



## Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille

Spécialité :

**Science de la Terre**

Présentée et soutenue publiquement par :

**Mélody LEFEVRE**

*Pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de l'Université d'Aix-Marseille*

*Spécialité: Sciences de la Terre et de l'Univers*

---

### **Propriétés structurales, pétro-physiques et circulations de fluides au sein d'une zone de failles dans les argiles**

Soutenue le 26/04/2016 devant la commission d'examen composée de :

Benoît Valley .....Directeur du jury  
Yves Geraud .....Rapporteur  
Olivier Fabbri.....Rapporteur  
Christophe Nussbaum.....Examineur  
Pierre Dick.....Examineur  
Raymi Castilla .....Examineur  
Anne-Marie Boullier.....Invitée  
Yves Guglielmi.....Directeur de thèse  
Pierre Henry.....Co-directeur de thèse

## Remerciements

Parce qu'une thèse est avant tout une expérience relationnelle, on ne peut détacher le travail effectué, des personnes avec lesquelles on a échangé.

Mes premiers remerciements vont à mes directeurs de thèse, Yves Guglielmi et Pierre Henry, qui m'ont donné la chance de pouvoir réaliser ce travail. Ensuite, je remercie toute la Fluids & Faults Team (FV. Donze, L. DeBarros, D. Neyens, D. Rivet, C. David, P. Dick, C. Gout, R. Castilla, J. Lamarche, S. Viseur, A. Schubnel, A. Bonnelye, A. Tsopela, F. Cappa ...) avec qui j'ai échangé tout au long de ces trois années lors de nos fameuses réunions trimestrielles. Et plus particulièrement aux participants TOTAL ; Claude Gout qui, entre autre, m'a soutenue lors de ma première conférence in english et Raymi Castilla qui s'est cramponné dans le minuscule coucou Pau-Marseille pour venir échanger avec moi. Je remercie Juliette Lamarche pour son aide en géologie et pour sa faculté à clarifier mes brouillons et Sophie Viseur pour son aide en modélisation. Je tiens particulièrement à adresser mes remerciements à Pierre Dick, d'une gentillesse sans égale, et qui a toujours été là pour moi. Je tiens à remercier aussi tout particulièrement mon ami Urs Scharer, officiellement pour les heures passées à corriger mon anglais et officieusement pour sa présence et nos échanges que j'espère garder le plus longtemps possible.

Il y a aussi tous les stagiaires et les CDD qui ont participé au projet, que j'aimerais remercier. Et plus particulièrement, La petite Lisa et Guillaume. La deuxième partie de mes remerciements concerne « ma vie de labo » : Aux filles ; Julia et Justine. Cécile, ma collègue de bureau ; car il faut dire que partager un bureau de 6 mètres carrés, ça rapproche ! Les copains de clope ; Jean, Baptiste et Jouves ainsi que les copains de café ; Matonti, Simon, Seb, Alexandre, Dawin.

Parce que la vie de labo est complétée par la vie perso;

Je remercie Antoine, qui a eu la « joie » de m'accompagner pendant ces trois années de thèse et qui pour moi, remporte le prix de doctorant « passif ». Et plus généralement, mon entourage et ma famille, car il faut bien dire que la vie personnelle représente des fondations indispensables à la réalisation de projet et de soi !

J'ai toujours terminé mes rapports par «je considère ce stage non pas comme une finalité mais comme une étape», mais après réflexion, ce travail de thèse est aussi une finalité, une finalité que je dédie à mon père.



## **Propriétés structurales, pétro-physiques et paléo-circulations de fluides au sein d'une zone de failles dans les argiles**

---

### **RESUME**

Les zones de failles concentrent la migration de fluides et la déformation dans la croûte supérieure. Il est courant d'observer des modifications de propriétés de l'encaissant attribuées à la présence de failles. Les propriétés hydrauliques des formations argileuses en font des excellents sites de stockage (CO<sub>2</sub>, déchets nucléaires...), des terrains de couverture pour des réservoirs profonds ou des roches mères depuis lesquelles les hydrocarbures migrent. Les zones de failles peuvent jouer deux rôles contraires dans la circulation de fluides, soit elles s'expriment sous forme de drains, soit elles constituent une barrière, et en général, les deux rôles sont combinés au sein d'une même zone de failles. Les processus de migration des fluides dans les zones de failles affectant les formations argileuses sont peu connus. Cette étude s'est donc focalisée sur la structure, les paléo-circulations, les circulations actuelles lors de tests d'injection et les propriétés pétro-physiques de la zone de failles présente dans le laboratoire de recherche souterrain (URL) de Tournemire dans les argilites Toarciennes. La structure de la zone de failles a été caractérisée par le biais de forages et reconstituée en 3D par modélisation numérique, permettant de définir un certain nombre de faciès de déformation. Il apparaît que l'architecture de la zone de failles se caractérise par une imbrication de faciès de déformations plus ou moins intenses (zones intactes, zones fracturées, brèches) sans claire organisation en cœur et zone endommagée comme observée dans les roches plus dures. Les zones intactes, fracturées et les brèches sont respectivement caractérisées par des porosités matricielles comprises entre 9.5-13.5, 10-15 et 13-21%. Malgré la forte porosité matricielle de la brèche de failles, celle-ci s'est révélée jouer le rôle de barrière vis-à-vis des fluides lors des tests hydrauliques, isolant ainsi les deux compartiments fracturés de la zone de failles. La circulation de fluide se concentrant aux limites de la brèche et au niveau des zones de failles « immatures » ou secondaires comprises dans les zones fracturées. Lors de son activité, la zone de failles a déjà été affectée par au moins deux phases de circulations de fluides.

---

**Mots clefs :** argile, zone de failles, structure, fluides, propriétés pétro-physiques, cœur de faille, zone endommagée, densité de fracturation, cimentation, brèche.

### ABSTRACT

Fault zones concentrate fluids migration and deformations in the upper crust. It is common, to observe modification of properties in the host-rock attributed to the presence of the fault zones. The hydraulic properties of shale formations make them excellent storage sites (CO<sub>2</sub>, nuclear wastes...) sealing layers for deep reservoirs or source rocks of hydrocarbons. Fault zones can play two opposite roles in the fluid circulation, either drains or barriers, and in general, both roles are combined within the same fault zone. What are the conditions that promote the fluid circulation along the fault zones in shales and what are the impacts of the fault zone on the properties of the formation are relatively poorly explored key questions. This study focused on characterizing the relationships between fault architecture, paleo-fluid as well as current fluid circulations through the analysis of fault calcite mineralizations, injection tests and petro-physical properties conducted on a fault zone outcropping underground in the research laboratory (URL) of Tournemire nested in the Toarcian shale. The structure of the fault zone was characterized using boreholes data and reconstructed in 3D through modeling to define different deformation facies; intact, fractured and breccia zones. No clear organization of the facies is observed, a fault core and a fault damage zone being difficult to define as it is in hard rocks. The intact, fractured and breccia facies are characterized by a porosity of 9.5-13.5, 10-15 and 13-21% respectively. Despite the high porosity, the breccia zones appeared low permeable to fluids injections playing the role of a low permeable to impervious barrier between the two fault compartments. Large fluid flowrate concentrated along a few "channels" located at the breccia boundaries and in the secondary fault zones that displayed fractured facies and limited breccia fillings. Detailed microstructural and geochemical analysis of a block sampled at the interface between breccia zones and fractured damage zones revealed that fluids circulated out of the main shear zones, in micro-more or less inherited fractures highlighting a decoupling between fault slip and fluids migration.

---

**Keywords:** shale, fault zone, structure, fluid circulation, petro-physical properties, fault core, damage zones, density of fracture, cementation, breccia.

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1 :</b> Composantes du vecteur contrainte C exercées au point P sur une face du tétraèdre. D'après Mercier et Vergély, 1992. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 23 |
| <b>Figure 2 :</b> Illustration des différents stades de la genèse d'un plan de rupture à partir de micro-défauts sous sollicitation mécanique. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 24 |
| <b>Figure 3:</b> Représentation graphique des conditions de rupture (tricerclé de Mohr), avec en abscisse, la contrainte normale ( $\sigma_n$ ), et la contrainte tangentielle ( $\tau$ ) en ordonnée. $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , $\sigma_3$ et $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ représentent la contrainte principale maximale, la contrainte principale intermédiaire, la contrainte principale minimale et la contrainte moyenne (appelé aussi pression de confinement). Les paramètres T, C et $\phi$ , représentent les propriétés de traction, de cohésion et d'angle de friction du matériau donné. L'angle $\alpha$ représente l'orientation du plan en fonction d'une des contraintes principales maximum, $\sigma_1$ ou minimum, $\sigma_3$ . .... | 25 |
| <b>Figure 4:</b> Présentation des modes I, II et III de propagation de la rupture caractérisés par l'ouverture, le glissement plan et anti-plan, respectivement. (Illustration tirée de Roche, 2011). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| <b>Figure 5:</b> Illustration des trois types de rupture (mode I et mode II, III) en fonction de l'état de contraintes. Le mode I se développe en faible pression de confinement et les modes II et III se réalise pour des pressions de confinement plus élevées. D'après Sibson, 1990b. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 27 |
| <b>Figure 6:</b> Présentation des différents type de failles (d'après Caron et al., 2003). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 29 |
| <b>Figure 7:</b> Schéma d'une zone de failles, d'après Childs et al., 2009. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 |
| <b>Figure 8:</b> Relation de proportionnalité entre l'épaisseur de la zone de failles et son déplacement, d'après Childs et al., 2009 utilisant les données issues de Wolf (1985), Childs et al., (1996), Childs (2000), Faulkner and Rutter (2001) et Van der Zee (2002). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 31 |
| <b>Figure 9:</b> Liens étroits entre les propriétés architecturale, hydrologique et mécanique d'une zone de failles, d'après Faulkner et al., 2010. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 32 |
| <b>Figure 10:</b> Agencement de la zone de cœur de faille (fault core) et la zone endommagée (damage zone), prenant en compte une ou plusieurs zones de cœur de faille (d'après Faulkner et al., 2010). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| <b>Figure 11:</b> Classification des roches de faille d'après Sibson, 1977. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 34 |
| <b>Figure 12:</b> Variation de la perméabilité en fonction de la structure de la zone de failles. Cas (a) avec un seul cœur de faille et une densité de fracture décroissante simple et (b) cas plus complexe présentant plusieurs cœurs de faille et plusieurs pics de densité de fractures. D'après Faulkner et al., 2010. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 36 |
| <b>Figure 13 :</b> Profil schématique de perméabilité au travers d'une zone de failles composée d'un cœur central encadré par une zone endommagée puis du photolithe. Les valeurs de perméabilité ont été obtenues à partir de différents matériaux (sédiments, granite, conglomérat, métapélite...) pour une pression effective proche de 100 MPa (d'après Boutareaud et al., 2008). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 37 |
| <b>Figure 14 :</b> a) Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0 % compris) et des argiles pures, en fonction de la pression de confinement. Les chemins de chargement et de déchargement sont illustrés par une flèche sur la courbe correspondant aux argiles de type illite. b) Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0% compris) et des argiles pures, en fonction de la déformation cisailante (axe supérieur) et de déplacement (axe inférieur). Lors de ces expériences, la pression de confinement est de 200 MPa (d'après Morrow et al., 1984). ....                                                                                     | 39 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 15 :</b> Structures typiques rencontrées dans les cœurs de faille argileux, les plans correspondants aux flèches représentent les plans de glissement principaux, d'après Rutter et al., 1986. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 41 |
| <b>Figure 16 :</b> Anisotropie de perméabilité d'un échantillon de cœur de faille riche en minéraux argileux, d'après Faulkner et Rutter, 1998). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 42 |
| <b>Figure 17 :</b> Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0% compris) et des argiles pures, (en rouge) en fonction de la déformation cisailante (axe supérieur) et de déplacement (axe inférieur). Lors de ces expériences, la pression de confinement est de 200 MPa (d'après Morrow et al., 1984). ....                                                                                                                                                                      | 43 |
| <b>Figure 18:</b> Carte géologique simplifiée du bassin des Causses (Figure modifiée d'après Constantin, 2002). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 45 |
| <b>Figure 19:</b> Localisation du bassin des Causses et carte géologique simplifiée du bassin des Causses (Figure modifiée d'après Constantin, 2002). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 49 |
| <b>Figure 20 :</b> Localisation sur la carte géologique du BRGM au 25 000 des sites où les fractures ont été analysées dans le secteur de Tournemire. En orange est représentée l'orientation des fractures pour chaque site. Le code couleur vert, rouge et bleu représente le Bajocien inférieur, l'Aalénien et le Toarcien supérieur (Martin, 2015). ....                                                                                                                                                                     | 50 |
| <b>Figure 21 :</b> 1- Faille normale syn-sédimentaire au niveau de l'entrée du tunnel de Tournemire (en rouge, vert et jaune l'Aalénien, le Bajocien inférieur et le Bajocien inférieur, respectivement). 2- Faille normale syn-sédimentaire à l'est du cirque de Tournemire (en rouge, vert et jaune l'Aalénien, le Bajocien inférieur et le Bajocien inférieur, respectivement). 3- Faille calcifiée N090 50N dans les argiles Toarciennes dans le secteur du site 6 (Martin, 2015). ....                                      | 52 |
| <b>Figure 22 :</b> Carte géologique du secteur de Tournemire remplaçant la faille de Tournemire par un système de trois failles syn-sédimentaires (Martin, 2015). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 53 |
| <b>Figure 23:</b> Coupe géologique du secteur de Tournemire suivant l'axe du Tunnel de l'IRSN (en jaune). La station expérimentale se situe au niveau des galeries 1996-2008 et 2003 notées par des rectangles noirs le long du tunnel ferroviaire. ....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 53 |
| <b>Figure 24:</b> Log stratigraphique du secteur de Tournemire. Sont représentés par: (11-2), l'Héttangien; (13-4), le Sinémurien; (15), le Carixien; (16), le Domérien, (17), le Toarcien inférieur; (18-9a), Le Toarcien supérieur à l'Aalénien inférieur; (19b), l'Aalénien s supérieur; (j1a), le Bajocien inférieur; (j1b), le Bajocien supérieur; (j2a), le Bathonien inférieur; (j2b), le Bathonien supérieur; (j3-5), le Callovien à l'Oxfordien inférieur; (j6-7), l'Oxordien supérieur au Kimméridgien inférieur. .... | 54 |
| <b>Figure 25:</b> Présentation du tunnel de Tournemire (Vue du dessus) avec les différentes galeries/forages et carte des failles et des fractures rencontrées au sein du tunnel, avec en gris les failles secondaires, F1 et F2 les deux grandes zones de failles dont est la zone endommagée et la zone de cœur de faille sont représentées en orange et en rouge, respectivement. Cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014. ....                                                               | 55 |
| <b>Figure 26:</b> Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur, campagne de 1999. Modifié, d'après Rejeb et al., 2003. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 57 |
| <b>Figure 27:</b> Courbe de Subsidence des argilites Toarcienne de Tournemire. (Figure modifiée d'après Séranne et al., 2014). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 60 |
| <b>Figure 28:</b> a, Localisation de la zone d'étude, cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014. b, caractéristiques des forages. Le système de coordonnées utilisé est Lambert III. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 61 |
| <b>Figure 29:</b> Schéma qui présente deux forages horizontaux interceptant des objets de type fracture (traits bleus). Exemple de deux corrélations « objet à objet » (traits pointillés) et de                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| l'interprétation en tant que domaine/faciès de déformation, ici définies en termes de faciès fracturé. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 62 |
| <b>Figure 30</b> : Exemple de perturbation d'azimut dans les 7-9 premiers mètres du forage (l'origine représente la tête du forage) et dans le cœur de faille. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 65 |
| <b>Figure 31</b> : Détermination et correction du roll-over en utilisant l'orientation des plans de stratification.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 66 |
| <b>Figure 32</b> : Comparaison entre la projection des pôles des structures rencontrées dans chacun des forages (Schmidt, hémisphère inférieur) avant et après correction des roll-over. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 66 |
| <b>Figure 33</b> : Plan d'échantillonnage des échantillons CLU/CON le long du forage INJ représentés en rouge et jaune, respectivement. Les domaines de déformation ; HR ; roche intacte (FW) compartiment footwall, (HW); compartiment hanging wall, DZ; zone endommagée, (FW) compartiment footwall, (HW) compartiment hanging wall et FC ; fault core sont représentés en bleu clair, bleu moyen et bleu foncée, respectivement. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 69 |
| <b>Figure 34</b> : Plan d'échantillonnage des échantillons CLU/CON/SNEEDS/PET le long des différents forages HS1, M, R, S2, S4 et S5, représentés en rouge, jaune, violet et vert, respectivement. Les domaines de déformation ; HR ; roche intacte (FW) compartiment footwall, (HW); compartiment hanging wall, DZ; zone endommagée, (FW) compartiment footwall, (HW) compartiment hanging wall et FC ; fault core sont représentés en bleu clair, bleu moyen et bleu foncée, respectivement. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 70 |
| <b>Figure 35</b> : Préparation de l'échantillon. a) Imprégnation de l'échantillon à la résine époxyde. b) résine époxyde composée d'araldite et de durcisseur (liquide jaune). c) Mise sous vide dans l'échantillon. d) Séchage pendant près de 72h. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 71 |
| <b>Figure 36</b> : Exemple de fiche de puits structurale avec de gauche à droite ; l'image optique des parois du forage (diagraphy). Les tracés des structures et de quelques plans de stratification WellCad sur diagraphie optique (Log_WellCad, Strati). Les tracés des structures sur diagraphie provenant du logiciel gOcad (gOcad Log). Déroulé du CT-scan des carottes (CT-scan). Les tracés sur CT-scan (Log structural). L'épaisseur de minéralisation basée sur le CT-scan (aperture). L'image du log structural de la carotte (core log). Le Dip direction, pendage et tétard pour chaque structure, en rouge, gris, noir provient de la modélisation gOcad, du tracé WellCad diagraphie, du tracé WellCad CT-scan. La représentation des orientations sous stéréogramme Schmidt, hémisphère inférieur (Stereo plot) et les valeurs d'azimuth et d'inclinaison corrigées du forage (IMG_AZ et IMG_INCL). .... | 74 |
| <b>Figure 37</b> : Légende du log structural utilisée dans les fiches de puits structurales. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 75 |
| <b>Figure 38</b> : Exemple de fiche de puits pétrophysique avec de gauche à droite ; la porosité et la teneur en eau (porosity, water content) mesurées sur échantillons. La densité de grain et le degré de saturation (grain density, saturation) mesurés sur échantillons. La conductivité mesurée sur échantillon (sxx, syy, szz et smean, dans la direction x, y, z et moyenne) et par la sonde DIL38 (CONDL, CONDS, long et court espacement, respectivement). Les teneurs en Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> et MgO mesurées sur échantillons. La valeur de susceptibilité magnétique sur échantillons (Mag. Sus.). Le Natural gamme (GN, GN DIL) et enfin les teneurs en Potassium, Uranium et Thorium mesurées à partir de la sonde GRS (40-K, 238-U et 232-Th) et les valeurs de K <sub>2</sub> O sur échantillon (K <sub>2</sub> O). ....             | 76 |
| <b>Figure 39</b> : Présentation des trois échelles modélisées. Le premier est à l'échelle du massif (kilométrique), le deuxième modèle est à l'échelle du site d'expérience (pluri-métrique) et le troisième à l'échelle d'un échantillon prélevé dans la galerie 2003 (centimétriques). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 77 |

