



*document public*

**EVALUATION DE LA FRACTURATION DANS LE FORAGE GPK-1  
A PARTIR DE L'IMAGERIE ARI ENTRE 2870 M ET 3500 M  
(SOULTZ-SOUS-FORETS, FRANCE)**

---

**Albert Genter \***  
**David Genoux-Lubain\*\***

**juillet 1994**  
**Rapport du BRGM R 38099**

**\*BRGM**  
**DIRECTION DE LA RECHERCHE**  
**Département Géophysique et Imagerie Géologique**  
**BP. 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 02 - FRANCE - Tél.: (33) 38 64 34 34**  
**\*\*IPG Strasbourg**  
**5 rue René Descartes, 67084 STRASBOURG CEDEX - Tél.: (33) 88 41 63 00**

Mots clés : Fracturation, imagerie de paroi, géothermie profonde, Soultz-sous-Forêts, France

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

GENTER A., GENOUX-LUBAIN D. (1994) - Evaluation de la fracturation dans le forage GPK-1 à partir de l'imagerie ARI entre 2870 m et 3500 m (Soultz-sous-Forêts, France). Rapport BRGM R 38099, 14 p., 2 fig.

© BRGM, 1994, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

## **RESUME**

L'étude de la fracturation naturelle dans les forages de Soultz-sous-Forêts (Projet de Recherche BRGM/DR S07) s'inscrit dans le cadre du projet Européen de Géothermie Profonde. La comparaison des fractures visibles sur deux logs d'imagerie électrique (ARI, FMI) dans la partie profonde du forage GPK-1 (2870 - 3500 m) permet une hiérarchisation du réseau de fractures. 60% des fractures naturelles visibles sur le FMI sont détectées par l'ARI, contre 11% seulement des fractures induites, c'est-à-dire celles qui sont le plus superficielles. Deux directions de fracturation caractérisent les structures les plus pénétratives dans le granite: une direction majeure orientée N020E et une direction secondaire orientée N150E. Ces directions N020E et N150E représentent la fracturation utile c'est-à-dire celle qui va guider les écoulements dans le granite préfracturé. A partir de lois empiriques extraites de la littérature, des calculs d'ouverture et d'extension des fractures visibles sur l'ARI ont été réalisés. Les résultats bruts obtenus ne sont qu'indicatifs compte tenu du grand nombre d'hypothèses qui sous-tendent ces lois.

## **TABLE DES MATIERES**

1. INTRODUCTION .....	5
2. PRINCIPE DE L'OUTIL .....	5
3. METHODES .....	7
4. RESULTATS .....	7
4.1. Analyse des fractures sur l'ARI et comparaison avec le FMI .....	7
4.2 Les problèmes de détection .....	8
4.3 Comparaison ARI - FMI .....	9
4.4 Orientation du réseau ARI .....	9
5. OUVERTURE ET EXTENSION DES FRACTURES .....	11
5.1 Théorie et limitations .....	11
5.2 Applications numériques .....	12
6. CONCLUSIONS .....	13
BIBLIOGRAPHIE .....	14

## **1. INTRODUCTION**

Le réseau de fractures recoupant le forage GPK-1 de Soultz-sous-Forêts (France), a été étudié principalement dans sa partie profonde à partir de l'imagerie Fullbore Formation MicroImager, appelée FMI (Genter et Dezayes, 1993a et b, Genter et al., in press). Cet outil électrique, qui permet non seulement d'obtenir une image de la résistivité de la paroi du puits avec une très bonne résolution mais aussi de caractériser géométriquement les fractures, n'apporte pas d'informations discriminantes sur la continuité de ces fractures dans le granite. En revanche, l'ARI (Azimuthal Resistivity Imager), qui est aussi un outil électrique d'imagerie, est censé fournir des éléments de réponse quant à ce problème d'extension de fractures au-delà de la paroi du puits. En effet, c'est l'orientation des fractures les plus pénétratives qui doit contrôler les circuits préférentiels des fluides dans le granite.

