

ÉVALUATION DE LA FRACTURATION DES RÉSERVOIRS PAR FORAGES : COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES DE CAROTTES ET D'IMAGERIE DE PAROI

A. GENTER, C. CASTAING et P. MARTIN

BRGM¹

Deux séries sédimentaires pouvant être considérées comme des analogues de réservoirs ont fait l'objet de travaux de reconnaissance par forages profonds à Soultz-sous-Forêts en Alsace et à Balazuc en Ardèche. Dans ces séries principalement gréseuses, l'évaluation de la fracturation naturelle s'appuie sur une analyse comparative du relevé des fractures effectué à la fois sur des carottes échantillonnées en continu et sur des imageries de paroi obtenues par des méthodes acoustique (BHTV) et électrique (FMS). Cette comparaison carotte-image montre logiquement que l'analyse des carottes donne des résultats plus complets que l'interprétation des images de paroi. Le BHTV permet de caractériser 50 % de la population des fractures visibles sur les carottes, contre 6 % avec le FMS. Dans les grès du Buntsandstein de Soultz, les fractures qui s'organisent en paquets (c'est-à-dire qui sont très rapprochées les unes des autres) ne sont pas correctement imagées par le BHTV. Ce biais est encore plus significatif avec le FMS puisqu'il s'applique à l'ensemble de la distribution quel que soit l'espacement des fractures. Ces limites opérées par les techniques d'imagerie sur la détection des fractures sont d'autant plus importantes que les fractures sont fermées (pas de vides résiduels), colmatées (peu de contrastes physiques) ou de petite taille (en dessous du seuil de résolution). Cette comparaison carotte-image montre aussi que la résolution horizontale de l'outil imageur peut sensiblement limiter le nombre de fractures détectées surtout dans le cas des fractures fermées. En effet, le BHTV, qui a une résolution comprise entre 1 et 2 mm, ne détecte pas les fractures dont l'épaisseur est inférieure ou égale à cette résolution, c'est-à-dire 45 % de la population. Ce chiffre est en accord avec le nombre mesuré qui est d'une fracture sur deux. Le FMS, qui a une résolution plus grossière de l'ordre de 7,5 mm, ne peut détecter que les fractures ayant au moins cette épaisseur de colmatage. Dans les formations de Balazuc, 6 % des fractures sont détectées par le FMS, ce qui correspond exactement à la proportion de fractures dont la taille est supérieure à la résolution de l'outil. Malgré ces biais d'échantillonnage, les directions majeures de fracturation sont correctement détectées avec les deux techniques mises en œuvre.

ASSESSMENT OF RESERVOIR FRACTURING FROM BOREHOLES:

COMPARISON BETWEEN CORE AND WALL-IMAGE DATA

Deep drilling was carried out of two sedimentary sequences considered as representative of reservoir formations; one at Soultz-sous-Forêts in Alsace and the other at Balazuc in the

(1) 3, avenue Claude Guillemin, BP 6009,
45060 Orléans Cedex 2 - France

Ardèche, France. The natural fracturing in these predominantly sandstone sequences has been analysed both from the continuous cores collected during the drilling and from wall imagery obtained by acoustic (BHTV) and electric (FMS) methods. This core-imagery comparison shows, quite logically, that the core analysis gives more complete results than the interpretation of wall imagery. With the BHTV it was possible to characterize 50% of the fractures seen in the cores, as against only 6% using the FMS. In the Buntsandstein at Soultz the fractures that form clusters (i.e. very close to one another) are not correctly recorded by the BHTV. This bias is even more significant with the FMS since it applies to the entire fracture distribution, regardless of the fracture spacing. This fracture-detection filtering that we find with the imagery techniques are even more evident where the fractures are filled (little physical contrast) or small (below the detection threshold). The core-imagery comparison also shows that the horizontal resolution of the imaging tool is directly proportional to the number of fractures detected. The BHTV, which has a resolution of between 1 and 2 mm, does not detect fractures of this thickness or less, i.e. 45% of the population. This percentage is similar to the amount of fractures recognized by BHTV compared to that recorded in core. The FMS, with a much coarser resolution of about 7.5 mm, can only detect fractures with at least this thickness of infill material. In the Balazuc sequence, 6% of the fractures were detected by the FMS, which corresponds exactly to the proportion of core fractures with a thickness greater than the tool's resolution. Despite this sampling bias, the major fracture directions were correctly detected with both the imaging techniques used.

resolución comprendida entre 1 y 2 mm, no detecta efectivamente las fracturas de grosor inferior o igual a dicha resolución, es decir, el 45% de la población. Esta cifra concuerda con el número medido, que es una fractura de cada dos. El FMS, cuya resolución es menos fina, de unos 7,5 mm, sólo puede detectar las fracturas que tengan por lo menos dicho grosor de colmataje. En las formaciones de Balazuc, el 6% de las fracturas se detectan con el FMS, lo que corresponde exactamente a la proporción de fracturas cuyo tamaño supere la resolución de la herramienta. A pesar de estos aspectos del muestreo, se detectan correctamente las direcciones principales de fracturación con ambas técnicas utilizadas.

EVALUACIÓN DE LA FRACTURACIÓN DE LOS DEPÓSITOS MEDIANTE PERFORACIONES:

COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS DE MUESTREO Y LAS IMÁGENES DE PARED

Dos series sedimentarias, que pueden considerarse como análogas de los depósitos, han sido objeto de trabajos de reconocimiento mediante perforaciones profundas en Soultz-sous-Forêts, en Alsacia, y en Balazuc, en Ardèche, Francia. En estas series, de gres principalmente, la evaluación de la fracturación natural se basa en un análisis comparativo de los resultados de las fracturas, efectuado en muestras tomadas en continuo, y en imágenes de la pared obtenidas por método acústico (BHTV) y eléctrico (FMS). La comparación muestra-imágenes demuestra lógicamente que el análisis de las muestras da resultados más completos que la interpretación de las imágenes de pared. El BHTV permite caracterizar el 50% de la población de las fracturas visibles en las muestras, frente al 6% con el FMS. En el gres del Buntsandstein de Soultz, las fracturas que se organizan por paquetes (es decir, que están muy cerca unas de otras) no aparecen correctamente en las imágenes obtenidas por BHTV. Este aspecto es aún más significativo con el FMS puesto que se aplica al conjunto de la distribución sea cual fuere la separación de las fracturas. Estos filtros, obtenidos por las técnicas de imágenes para la detección de fracturas, son más importantes cuanto más cerradas sean las fracturas (sin vacíos residuales), colmatadas (pocos contrastes físicos) o de pequeña dimensión (por debajo de los límites de resolución). La comparación muestra-imágenes demuestra también que la resolución horizontal de la herramienta gráfica es directamente proporcional al número de fracturas detectadas. El BHTV, que tiene una

INTRODUCTION

Les réservoirs fracturés occupent une place de plus en plus importante dans l'exploitation des hydrocarbures, la prospection de l'eau souterraine et des fluides géothermiques. La caractérisation de la géométrie du réseau de fractures affectant un réservoir rocheux devient essentielle pour la compréhension et la modélisation des circulations. À l'échelle d'un forage, la caractérisation du milieu fracturé s'appuie sur le prélèvement de carottes ou sur des nouvelles technologies d'imagerie de paroi beaucoup moins coûteuses que le carottage.

Dans cette étude, nous prenons comme exemples deux formations sédimentaires reconnues par des forages entièrement carottés, dans le cadre des projets de géothermie *Hot Dry Rock* (Soultz-sous-Forêts, Alsace) et *Géologie Profonde de la France* (Balazuc, GPF-Ardèche). La fracturation a fait l'objet d'un relevé systématique à la fois sur les carottes mais aussi sur des imageries de paroi, permettant ainsi une comparaison des deux échantillonnages. Cette comparaison carotte-image doit nous renseigner sur les limites des outils d'imagerie en termes de détection de fractures. En effet, certains facteurs limitants existent dans la mesure où la résolution de ces outils est en général plus grossière que l'observation visuelle des carottes. Les techniques d'imagerie utilisées dans les deux puits étant différentes, l'analyse combinée entre les réponses des deux systèmes (acoustique et électrique) n'a pas pu être réalisée.

L'objectif de la présente publication est de préciser le seuil de détectabilité des fractures, c'est-à-dire l'épaisseur minimum (incluant l'épaisseur du colmatage) au-dessous de laquelle celles-ci ne sont plus visibles sur les images. On pourra aussi estimer l'effet de la résolution sur les lois d'espacement ou sur l'orientation des familles de fractures. Certains facteurs externes aux données de forage jouent également un rôle dans la détection des fractures. Il s'agit principalement du champ de contrainte en place qui peut sensiblement modifier les propriétés des fractures au voisinage du puits, en favorisant très localement l'ouverture des fractures ou leur fermeture, selon que celui-ci est parallèle ou perpendiculaire à celles-ci. Le premier cas aura tendance à révéler les fractures naturelles sur la paroi du puits et donc de rendre leur détection plus facile par les techniques d'imagerie.