**Figure 40 :** Report en trois dimensions des différentes informations (fractures, cœur de faille schématique, capteurs sismiques, jauges de déformation...) en vue de réaliser un modèle intégré..... 78

**Figure 41 :** Modélisation des zones testées hydrauliquement. Le test 1 se trouve dans la zone endommagée du compartiment ouest (hanging wall) de la zone de failles et plus précisément, c'est une faille lustrée qui est testée. Le test 2 se trouve dans le compartiment Est (footwall) de la zone de failles, et plus précisément la zone intacte. Le test 3 se situe aussi dans le footwall, dans la zone endommagée, et concerne une série de fractures calcifiées. Le test 4 se trouve dans la zone de cœur de faille..... 79

**Figure 42 :** a, Localisation de la zone de failles étudiée F2 et des forages utilisés, cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014. b, caractéristiques des forages. Le système de coordonnées est Lambert III. .... 91

**Figure 43 :** a, Identification et acquisition des données de failles/fractures dans une portion du forage S4. De gauche à droite, la diagraphie optique de la paroi de forage, l'image du CT-scan de la carotte, le dip et le dip direction de la structure (faille/fracture) digitalisée sur la diagraphie/CT-scan et l'épaisseur maximum de cimentation (calcite) de la structure digitalisée. b, Observations de deux types de fracture et d'une faille non calcifiée (rose) sur carotte. Les deux types de fracture sont; les fractures finement calcifiées (bleu) et les fractures cimentées et bréchifiées (orange). c, Photo de l'éponte ouverte d'une faille présentant des stries. .... 92

**Figure 44 :** Histogrammes présentant la densité de fractures (post-correction de Terzaghi) le long des forages (S2, HS1, R, M, S4 et S5), l'origine du graphique correspond à la tête du forage. La zone hachurée (FC) représente le cœur de faille. En noir sont représentées les fractures avec un pendage  $< 45^\circ$ ; en gris avec un pendage  $> 45^\circ$ ; les petites flèches représentent les failles; les flèches moyennes représentent les failles secondaires (sf1, sf2 et sf3); les grandes flèches représentent le plan principal de faille. Les failles/failles-secondaires polies/lustrées, cimentées et non cimentées sont représentées en rouge, vert et bleu, respectivement..... 94

**Figure 45 :** Canevas de Schmidt, hémisphère inférieure où sont représentés les pôles des structures rencontrées dans chaque forage (HS1, M, R, S2, S4 et S5). Les fractures avec un fin remplissage de calcite, avec un remplissage de calcite et de brèche, les failles/failles-secondaires calcifiées, les failles/failles-secondaires non calcifiées, les failles/failles-secondaires lustrées/polies et les failles principales sont représentées par des petits cercles, triangles, carrés, losanges et des grands cercles, respectivement. Les structures appartenant au hanging wall sont représentées par des symboles pleins et les structures appartenant au footwall sont représentées par des symboles vides. La gamme de couleur représente la distance de la structure au plan de faille principale (interface entre le DZ/FC). La couleur rouge représente les structures les plus proches au plan de faille principale et la couleur noire représente les structures les plus éloignées du plan de faille principal. .... 95

**Figure 46 :** a, Carte des structures d'une portion (11.08-11.20m) de carotte du forage R comprenant la faille secondaire sf1. b, Photo de la portion de carotte. c, Projection des pôles des failles observées sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieure. Les plans de stratification, des failles finement cimentées, les failles cimentées et bréchifiées et la faille secondaire sf1 sont représentées en gris, rouge, orange et noir, respectivement. .... 96

**Figure 47 :** Projection des failles rencontrées dans le forage INJ sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieure..... 97

**Figure 48 :** Partie supérieure : Portion du CT-scan de carotte du forage S4 présentant deux domaines de déformation différents ; la brèche de faille (f-br) et la brèche (br) en rouge et bleu, respectivement. (cl), claste de taille pluri-centimétrique présent dans la brèche, (a), faille

