la roche avait déjà été cassée. Cependant, certains points restent obscurs et en particulier l'allure en deux parties de la fig. 10. La jonction des puits TRA1 et TRA2 ne peut être à l'origine d'une telle rupture de pente, la liaison établie

entre les deux forages ne permettant qu'un minuscule débit. Peut-on alors expliquer cette anomalie par la propagation d'une deuxième fracture quand le volume injecté dépasse 400 m³?

Tableau 1

Volume injecté (en m ³)	Rayon estimé (en m)	Ecart-type de l'estimation (en m)
100	77	5
200	86	9
300	104	9
400	124	7
500	125	3
600	130	6
700	142	6
800	157	4

Il est en outre surprenant de constater que pour un volume de 400 m³, le rayon de la fracture est proche de 120 m alors que c'est à ce moment de l'injection qu'un capteur de pression placé dans le puits TRA2 (situé à 60 m de TRA1), indique l'établissement de la jonction entre les deux forages. On pense en fait que la rupture s'est effectivement très vite propagée jusqu'à un rayon de 60 à 70 m mais qu'un pincement de la fracture au niveau du puits TRA2 n'a rendu la circulation d'eau possible entre les deux sondages que pour des volumes injectés plus importants (400 m³) alors que le rayon moyen de la fracture était déjà bien supérieur à 60 m. On met là en évidence la limite du modèle de la fracture circulaire horizontale.

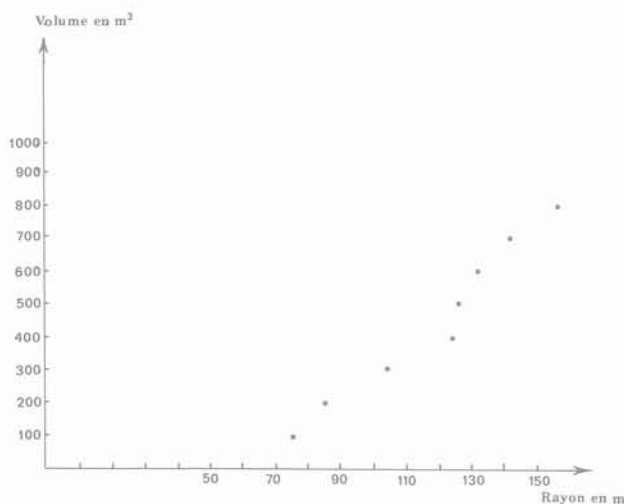


Fig. 10. — Evolution calculée du rayon de la fracture au cours de l'injection.

Connaissant le rayon a et le volume V de la fracture, son épaisseur centrale peut facilement être déterminée par la formule:

$$e = \frac{3V}{2\pi a^2}$$

Pour $V = 800 \text{ m}^3$ et $a = 150 \text{ m}$, on obtient $e = 17 \text{ mm}$.

Une vérification simple de notre inversion peut être réalisée en recalculant la formule (2) pour les diverses valeurs du rayon trouvées (et les volumes correspondants). La différence entre ces inclinaisons recalculées et les mesures effectuées in situ est très faible. Pour un volume injecté de 500 m³ par exemple, cet écart est de l'ordre de 1 à 2 μrad pour les inclinomètres situés à 100 et 150 m de TRA1. Ceci confirme a posteriori la validité de l'inversion. Cependant on note que pour des volumes supérieurs, cet écart augmente.

CONCLUSION

Les qualités des mesures inclinométriques d'une part et de la méthode d'inversion utilisée d'autre part, nous ont permis de vérifier la profondeur de propagation d'une fracture hydraulique et de constater la migration latérale de son centre lors d'une première injection. Les mesures d'inclinaisons du sol ont ensuite permis de suivre l'évolution d'une telle rupture horizontale au cours de son extension lors d'une deuxième expérience. Toutefois ces résultats sont limités par le modèle choisi et pourraient probablement être affinés en considérant un modèle plus élaboré. Le choix effectué ici, dont l'avantage essentiel est la simplicité, n'envisage pas par exemple de pendage éventuel de la cassure ou d'autres formes de fracture qu'une rupture circulaire. Et pourtant, les inclinaisons tangentielles mesurées après l'injection, d'un fort volume (fig. 8, $V = 800 \text{ m}^3$) ne sont plus négligeables devant les mesures radiales. Ceci traduit des contours irréguliers de la fracture. Mais n'est-il pas, en vertu du principe de Saint-Venant, difficile de décrire ces irrégularités à partir de mesures effectuées en surface?

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à F.H. CORNET qui a bien voulu relire le manuscrit de cette note et à A. TARANTOLA pour ses conseils.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBRIGHT H.; PEARSON F. — «Location of hydraulic fractures using microseismic techniques». 55th annual conference of Soc. of Petroleum Engineers of AIME (SPE 9509). Dallas (Texas). September 1980.
- BLUM P.A.; GAULON R. — «Détection et traitement des ondes sismiques de très basses fréquences». Annales de Géophysique, tome 27, I.P.G.P., Univ. Paris VI - Editions du C.N.R.S., 1971.
- CORNET F.H.; HOSANSKI J.M., BERNAUDAT F.; LEDOUX E. — «Shallow depth experimentation on the concept of energy extraction from hot dry rocks». First Japan-United States joint seminar on hydraulic fracturing and geothermal energy: Tokyo: co-sponsored by Nat. Scient. Fond (U.S.A.) and Japan Soc. for the Promotion of Science. Martinus Nijhoff publishers, the Hague.

- EVANS K. — «Analysis of ground deformations and description of hydraulic fractures formed during treatment of the Colombia Gas transmission company well 20148-T (Wakefield) in Lorrain county, Ohio, 1980». Report by M.D. WOOD, inc. for Sandia Scientific Laboratories, contract number: 13-2371. February 27, 1981.
- EVANS K. — «Some examples and implications of observed elastic deformations associated with growth of hydraulic fractures in the Earth». or «The growth of shallow hydraulic fractures as viewed through the surface deformation field». National Academy Press Workshop on hydraulic fracturing stress measurements, Monterey, December 2-5, 1981.
- PEARSON C. — «The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks». Journal of geophysical Research, vol. 86, n° B9, p. 7855-7864, september 10, 1981.
- RALEIGH C.B.; HEALY J.H.; BREDEHOEFT J.D. — «Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado». In flow and fracture of rocks. Geophysical Monogr. series p. 275, Am. geophys. Union, Washington D.C., 1972.
- SNEDDON I.N. — «The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid». Proc. Roy. Soc. London, Ser. A 187, p. 229-260, 1946.
- SUN R.J. — «Theoretical size of hydraulically induced horizontal fractures and corresponding surface uplift in an idealized medium». J.G.R., vol. 74, n° 25, p. 5995-6011, 1969.
- TARANTOLA A.; VALETTE B. — «Inverse Problems — Quest for Information». I.P.G.P., Journal of Geophysics, 1982.