L'objectif de cette étude est donc de tenter une hiérarchisation du réseau de fractures pénétratifs en comparant dans GPK-1, les données ARI et FMI disponibles entre 2475 et 2525 m, 2580 et 2615 m et entre 2870 et 3500 m de profondeur. Par ailleurs, des travaux récents sur la quantification de l'ouverture et de l'extension des fractures (Faivre, 1993) proposent des lois empiriques qui permettent de calculer grossièrement ces paramètres à partir de la lecture des valeurs de résistivité sur le log ARI. Ces lois, basées sur de nombreuses hypothèses, seront donc appliquées à nos données, tout en gardant à l'esprit que les résultats obtenus ne sont qu'approximatifs et ne constituent en rien des données réelles. Il s'agit principalement d'approcher des ordres de grandeurs relatifs de l'extension moyenne des fractures.

Enfin, la comparaison entre les deux outils d'imagerie va permettre d'affiner la typologie proposée à partir du FMI seul. En effet, l'ensemble des fractures induites par la foration et qui ne possèdent pas d'extension dans le granite, ne seront pas imagées par l'outil ARI car elles constituent un réseau superficiel.

## **2. PRINCIPE DE L'OUTIL**

L'ARI ou Azimuthal Resistivity Imager de Schlumberger est un outil électrique qui combine d'une part, un latéolog standard et d'autre part, un nouveau module qui permet des mesures azimutales. Ce latéolog mixte est équipé d'une électrode supplémentaire qui livre 12 résistivités profondes disposées azimutalement et régulièrement espacées sur l'outil (Davies et al., 1992). L'outil est orienté avec le même système d'inclinométrie que celui utilisé pour le log FMI.

Le log papier couleur ARI (échelles 1/40ème et 1/200ème) se compose de trois éléments distincts (figure 1) :

- une colonne imagerie statique qui en déroulé couvre 360 degrés sur 12 pixels; elle est exprimée en échelle de conductivité fixe,
- une colonne imagerie dynamique qui couvre 360 degrés sur 12 pixels ; elle est exprimée en échelle de conductivité normalisée qui renforce les contrastes locaux,