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| traversant la totalité de la carotte, (b), veines de calcite et (c), vide, c'est-à-dire pas de récupération de matière lors de l'extravasation de la carotte. Partie inférieure : Portion du CT-scan du forage INJ comprenant le plan de faille principal (N150° ; 60°W°) séparant la zone de brèches de faille à l'ouest et le domaine endommagé à l'Est.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 97  |
| <b>Figure 49 :</b> Vu du modèle 3D gOcad de la zone de failles F2. Les fractures/failles sont représentées en gris, les plans moyens représentant les zones fracturées sont représentés en rose et le domaine bleu englobe toutes les zones de FC. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 99  |
| <b>Figure 50 :</b> (b1) et (b2) sont deux modèles conceptuels. (b1) met en évidence une zone de failles composée d'un cœur hétérogène avec de fortes variations d'épaisseur et d'une zone endommagée d'épaisseur asymétrique de part et d'autre du FC. Le FC est séparé de la DZ par les plans principaux de failles. Les zones fortement fracturées de la zone endommagée sont concentrées à proximité des failles secondaires. Le modèle conceptuel (b2) met en avant plusieurs zones de failles; avec une zone de failles principale et plusieurs zones de failles secondaires. ....                                                                                                                            | 100 |
| <b>Figure 51 :</b> (1) Extension E-W du Bajocien inférieur et failles normales syn-sédimentaire N030°-N040°, (2) formation syn-compaction sédimentaire des deux familles de joints (N160°-N190° et N080°-N110°). (3) Compression Pyrénéenne est formation de F2 au niveau de l'intersection entre la faille normale syn-sédimentaire et les joints N160°-N190°. Jeu décrochant dextre au cours de la première phase de compression Pyrénéenne et sénestre au cours de la deuxième phase de compression Pyrénéenne. Les failles N130°-N140° représentent un système de Riedel associé au mouvement sénestre de la zone de failles.....                                                                              | 101 |
| <b>Figure 52 :</b> Présentation de l'échantillon. Les faces grises et hachurées ont été l'objet d'une analyse structurale présentée dans la figure 53. Les contours bleus (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9 et TS10) représentent la localisation des lames minces. Les rectangles blancs (L1, L2, L3, L4 et L5) représentent la localisation des analyses sur lames minces présentées sur la figure 55. Les cubes blancs ( $\mu$ XRF <sub>1</sub> , $\mu$ XRF <sub>2</sub> et $\mu$ XRF <sub>3</sub> ) représentent les zones analysées au $\mu$ XRF présentées dans la figure 54. Les notations S01 et S02 représentent la localisation des mesures des plans de stratification de la figure 53. .... | 139 |
| <b>Figure 53 :</b> Analyse structurale des faces verticale Nord (0zx), et horizontale supérieure (0xy) perpendiculaire à la direction du plan de faille principal. Les lignes grises, pointillées noires et noires représentent la famille de fractures f1a, f1b et f1c. Les lignes bleues et rouges représentent les familles de failles f2 et f3. A- Zoom sur un plan de cisaillement f3. B- Zone de brèches. C- Zoom sur la rotation antihoraire et le jeu sénestre de la famille de fractures f1 à proximité d'un plan de faille f3. D-Zoom sur le jeu sénestre de la famille de failles f2. S01 et S02 représentent les mesures de plans stratigraphiques (localisation sur figure 52). ....                  | 140 |
| <b>Figure 54 :</b> a- Zones étudiées au $\mu$ XRF. $\mu$ XRF <sub>1</sub> et $\mu$ XRF <sub>2</sub> sont localisées dans la zone endommagée et $\mu$ XRF <sub>3</sub> est localisée dans la zone de transition entre la zone endommagée et le cœur de faille (localisation dans figure 52). b- Spectre chimique moyen pour chaque zone ( $\mu$ XRF <sub>1</sub> , $\mu$ XRF <sub>2</sub> , et $\mu$ XRF <sub>3</sub> ) mettant en évidence des variations chimiques entre la zone endommagée et la zone de transition et entre la zone endommagée et le cœur de faille.....                                                                                                                                        | 142 |
| <b>Figure 55 :</b> Observations sur lames minces dans différents endroits de la zone de failles. Pour chaque observation, la notation (Pol) représente les analyses par microscope polarisant et (CT) par cathodoluminescence. Les observations L1 et L2 sont localisées dans la zone endommagée (provenant des lames minces TS1 et TS2, Figure. 50). L3, L4 et L5 sont localisées dans la zone de transition entre la zone endommagée et le Cœur de faille (provenant de la lame mince TS3, Figure. 50). ....                                                                                                                                                                                                     | 143 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 56 :</b> Carte présentant le forage d'injection (INJ, en noir), le forage doté du dispositif de résistivité (R, vert), les intervalles des tests (en rouge) et la géologie du modèle gOcad.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 177 |
| <b>Figure 57 :</b> Schéma de l'espacement inter-électrode dans la flûte de résistivité. La localisation par rapport aux autres forages et aux ponts d'injection est présentée dans la figure 54a. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 178 |
| <b>Figure 58 :</b> Localisation et description des zones testées. Le test 1 se trouve dans la zone endommagée du compartiment ouest (hanging wall) de la zone de failles et plus précisément, c'est une faille lustrée qui est testée. Le test 2 se trouve dans le compartiment Est (footwall) de la zone de failles, et plus précisément la zone intacte. Le test 3 se situe aussi dans le footwall, dans la zone endommagée, et concerne une série de fractures calcifiées. Le test 4 se trouve dans la zone de cœur de faille. La figure 54a présente la localisation de ces différents tests. .... | 179 |
| <b>Figure 59 :</b> Représentation de la position des points de mesure et de la procédure d'acquisition via le dispositif dipôle-dipôle. Chaque changement de couple d'électrodes se fait en 10 ms. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 180 |
| <b>Figure 60 :</b> Graphique représentant la résistivité en fonction de la profondeur et du temps et représentant l'ensemble des données de résistivité totale acquises sur une période d'un an et 3 mois (entre le 21/11/13 au 28/02/2015). L'échelle de couleur correspond aux valeurs de résistivité en $\Omega.m$ , avec en bleu les valeurs les plus basses et en rouge, les valeurs les plus fortes. ....                                                                                                                                                                                        | 181 |
| <b>Figure 61 :</b> En bleu, surfaces humides, c'est-à-dire affectées par la circulation de fluides au niveau de la paroi Est du Tunnel principal à la fin de la phase 2 d'injection (le 19/06/2014, à 16h). En rouge, le forage d'injection, en vert, le forage de résistivité et les sphères bleues représentent la localisation des différents essais de la phase 1. ....                                                                                                                                                                                                                            | 182 |
| <b>Figure 62 :</b> Heure et valeur de débit associées aux différentes têtes de forage lors des quatre essais de la phase 1. En blanc, bleu clair, bleu, bleu foncé et bleu nuit, les valeurs de débit calculées de 0ml/min, <50ml/min, 50-100ml/min, 100-200ml/min et >200ml/min.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 183 |
| <b>Figure 63 :</b> Heure et valeur de débit associées aux différentes têtes de forage lors des deux essais de la phase 2. En blanc, bleu clair, bleu, bleu foncé et bleu nuit, les valeurs de débit calculées de 0ml/min, <50ml/min, 50-100ml/min, 100-200ml/min et >200ml/min.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 184 |
| <b>Figure 64 :</b> Diagraphie optique de la paroi du forage R, log structural du forage R avec les fractures calcifiées fermées, les failles ouvertes, les failles lustrées/polies ouvertes et le cœur de faille représentés ne rose, noir, rose et gris, respectivement et log de différence de résistivité entre, avant et après les tests d'injection. ....                                                                                                                                                                                                                                         | 185 |
| <b>Figure 65 :</b> Les différentes coupes horizontales du modèle structural gOcad correspondant aux profondeurs moyennes des différents essais. Les coupes à h = 512, 508, 510 et 510.7m correspondent aux essais 1, 2, 3 et 4 de la phase 1. Les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre le l'axe du forage et le plan de coupe. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 186 |
| <b>Figure 66 :</b> Les différents chemins préférentiels des fluides réalisés en utilisant les fuites aux têtes des forages, pour les différents tests de la phase 1. Les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre le l'axe du forage et le plan de coupe. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 187 |
| <b>Figure 67 :</b> Différents chemins préférentiels d'écoulement des fluides déduits de l'analyse des fuites aux têtes des forages et des surfaces de parois humides, pour les différents tests (essais 5 et 6) de la phase 2. Les étoiles bleues indiquent les fuites.et les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre le l'axe du forage et le plan de coupe. ....                                                                                                                                                                                                                | 188 |
| <b>Figure 68 :</b> Représentation des zones de failles secondaires, de l'EDZ (zone d'endommagement autour du tunnel) et des forages affectés par les fluides (en bleu). Les secteurs bleus ont été définis en interpolant le trajet point d'injection-fuites en tête de forage. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 190 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 69 :</b> Modèle conceptuel hydraulique où sont uniquement représentées les zones de failles secondaires et l'interface entre le domaine de cœur bréchique et la zone endommagée.                                                                                                                                                                                                                                                                       | 191 |
| <b>Figure 70 :</b> (a) Valeurs de porosité et de teneur en eau moyenne de chacun des forages dans le HR-HW (zone intacte compartiment Ouest), DZ-HW (zone endommagée fracturée compartiment Ouest), FB (brèche de faille), DZ-FW (zone endommagée fracturée compartiment Est) et HR-FW (roche intacte compartiment Est). (b) Graphique présentant les valeurs de teneur en eau en fonction de la porosité pour le HR (en bleu), le DZ (orange) et le FB (rouge). | 192 |
| <b>Figure 71 :</b> Corrélation entre les valeurs de porosité mesurées et les valeurs de CT moyen à proximité des échantillons. En rouge, la totalité des mesures et en noir est exclu les mesures sur échantillons portant des pyrites de taille importante.                                                                                                                                                                                                     | 193 |
| <b>Figure 72 :</b> Profils de porosité mesurée sur échantillons, en rouge, et porosité calculés, en gris le long des forages R, HS1, et S4. Avec DZ, FB, HW et FW pour la zone endommagée, la brèche de faille, le compartiment Ouest et le compartiment Est.                                                                                                                                                                                                    | 194 |
| <b>Figure 73 :</b> Schématisation des différentes hypothèses permettant d'expliquer la présence du « halo » autour de la brèche de faille.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 195 |
| <b>Figure 74 :</b> Figure de synthèse récapitulant les principales conclusions sur les caractéristiques de la zone de failles étudiée selon différents aspects ; structure, déformation, perméabilité de fractures et les propriétés pétrophysiques.                                                                                                                                                                                                             | 235 |

## LISTE DES ANNEXES

|                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Annexe 1 :</b> Fiche technique sonde OPTV                  | 247 |
| <b>Annexe 2 :</b> Fiche technique sonde DIL38                 | 248 |
| <b>Annexe 3 :</b> Fiche technique sonde GRS                   | 249 |
| <b>Annexe 4 :</b> Fiche de puits – HS1 – aspect pétrophysique | 250 |
| <b>Annexe 5 :</b> Fiche de puits – HS1 – aspect structural    | 251 |
| <b>Annexe 6:</b> Fiche de puits – HS1 - résumé                | 252 |
| <b>Annexe 7 :</b> Fiche de puits – S5 – aspect pétrophysique  | 253 |
| <b>Annexe 8 :</b> Fiche de puits – S5 – aspect structural     | 254 |
| <b>Annexe 9 :</b> Fiche de puits – S5 - résumé                | 255 |
| <b>Annexe 10 :</b> Fiche de puits – S4 – aspect pétrophysique | 256 |
| <b>Annexe 11 :</b> Fiche de puits – S4 – aspect structural    | 257 |
| <b>Annexe 12 :</b> Fiche de puits – S4 - résumé               | 258 |
| <b>Annexe 13 :</b> Fiche de puits – S2 – aspect structural    | 259 |
| <b>Annexe 14 :</b> Fiche de puits – S2 – aspect pétrophysique | 260 |
| <b>Annexe 15 :</b> Fiche de puits – R – aspect pétrophysique  | 261 |
| <b>Annexe 16 :</b> Fiche de puits – R – aspect structural     | 262 |
| <b>Annexe 17 :</b> Fiche de puits – R - résumé                | 263 |
| <b>Annexe 18 :</b> Fiche de puits – M – aspect géophysique    | 264 |
| <b>Annexe 19 :</b> Fiche de puits – M – aspect structural     | 265 |
| <b>Annexe 20 :</b> Fiche de puits – M - résumé                | 266 |
| <b>Annexe 21 :</b> Fiche de puits – INJ – aspect structural   | 267 |
| <b>Annexe 22 :</b> Planning Essai 1 – 1/5                     | 268 |

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| <b>Annexe 23 : Planning Essai 1 – 2/5 .....</b> | <b>269</b> |
| <b>Annexe 24 : Planning Essai 1 – 3/5 .....</b> | <b>270</b> |
| <b>Annexe 25 : Planning Essai 1 – 4/5 .....</b> | <b>271</b> |
| <b>Annexe 26 : Planning Essai 1 – 5/5 .....</b> | <b>272</b> |
| <b>Annexe 27 : Planning Essai 2 – 1/4 .....</b> | <b>273</b> |
| <b>Annexe 28 : Planning Essai 2 – 2/4 .....</b> | <b>274</b> |
| <b>Annexe 29 : Planning Essai 2 – 3/4 .....</b> | <b>275</b> |
| <b>Annexe 30 : Planning Essai 2 – 4/4 .....</b> | <b>276</b> |
| <b>Annexe 31 : Planning Essai 3 – 1/6 .....</b> | <b>277</b> |
| <b>Annexe 32 : Planning Essai 3 – 2/6 .....</b> | <b>278</b> |
| <b>Annexe 33 : Planning Essai 3 – 3/6 .....</b> | <b>279</b> |
| <b>Annexe 34 : Planning Essai 3 – 4/6 .....</b> | <b>280</b> |
| <b>Annexe 35 : Planning Essai 3 – 5/6 .....</b> | <b>281</b> |
| <b>Annexe 36 : Planning Essai 3 – 6/6 .....</b> | <b>282</b> |
| <b>Annexe 37 : Planning Essai 4 – 1/5 .....</b> | <b>283</b> |
| <b>Annexe 38 : Planning Essai 4 – 2/5 .....</b> | <b>284</b> |
| <b>Annexe 39 : Planning Essai 4 – 3/5 .....</b> | <b>285</b> |
| <b>Annexe 40 : Planning Essai 4 – 4/5 .....</b> | <b>286</b> |
| <b>Annexe 41 : Planning Essai 4 – 5/5 .....</b> | <b>287</b> |

# SOMMAIRE

|                                                                           |               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Introduction générale .....</b>                                        | <b>18</b>     |
| <b>Présentation du projet Fluides &amp; Failles.....</b>                  | <b>19</b>     |
| <b>Contexte général de la thèse.....</b>                                  | <b>20</b>     |
| <br><b>1 GENERALITES.....</b>                                             | <br><b>22</b> |
| <b>1.1 Déformation cassante .....</b>                                     | <b>22</b>     |
| <b>1.1.1 La rupture des roches .....</b>                                  | <b>22</b>     |
| 1.1.1.1 Concept de rupture et état de contrainte.....                     | 22            |
| 1.1.1.2 Genèse d'un plan de rupture .....                                 | 23            |
| <b>1.2 Critère de rupture.....</b>                                        | <b>25</b>     |
| <b>1.2.1 Types de plan de rupture.....</b>                                | <b>28</b>     |
| 1.2.1.1 Les fractures .....                                               | 28            |
| 1.2.1.2 Les failles .....                                                 | 28            |
| <b>1.2.2 Zone de failles .....</b>                                        | <b>29</b>     |
| 1.2.2.1 Notion de zone de failles.....                                    | 29            |
| 1.2.2.2 Les propriétés d'une zone de failles.....                         | 32            |
| 1.2.2.3 Structure interne .....                                           | 32            |
| 1.2.2.3.1 Zone endommagée .....                                           | 33            |
| 1.2.2.3.2 Zone de cœur de faille .....                                    | 33            |
| 1.2.2.4 Propriétés hydrauliques.....                                      | 35            |
| 1.2.2.4.1 Perméabilité de la zone endommagée .....                        | 38            |
| 1.2.2.4.2 Perméabilité de la zone de cœur.....                            | 38            |
| <b>1.2.3 Zone de failles en milieu argileux.....</b>                      | <b>40</b>     |
| 1.2.3.1 Bref rappel sur les formations argileuses et leurs intérêts ..... | 40            |
| <b>1.2.4 Propriétés des zones de failles en milieux argileux.....</b>     | <b>41</b>     |
| <b>1.3 Contexte géologique de la zone de failles étudiée .....</b>        | <b>44</b>     |
| <b>1.3.1 Le bassin des Causses.....</b>                                   | <b>44</b>     |
| 1.3.1.1 Localisation et description générale.....                         | 44            |
| 1.3.1.2 Histoire géologique du bassin des Causses.....                    | 46            |

|              |                                                                           |           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.1.2.1    | <i>La genèse du bassin</i> .....                                          | 46        |
| 1.3.1.2.2    | <i>Le remplissage du bassin durant l'extension Mésozoïque</i> .....       | 46        |
| 1.3.1.2.3    | <i>L'exhumation du bassin au cours de la compression Pyrénéenne</i> ..... | 47        |
| 1.3.1.2.4    | <i>Evènements post-Oligocènes</i> .....                                   | 48        |
| <b>1.3.2</b> | <b>Le secteur de Tournemire</b> .....                                     | <b>48</b> |
| 1.3.2.1      | Géologie structurale du secteur de Tournemire .....                       | 48        |
| 1.3.2.1.1    | <i>Observations structurales de terrain supplémentaires</i> .....         | 50        |
| 1.3.2.2      | La station expérimentale de Tournemire .....                              | 53        |
| 1.3.2.3      | La fracturation au sein de la station expérimentale de Tournemire .....   | 55        |
| 1.3.2.4      | Etat de contrainte actuel au sein du Tunnel de Tournemire.....            | 56        |
| 1.3.2.5      | Contexte hydrogéologique .....                                            | 57        |
| 1.3.2.6      | Propriétés des argilites Toarciennes de Tournemire .....                  | 58        |
| 1.3.2.6.1    | <i>Composition minéralogique</i> .....                                    | 58        |
| 1.3.2.6.2    | <i>Propriétés physiques et mécaniques</i> .....                           | 58        |
| 1.3.2.6.3    | <i>Enfouissement des argilites Toarciennes de Tournemire</i> .....        | 59        |
| <b>1.3.3</b> | <b>La zone d'étude « Fluides &amp; Failles »</b> .....                    | <b>61</b> |
| <b>2</b>     | <b>LES DIFFERENTES APPROCHES</b> .....                                    | <b>63</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>L'étendue des données</b> .....                                        | <b>63</b> |
| <b>2.1.1</b> | <b>Les données structurales</b> .....                                     | <b>63</b> |
| 2.1.1.1      | Les carottes .....                                                        | 63        |
| 2.1.1.2      | Les CT-scans des carottes .....                                           | 63        |
| 2.1.1.3      | La diagraphie optique des parois de forage .....                          | 64        |
| 2.1.1.4      | Les corrections de données liées à la diagraphie optique .....            | 64        |
| 2.1.1.4.1    | <i>Les perturbations magnétiques</i> .....                                | 64        |
| 2.1.1.4.2    | <i>Le roll-over</i> .....                                                 | 65        |
| <b>2.1.2</b> | <b>Les données pétrophysiques</b> .....                                   | <b>66</b> |
| 2.1.2.1      | La conductivité/résistivité .....                                         | 66        |
| 2.1.2.2      | Les mesures porosité/saturation sur échantillons.....                     | 67        |
| <b>2.1.3</b> | <b>Les données chimiques</b> .....                                        | <b>68</b> |
| 2.1.3.1      | La spectrométrie gamma spectral .....                                     | 68        |
| <b>2.1.4</b> | <b>L'échantillonnage</b> .....                                            | <b>68</b> |
| 2.1.4.1      | Sur carottes.....                                                         | 68        |
| 2.1.4.2      | Echantillon de la galerie 2003.....                                       | 71        |
| <b>2.2</b>   | <b>Synthèse de données</b> .....                                          | <b>72</b> |
| <b>2.2.1</b> | <b>Les fiches de puits</b> .....                                          | <b>72</b> |