1 MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA FRACTURATION EN FORAGE

L'analyse de la fracturation en forage consiste en un relevé exhaustif de toutes les structures cassantes

présentes dans les carottes. Cette analyse est menée sur les carottes elles-mêmes et sur des "photos-déroulées" de carottes où chaque fracture apparaît comme une sinusoïde. Pour chaque structure identifiée, plusieurs paramètres sont mesurés et intégrés dans une base de données. Le type, la profondeur, l'épaisseur, la direction, le pendage et la nature du remplissage des fractures représentent les paramètres majeurs à acquérir. Si le forage n'est pas carotté, l'analyse des fractures dans les puits est rendue possible grâce à l'utilisation des imageries de paroi. Il s'agit de diagraphies acoustiques (*BoreHole TeleViewer*, BHTV) ou électriques (*Formation MicroScanner*, FMS) qui fournissent une image *in situ* orientée et développée de la paroi du puits. Le BHTV livre une image en amplitude et en temps de transit à partir d'une onde qui est émise par un transducteur puis réfléchi par le milieu (Zemanek *et al.*, 1970). Le FMS livre une cartographie des contrastes de résistivités mesurés par quatre patins qui pressent la surface interne du forage (Ekström *et al.*, 1986). Par conséquent, les fractures s'individualisent généralement comme des traces sinusoïdales noires témoignant d'une forte rugosité ou d'une ouverture libre (BHTV) ou encore d'une forte conductivité (FMS). Le minimum de la sinusoïde correspond à la direction de plongement de la fracture et la hauteur de la sinusoïde est proportionnelle au pendage. En ce qui concerne le BHTV, seul un tirage papier était disponible et les structures ont donc été digitalisées. Dans le cas du FMS, les imageries ont été interprétées directement sur une station de travail avec un logiciel spécifique de Schlumberger. Comme les fractures rencontrées dans ces formations sont surtout verticales, il est important d'estimer la résolution périphérique ou horizontale de ces outils d'imagerie. Dans le forage EPS1 (diamètre 5"), le BHTV enregistre 250 données par rotation, ce qui correspond à une résolution horizontale de 1,6 mm environ. La résolution périphérique du FMS qui est liée à la configuration de l'outil est de 7,5 mm (Schlumberger, 1992). Cette notion de résolution horizontale s'applique davantage aux fractures fermées qu'aux fractures ouvertes qui sont préférentiellement détectées par ces techniques d'imageries, même si leur épaisseur est en dessous du seuil théorique imposé par la configuration de l'outil. De ce fait, des fractures conductrices ayant une taille inférieure au millimètre peuvent être détectées par le FMS pourvu que les contrastes physiques entre ces fractures et leur encaissant soient suffisants (Pézarid *et al.*, 1992).

2 CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES DE FRACTURES DANS LES GRÈS DU BUNTSANDSTEIN D'ALSACE (SOULTZ)

2.1 Cadre géologique

Le forage EPS1 de Soultz qui traverse les grès du Buntsandstein est localisé à l'intérieur du graben rhénan à proximité de sa bordure occidentale (fig. 1). Le carottage de la base de la série triasique offre une coupe continue des grès du Buntsandstein qui reposent en discordance à 1417 m sur le socle granitique (fig. 2). Cette puissante formation gréseuse est recouverte stratigraphiquement à 1009 m par la série transgressive laguno-marine du Muschelkalk composée d'argilite silteuse, de dolomie et d'évaporites. Les niveaux gréseux compétents montrent des porosités de l'ordre de 13 à 15 % et représentent les meilleurs niveaux réservoirs d'eau souterraine (Vernoux *et al.*, 1995). Quatre

formations ont été reconnues régionalement à l'intérieur du Buntsandstein (Ménillet *et al.*, 1989): les Grès d'Annweiler, les Grès vosgiens, les Couches intermédiaires et les Grès à Voltzia (fig. 2).

Les Grès d'Annweiler et l'unité basale permienne (1417-1349 m) sont constitués par des grès fins à moyens et des alternances argilo-silteuses. Ces séquences de faciès caractérisent un réseau fluvial en tresse relativement distal où alternent dépôts gréseux de chenaux, dépôts plus fins de plaine d'inondation et dépôts lacustres. Les Grès vosgiens (Buntsandstein moyen) reposent en contact érosif sur les Grès d'Annweiler. Deux ensembles globalement granodécroissants se distinguent. L'ensemble inférieur (1349-1152 m) est essentiellement composé de grès moyen relativement homogène et l'ensemble supérieur (1152-1079 m) est constitué de grès moyen à grossier. Ensuite, la formation des Couches intermédiaires (1079-1019 m) du Buntsandstein supérieur repose directement sur les Grès vosgiens.

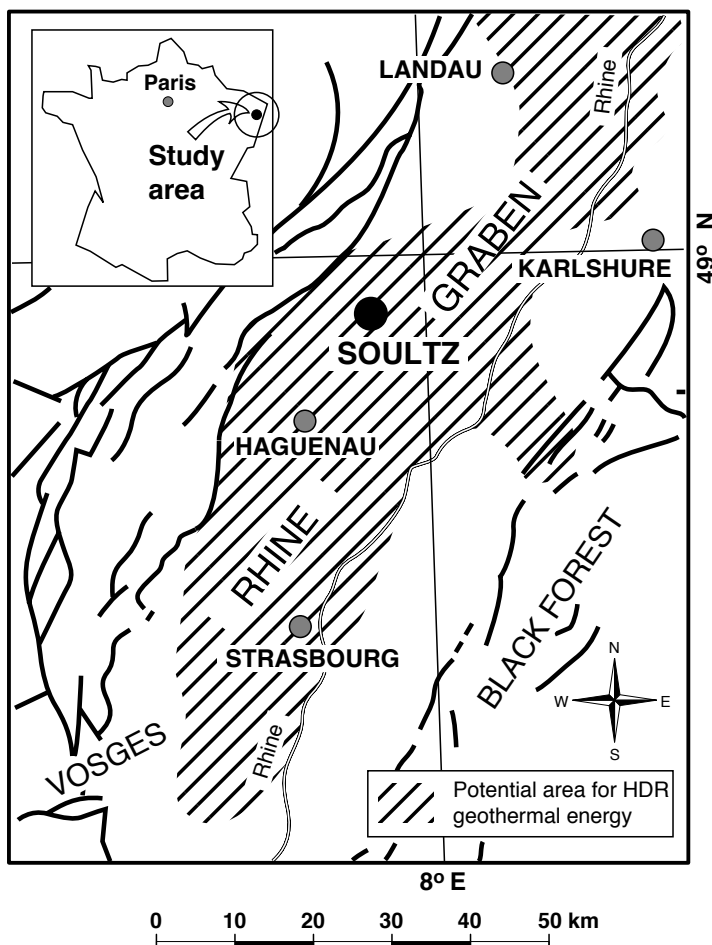


Figure 1

Le site de Soultz-sous-Forêts dans le fossé rhénan.

Location of the Soultz-sous-Forêts site in the Rhine graben.