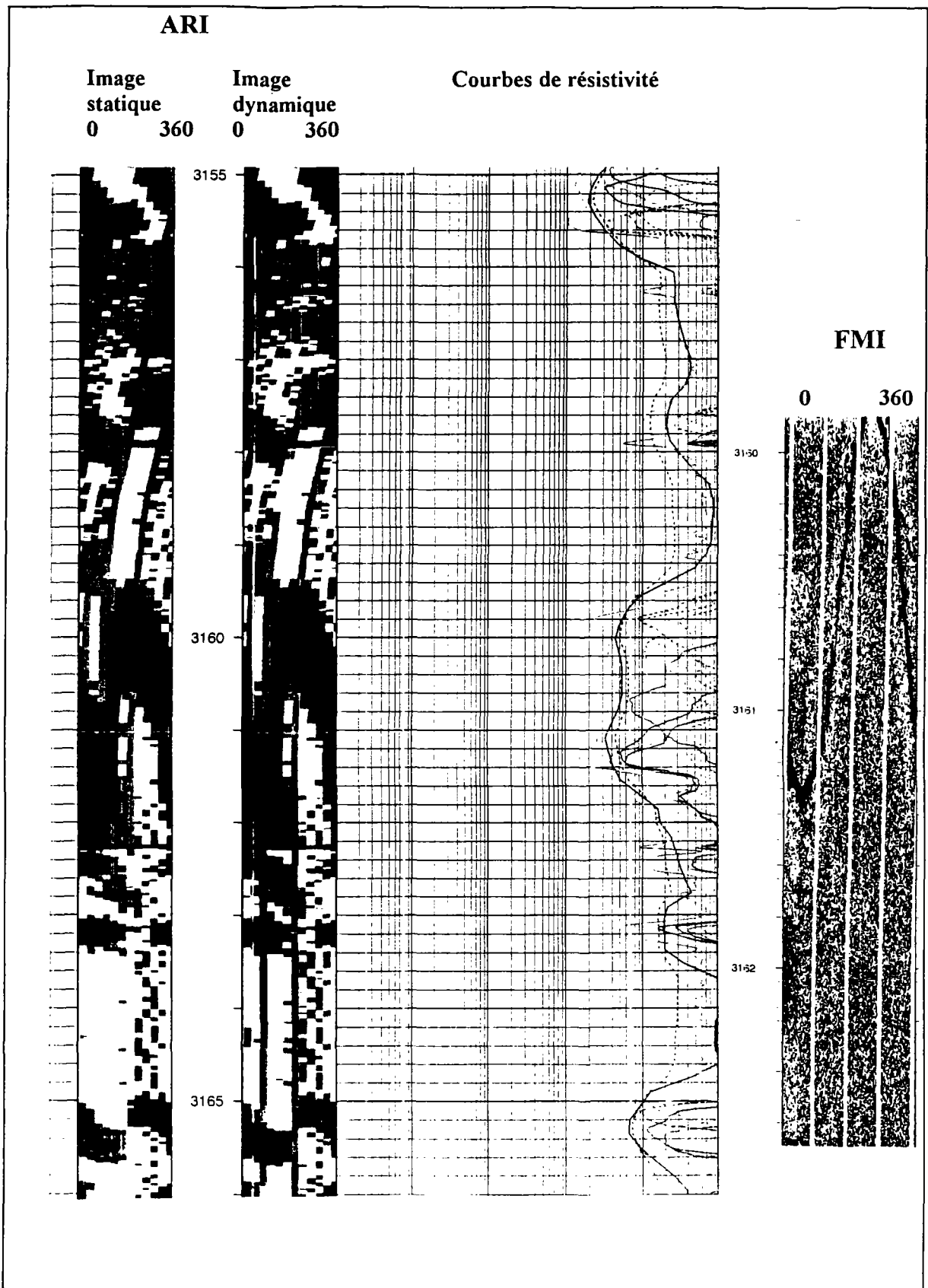


Figure 1 - Exemples de réponse ARI et FMI

- un log de courbes de résistivité (12 électrodes notées AR01 à AR12, une courbe de résistivité *shallow* LLS, une courbe de résistivité *deep* LLD et une courbe de résistivité moyenne LLhr). La somme des 12 résistivités azimutales permet d'obtenir cette résistivité haute résolution LLhr. La résolution verticale de l'outil est l'ordre de 8 pouces pour des diamètres de forages compris entre 6 et 8 pouces (le diamètre de GPK-1 est de 6.25 pouces). D'après Davies et al. (1992), cette courbe LLhr a une profondeur d'investigation comparable à la résistivité LLD et une résolution verticale comparable à la résistivité MSFL (MicroSpherical Focused Laterolog). Compte tenu de la configuration des 12 électrodes azimutales, l'outil possède une faible résolution pour les événements conducteurs superficiels.

### 3. METHODES

On repère sur ce log, l'ensemble des anomalies conductrices évidentes c'est-à-dire noires sur les colonnes images. Elles doivent correspondre à des fractures qui possèdent une certaine profondeur de pénétration dans la formation.

Dans le cas du contexte de Soultz, deux cas principaux ont été étudiés en fonction de la nature du voisinage immédiat de la fracture :

- *les fractures individuelles*; la chute de résistivité se matérialise sur l'image ARI par une sinusoïde noire correspondant à une fracture qui recoupe un environnement résistif donc clair correspondant à du granite sain.
- *les zones de fractures*; la chute de résistivité se matérialise sur l'image ARI par une zone noire, c'est-à-dire conductrice mais qui elle-même, appartient à un milieu conducteur également noir correspondant à du granite altéré. Ces anomalies intrazones fracturées sont donc attribuées à des fractures bien qu'elles ne soient pas systématiquement corrélables avec une sinusoïde visible ou parfaitement exprimée sur l'image.