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2.2    | La modélisation 3D.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 77         |
| 2.2.3    | Coupling of gOcad, COMSOL and 3D-Stress codes to estimate stress induced permeability variations in a fault zone-(33th gOcad Meeting, Sept 2013)..                                                                                                                               | 80         |
| 2.2.3.1  | Présentation de l'article:.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 80         |
| 2.2.4    | Article: Coupling of gOcad, COMSOL and 3D-Stress codes to estimate stress induced permeability variations in a fault zone-(33th gOcad Meeting, Sept 2013)..                                                                                                                      | 81         |
| <b>3</b> | <b>STRUCTURE 3D DE LA ZONE DE FAILLES.....</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>91</b>  |
| 3.1      | Présentation de l'article .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 91         |
| 3.2      | Article Lefèvre et al., 2016: 3D structure of fault zones in shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France). .....                                                                                                                                           | 101        |
| 3.2.1    | Abstract .....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 103        |
| 3.2.2    | Introduction .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 103        |
| 3.2.3    | Geological setting around the Tournemire area.....                                                                                                                                                                                                                               | 105        |
| 3.2.4    | Methodology .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 109        |
| 3.2.5    | Results .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 113        |
| 3.2.5.1  | Cross hole correlations of fault structures.....                                                                                                                                                                                                                                 | 113        |
| 3.2.5.2  | Fault and fractures properties.....                                                                                                                                                                                                                                              | 116        |
| 3.2.5.3  | Fault breccia zone .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 120        |
| 3.2.6    | Synthesis: towards a conceptual model.....                                                                                                                                                                                                                                       | 122        |
| 3.2.7    | Discussion.....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 124        |
| 3.2.7.1  | Fracture density variation with distance to the principal fault plane .....                                                                                                                                                                                                      | 124        |
| 3.2.7.2  | Fracture dip .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 125        |
| 3.2.7.3  | Mechanisms of faulting.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 126        |
| 3.2.8    | Conclusion.....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 128        |
| <b>4</b> | <b>LES PALEAO-CIRCULATIONS DANS LA ZONE DE FAILLES .....</b>                                                                                                                                                                                                                     | <b>138</b> |
| 4.1      | Présentation de l'article .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 138        |
| 4.2      | Article: Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P., Gout, C., 2016. Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France). Journal of Structural Geology 83, 73-84. .... | 144        |
| 4.2.1    | Abstract.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 145        |
| 4.2.2    | Introduction .....                                                                                                                                                                                                                                                               | 146        |
| 4.2.3    | Fault geology in the Tournemire URL and paleo-circulations .....                                                                                                                                                                                                                 | 148        |
| 4.2.4    | Methodology .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 153        |

|              |                                                                                                                                                                                  |            |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.2.5</b> | <b>Results .....</b>                                                                                                                                                             | <b>156</b> |
| 4.2.5.1      | Shear induced dilation at the FDZ/FC transition zone inferred from microstructural analyses .....                                                                                | 156        |
| 4.2.5.2      | Episodes of calcite cementation.....                                                                                                                                             | 159        |
| 4.2.5.3      | Micro-analyses .....                                                                                                                                                             | 163        |
| <b>4.2.6</b> | <b>Interpretation/Discussion .....</b>                                                                                                                                           | <b>165</b> |
| 4.2.6.1      | Relationships between vein growth, fluid composition and deformation within the fault zone .....                                                                                 | 165        |
| 4.2.6.2      | Permeability variations during faulting.....                                                                                                                                     | 168        |
| <b>4.2.7</b> | <b>Conclusions .....</b>                                                                                                                                                         | <b>169</b> |
| <b>5</b>     | <b>HYDROGEOLOGIE DE LA ZONE DE FAILLES A PARTIR DES TESTS D'INJECTION .....</b>                                                                                                  | <b>177</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>Imagerie de la circulation d'eau par le système d'acquisition de résistivité électrique. ....</b>                                                                             | <b>177</b> |
| 5.1.1        | Le dispositif de la flûte de résistivité.....                                                                                                                                    | 177        |
| 5.1.2        | Deux phases de test d'injection .....                                                                                                                                            | 178        |
| 5.1.3        | Mise en évidence des circulations d'eau .....                                                                                                                                    | 180        |
| 5.1.3.1      | Par diagraphie électrique continue.....                                                                                                                                          | 180        |
| 5.1.3.2      | Par observation des volumes humides sur parois du tunnel et évaluation des débits de fuite en tête de forage.....                                                                | 181        |
| 5.1.4        | Comparaison des variations de résistivité avec la géologie. ....                                                                                                                 | 184        |
| 5.1.4.1      | Chemins préférentiels d'écoulement.....                                                                                                                                          | 186        |
| <b>5.2</b>   | <b>Discussion .....</b>                                                                                                                                                          | <b>189</b> |
| <b>6</b>     | <b>PROPRIETES PETROPHYSIQUES DE LA ZONE DE FAILLES .....</b>                                                                                                                     | <b>192</b> |
| <b>6.1</b>   | <b>Présentation de l'article .....</b>                                                                                                                                           | <b>192</b> |
| <b>6.2</b>   | <b>Article Lefèvre et al., 2016: Petro-physical characterization of a fault zone affecting Toarcian shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France). ....</b> | <b>196</b> |
| 6.2.1        | Abstract.....                                                                                                                                                                    | 197        |
| 6.2.2        | Introduction .....                                                                                                                                                               | 198        |
| 6.2.3        | Fault geology in the Tournemire URL .....                                                                                                                                        | 200        |
| 6.2.4        | Methodology .....                                                                                                                                                                | 204        |
| 6.2.4.1      | Structural analysis .....                                                                                                                                                        | 204        |
| 6.2.4.2      | Sampling and petrophysical measurements .....                                                                                                                                    | 205        |

|                            |                                                                                                   |            |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6.2.5</b>               | <b>Results .....</b>                                                                              | <b>209</b> |
| 6.2.5.1                    | Structural facies in the fault zone.....                                                          | 209        |
| 6.2.5.2                    | Petrophysical characterization of the different fault zone facies .....                           | 212        |
| 6.2.5.2.1                  | <i>Water content and porosity profiles across the fault zone .....</i>                            | <i>212</i> |
| 6.2.5.3                    | CT and porosity ( $\Phi$ ) correlation .....                                                      | 215        |
| 6.2.5.4                    | High resolution porosity profile along a fault zone. ....                                         | 217        |
| <b>6.2.6</b>               | <b>Discussion .....</b>                                                                           | <b>220</b> |
| <b>6.2.7</b>               | <b>Conclusion.....</b>                                                                            | <b>222</b> |
| <b>7</b>                   | <b>CONCLUSION.....</b>                                                                            | <b>232</b> |
| <b>7.1</b>                 | <b>Principaux résultats.....</b>                                                                  | <b>232</b> |
| <b>7.1.1</b>               | <b>Recommandations pour caractériser une zone de failles affectant des roches argileuses.....</b> | <b>235</b> |
| 7.1.1.1                    | En termes d'architecture et de propriétés pétrophysiques .....                                    | 235        |
| 7.1.1.2                    | En termes de perméabilité.....                                                                    | 236        |
| <b>7.3</b>                 | <b>Perspectives de recherche.....</b>                                                             | <b>237</b> |
| <br><b>REFERENCES.....</b> |                                                                                                   | <b>239</b> |
| <br><b>ANNEXES.....</b>    |                                                                                                   | <b>247</b> |

## INTRODUCTION GENERALE

Les zones de failles concentrent la migration de fluides et la déformation dans la croûte supérieure. Les failles ne sont plus représentées comme de simples structures discrètes mais comme des zones hétérogènes comprenant des matériaux déformés agencés selon une architecture complexe ayant une épaisseur et une extension non négligeables. Ce concept d'architecture des zones de failles a des implications fondamentales pour la prise en compte des propriétés des zones de failles rencontrées dans les sites de stockage ou dans des réservoirs d'hydrocarbures. Les liens entre l'architecture et les propriétés des zones de failles affectant les formations argileuses peu perméables sont au centre de ce travail. Il est primordial de caractériser quelles sont les conditions qui favorisent l'écoulement de fluides le long d'une zone de failles dans une formation peu perméable afin de mieux caractériser la qualité, la performance des sites d'exploration/production d'hydrocarbures ou/et des sites de stockage. Pour cela, la compréhension des propriétés géométriques, mécaniques et hydrauliques de la zone de failles et la variation de ces propriétés sous l'effet des contraintes ou d'autres facteurs sont primordiales.

Les observations de terrain (exemple des décollements de prisme d'accrétion de Costa Rica et de la Barbade) indiquent que les failles actives peuvent être hydrauliquement conductrices malgré la faible perméabilité des formations « intactes » riches en argile. Des expériences de laboratoire sur des échantillons riches en argile mettent généralement en évidence que pour une contrainte effective moyenne donnée, le cisaillement tend à réduire la perméabilité (Dewhurst et al, 1996; Zhang et Cox, 2000 ; Wibberley et al, 2008). Cependant, des augmentations significatives de perméabilité ( $\times 10$ -100) ont été mesurées sur des échantillons de silt/argile cisailés ou faillés dans des conditions très sur-consolidées (Zhang et Cox, 2000; Bolton et al 1999; Nygard, 2006). Les modèles existants de perméabilité de faille ont proposé une dépendance exponentielle de la perméabilité à la pression effective (Rice et al., 1992; Fisher et al, 1996;. Revil et al, 2002).

En nous intéressant uniquement aux couplages hydromécaniques; deux cas sont considérés dans cette étude:

- Pour un état de contrainte, une lithologie et un contexte tectonique donnés, à quelle pression de fluide la perméabilité de la faille peut-elle augmenter ?



- Quels processus mécaniques vont favoriser une augmentation significative de perméabilité ?

Afin d'amener des éléments de réponse à ces questions, différents moyens ont été mis en œuvre dans le cadre du projet « Fluides & Failles ». Ce projet est financé par TOTAL SA et rassemble des expériences in situ (forage, carottage, tests d'injection, plan de surveillance géophysique...), des expériences en laboratoire et de la modélisation numérique. Le site proposé pour l'expérience de terrain est le laboratoire expérimental sous-terrain de l'IRSN (Tournemire, Aveyron).

## **Présentation du projet Fluides & Failles**

Le but principal du projet « Fluides & Failles » est l'évaluation des conditions d'étanchéité d'une zone de failles dans des sites d'exploration/production d'hydrocarbures et de stockage (CO<sub>2</sub>, déchets radioactifs). Dans le cas des sites d'exploration/production, le but est d'améliorer la prévision de la quantité d'hydrocarbures potentiellement piégée dans les zones de failles et d'estimer la probabilité de fuite des couvertures via les failles. Pour cela, la compréhension des propriétés géométriques, mécaniques et hydrauliques des zones de failles est primordiale. L'objectif du projet est de préciser les conditions de variation de la perméabilité sous contrainte des failles pour aboutir à un ensemble de recommandations qui peuvent être mises en œuvre dans des conditions réelles d'exploration ou de production d'hydrocarbures.

Les laboratoires partenaires de ce projet sont; le *CEREGE* (CNRS, IRD, CEREGE UM34) basé à Marseille, le laboratoire de Géologie de l'ENS (CNRS UMR 8538); l'Université de Géosciences et de l'Environnement à Cergy-Pontoise, le laboratoire de Géosciences à Montpellier, Géoazur à Sophia Antipolis et le 3S-R à Grenoble.

Le projet « Fluides & Failles » est organisé en trois parties: (i) les expériences de terrain, (ii) les expériences de laboratoire et (iii) la modélisation numérique.

(i) Les expériences de terrain concernent une série de tests d'injection d'eau sous pression, dans un volume d'échelle décimétrique (expériences coordonnées par Y. Guglielmi, CEREGE). L'objectif est d'effectuer des tests de perméabilité in situ dans une zone de failles tout en surveillant la microsismicité et les déplacements de la faille. Une sonde construite dans le cadre des projets ANR HPPP (2007-2011) et mHPP (Ademe, 2012-2014) a été utilisée pour monitorer les déplacements de la faille au niveau du forage d'injection.