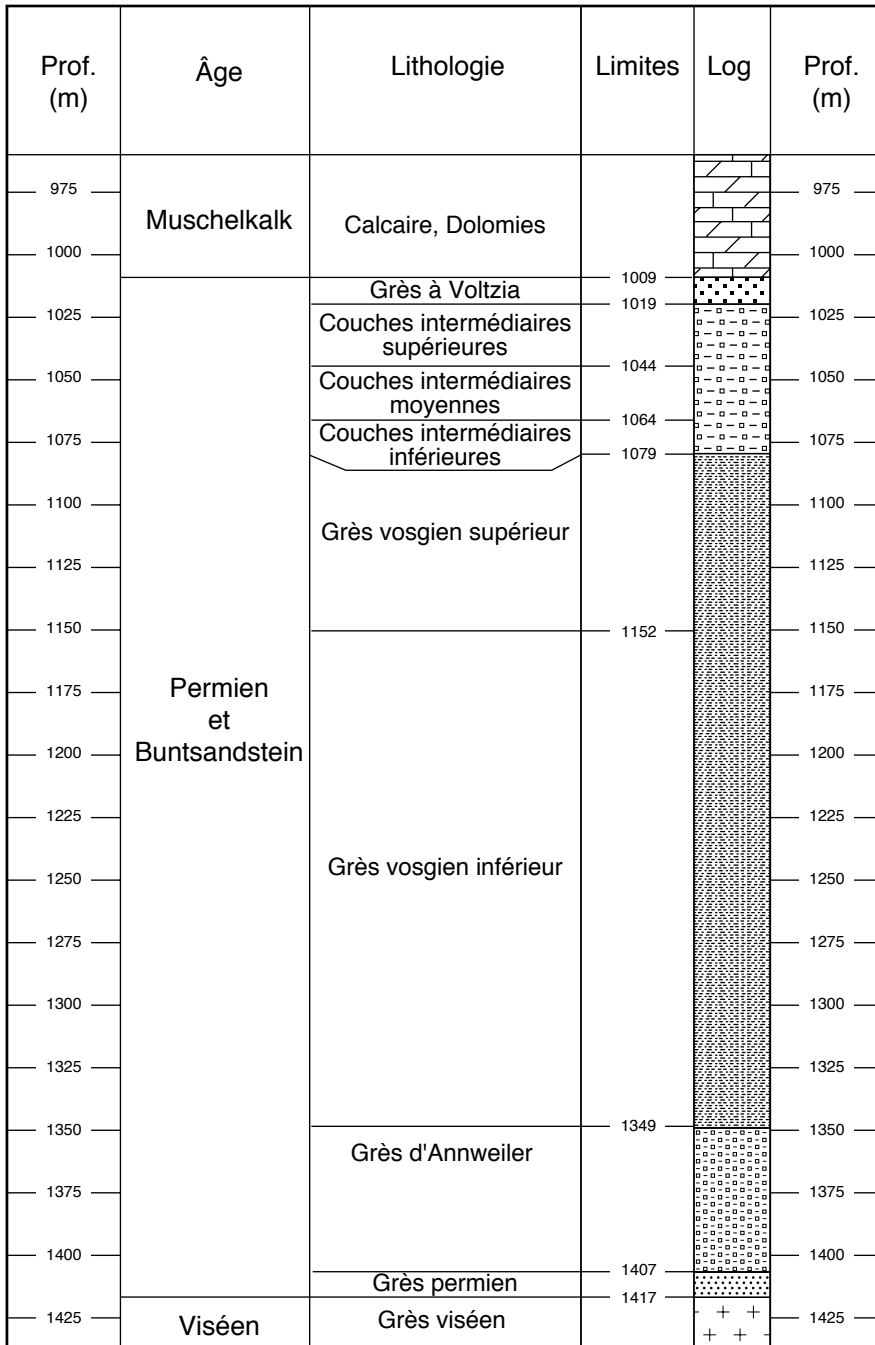


Figure 2

Les unités du Buntsandstein d'Alsace (Soultz) recoupées par le sondage carotté EPS1.

Lithological units of the Alsace Buntsandstein intersected by cored Borehole EPS1 at Soultz.

Cette formation peut être divisée en une unité inférieure (1079-1064 m), constituée de séquences gréseuses fluviales d'épaisseur métrique, une unité médiane (1064-1044 m) principalement composée de conglomérats et une unité supérieure (1044-1019 m) composée de conglomérats et de grès. Les Grès à Voltzia (1019-1009 m) qui terminent régionalement la série des grès

du Buntsandstein sont composés de couches pluridécimétriques de grès fin micacé séparées de minces lits argilo-silteux parfois riches en débris végétaux. Ces grès sont interprétés comme des dépôts fluviaux dans un environnement de plaine alluviale distale. Ce faciès assure la transition avec les dépôts argilo-silteux lagunaires du Muschelkalk.

2.2 Caractérisation du système de fractures

Le long des 400 m de carottes prélevées en continu, 348 structures ont été identifiées. Elles correspondent principalement à des filons clastiques à remplissage de grès (41 données), des fractures sans indice de mouvement, appelées fentes, généralement remplies de barytine (296 données) et des plans striés ou microfailles montrant un jeu normal (11 données). Parallèlement, 177 fractures ont été mesurées sur le BHTV. Compte tenu de la qualité du carottage et de l'imagerie, 92 % des structures ont pu être orientées. Les structures analysées sur les péri-photographies de carottes ont été digitalisées dans un repère fictif à l'aide du logiciel Numcar du BRGM. Parallèlement, sur le log papier BHTV, les structures interprétées ont également été numérisées par rapport au Nord. La géométrie de la fracture est donc parfaitement connue, à la fois dans le repère carotte et dans le repère image. Ensuite, la méthode de base pour réorienter les fractures consiste à identifier sur l'image orientée et la carotte un même objet géologique. Par exemple, une fracture présentant des ouvertures géodiques visible sur carotte sera parfaitement imagée par le BHTV. Deux fractures parallèles ou en opposition de direction de plongement, ou encore des contacts lithologiques, sont autant de critères très utiles pour réorienter les carottes et donc les fractures portées par celles-ci. L'incertitude sur l'orientation des fractures naturelles réorientées résultant de la comparaison carotte-image est estimée à 10°.

2.2.1 Profil de fracturation

La figure 3 montre la distribution du nombre cumulé de fractures en fonction de la profondeur entre 1000 et 1420 m en ce qui concerne les données provenant des carottes et du BHTV. Plus la pente de ce graphe est faible, plus la densité de fracturation est forte. L'imagerie de paroi ayant une résolution inférieure à celle de l'observation oculaire des carottes, l'échantillonnage des fractures est plus exhaustif à partir de ces dernières. De ce fait, les courbes ne sont pas superposables, excepté sur les premiers mètres où le nombre de fractures n'est pas significatif. À l'échelle du puits, le nombre de fractures collectées sur les carottes (0,77 fractures/m) est presque deux fois supérieur à celui déduit de l'interprétation des images BHTV (0,42 fractures/m).

Dans les zones de grès peu fracturées (1116-1150 m, 1220-1365 m, 1380-1417 m), les deux graphes sont

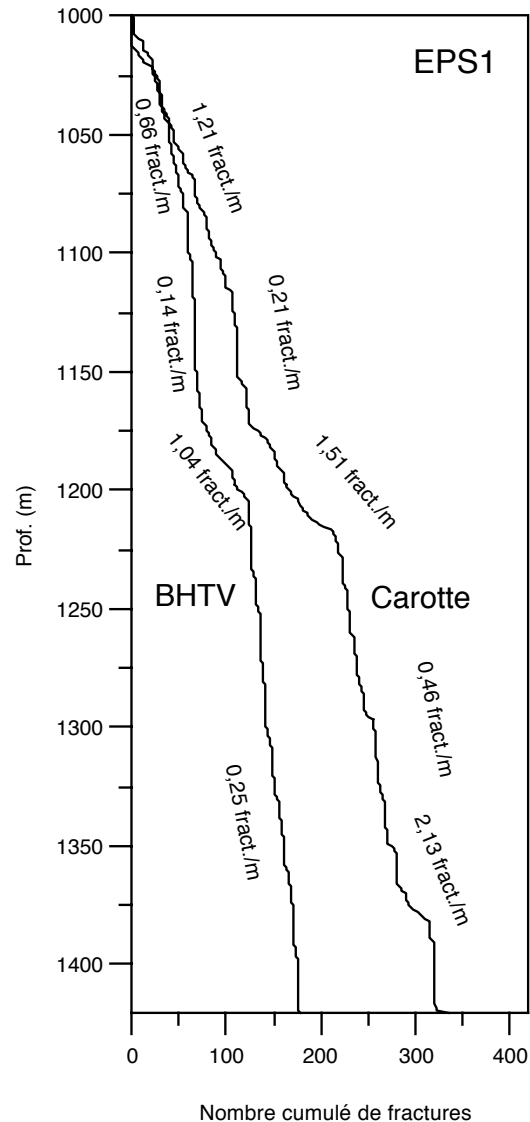


Figure 3

Profil cumulé du nombre de fractures le long du forage EPS1 de Soultz.

Cumulative profile of the number of fractures along Borehole EPS1 at Soultz.

subparallèles et montrent des densités de fracturation toujours inférieures à 0,50 fractures/m. Dans les zones moyennement fracturées (1000-1116 m, 1,21 fractures/m), la densité de fracturation sur carottes est le double de celle déduite du BHTV. Enfin, dans les zones très fracturées, deux cas différents se distinguent : (i) le BHTV et les carottes détectent un très grand nombre de fractures (1150-1220 m) et les densités de fracturations restent élevées avec les deux techniques (1,04 à