### 4. RESULTATS

#### 4.1 ANALYSE DES FRACTURES SUR L'ARI ET COMPARAISON AVEC LE FMI

##### a - Fractures naturelles

Les fractures qualifiées de naturelles sur le FMI montrent en général une excellente réponse sur l'image ARI. La taille des pixels étant plus grande sur l'image ARI que sur l'image FMI, la sinusoïde résultante montre une épaisseur apparente plus large. Sur les courbes de résistivités azimutales, deux pics de conductivités sont généralement observés pour une seule et même fracture (figure 1). Ces pics apparaissent au toit et au mur de la fracture et sont à mettre en relation avec la géométrie de l'outil et le fort pendage de la fracture. A une profondeur donnée et pour une fracture à fort pendage, une partie des capteurs azimutaux détectent des éléments conducteurs tandis que l'autre partie des capteurs enregistrent des éléments résistifs. Ce phénomène se répète en s'inversant à la seconde extrémité de la fracture. Pour une fracture horizontale, ce dédoublement de pics conducteurs

n'existent pas puisque les 12 électrodes mesurent à la même profondeur les mêmes gammes de résistivités. La distance verticale entre les deux pics d'une même fracture est proportionnelle au pendage.

Quelques fractures individuelles développent un halo d'altération qu'il est possible de détecter sur l'image FMI par un aspect moucheté. Ce même halo se marque sur l'image ARI par une image très sombre. La largeur de chacun des deux pics est plus importante dans le cas des fractures avec altération que pour celles ne montrant pas d'effet d'éponte.

Le regroupement de fractures par paquets et les altérations du granite (dissolutions, argilisation) sont deux éléments géologiques, caractéristiques du site de Soultz (Genter et al., in press). Sur le FMI, les concentrations de fractures ou zones fracturées altérées sont aisément détectables car noires et seules quelques fractures sont interprétables dans ces zones. Sur l'image ARI, les zones sont encore plus facilement détectables car extrêmement noires. Cependant, les fractures individuelles qui s'y développent, sont quant à elles difficilement repérables. Au cours de cette analyse, on a pris comme hypothèse que les pics majeurs de conductivité présents à l'intérieur des zones, correspondaient à des fractures (Cf. paragraphe méthode).

#### **b - Fractures partielles, en-échelon et verticales induites**

Ces structures montrent sur l'imagerie FMI un caractère discontinu qui leur est propre. Sur l'image ARI, on ne voit pas de sinusoïde mais plutôt des éléments conducteurs horizontaux. On note également l'absence de pics marqués de conductivité à l'aplomb de ces structures induites. L'ensemble de ces caractéristiques militent en faveur d'un effet superficiel de ces structures.

## **4.2. LES PROBLEMES DE DETECTION**

### **a - Fractures proches sur FMI se rassemblent sur ARI**

Lorsque deux fractures parallèles sont trop proches, l'outil ARI les regroupe en une seule sur l'image résultante. En théorie, sa configuration n'est sensée opérer des recouvrements que pour des distances interfractionnelles inférieures à 6 pouces (~15 cm). 5 couples de fractures pentées visibles sur l'image FMI se présentent sous l'aspect d'une fracture unique sur l'image ARI. La distance interfractionnelle moyenne est de l'ordre de 30 cm et est toujours supérieure au 15 cm théorique, valable pour des fractures horizontales.