(ii) Les expériences en laboratoire sous la coordination de A. Schubnel (ENS, Paris) et C. David (Univ. Cergy-Pontoise) ont pour objectif de caractériser l'évolution de la vitesse des ondes P et S ainsi que les conditions de fracturation des argilites de Tournemire sous différents confinements et déviateurs de contraintes.

(iii) La partie modélisation numérique qui est dirigée par P. Henry (CEREGE) et un réseau de collaborateurs impliquant Y. Guglielmi, F. Cappa (Géoazur) et FV. Donzé (3S-R Grenoble) a pour principaux objectifs (i) d'analyser les différents signaux couplés hydro-mécaniques, (ii) de tester/développer des algorithmes permettant de mieux décrire les relations entre variations de perméabilité et de contrainte dans les failles argileuses et (iii) d'extrapoler ces relations aux conditions réelles d'exploitation des réservoirs profonds. Cette partie comporte aussi la réalisation de modèles géologiques et de propriétés de la zone de failles qui sont proposés dans le cadre de cette thèse.

Le projet complet compte deux thèses de doctorat et un post-doc. Une première thèse, (M. Lefèvre, Aix-Marseille Université) est centrée sur l'expérience méso-échelle et une deuxième (A. Bonnelye, Université de Cergy-Pontoise) est centrée sur les expériences de laboratoire. Le post-doc (I. Ghani, Aix-Marseille Université) est spécialisé dans les analyses numériques hydromécaniques des résultats expérimentaux avec des codes aux différences finies.

## **Contexte général de la thèse**

Cette thèse est axée sur la partie géo-structurale du projet « Fluides & Failles » qui se rattache à la partie expérimentale in situ. Le travail proposé s'est attaché à préciser les questions suivantes:

- 1- Reconstituer l'architecture d'une zone de failles dans des formations riches en argile. La question clé de la continuité des structures associées à la faille sera abordée. En quoi l'architecture d'une zone de failles affectant des roches très argileuses diffère-t-elle des concepts classiques de zone endommagée entourant un cœur très déformé ?
- 2- Quels liens entre les variations spatiales des propriétés pétrophysiques et l'architecture de la zone de failles ? S'il y a une zone endommagée, quelles sont ses propriétés ? Contrastent-elles avec celles du cœur de faille et de la roche intacte ?
- 3- Comment s'effectue la diffusion des fluides à l'intérieur de la zone de failles et en combien de temps ?

- 4- Quels liens entre la déformation de la faille et la diffusion des paléo-fluides et des fluides actuels ? Quand peut-on considérer que la dilatance devient un paramètre dominant qui contrôle la perméabilité de la faille?

Ce travail de thèse repose sur différentes méthodes d'analyse menées à différentes échelles. La caractérisation structurale de l'ensemble de la zone de failles a été effectuée à partir de données de forages (carottes, log structuraux, diagraphies de puits, CT-scan de carottes) et en intégrant ces données via le geomodeleur gOcad pour proposer une reconstitution tridimensionnelle des structures géologiques. Les mécanismes de déformation et d'écoulement dans la zone de failles ont été étudiés à petite échelle (centimètre à micromètre) sur un échantillon à proximité du cœur de faille (analyses en lames minces,  $\mu$ XRF, cathodoluminescence) et à grande échelle en reconstituant le comportement hydrogéologique de la zone de failles lors des essais in situ. Les propriétés pétro-physiques (teneur en eau, saturation, porosité, densité de grain...) de la zone de failles ont été mesurées sur des échantillons de carottes et corrélées aux valeurs de CT-scan des carottes. La variation quasiment en continu de la porosité par exemple a ensuite été comparée à l'architecture de la zone de failles déduite des données diagraphiques.

# **1 GENERALITES**

## **1.1 Déformation cassante**

Le terme de déformation se traduit par une modification de la structure d'un matériau et l'adjectif cassant précise que cette déformation s'exprime par rupture. Celle-ci s'oppose à la déformation ductile qui est caractérisée par une modification de la structure sans discontinuité. Bien que ces modes de déformation soient différents, ils sont cependant intrinsèquement liés. La déformation cassante s'exprime dans de nombreux contextes géodynamiques, qu'ils soient de divergence (rifts, marges passives, dorsales), de convergence (subduction, collision) ou de décrochement (coulissage, faille transformante). Elle participe à la structuration de la lithosphère. Les zones de rupture vont affecter les propriétés de la lithosphère (mécanique, thermique, hydro) et par conséquent ont une grande influence sur la géodynamique globale de la Terre. Ainsi pour toutes ces raisons ou des à des fins de prévision de séismes, cette déformation est fortement étudiée aussi bien de manière théorique qu'expérimentale.

Nous nous proposons dans cette partie générale, dans un premier temps, de faire quelques rappels sur le concept, les critères et la genèse d'un plan de rupture ainsi que de synthétiser les différents types de plans de rupture rencontrés (fractures, failles) et le rôle des fluides. Dans un deuxième temps, on amènera le concept de zone de failles (zone endommagée, cœur de faille), caractérisé principalement structuralement et hydrauliquement (perméabilité). Et enfin, dans un troisième temps on se concentrera sur les zones de failles en milieu argileux.

### **1.1.1 La rupture des roches**

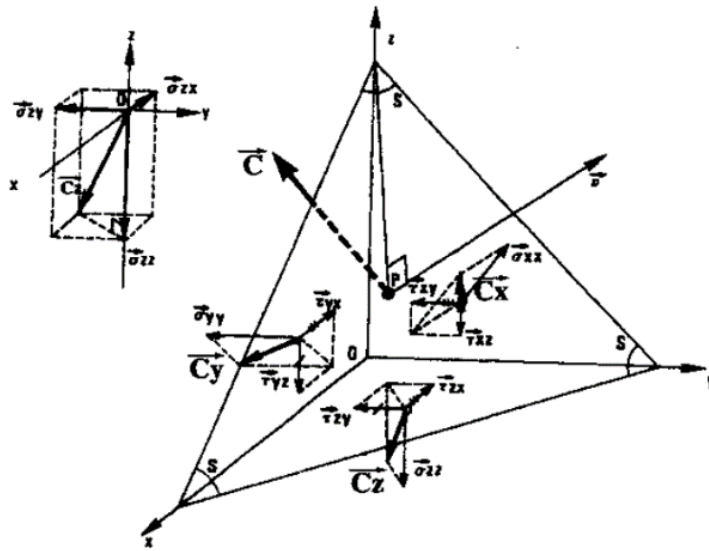
#### **1.1.1.1 Concept de rupture et état de contrainte**

Dans la plupart des cas, la déformation s'amorce en adoptant un comportement élastique puis peut devenir plastique (réorganisation irréversible des atomes), avant d'atteindre la rupture.

Ce sont des phénomènes d'échelle microscopique et inférieure qui sont responsables de la manifestation de la rupture à l'échelle macroscopique. En effet, la rupture implique la destruction de liaisons atomiques. Briser les liaisons atomiques implique une variation d'énergie liée à une variation de contrainte mécanique.

En tout point d'un volume s'exercent des forces responsables de la rupture. Ces forces peuvent être représentées par un tenseur de contraintes. Dans le cas d'un tétraèdre de repère orthonormé

( $0x$ ,  $0y$  et  $0z$ ), le vecteur contrainte  $C$  appliqué en un point  $P$  d'une des faces  $S$  du tétraèdre; se décompose, en trois composantes ( $C_x$ ,  $C_y$  et  $C_z$ ). Ces vecteurs ( $C_x$ ,  $C_y$  et  $C_z$ ) se décomposent suivant les trois axes du repère, en une contrainte normale à la surface ( $\sigma_{ij}$ ) et en deux contraintes tangentielles ( $\tau_{ij}$ ) dans chaque plan (Fig. 1). Dans ce volume sollicité, il existe trois plans orthogonaux le long desquels les contraintes tangentielles sont nulles et pour lesquels les contraintes normales ont des valeurs maximum, minimum et intermédiaire. Ces trois contraintes sont désignées comme les contraintes principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ ) et définissent l'état de contraintes. Les contraintes principales; majeure, intermédiaire et mineure sont appelées  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , respectivement.



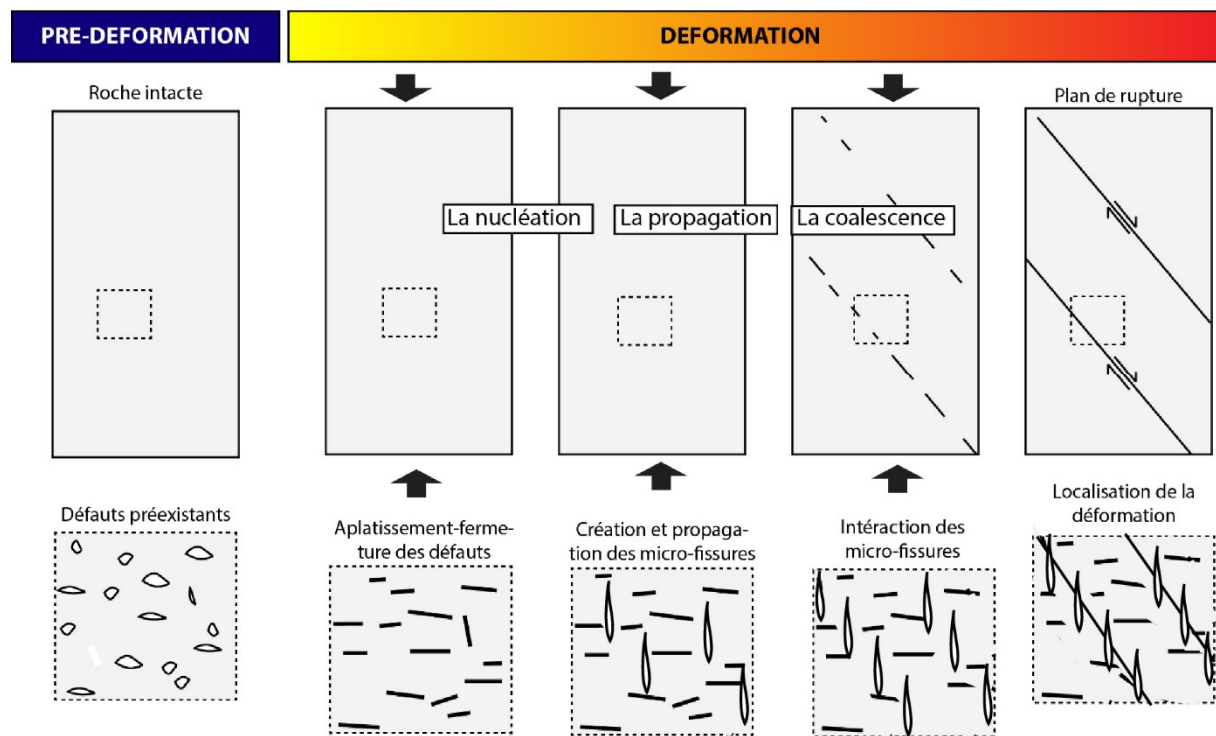
**Figure 1 :** Composantes du vecteur contrainte  $C$  exercées au point  $P$  sur une face du tétraèdre. D'après Mercier et Vergély, 1992.

### 1.1.1.2 Genèse d'un plan de rupture

A l'échelle microscopique, un volume de roche renferme un grand nombre de petits défauts (discontinuités) qui peuvent être caractérisés par des limites de grains, par un grain plus grossier ou des pores irréguliers ou encore à la présence de microfossiles. Ainsi, une roche macroscopiquement dite intacte comporte en réalité de multiples petites discontinuités qui sous sollicitation mécanique, peuvent être à l'origine de la localisation de la déformation et du plan de rupture. La distribution macroscopique des plans de rupture (induit mécaniquement) dans un volume rocheux est donc fonction de la distribution des micro-défauts dans ce même volume.

Des micro-défauts au plan de rupture, généralement, trois stades sont considérés : la nucléation, la propagation et la coalescence (Brace et al., 1972 ; Tapponnier et al., 1976 ; Costin, 1987).

Sous sollicitation mécanique (enfouissement par exemple, Fig. 2), les micro-défauts vont dans un premiers temps avoir tendance à s'aplatir et à se fermer. Le stade de nucléation représente la localisation de la microdéformation au niveau de ces micro-défauts (voir chapitre du dessus). L'augmentation de contrainte aux extrémités des micro-défauts est responsable de la propagation de la rupture sous forme de microfissures. En absence de défaut planaire préexistant, les microfissures se développent selon la direction de la contrainte principale maximale,  $\sigma_1$ . La coalescence des microfissures intervient à partir d'un certain nombre de microfissures, donnant alors une fracture d'échelle supérieure. Ces phénomènes s'accompagnent de réorientations des contraintes qui en retour induisent des réorientations du plan de rupture en cours de croissance (Fig. 2).



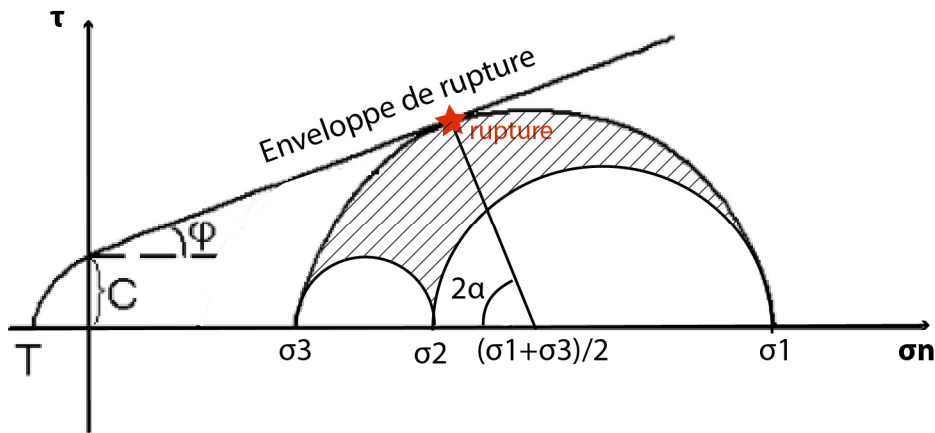
**Figure 2 :** Illustration des différents stades de la genèse d'un plan de rupture à partir de micro-défauts sous sollicitation mécanique.