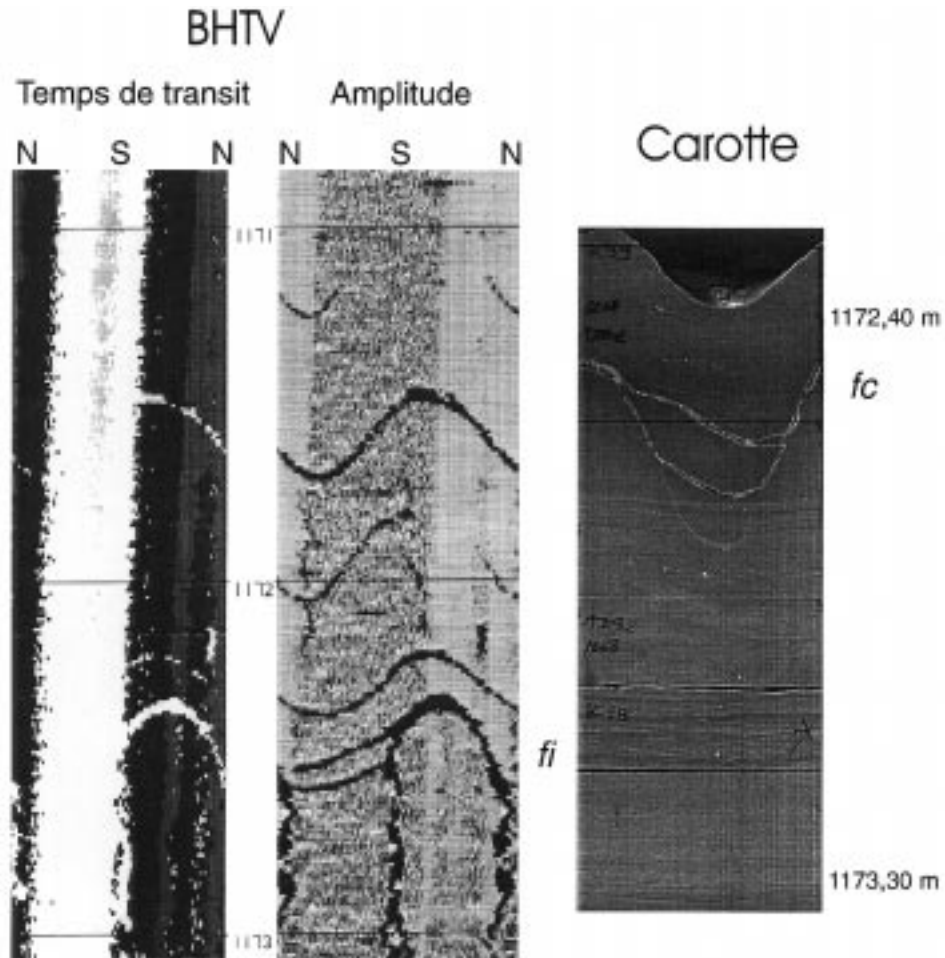


Figure 4a

Exemples de fractures visibles dans les grès de Sultz à la fois sur l'imagerie BHTV et sur un déroulé de carottes dans le sondage EPS1. L'image orientée BHTV est présentée en temps de transit et en amplitude sur 360° en profondeur BHTV, tandis que les carottes non orientées sont présentées sur 360° en profondeur foreur.

a Un paquet de fractures (*fc*) visible sur la carotte et sur le BHTV vers 1173 m de profondeur. Les fractures individuelles visibles sur l'imagerie acoustique (*fi*) sont ouvertes et correctement imagées par l'outil BHTV.

Example of the fractures determined in a section of Sultz sandstone from Borehole EPS1 using BHTV imagery and those seen on "unrolled" core. The oriented BHTV imagery is shown for transit time and for amplitude over 360° at logging depth, whereas the non-oriented core is presented over 360° at drilling depth.

*a A swarm of fractures (*fc*) seen on both the core and the BHTV image at about 1173 m depth. The individual fractures visible on the acoustic log (*fi*) are open and correctly imaged by the BHTV tools.*

1,51 fractures/m respectivement), ou (ii) un certain nombre de fractures ne sont pas imagées par le BHTV (1365-1380 m). Dans ce dernier cas, bien que la densité de fracturation soit maximale (2,13 fractures/m sur carotte contre 0,25 fractures/m sur le BHTV), l'épaisseur des fractures doit être en dessous de la résolution minimale du BHTV, et ne permet donc pas leur détection de manière discrète.

Deux exemples caractéristiques illustrent ces relations carotte-image. La figure 4a montre un paquet de

petites fractures localisées vers 1173 m de profondeur qui sont visibles à la fois sur les carottes et le BHTV. Leur détection en amplitude et en temps de transit suggère que ces fractures présentent une ouverture libre résiduelle confirmée par l'analyse des carottes qui a, de plus, montré la présence d'un remplissage de barytine de 1 à 10 mm d'épaisseur. La figure 4b montre encore un paquet de fractures fortement pentées localisé vers 1214 m de profondeur. Ces fractures sont visibles sur les carottes mais pas sur le BHTV correspondant.

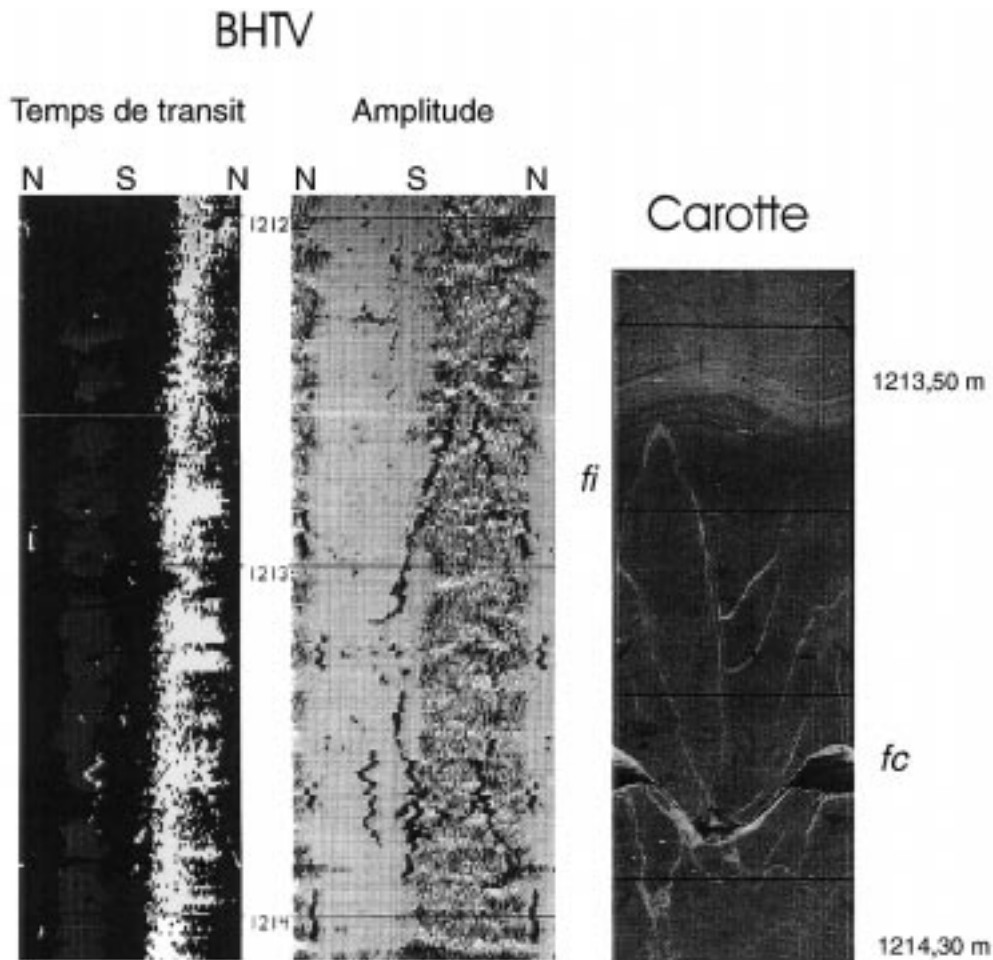


Figure 4b

Exemples de fractures visibles dans les grès de Saultz à la fois sur l'imagerie BHTV et sur un déroulé de carottes dans le sondage EPS1. L'image orientée BHTV est présentée en temps de transit et en amplitude sur 360° en profondeur BHTV, tandis que les carottes non orientées sont présentées sur 360° en profondeur foreur.

b Un paquet de petites fractures (*fc*) visibles sur les carottes vers 1214 m de profondeur. L'image BHTV correspondante ne détecte qu'une seule fracture ouverte (*fi*).

Example of the fractures determined in a section of Saultz sandstone from Borehole EPS1 using BHTV imagery and those seen on 'unrolled' core. The oriented BHTV imagery is shown for transit time and for amplitude over 360° at logging depth, whereas the non-oriented core is presented over 360° at drilling depth.

*b A swarm of small fractures (*fc*) visible in the core at around 1214 m depth. The corresponding BHTV image detected only a single open fracture (*fi*).*

L'examen des carottes a montré que les fractures étaient peu épaisses (< 1 mm) et colmatées par de la barytine. Une seule d'entre elles présentait une ouverture libre et fut donc imagée par le BHTV. Les fractures ayant une épaisseur inférieure au millimètre représentent 45 % de la population des fractures collectées sur carottes (fig. 5 (a)). Le fait que le BHTV ne détecte que 50 % d'entre elles est en accord avec la résolution de l'outil qui est comprise entre 1 et 2 mm (cf. § 1).