### **b - Fractures non détectées sur le FMI**

A 3113 m de profondeur, une structure est clairement exprimée sur l'image ARI et non détectée en FMI. Des fractures intrazones, ont été mesurées sur l'image ARI. Elles ne possèdent pas systématiquement d'équivalent sur l'image FMI. Dans des zones de granite sain, plusieurs fractures évidentes sur les deux types d'imagerie, n'avaient pas été analysées sur le FMI. Il s'agissait soit simplement d'oublis, soit de fractures localisées à la limite de deux fichiers images.

### **c - Autres cas**

Entre 3046 - 3047 m de profondeur, il semble qu'il existe un événement électrique conducteur mais dont la géométrie est difficilement caractérisable. Cette portion de structure est visible sur les imageries FMI et ARI. Compte tenu des fortes valeurs de résistivité sur l'ARI et de sa forme énigmatique sur le FMI, on peut envisager une origine superficielle et donc induite pour cette structure.

### 4.3. COMPARAISON ARI - FMI

L'imagerie ARI ne voit pas les fractures d'extension limitée comme en témoignent les statistiques dans l'intervalle d'étude. En effet, sur les 169 fractures de type fractures partielles, fracture en-échelon et fractures verticales induites relevées sur le FMI, 11 seulement ont été identifiées sur l'ARI, c'est-à-dire à peine 8% (Tableau 1). Elles correspondent toutes au type fracture partielle suggérant ainsi qu'il s'agirait probablement de fractures naturelles mais dont la trace est mal exprimée sur la paroi du puits.

L'imagerie ARI est sensible aux structures ayant une certaine extension c'est-à-dire aux fractures naturelles. Sur les 329 fractures naturelles relevées sur le FMI, 191 ont été retrouvées sur l'ARI (Tableau 1). Sur les 790 m de log analysés, une cinquantaine de fractures supplémentaires ont été identifiées au sein des zones de granite altéré ou de granite sain. L'ARI image donc moins de 60% des fractures naturelles visibles en FMI.

TYPE	FMI	ARI Fracture orientée	ARI Zone orientée	ARI Fracture détectée	ARI Zone orientée
Naturelle	329	111	80	111	80
Partielle	140	7	4	7	4
En-échelon	26	0	0	0	0
Verticale induite	3	0	0	0	0
Fracture nouvelle				38	13
Total	498	118	84	156	97

Tableau 1 - Comparaison ARI -FMI dans la partie profonde du forage GPK1

### 4.4. ORIENTATION DU RESEAU ARI

Quand une même structure est présente sur les deux types d'images, ses caractéristiques géométriques (direction, pendage) n'ont pas été remesurées sur l'ARI mais directement lues dans le fichier des données FMI. Pour les fractures nouvelles, quand cela était possible, quelques mesures ont été effectuées. 202 fractures naturelles dont 118 fractures individuelles et 84 fractures dans zone altérée, sont donc orientées (Tableau 1).

Pour les fractures individuelles et pour celles développées dans les zones altérées, la famille directionnelle principale de fracturation est orientée N020E (figure 2). Une famille secondaire, orientée N150E, se distingue dans le cas des zones altérées (figure 2).