La présence de minéraux argileux dans la formation peut complexifier ce processus de rupture. En effet, leur aptitude à se déformer et à se réorienter sous sollicitation mécanique (Tapponnier et al., 1976 ; Shea et al., 1993) peut potentiellement retarder et complexifier le processus de rupture en adoptant un comportement plus ductile pouvant s'exprimer comme une tendance au fluage.

## 1.2 Critère de rupture

En supposant que la rupture d'un matériau est fonction exclusivement de ses paramètres mécaniques (cohésion, angle de friction...) et de la contrainte appliquée ; les conditions à partir desquelles intervient la rupture sont données par le critère de rupture. Ainsi, expérimentalement, les critères de rupture ont été déterminés pour chaque type de matériau (grès, calcaire, granite...).

Le critère de rupture le plus couramment employé est représenté graphiquement par une courbe de rupture appelée l'enveloppe de Mohr-Coulomb (Fig. 3). Dans le cas, où la roche est idéalement homogène et intacte, la théorie de Mohr suppose qu'à la rupture, les contraintes normales et cisailantes sont liées par la relation  $\tau = f(\sigma)$ . Ainsi, si les contraintes ( $\tau$ ,  $\sigma$ ) représentées par les points du cercle de Mohr se situent en dessous de l'enveloppe de rupture, la rupture n'a pas lieu. Dans le cas où le cercle coupe l'enveloppe de rupture, la partie du cercle située au-dessus de l'enveloppe représente les contraintes entraînant la rupture. Et si le cercle est tangent à l'enveloppe, alors le point commun cercle-enveloppe représente la contrainte critique à laquelle s'initie la rupture (Fig. 3).



**Figure 3:** Représentation graphique des conditions de rupture (tricercler de Mohr), avec en abscisse, la contrainte normale ( $\sigma_n$ ), et la contrainte tangentielle ( $\tau$ ) en ordonnée.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  et  $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$  représentent la contrainte principale maximale, la contrainte principale intermédiaire, la contrainte principale minimale et la contrainte moyenne (appelé aussi pression de confinement). Les paramètres  $T$ ,  $C$  et  $\phi$ , représentent les propriétés de traction, de cohésion et d'angle de friction du matériau donné. L'angle  $\alpha$  représente l'orientation du plan en fonction d'une des contraintes principales maximum,  $\sigma_1$  ou minimum,  $\sigma_3$ .

La présence d'une faille préexistante ou la réorientation pré-rupture des minéraux modifient considérablement les propriétés mécaniques du matériau. Dans cette représentation, l'enveloppe de rupture est alors révisée (se situant en dessous de l'enveloppe de rupture initiale). De la même manière, la présence de fluides au sein de la formation peut influencer la rupture. En effet, l'augmentation de la pression des fluides dans les pores de la roche favorise la rupture. Dans la représentation du Cercle de Mohr, le centre du cercle se déplace vers la gauche.

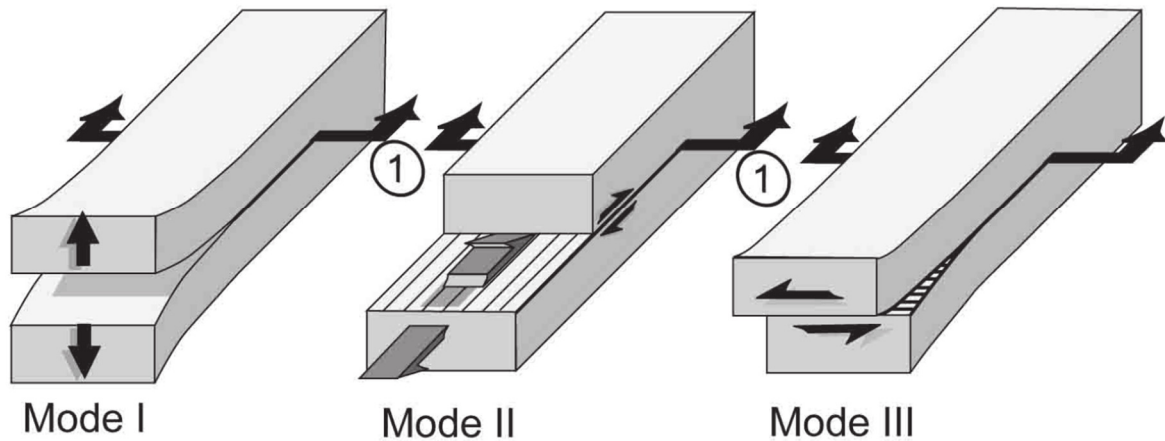
Le fort caractère stratifié des roches argileuses sous-entend que ses propriétés mécaniques varient selon l'orientation par rapport au plan de stratification. Par exemple, le comportement mécanique de l'argilite de Tournemire est défini par une loi rhéologique élastoplastique pour laquelle le critère de rupture est un critère de Mohr-Coulomb avec un angle de frottement interne de  $20^\circ$  et une cohésion comprise entre 6.7 et 10.8 MPa selon l'orientation par rapport au plan de stratification (Ben Ouanas, 2010).

Cette représentation permet aussi de déterminer la géométrie de la rupture c'est-à-dire, l'orientation des plans de rupture en fonction de la pression de confinement (contrainte moyenne).

Les plans de rupture se divisent en plusieurs familles (joints, fractures, failles...) selon leur mode de propagation (lié directement à l'état de contrainte). Il y a trois modes fondamentaux de propagation de la rupture (Fig. 4) :

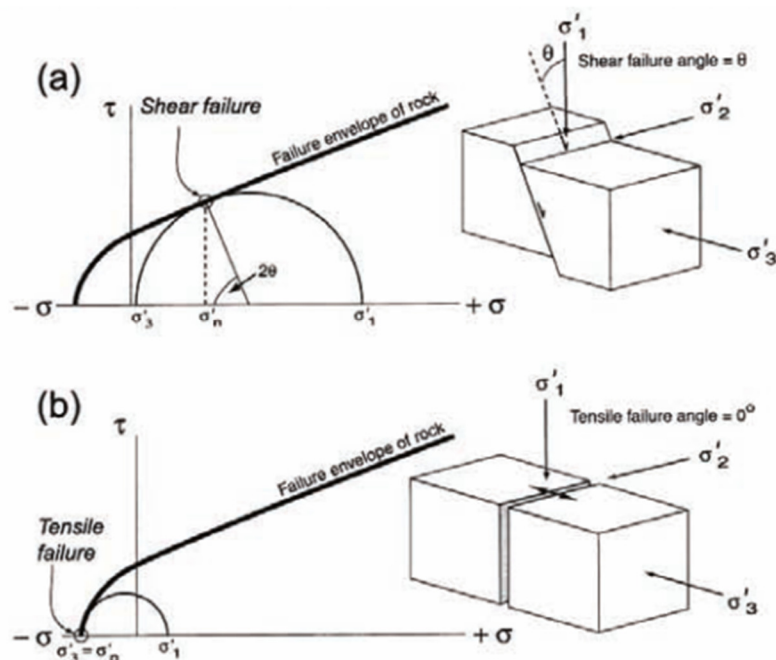
- **Le mode I** est caractérisé par l'ouverture du plan de rupture par traction, perpendiculaire à ses épontes (sans déplacement).
- **Le mode II** est défini par une propagation du plan par glissement le long de sa direction, perpendiculairement à son front.
- **Le mode III** qui est caractérisé par une propagation du plan par torsion accompagné d'un glissement, parallèle à son front.





**Figure 4:** Présentation des modes I, II et III de propagation de la rupture caractérisés par l'ouverture, le glissement plan et anti-plan, respectivement. (Illustration tirée de Roche, 2011).

De manière générale, pour de faibles pressions de confinement, la rupture se développe en mode I (sans glissement), par des plans de rupture perpendiculaires à la contrainte principale maximale  $\sigma_1$ , qui s'ouvrent dans la direction de la contrainte principale minimale  $\sigma_3$ . Pour des pressions de confinement plus élevées, il devient plus difficile d'ouvrir ces plans de rupture. La propagation du plan de rupture se réalise en modes II et III, c'est-à-dire par glissement (Fig. 5).



**Figure 5:** Illustration des trois types de rupture (mode I et mode II, III) en fonction de l'état de contraintes. Le mode I se développe en faible pression de confinement et les modes II et III se réalise pour des pressions de confinement plus élevées. D'après Sibson, 1990b.

## 1.2.1 Types de plan de rupture

### 1.2.1.1 Les fractures

Les fractures sont caractérisées par un mode de propagation de type I (par ouverture et sans déplacement). Les différents types de fracture sont les veines, les diaclases, les joints et les fentes de tension.

Lorsqu'une fracture présente un remplissage par minéralisation (souvent quartz et calcite), on parle alors d'une veine. Selon l'orientation entre le plan de fracture par rapport au plan de stratification on peut définir deux types de fractures : Les diaclases qui sont perpendiculaires à la stratification et les joints qui sont parallèles ou obliques à la stratification. Les fentes de tension sont en général des veines tensiles qui s'ouvrent dans la direction de la contrainte principale minimale,  $\sigma_3$ .

### 1.2.1.2 Les failles

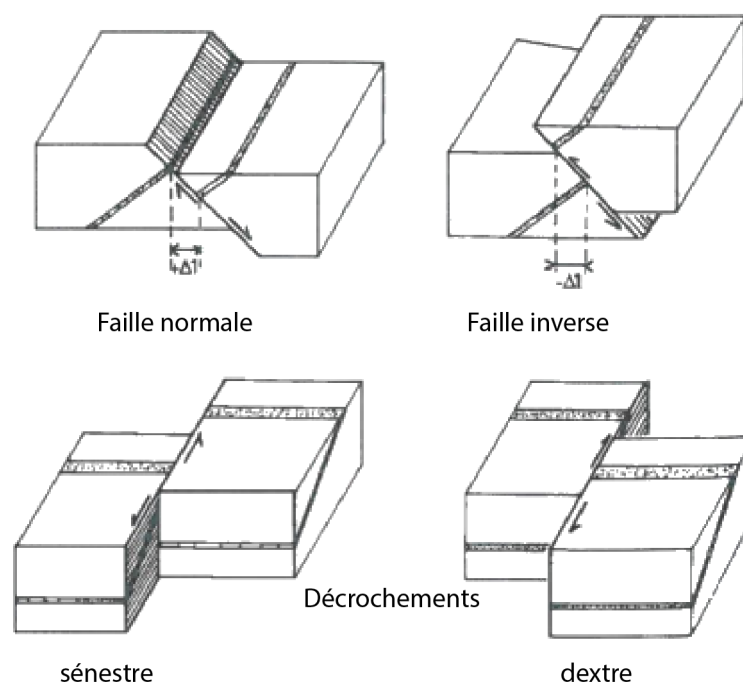
Les failles sont des surfaces de rupture sur lesquelles a lieu un déplacement caractérisé par un mode de propagation de type II et III, c'est-à-dire avec une composante cisailante.

Selon le déplacement relatif des compartiments de part et d'autre du plan de faille, différents types de failles ont été désignés (Fig. 6):

- Les failles normales : le déplacement sur une faille normale s'effectue plus ou moins selon la ligne de plus grande pente du plan de faille. Le mur (footwall) descend relativement au toit (hangingwall). Ce sont des failles qui se forment en contexte extensif. La contrainte principale minimale  $\sigma_3$ , est fortement horizontale et perpendiculaire au plan de faille. Le pendage typique des failles normales est de  $60^\circ$ .
- Les failles inverses et chevauchements : le déplacement sur une faille inverse s'effectue aussi plus ou moins selon la ligne de plus grande pente du plan de faille. Le mur (footwall) monte par rapport au toit (hanging wall). Ce sont des failles qui se forment en contexte compressif. La contrainte principale maximale  $\sigma_1$ , est fortement horizontale et la contrainte principale minimale  $\sigma_3$  verticale. Le pendage typique des failles inverses est de  $30^\circ$  mais en pratique, on observe des failles inverses présentant des pendages plus élevés expliqués par la réactivation d'anciennes failles normales. Le chevauchement est

un type de failles inverses qui présente un faible pendage et un fort déplacement. Ce sont des failles compressives qui résultent d'un épaissement et un raccourcissement crustal.

- Les failles décrochantes : le déplacement se fait essentiellement horizontalement. On parle de décrochement pour une faille décrochante à fort pendage. Le mouvement d'une faille décrochante est défini par rapport à la direction dans laquelle fuit le compartiment opposé à celui sur lequel on se trouve. Si c'est le compartiment de gauche qui fuit, on parle de décrochement senestre et si c'est le compartiment de droite, on parle de décrochement dextre.



**Figure 6:** Présentation des différents type de failles (d'après Caron et al., 2003).

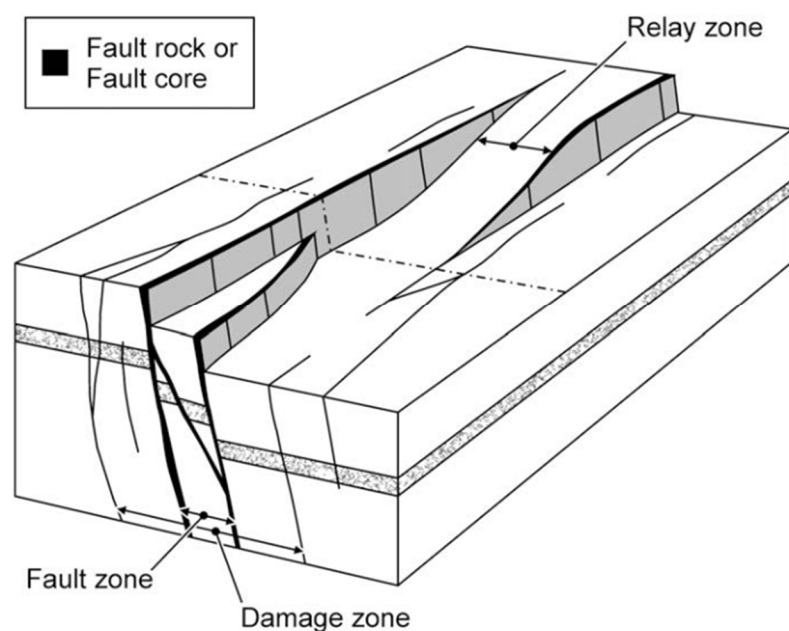
En réalité, la plupart des failles observées présentent des mouvements composites, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas uniquement décrites par un des types de failles présentés ci-dessus mais elles combinent plusieurs types. C'est le cas pour une faille normale dextre ou encore une faille décrochante normale...