2.2.2 Distribution des espacements entre fractures

Les espacements bruts entre fractures correspondent aux distances séparant deux fractures consécutives mesurées le long du forage sur les carottes et sur l'imagerie BHTV. Les distributions sont représentées dans un graphe log/log (fig. 6 (a)). Elles suivent approximativement les mêmes lois dans les deux cas, ceci pour les valeurs d'espacements supérieures à 0,80 m. Les petits

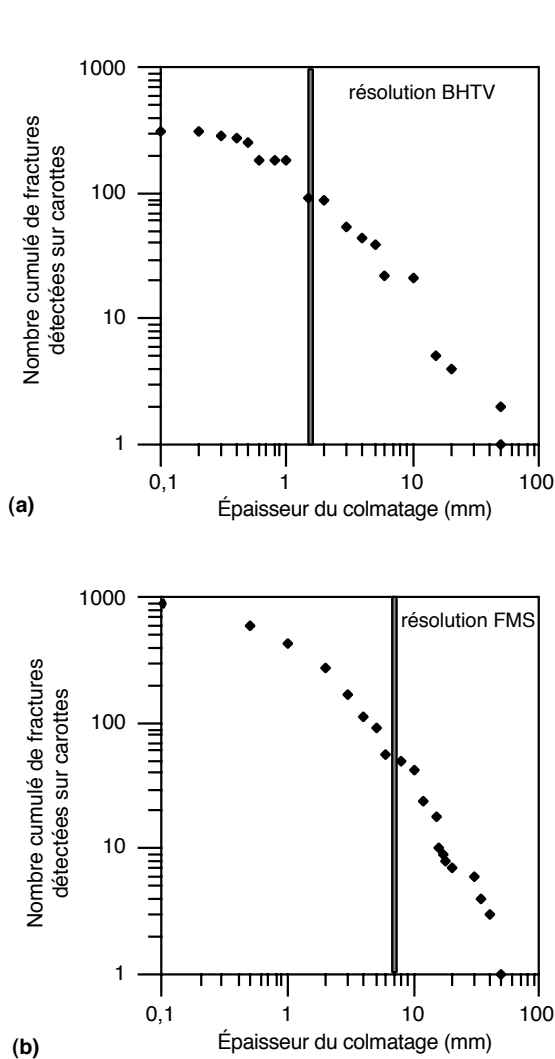
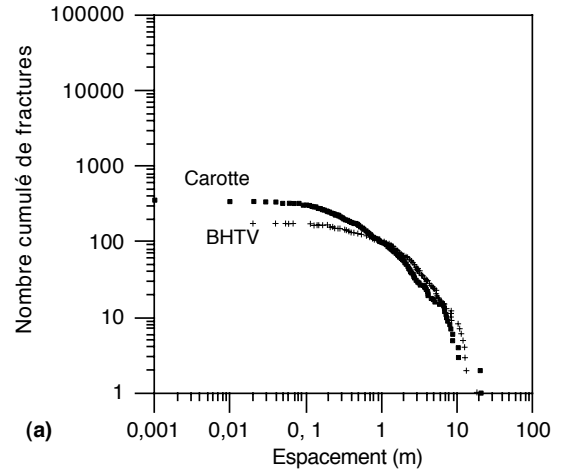


Figure 5
Distributions cumulées des épaisseurs de fractures collectées sur les carottes des formations de Soutz (a) et de Balazuc (b).
Cumulative distribution of fracture thicknesses determined from the cores at Soutz (a) and Balazuc (b).

EPS1



BA1

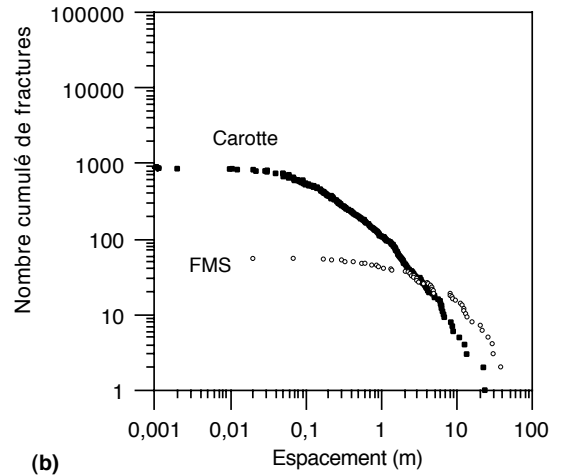


Figure 6
Distributions des espacements de fractures observées sur les carottes et sur les imageries de paroi obtenues à Soutz (a) et à Balazuc (b).
Distribution of fracture spacing determined from the cores and the wall imagery at Soutz (a) and Balazuc (b).

espacements inférieurs à 0,80 m sont sous-estimés avec le BHTV. L'écart minimum déduit du BHTV est de 20 mm contre 1 mm sur les carottes. Cette différence traduit le fait que des fractures colmatées de faible épaisseur (< 1mm) ou trop proches (groupées en paquets) ne seront pas imagées individuellement par l'outil. Les grands espacements semblent correctement transcrits et convergent vers une valeur commune de l'ordre de 20 m.

2.2.3 Orientation des fractures

L'analyse structurale des carottes permet de définir un système principal de fracturation orienté N 160-170° et plusieurs familles secondaires orientées N 20°, N 55°, N 90° et N 140° (fig. 7 (a)). Les données du BHTV donnent approximativement la même direction principale à N 160° et trois familles secondaires orientées N 0°, N 60° et N 100° (fig. 7 (b)). Les familles

N 20° et N 140° semblent moins bien imagées avec le BHTV. Compte tenu de l'incertitude sur les mesures d'orientation qui peut être estimée à au moins 10° en direction, il y a globalement un bon accord entre les orientations de fracturation déduites par les deux techniques, même si 50 % des fractures ne sont pas imagées par le BHTV.

3 CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES DE FRACTURES DANS LES FORMATIONS DE LA MARGE ARDÉCHOISE (BALAZUC)

3.1 Cadre géologique

Le forage scientifique de Balazuc BA1 a été implanté sur la marge ardéchoise dans les Cévennes (fig. 8). Ce forage avait pour objet l'étude des interactions fluides-roches au droit d'une paléomarge passive contrôlée par un système de failles N05-20°. Les formations jurassiques et triasiques qui reposent sur le socle carbonifère ont été traversées en mode destructif depuis la surface jusqu'à 1220 m, puis entièrement carottées jusqu'à 1730 m. Trois des niveaux carottés sont connus régionalement pour leurs propriétés aquifères : les dolomies hettangiennes faillées et les deux unités gréseuses du Trias. La comparaison carotte-image a été effectuée dans une zone qui présente une lithologie très variée comme en témoigne la coupe lithologique de la figure 9. Dans la zone carottée, le forage BA1 a recoupé les formations suivantes :

- le Lias inférieur (1220-1350 m) qui se compose de carbonates, de dolomies et d'un niveau de shales noirs ;
- le Rhétien (1350-1378 m) qui marque la transition entre la sédimentation marine liasique et les dépôts continentaux du Trias ;
- le Trias, composé d'un niveau d'évaporites intercalé entre deux unités gréseuses ;
- le socle carbonifère formé d'argiles noires.

3.2 Caractérisation du système de fractures

Le long du forage de Balazuc, 888 structures ont été relevées sur les 500 m de carottes entre 1225 et 1725 m. Elles correspondent à des fentes (527 données), des diaclases (76 données) et des failles (285 données). Dans le même intervalle de profondeur, 55 structures ont été identifiées et mesurées sur l'imagerie électrique FMS.

3.2.1 Profil de fracturation

Le profil de fracturation montre que le nombre de fractures collectées sur carotte est supérieur à celui déduit de l'interprétation des images électriques FMS (fig. 10). En effet, plus de 90 % des fractures visibles sur carottes n'ont pas été détectées par le FMS. Le graphe déduit de l'analyse des carottes montre trois ensembles distincts à l'échelle du sondage. Une première zone qui s'étend de 1225 à 1460 m, qui possède une densité de fracturation moyenne (1,42 fractures/m en moyenne) avec, en particulier, la présence d'un niveau fracturé correspondant aux dolomies hettangiennes. Une seconde zone qui couvre l'intervalle 1460 à 1620 m et qui comprend les réservoirs détritiques du Trias. Cette zone est moins fracturée (0,62 fractures/m en moyenne) que la zone sus-jacente. Enfin, une troisième zone très fracturée (4,11 fractures/m en moyenne) qui s'étend de 1620 m jusqu'au fond du puits et qui correspond à la limite couverture-socle composée de niveaux de siltite.

L'évolution verticale du profil de fracturation FMS se divise en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble localisé entre 1290 et 1645 m montre une pente très forte et donc une densité de fracturation faible (0,08 fractures/m en moyenne). Dans cet intervalle, la barre dolomitique hettangienne fracturée n'est pas détectée. L'intervalle 1225-1460 m moyennement fracturé sur carottes n'est pas mis en évidence avec le FMS. Le second sous-ensemble, qui comprend les 100 derniers mètres du sondage, montre une densité de fracturation plus forte (0,37 fractures/m en moyenne) en relation avec les formations carbonifères plus fracturées.

3.2.2 Distribution des espacements entre fractures

Les distributions des espacements entre fractures représentées dans un graphe log/log (fig. 6 (b)) ne suivent pas les mêmes lois en ce qui concerne les carottes et les images FMS. Comme dans les grès triasiques de Soultz, le plus petit espacement déduit du FMS est de 20 mm contre 1 mm sur les carottes (cf. § 2.2). En ce qui concerne les grands espacements, il n'y a pas de valeur commune. En effet, l'information carotte fournit le même ordre de grandeur que celui obtenu pour les grès de Soultz, c'est-à-dire 20 m, tandis que les données FMS montrent un espacement maximum de 50 m. Ce maximum est certainement surestimé. En effet, on a vu qu'à Soultz le filtre opéré par le BHTV affectait