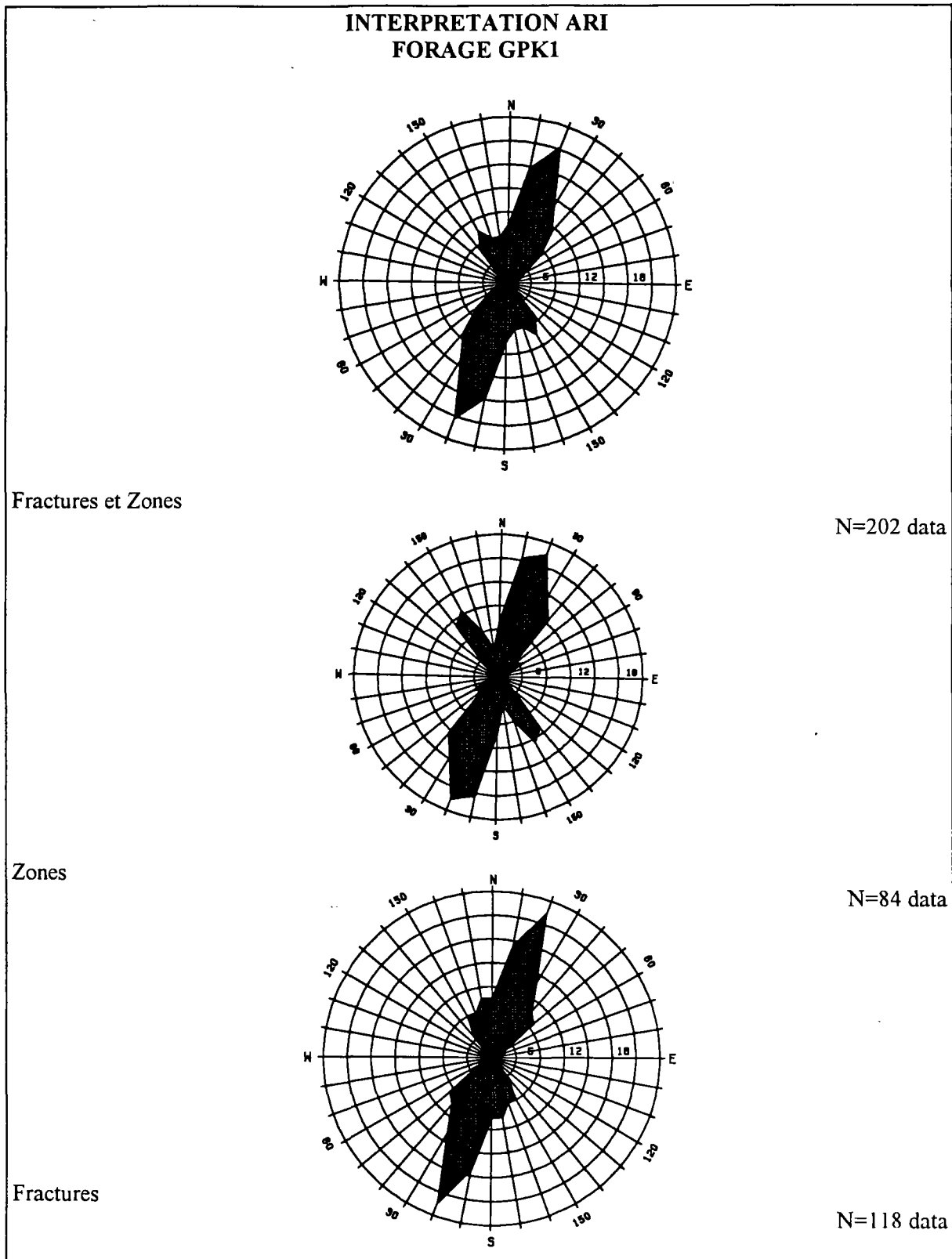


Figure 2 - Rosaces des directions de fractures détectées par l'outil ARI

## 5. OUVERTURE ET EXTENSION DES FRACTURES

### 5.1. THEORIE ET LIMITATIONS

A partir de mesures électriques en forage (Dual Laterolog, FMS, ARI), plusieurs travaux permettent d'estimer l'ouverture ou l'extension des fractures (Sibbit and Faivre, 1985; Luthi and Souhaité, 1990; Faivre, 1993). En considérant les fractures comme des structures parfaitement planaires, remplies par un fluide de forage conducteur, ces auteurs proposent des lois empiriques. A partir de simulations numériques basées sur un modèle en éléments finis, Faivre (1993) montre que la réponse de l'outil électrique en face d'une fracture, exprimée ici en termes de surface de conductivité (notion de Area of Added Conductivity, AAC), est liée à son ouverture (E), son extension (J), la résistivité de la matrice (R<sub>t</sub>) et celle du fluide (R<sub>m</sub>).