## 1.2.2 Zone de failles

### 1.2.2.1 Notion de zone de failles

La partie précédente met en avant, des failles génériques idéales caractérisées par des plans de rupture continus et infinis, ainsi qu'une « zone » de rupture sans épaisseur.

Cela dépend de l'échelle d'observation, mais dans la majeure partie des cas, la faille ne respecte pas ces trois critères. Les failles ne correspondent que rarement à un plan de rupture unique, mais à des zones de déformation (Fig. 7). Le concept de la *faille plan simple* est alors remplacé par celui de la *zone de failles*. La zone de failles inclut la faille principale présentant la plus grande dimension sous forme de segment de failles qui interagissent entre eux (système de failles en échelon, les pull-apart, les faisceaux de failles...), ainsi que des failles secondaires qui peuvent se brancher sur la faille principale. On peut alors parler en termes de population de failles. Les failles peuvent être plus ou moins parallèles avec un espacement plus ou moins régulier dans un volume relativement restreint. Ces failles sont fréquemment encadrées par un réseau de fractures (exemple du système de Riedel ; Billi et al., 2003). La zone de failles inclut aussi des fractures dites satellites qui affectent des zones très locales ainsi que des roches de faille caractérisées par des faciès très déformés (brèche, gouge, cataclasite...).

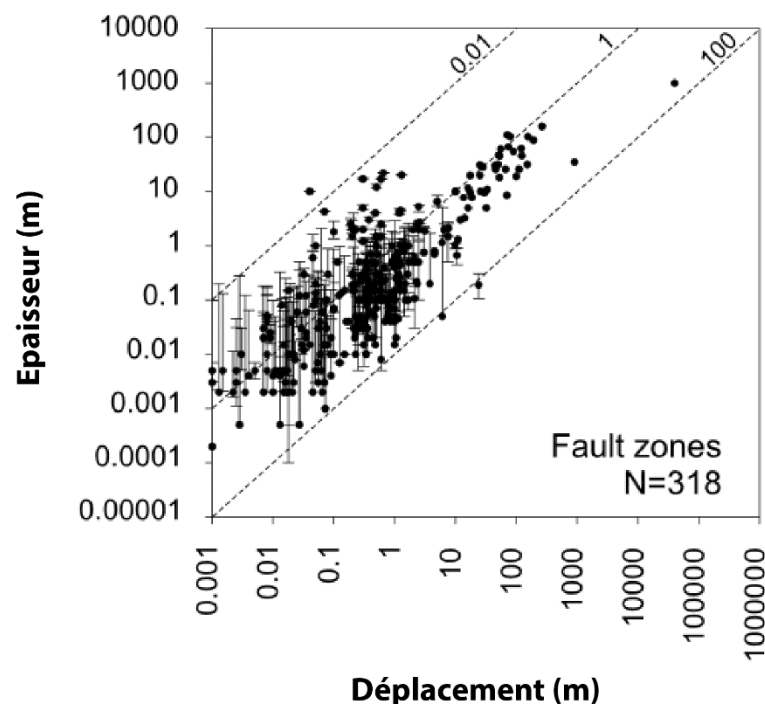


**Figure 7:** Schéma d'une zone de failles, d'après Childs et al., 2009.

La terminaison des zones de failles peut être complexe si elle n'est pas tronquée par des structures plus récentes. Dans la plupart des cas, la faille s'amortie progressivement en se divisant en une série de petites failles (terminaison en queue de cheval...). De nombreuses complications structurales peuvent aussi survenir au niveau des transitions lithologiques ou lors d'une réactivation de la déformation. On appelle un système de failles lorsque l'ensemble des structures provient d'un même événement tectonique.

Dans la plupart des zones de failles, le déplacement est partitionné en fonction des plans de faille présents et donc l'épaisseur d'une zone de failles peut être calculée comme étant la distance maximale entre les plans de faille. Les travaux de Childs et al, 2009 répertorient des caractéristiques (dont l'épaisseur et le déplacement) de plusieurs zones de failles dérivées de différentes sources dont Wolf (1985), Childs et al., (1996), Childs (2000), Faulkner and Rutter (2001) et Van der Zee (2002), (Fig. 8). Les barres verticales sont les gammes d'épaisseur mesurées sur chaque zone de failles. Ces résultats mettent en évidence une relation de proportionnalité entre l'épaisseur de la zone de failles et son déplacement (Fig. 8). On constate aussi une plus grande variation d'épaisseur mesurée de la zone de failles pour des faibles déplacements (< 10 cm). A l'inverse pour des forts déplacements, les variations d'épaisseur sont très faibles, cependant il est possible qu'il soit plus difficile d'identifier les structures faisant partie d'une même zone lorsqu'il s'agit d'une zone de failles à fort déplacement que lorsqu'il s'agit d'une zone de failles plus étroite à faible déplacement (Childs et., 2009).

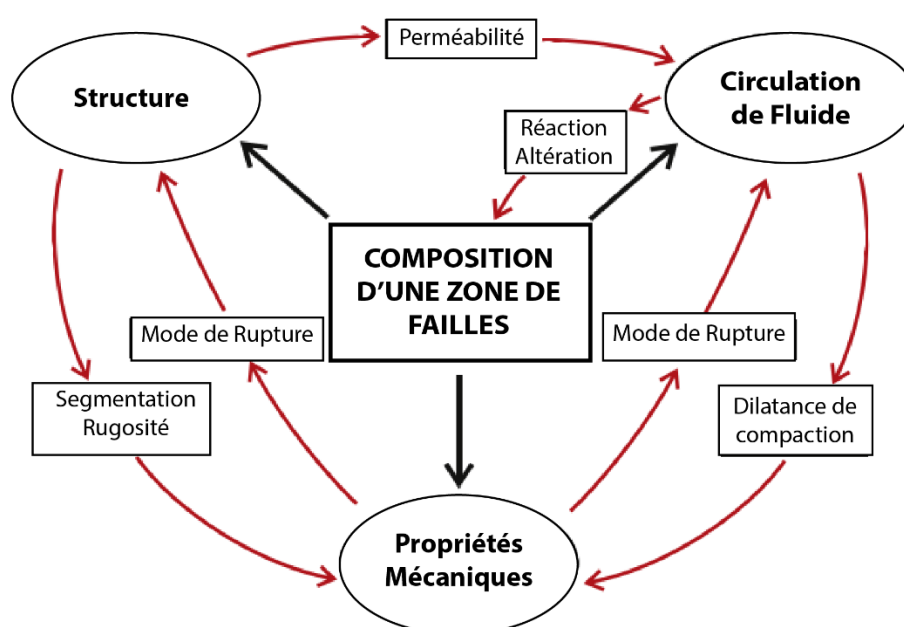
Cette relation est valable pour tous les types de failles (normales, inverses ou décrochantes) et ne semble pas dépendre de la lithologie du protholithe (Childs et al., 2009).



**Figure 8:** Relation de proportionnalité entre l'épaisseur de la zone de failles et son déplacement, d'après Childs et al., 2009 utilisant les données issues de Wolf (1985), Childs et al., (1996), Childs (2000), Faulkner and Rutter (2001) et Van der Zee (2002).

### 1.2.2.2 Les propriétés d'une zone de failles

Les propriétés mécaniques, hydrologiques et structurales de la zone de failles sont trois aspects primordiaux à la compréhension de son rôle et de son fonctionnement. Les propriétés mécaniques du protholite vont influencer l'architecture de la zone de failles qui va contrôler la circulation de fluides qui va elle-même perturber les propriétés mécaniques de la zone de failles (Fig. 9). Seulement les aspects structuraux et hydrologiques seront développés dans les parties suivantes (sections suivantes) car les propriétés mécaniques sont intrinsèques au type de lithologie. Les propriétés mécaniques seront données uniquement pour les argilites du Toarcien, dans la zone d'étude (§ 1.3.2.5.1).



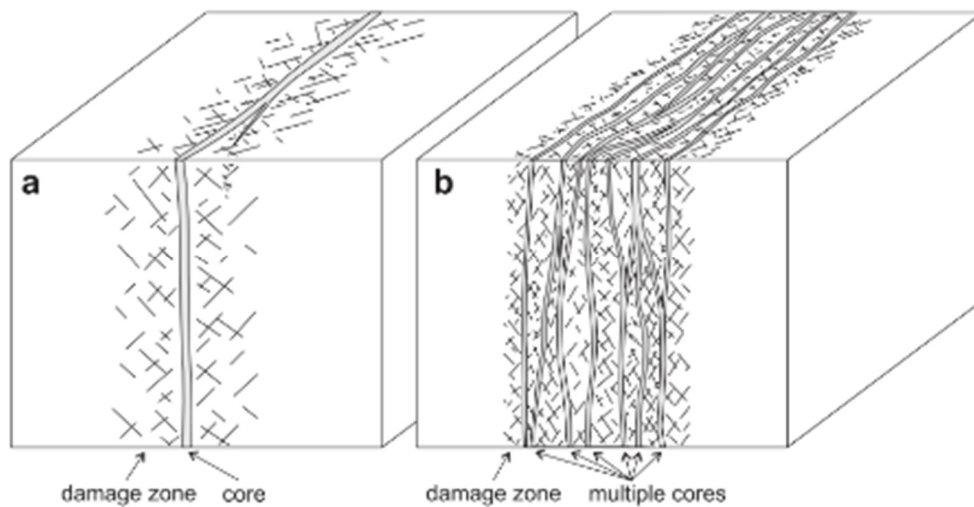
**Figure 9:** Liens étroits entre les propriétés architecturale, hydrologique et mécanique d'une zone de failles, d'après Faulkner et al., 2010.

### 1.2.2.3 Structure interne

Il est communément admis qu'une faille ne peut pas être considérée comme un simple plan continu mais correspond plutôt à un volume de roche affecté par une grande variété de structures de déformation à différentes échelles d'espace et d'intensité (Constantin et al., 2004; Faulkner et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010).

On peut considérer qu'une zone de failles est composée de deux domaines de déformation : La zone de cœur de faille (*fault core*) qui est encadrée par la zone endommagée (*damage zone*) qui représente une zone de transition entre le cœur de faille et la roche intacte (*host-rock*), (Fig. 10),

(Caine et al., 1996; Chester et al., 1993; Wibberley et al., 2008; Faulkner et al., 2010). Certains modèles proposent plusieurs cœurs de faille (Faulkner et al., 2010, Choi et al., 2015).



**Figure 10:** Agencement de la zone de cœur de faille (fault core) et la zone endommagée (damage zone), prenant en compte une ou plusieurs zones de cœur de faille (d'après Faulkner et al., 2010).

#### 1.2.2.3.1 Zone endommagée

Les structures observées dans la zone endommagée sont des fractures, des failles subsidiaires (secondaires), des veines, des plis et des plans de clivages (Chester and Logan, 1986; Chester et al., 1993; Caine et al., 1996; Hesthammer et al., 2000; Jourde et al., 2002).

#### 1.2.2.3.2 Zone de cœur de faille

Le cœur de faille est affecté par la déformation maximale le long d'un ou plusieurs plans de cisaillement principal. Il est composé de diverses structures regroupées sous le terme de roches de faille (*fault rock*) qui sont en général associées à des roches broyées/fragmentées.

Il existe une terminologie complexe selon la taille des fragments, de la nature cohésive ou non de la roche de faille (Fig. 11).

Selon Sibson (1977), on peut diviser les roches de faille en deux grandes catégories selon leur nature cohésive ou non. (i) Dans le cas d'une roche de faille non-cohésive ; si les fragments, appelés plus couramment des clastes, sont supérieurs à 30% de la masse de la roche, on parle

de brèche de faille, s'ils sont inférieurs à 30%, on parle alors de gouge. (ii) Dans le cas d'une roche de faille cohésive, on se focalise sur la proportion de matrice. Dans le cas où la matrice représente entre 0-10% de la roche totale, si les fragments ont une taille supérieure à 0.5cm, on parle de brèche. Lorsque les fragments ont une taille inférieure de 0.1cm, on parle de microbrèche. Entre la brèche et la microbrèche (fragment entre 0.1-0.5cm), on qualifie la roche de faille de brèche fine. A partir d'une proportion de matrice supérieure à 10%, on rentre dans la série des cataclasites ou des mylonites (si présence de foliation).

| FABRIQUE                      |                                                                  |                  | FOLIATION     |                             |  |                       |           |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|-----------------------------|--|-----------------------|-----------|
| NO-COHESIF                    | BRECHE DE FAILLE<br>fragments visibles >30% de la masse de roche |                  |               |                             |  |                       |           |
|                               | GOUGE DE FAILLE<br>fragments visibles <30% de la masse de roche  |                  |               |                             |  |                       |           |
|                               | Verre/verre dévitrifié                                           | PSEUDOTACKYLITE  |               |                             |  |                       |           |
| COHESIF                       | NATURE DE LA MATRICE<br>Réduction tectonique de la granulométrie | BRECHE           |               | fragments > 0.5 cm          |  | PROPORTION DE MATRICE |           |
|                               |                                                                  | BRECHE FINE      |               | 0.1 cm < fragments < 0.5 cm |  |                       | 0 - 10%   |
|                               |                                                                  | MICROBRECHE      |               | fragments < 0.1 cm          |  |                       | 10 - 50 % |
|                               |                                                                  | PROTACATLASITE   |               | PROTOMYLONITE               |  | 50 - 90 %             |           |
|                               |                                                                  | CATACLASITE      |               | MYLONITE                    |  | 90 - 100 %            |           |
|                               |                                                                  | ULTRACATACLASITE |               | ULTRAMYLONITE               |  |                       |           |
| Croissance de grain prononcée |                                                                  |                  | BASTOMYLONITE |                             |  |                       |           |

**Figure 11:** Classification des roches de faille d'après Sibson, 1977.

La série des cataclasites se compose des protocataclasites, des cataclasites et des ultracataclasites correspondant à des proportions de matrice comprises entre 10-50, 50-90 et 90-100%. Et la série des mylonites se compose des protomylonites, des mylonites et des bastomylonites correspondant à des proportions de matrice comprises entre 10-50, 50-90 et 90-



100% (Sibson, 1977). Les pseudo-tackylites sont, elles aussi, des roches cohésives mais formées par la fusion par friction lors de la déformation (on parle aussi de verre).