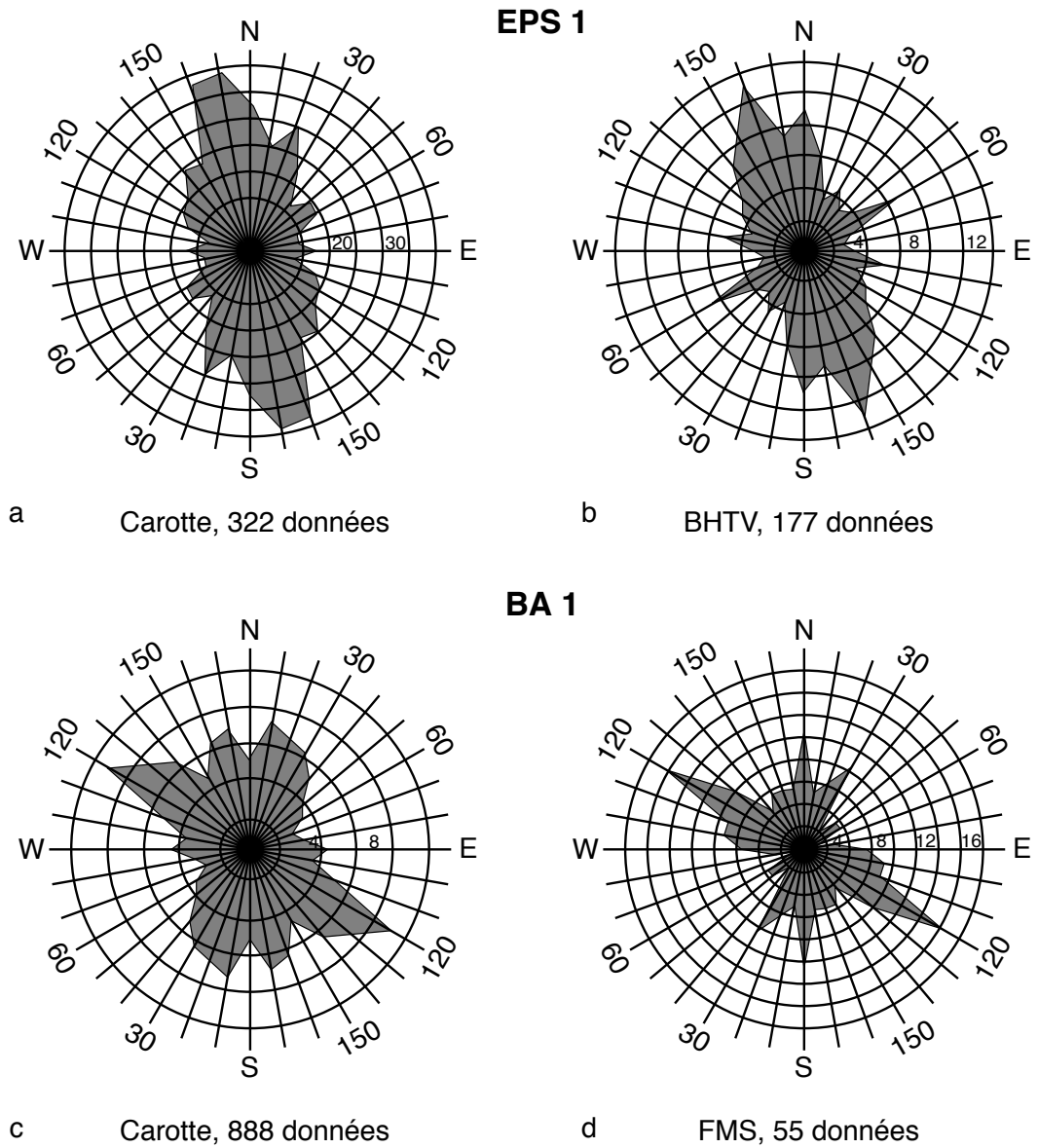


Figure 7

Orientation de la fracturation relevée sur carottes et sur imageries de paroi obtenues à Soultz (a, b) et à Balazuc (c, d).

Fracture orientation determined from the cores and wall imagery at Soultz (a, b) and Balazuc (c, d).

préférentiellement les zones fracturées et assez peu les niveaux de grès faiblement fracturés. Dans les formations de Balazuc, plus de 90 % des fractures n'ont pas été imagées avec le FMS, ce qui a pour effet d'amplifier les "blancs", c'est-à-dire les volumes apparemment sans fractures et donc de maximiser les grandes valeurs d'espacements.

3.2.3 Orientation des fractures

L'analyse structurale des carottes permet de définir trois directions dominantes de fracturation orientées N 10-30°, N 120° et N 170° et une famille secondaire orientée N 90° (fig. 7(c)). Les données FMS donnent approximativement une direction principale à savoir

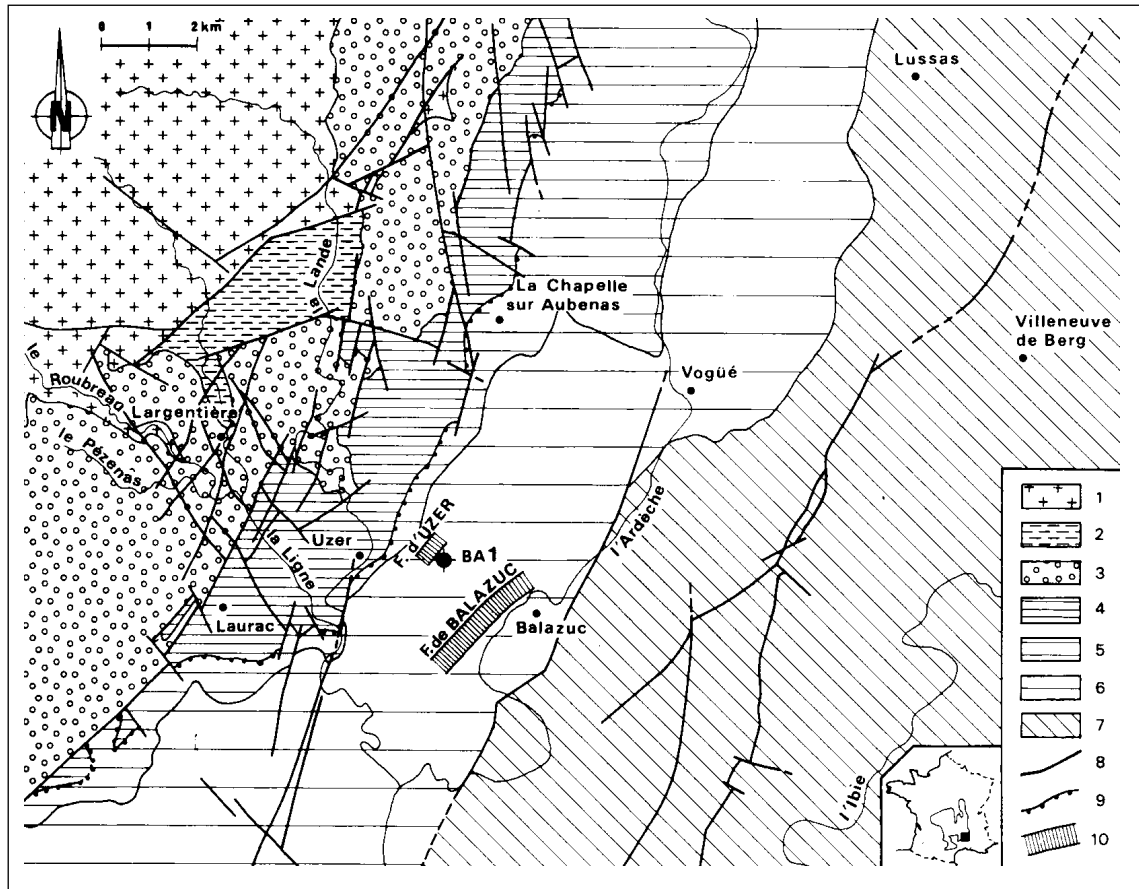


Figure 8

Localisation du sondage BA1 (Balazuc-1) sur la bordure cévenole du bassin du Sud-Est de la France (d'après la carte géologique à 1/50 000 : Largentière). 1 : socle cristallin, 2 : Permien, 3 : Trias, 4 : Lias, 5 : Dogger, 6 : Malm, 7 : Crétacé, 8 : faille majeure à l'affleurement, 9 : paléosurface, 10 : faille majeure reconnue par sismique.

Location of Borehole BA1 (Balazuc-1) on the Cévennes margin of the Southeastern basin of France (from the Largentière sheet of the 1:50.000-scale geological map). 1: crystalline basement, 2: Permian, 3: Triassic, 4: Lias, 5: Dogger, 6: Malm, 7: Cretaceous, 8: major outcropping fault, 9: major fault determined from seismics.

N 120° et trois familles secondaires orientées N 0°, N 30° et N 100° (fig. 7(d)). Les familles N 0° et N 30° semblent moins bien imagées avec le FMS. Compte tenu de l'incertitude sur les mesures d'orientation qui peut être estimée à au moins 10° en direction, il apparaît donc que, globalement, il y a un bon accord entre les orientations de fracturation déduites par les deux techniques, même si 90 % des fractures ne sont pas imagées par le FMS. La relative absence des familles N 0° et N 30° (mineures sur le FMS) est d'autant plus surprenante qu'elles correspondent aux fractures qui possèdent les épaisseurs les plus significatives.