Moyennant certaines hypothèses, Faivre établit une formule pour quantifier l'ouverture d'une fracture supposée d'extension infinie:

$$E = a \cdot AAC^b \cdot R_t^c \cdot R_m^{(1-c)} \quad (1)$$

E, l'ouverture minimale calculée exprimée en mm,  
a, une constante,  
AAC, Area of Added Conductivity en (ohm.m)<sup>-1</sup>  
R<sub>t</sub>, résistivité de la matrice en ohm.m  
R<sub>m</sub>, résistivité du fluide en ohm.m  
b, une constante égale à 0.863  
c, une constante égale à 0.0048

Ne disposant que du log papier ARI, nous avons lu graphiquement non pas l'aire relative à l'AAC mais le pic de conductivité maximale lui correspondant sur la courbe LLhr.

En ce qui concerne l'extension des fractures, Faivre (1993) a également développé une formulation qui utilise l'ouverture calculée avec l'équation (1). Il considère que l'extension est circulaire et centrée sur l'axe du forage. Bien qu'il s'agisse d'un paramètre critique, l'extension finie de fractures s'exprime par la relation :

$$J_{\min} = a \cdot (R_t \cdot C_m \cdot E_c)^b \quad (2)$$

J<sub>min</sub>, l'extension minimum en pouces  
a, une constante proche de 1  
R<sub>t</sub>, résistivité de la matrice en ohm.m  
C<sub>m</sub>, la conductivité du fluide en (ohm.m)<sup>-1</sup>  
E<sub>c</sub>, ouverture calculée avec l'équation (1) en mm  
b, une constante égale à 1.42191

L'équation (2) est très sensible à la résistivité de la matrice  $R_t$ . Plus celle-ci est élevée, plus l'extension calculée est importante. Dans le cas de Soultz, ce phénomène est particulièrement pénalisant puisque dans le granite sain, la résistivité est très forte tandis que dans les zones altérées, le milieu est plus conducteur. Cette limitation nous amènera à distinguer ces deux cas dans nos applications numériques.

Faivre (1993) précise que son modèle est valide pour les fractures ayant un pendage de 60 degrés voire 75 degrés. Pour les structures verticales, le modèle n'est pas garanti. Enfin, les mesures réalisées avec l'outil ARI ne permettent pas de quantifier indépendamment les variables ouverture et extension puisqu'on est obligé de fixer la première pour estimer la seconde. A noter que ces lois empiriques ont été calées, notamment, à partir du jeu de données ARI acquises à Soultz dans la partie supérieure de GPK-1 (Davies et al., 1992; Faivre, 1993).

## **5.2. APPLICATIONS NUMERIQUES**

### **a - Ouverture des fractures**

La conductivité du fluide  $C_m$  est de  $10 \text{ (ohm.m)}^{-1}$  et la résistivité  $R_t$  de la matrice est successivement 10000, 50000, 100000 ohm.m. Les résultats ne varient pas de manière significative et l'ouverture moyenne reste stable autour d'une valeur de 3 microns, ce qui ne semble pas physiquement très réaliste (Tableau 2).

### **b - Extension des fractures**

Le fluide étant très salé, sa conductivité  $C_m$  est de  $10 \text{ (ohm.m)}^{-1}$  et la résistivité  $R_t$  de la matrice est successivement 10000, 50000, 100000 ohm.m. Les résultats sont très différents (Tableau 2). Les valeurs d'extension montrent des amplitudes millimétrique à décimétrique. Paradoxalement, les résultats du modèle donnent des extensions d'autant plus grandes que le milieu ( $R_t$ ) est résistif. Avec une résistivité de matrice de 100 000 ohm.m, les valeurs d'extension sont centrées autour d'une valeur moyenne de 30 cm environ. Pour les 3 calculs, la borne minimale semble peu réaliste, dans le mesure où elle est systématiquement très inférieure au diamètre du forage qui est d'au moins 6.25 pouces.