4 DISCUSSION

4.1 Fractures utiles dans les réservoirs

Les deux exemples traités peuvent être considérés comme des analogues de réservoirs fracturés. Dans les grès de Soultz, plusieurs forages d'exploration géothermique ayant traversés des zones faillées ont été le siège de circulation d'eau et parfois d'huile (Herbrich, 1988 ; Genter *et al.*, 1995 ; Ledésert *et al.*, 1996). Dans la formation de Balazuc, le suivi chimique des boues de forage a montré l'existence de drains actuels dans les

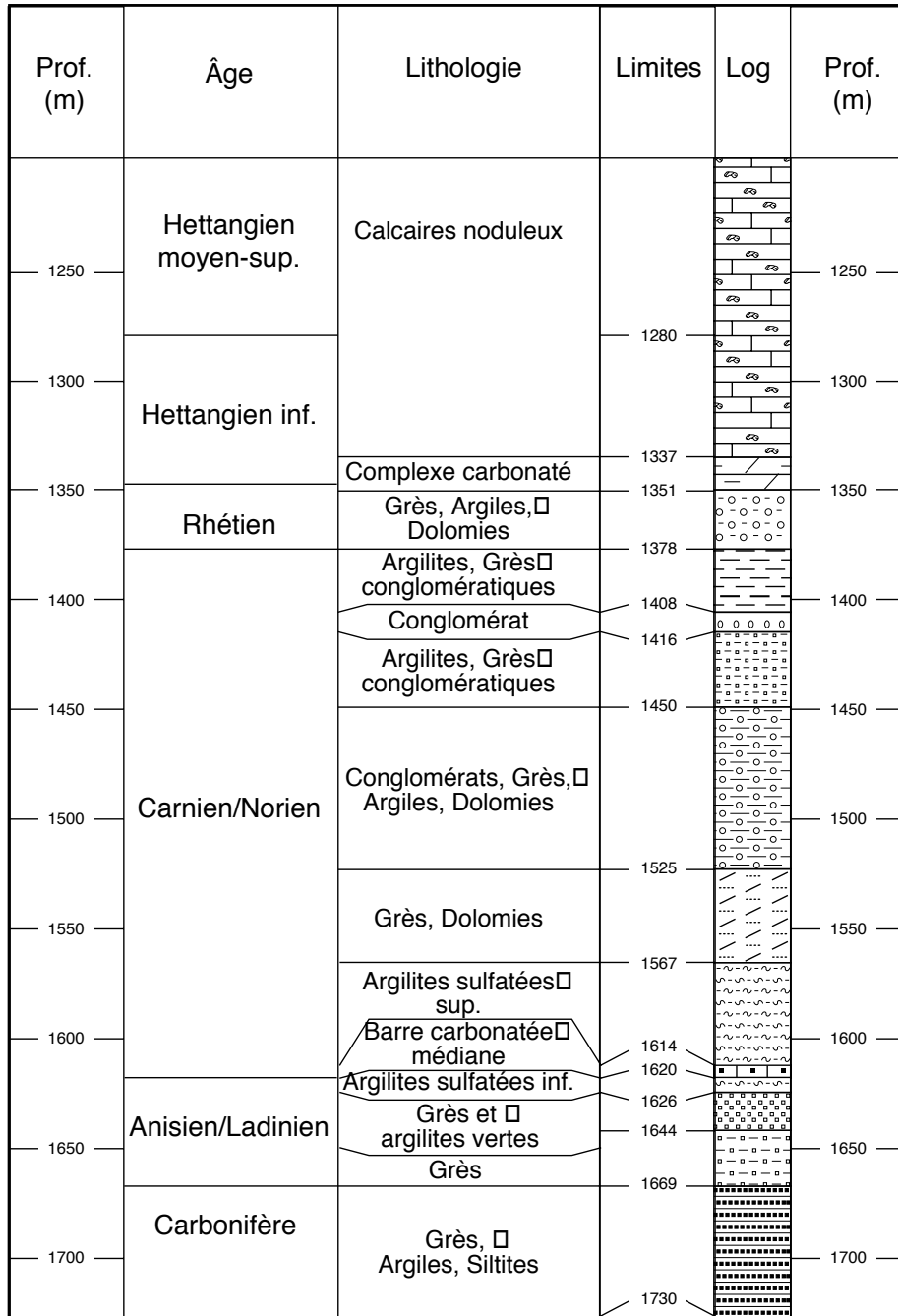


Figure 9

Les unités mésozoïques et paléozoïques recoupées par le sondage carotté BA1.
Mesozoic and Palaeozoic units intersected by cored Borehole BA1.

niveaux fracturés du Lias (Aquilina *et al.*, 1994 ; Bergerat et Martin, 1994). Les fractures représentent donc des drains potentiels qui participent à l'écoulement des fluides : eau, pétrole ou fluides géothermiques. Les fractures présentant des ouvertures libres seront plutôt détectées par le BHTV et celles fortement conductrices par le FMS. Bien qu'il s'avère difficile de dériver les propriétés

hydrauliques des fractures telles que la transmissivité à partir des seules données de puits, la comparaison carotte-image va nous renseigner sur les caractéristiques géométriques des fractures les plus transmissives, donc les plus utiles. Cette comparaison permet également de faire un bilan sur les possibilités réelles des techniques d'imagerie en termes de détection de fractures naturelles.

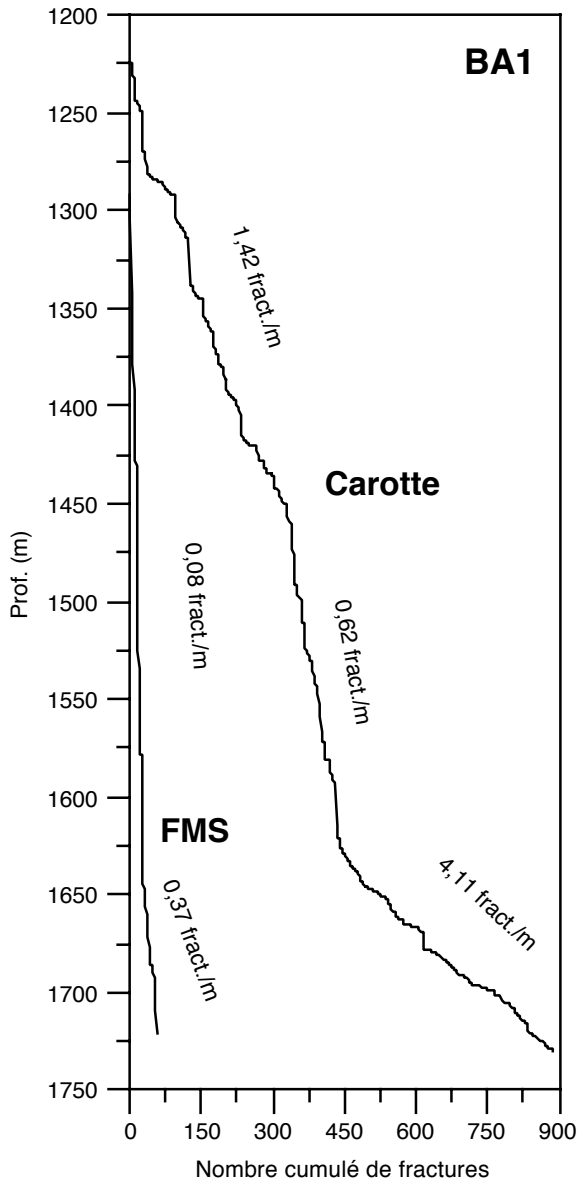


Figure 10
Profil cumulé du nombre de fractures le long du forage BA1 de Balazuc.
Cumulative profile of the number of fractures along Borehole BA1 at Balazuc.

4.2 Effet de la résolution des outils imageurs

Dans les grès de Soultz le BHTV image 50 % des fractures. Une statistique de leur épaisseur effective sur carottes confirme que 50 % d'entre elles ont une taille inférieure à 1 mm c'est-à-dire inférieure à la résolution de l'outil (fig. 5(a)). Ces structures ont donc peu de

chance d'être détectées surtout si leur colmatage est total. Dans la formation de l'Ardèche, le FMS image 6 % des fractures. La distribution des épaisseurs de fractures montre que 6 % seulement des fractures ont une épaisseur supérieure à 7 mm (fig. 5 (b)). C'est précisément la valeur de la résolution horizontale de l'outil. Il apparaît donc que pour les deux techniques mises en œuvre, le nombre de fractures détectées est directement lié à la résolution horizontale des outils.

4.3 Ouverture libre des fractures

L'analyse structurale des carottes montre aussi que les fractures présentent une ouverture libre résiduelle qui correspond généralement à un remplissage partiel des fractures. Dans les grès de Soultz, la barytine tapisse la quasi-totalité des fentes et 33 % d'entre elles possèdent une ouverture libre significative. Comme ces structures sont souvent les plus épaisses, la combinaison ouverture-épaisseur maximale garantit une détectabilité optimale. Dans les formations de Balazuc, moins de 2 % des fractures sont ouvertes (géodes, vacuoles) sur les carottes. Cette faible proportion est un handicap supplémentaire pour le FMS à imager *in situ* les fractures.

4.4 Espacement entre fractures

Le BHTV a montré que les valeurs d'espacements de fractures supérieures à 0,80 m sont correctement prédites. L'organisation en paquets, c'est-à-dire celle qui révèle les petits espacements, est généralement biaisée surtout lorsqu'il y a beaucoup de petites fractures (1365-1380 m, fig. 3). Le FMS ne semble pas fournir une distribution satisfaisante des espacements de fractures aussi bien pour les faibles ou fortes valeurs (fig. 6 (b)). En revanche, les deux outils montrent que, même si l'échantillonnage des fractures reste partiel, les directions dominantes de fracturation sur carotte se retrouvent sur les images.

4.5 Effet du champ de contrainte actuel

Les relations entre l'orientation du champ de contrainte en place et la géométrie du système de fractures peuvent également influencer la détectabilité des fractures par les systèmes d'imagerie. En effet, une contrainte horizontale maximale SH perpendiculaire à la direction principale de fracturation aura tendance à ne pas favoriser son ouverture sur la paroi du puits et donc son aptitude à être préférentiellement imagée. À

l'opposé, une contrainte majeure subparallèle à une direction majeure de fracturation aura tendance à réactiver les fractures au voisinage du puits et donc à renforcer les contrastes physiques, facilitant leur détection. On admet que lorsque le forage est vertical, les fractures verticales induites visibles sur les imageries de paroi sont parallèles à la direction de la contrainte horizontale maximale SH. À Soultz, dans l'intervalle considéré, l'analyse des imageries de paroi en termes de fractures verticales induites fournit une indication sur la direction de la contrainte horizontale maximale SH qui est ici proche de l'axe N 170-010° (fig. 11 (a)). À Balazuc, une analyse des structures verticales induites par le forage renseigne également sur la direction de la contrainte maximale qui est de N 120-140° (fig. 11 (b)). Dans les deux cas, la comparaison entre les directions majeures de fracturation naturelle relevées sur le BHTV et le FMS et celles de SH montre sensiblement les mêmes directions. Cette adéquation contrainte *in situ*-fracturation dominante peut favoriser la mise en relief des fractures dans les puits et donc faciliter leur détection par les systèmes d'imagerie. Bien que perpendiculaire à SH, la présence des familles N 60° à Soultz et N 0° et N 30° à Balazuc (figure 7 (b) à (d)) n'est pas contradictoire. En effet, ces familles représentent dans les deux cas les fractures les plus épaisses ayant une probabilité plus forte d'être détectées.

CONCLUSION

L'étude de la fracturation de deux séries sédimentaires de Soultz et de Balazuc reconnues par forage s'est appuyée sur la comparaison entre un carottage continu et des données d'imagerie de paroi (BHTV, FMS) également enregistrées en continu. Dans les deux cas, le relevé systématique de fractures réalisé sur les carottes par analyse visuelle s'est avéré plus exhaustif que celui déduit de l'interprétation des images de paroi.

À Soultz, la comparaison carotte-image a montré que 50 % environ des fractures n'étaient pas détectées par l'imagerie acoustique BHTV. Le filtre appliqué par cet outil n'affecte que les fractures les plus faiblement espacées, c'est-à-dire, les espacements inférieurs à 0,80 m. L'organisation en paquets visible sur les carottes n'est donc pas correctement échantillonnée par cet outil, surtout si les fractures sont colmatées et de très petites dimensions. Lorsque les fractures sont suffisamment espacées, le BHTV montre une distribution des espacements identique à celle des carottes. À Balazuc, l'analyse carotte-image montre que 6 % seulement des fractures ont été interprétées à partir de l'imagerie électrique FMS. Ce résultat implique que les espacements de fractures ne sont pas échantillonnés de manière satisfaisante avec, en particulier, une surestimation des grands espacements qui a pour effet d'amplifier la

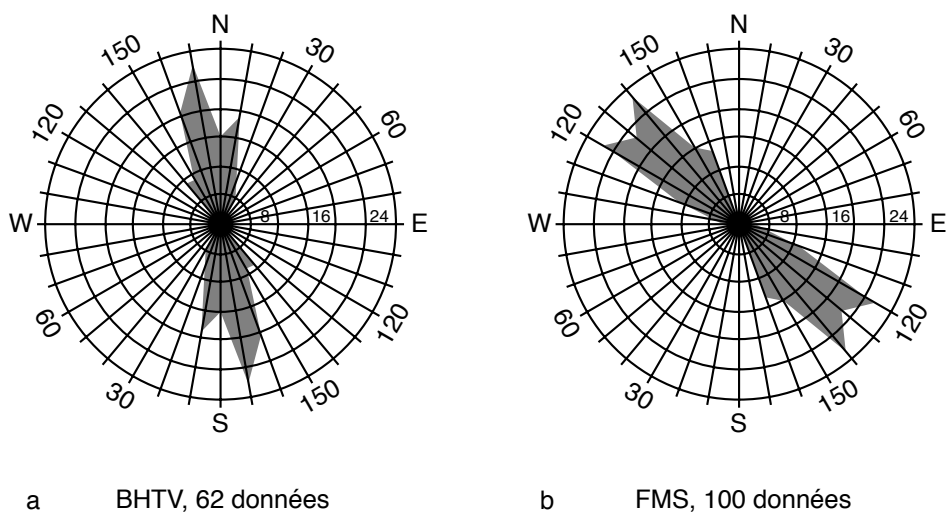


Figure 11

Orientation des fractures verticales induites relevées sur le BHTV à Soultz (a) et sur le FMS à Balazuc (b).

Orientation of the induced vertical fractures determined on the BHTV at Soultz (a) and on the FMS at Balazuc (b).

proportion de zones non fracturées. En revanche, les directions dominantes de fracturation révélées par les deux techniques (BHTV, FMS) sont très cohérentes en dépit des limitations d'échantillonnage.

L'effet principal qui limite la détection des fractures par ces techniques d'imagerie semble induit par le couple "épaisseur de la fracture-résolution". En effet, 45 % de la population de fractures collectées sur les carottes des grès de Soultz ont une taille inférieure au millimètre. Le fait que le BHTV ne détecte qu'une fracture sur deux est en accord avec sa résolution horizontale qui est comprise entre 1 et 2 mm. Dans les formations de Balazuc, la proportion de fractures visibles sur carottes ayant une épaisseur proche de celle de la résolution horizontale du FMS (7,5 mm) représente exactement la proportion de fractures effectivement détectée lors de l'analyse des images électriques, c'est-à-dire 6 %.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société *Socomine* et le programme *GPF-Ardèche (BRGM-DRED-INSU)* pour la mise à disposition des données de sondages

BIBLIOGRAPHIE

Aquilina L., J. Boulègue et J.F. Sureau (1994), Evolution of interstitial waters along the passive margin of the Southeast Basin of France: Welcom (Well Chemical On-line Monitoring) applied to Balazuc-1, Ardèche. *Applied Geochemistry*, **9**, p. 657-675.

Bergerat F. et P. Martin (1994), Analyse des failles du forage Balazuc-1 (programme GPF) et reconstitution des paléo-états de contrainte sur la bordure vivaro-cévenole du bassin du Sud-Est de la France. Relations avec la marge européenne de la Théthys ligure. *Bull. Soc. géol. France*, **165**, 4, p. 307-315.

Ekstrom M.P., C.A. Dahan, M.Y. Chen, P.M. Lloyd et D.J. Rossi (1986), Formation imaging with microelectrical scanning arrays. In *Proceedings 27th Annual Logging Symposium*, Paper 88, Trans. of SPWLA.

Genter A., H. Traineau, C. Dezayes, P. Elsass, B. Ledésert, A. Meunier et T. Villemin (1995), Fracture analysis and reservoir characterization of the granitic basement in the HDR Soultz project (France). *Geotherm. Sci. & Tech.*, **4**, 3, p. 189-214.

Herbrich B. (1988), Forage géothermique de Soultz-sous-Forêts (GPK1). *Rapport de fin de sondage*, 88 CFG 03, 118 p.

Ledésert B., J. Joffre, A. Ambles, P. Sardini, A. Genter et A. Meunier (1996), Organic compounds: natural tracers of fluids circulations between sediments and the granitic basement at Soultz-sous-Forêts (France). *J. Volcano. Geotherm. Res.*, **70**, 3-4, p. 235-253.

Ménillet F. avec la collaboration de C. Coulombeau, F. Geisser, H.J. Konrad et P. Schwoerer (1989), Notice explicative, *Carte Géol. France*, Feuille Lembach, 168, Orléans, Éd. BRGM, 91 p.

Pézarid P.A., R.N. Hiscott, M.A. Lovell, A. Collela et A. Malinverno (1992), Evolution of the Izu-Bonin intraoceanic forearc basin, western Pacific, from cores and FMS images. In Hurst, Griffiths, and Worthington (éds.), *Geological Applications of Wireline Logs II*, *Geological Society Publication*, **65**, p. 43-69.

Schlumberger (1992), FMI, *Full Formation MicroImager*. Éd. Schlumberger, SMP 9210, Houston, 42 p.

Vernoux J.F., A. Genter, P. Razin et C. Vinchon (1995), Geological and petrophysical parameters of a deep fractured sandstone formation as applied to geothermal exploitation, EPS-1 borehole, Soultz-sous-Forêts, France. *BRGM Open File Report*, R 38622, 69 p.

Zemanek J., E. E. Glenn, L.J. Norton et R.L. Caldwell (1970), Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer. *Geophysics*, **35**, p. 254-269.

Manuscrit définitif reçu en septembre 1996