A noter que le calcul de l'extension de manière azimutale c'est-à-dire sur chacune des 12 électrodes permettrait d'approcher dans l'espace la forme de la fracture.

Ouverture metre

	E 10000	E 50000	E 100000
Moyenne	3.3282E-06	3.354E-06	3.3651E-06
Minimum	1.6927E-08	1.7058E-08	1.7115E-08
Maximum	6.3636E-05	6.4129E-05	6.4343E-05
Ecart type	7.1828E-06	7.2385E-06	7.2626E-06

Extension pouce

	J 10000	J 50000	J 100000
Moyenne	0.38267625	3.8148243	10.269911
Minimum	0.00011458	0.00114224	0.00307504
Maximum	13.8872955	138.439717	372.694381
Ecart type	1.3185214	13.1440805	35.3852567

Tableau 2 - Statistiques sur l'ouverture et l'extension des fractures pour trois gammes de résistivité de matrice (N=253 data)

## 6. CONCLUSIONS

L'analyse des données ARI disponibles sur trois intervalles de profondeur dans le forage GPK-1 de Soultz, a permis de mettre en évidence le réseau majeur conducteur de fracturation. Deux directions ont été mises en évidence: une direction principale N020E et une direction secondaire N150E. Ces directions "électriques" matérialisent les chemins préférentiels des circulations dans le milieu et peuvent s'interpréter comme des directions de fracturation utile.

Les fractures à effet superficiel ne sont pas échantillonnées par l'ARI ce qui confirme leur nature induite. 60 % des fractures naturelles, à priori à plus forte pénétrativité dans le granite, sont imagées par l'ARI. Les 40% restants doivent représenter des fractures dont l'extension est limitée à celle du puits. Les calculs d'ouverture et d'extension sont basés sur de nombreuses hypothèses. Les résultats obtenus ne sont que des estimations qui ne paraissent pas très réalistes et ne constituent en rien un jeu de données réelles. Ils permettent néanmoins de comparer qualitativement les fractures entre elles.

## BIBLIOGRAPHIE

Davies D.H, Faivre O., Gounot M-T., Seeman B., Troullier J.C., Benimelli D., Ferreira A., Pittman D.J., Smits J-W., Randrianavony M., Anderson B.I. and Lowell J. (1992) - Azimuthal Resistivity Imaging: a new generation laterolog. Society of Petroleum Engineers, SPE paper 24676, presented at the 1992 SPE Annual Technical Conference, Washington D.C., p 143 - 153.

Faivre O. (1993) - Fracture evaluation from quantitative azimuthal resistivities. Society of Petroleum Engineers, SPE paper 26434, presented at the 1992 SPE Annual Conference Technical Conference, Washington D.C., presented at the 1993 SPE Annual Technical Conference, Houston, Texas, p 179 -192.

Genter, A. and Ch. Dezayes (1993a). Fracture evaluation in GPK-1 borehole using FMI data (Soultz-sous-Forêts). *Technical note* RCS 93 T90, Field report, 25.03.1993, 3 p.

Genter, A. and Ch. Dezayes (1993b). Fracture evaluation in GPK-1 borehole using FMI data between 2870 and 1960 m (Soultz-sous-Forêts). *Technical note* RCS 93 T91, Field report, 24.06.1993, 5 p.

Genter A., Traineau H., Dezayes Ch., Elsass Ph., Ledesert B., Meunier A. and Villemin Th. (in press).- Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz project (France). Accepté pour publication à *Geothermal Science and Technology*.

Luthi S. and Souhaite P. (1990) - Fracture apertures from electrical borehole scans. *Geophysics*, Vol 55, N°7, p 821 - 833.

Sibbit A.M. and Faivre O. (1985) - The dual laterolog response in fractured rocks., presented at the SPWLA 26 annual logging symposium, June 1985, paper T, 33p.