Les roches foliées comme la série mylonite se forment majoritairement en régime ductile alors que la série des cataclasites est plutôt caractéristique d'un régime cassant. Les paramètres physiques qui vont influencer ces deux régimes sont la température, la pression de confinement et la vitesse de déformation. Ainsi, globalement, on peut prétendre qu'une roche de faille formée au-dessus de 10-15km de profondeur, sera composée de cataclasites alors qu'en dessous de 15km, elle sera composée de mylonites.

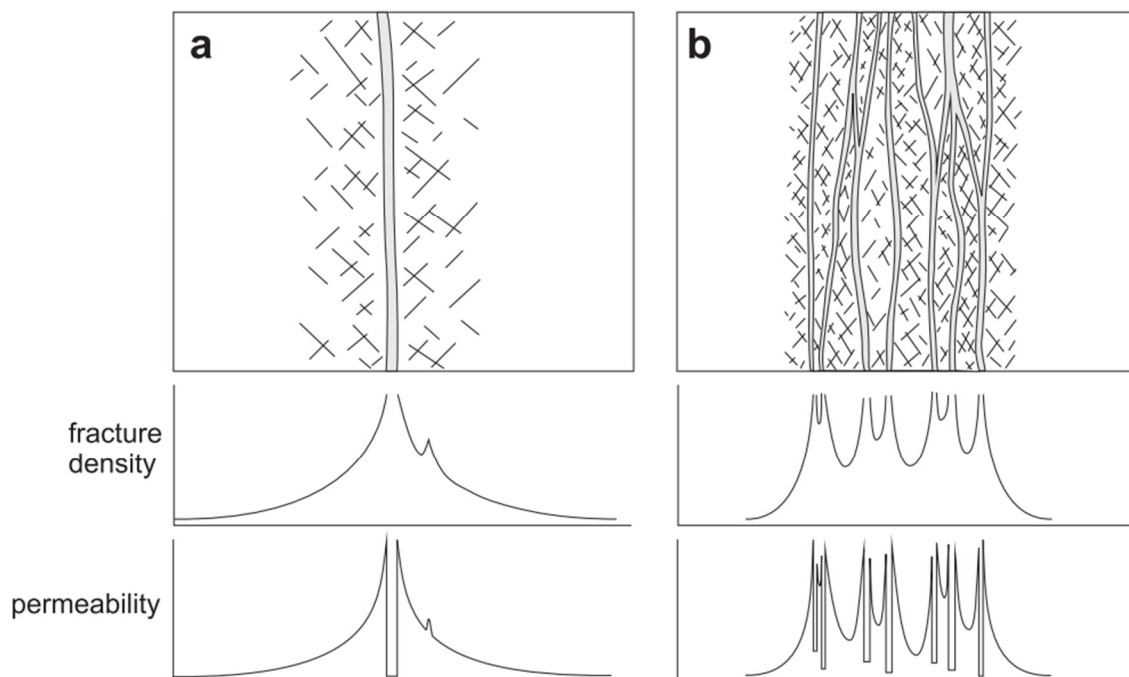
#### **1.2.2.4 Propriétés hydrauliques**

Les différentes caractéristiques structurales entre la zone endommagée et le cœur de faille impliquent des répercussions sur les propriétés hydrauliques au sein d'une zone de failles. En effet, généralement dans une zone de failles, la zone endommagée est le domaine le plus perméable contrairement au cœur de faille qui est le moins perméable (Chu et al., 1981 ; Morrow et al., 1984 ; Evans et al., 1997 ; Seront et al., 1998 ; Faulkner & Rutter 1998; Tsutsumi et al., 2004 ; Bense et al., 2013). En fonction de la nature du protolithe, sa perméabilité peut être une valeur intermédiaire entre la perméabilité de la zone endommagée et la perméabilité du cœur de faille (Fig. 13) ou bien elle représente la perméabilité la plus faible du système de faille (Fig. 12).

La valeur de perméabilité dépend de la teneur en minéraux argileux (souvent présents dans le cœur de faille), de la distribution, proportion ainsi que de la taille des grains (clastes), de la géométrie des discontinuités (orientation, tortuosité, ouverture), de la connexion et du remplissage de ces discontinuités. Il est courant d'observer dans les cœurs de faille des structures foliées responsables de forte anisotropie de perméabilité. Ces structures ont tendance à se paralléliser le long du plan de faille et génèrent une perméabilité plus importante le long (parallèle) du plan de faille que perpendiculairement (Rutter et al., 1986). Des études expérimentales sur des zones de gouge riche en phyllosilicate, ont montré que la perméabilité perpendiculaire à la foliation (plan de faille) est un à trois ordres de grandeur plus petite que la perméabilité parallèle à la foliation (Faulkner & Rutter, 1998 ; Faulkner, 2004). Cet écart de perméabilité est d'autant plus marqué que la pression de confinement est importante (Faulkner & Rutter, 1998).

Cependant comme on a vu dans la partie « architecture de la zone de failles » (partie I.1.3.2) ; une zone de failles est composée de segments de failles qui interagissent et se branchent entre eux avec des systèmes de faille en échelon, des pull-apart, des faisceaux de failles ... La diversité des structures peut conduire à une succession de zones perméables et non perméables d'une très grande hétérogénéité (Fig. 12). Ainsi la complexité structurale au sein d'une zone de failles induit une forte hétérogénéité dans l'écoulement de fluides (Evans et al., 1997; Mandl et al., 1977; Manzocchi et al., 1999; Yielding et al., 1999).

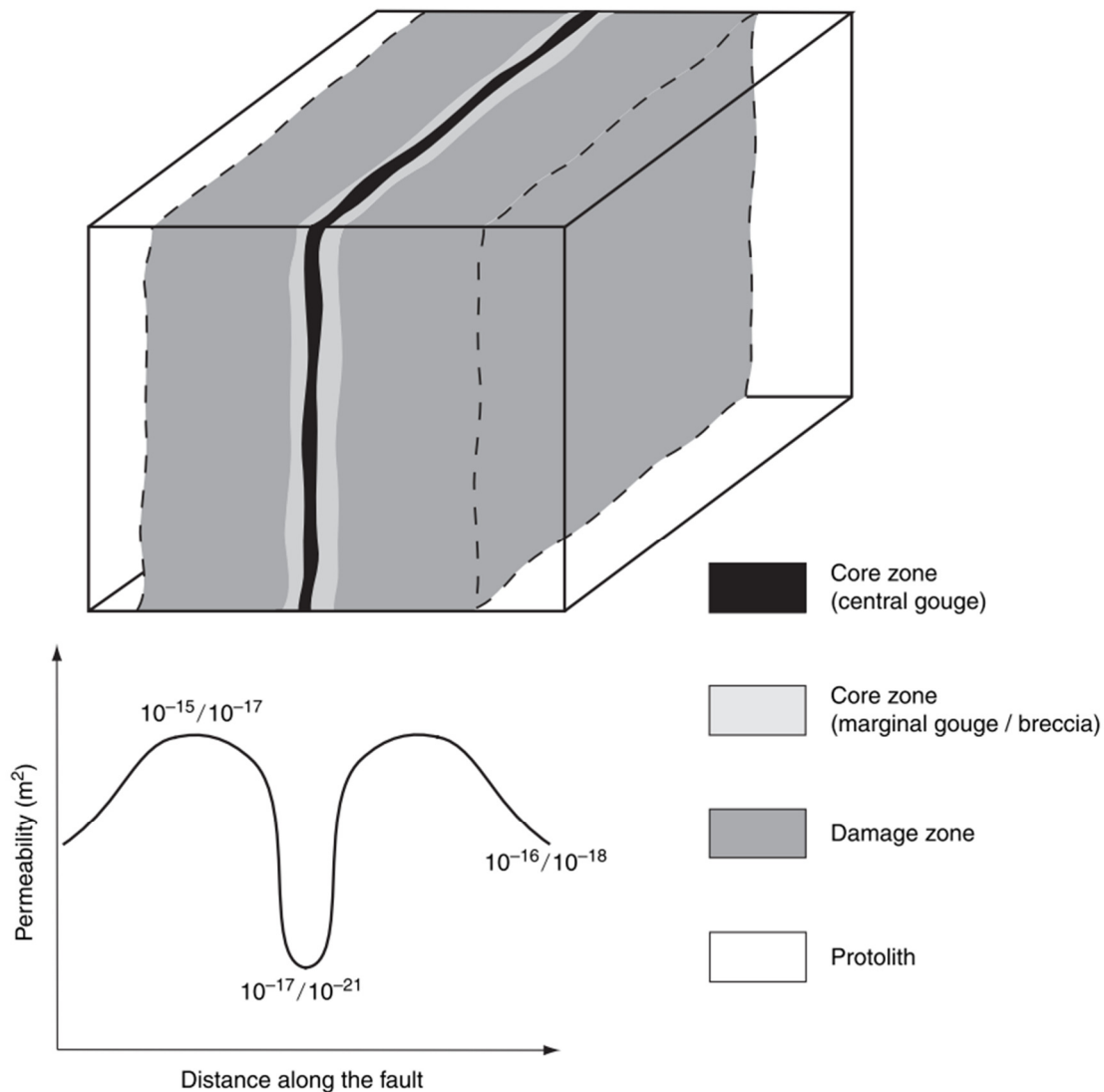
La zone de failles inclut la faille principale présentant la plus grande dimension sous forme de segment de failles qui interagissent entre eux (système de faille en échelon, les pull-apart, les faisceaux de failles...), ainsi que des failles secondaires qui peuvent se brancher sur la faille principale.



**Figure 12:** Variation de la perméabilité en fonction de la structure de la zone de failles. Cas (a) avec un seul cœur de faille et une densité de fracture décroissante simple et (b) cas plus complexe présentant plusieurs cœurs de faille et plusieurs pics de densité de fractures. D'après Faulkner et al., 2010.

On peut alors parler en termes de population de failles. Les failles peuvent être plus ou moins parallèles avec un espacement plus ou moins régulier dans un volume relativement restreint. Ces failles sont fréquemment encadrées par un réseau de fractures (exemple du système de Riedel ; Billi et al., 2003). La zone de failles inclut aussi des fractures dites satellites qui

affectent des zones très locales ainsi que *des roches* de faille caractérisées par des faciès très déformés (brèche, gouge, cataclasite...).



**Figure 13 :** Profil schématique de perméabilité au travers d'une zone de failles composée d'un cœur central encadré par une zone endommagée puis du photolithe. Les valeurs de perméabilité ont été obtenues à partir de différents matériaux (sédiments, granite, conglomérat, métapélite...) pour une pression effective proche de 100 MPa (d'après Boutareaud et al., 2008).

Pour donner une idée sur les ordres de grandeur de perméabilité du cœur de faille, de la zone endommagée et du protolithe, des mesures de perméabilité (à pression effective de confinement et de pression de pores de 80-180MPa et 10-20MPa, respectivement) sur des échantillons provenant d'une zone de failles au sein d'un protolithe à faible porosité ont été réalisées (Faulkner & Rutter 1998 ; Lockner et al., 1999 ; Mizoguchi et al., 2000 ; Tsutsumi et al., 2004). La perméabilité obtenue pour le cœur de faille est comprise entre  $10^{-21}$  et  $10^{-17}$  m<sup>2</sup>, celle de la

zone endommagée est comprise entre  $10^{-17}$  et  $10^{-15} \text{ m}^2$  et enfin la perméabilité obtenue pour le protolithe est comprise entre  $10^{-18}$  et  $10^{-16} \text{ m}^2$  (Fig. 13), (Faulkner & Rutter 1998, Chu et al., 1981 ; Morrow et al., 1984 ; Lockner et al., 1999 ; Mizoguchi et al., 2000 ; Tsutsumi et al., 2004). Dans ces exemples, la perméabilité de la roche intacte (protolithe) est considérée comme intermédiaire entre la perméabilité de la zone endommagée et la perméabilité du cœur de faille.

#### **1.2.2.4.1 Perméabilité de la zone endommagée**

La perméabilité de la zone endommagée est régie par la perméabilité du protolithe à laquelle s'ajoute la perméabilité de fracture. Les facteurs influençant la perméabilité de fracture sont nombreux et comprennent majoritairement des aspects géométriques souvent intimement liés entre eux, comme l'ouverture hydraulique, la tortuosité, l'orientation, la densité, la taille ou encore la connexion hydraulique (Caine et al., 1996; Faulkner et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010). La perméabilité diminue de la même manière que la densité de fracture a tendance à décroître avec la distance au cœur de faille, (Fig. 12). Au sein de la zone endommagée, la variation de perméabilité peut varier de plusieurs ordres de grandeur. Cette modification est due à des variations lithologiques et à une complexité de la structure (Wibberley et al., 2003).

#### **1.2.2.4.2 Perméabilité de la zone de cœur**

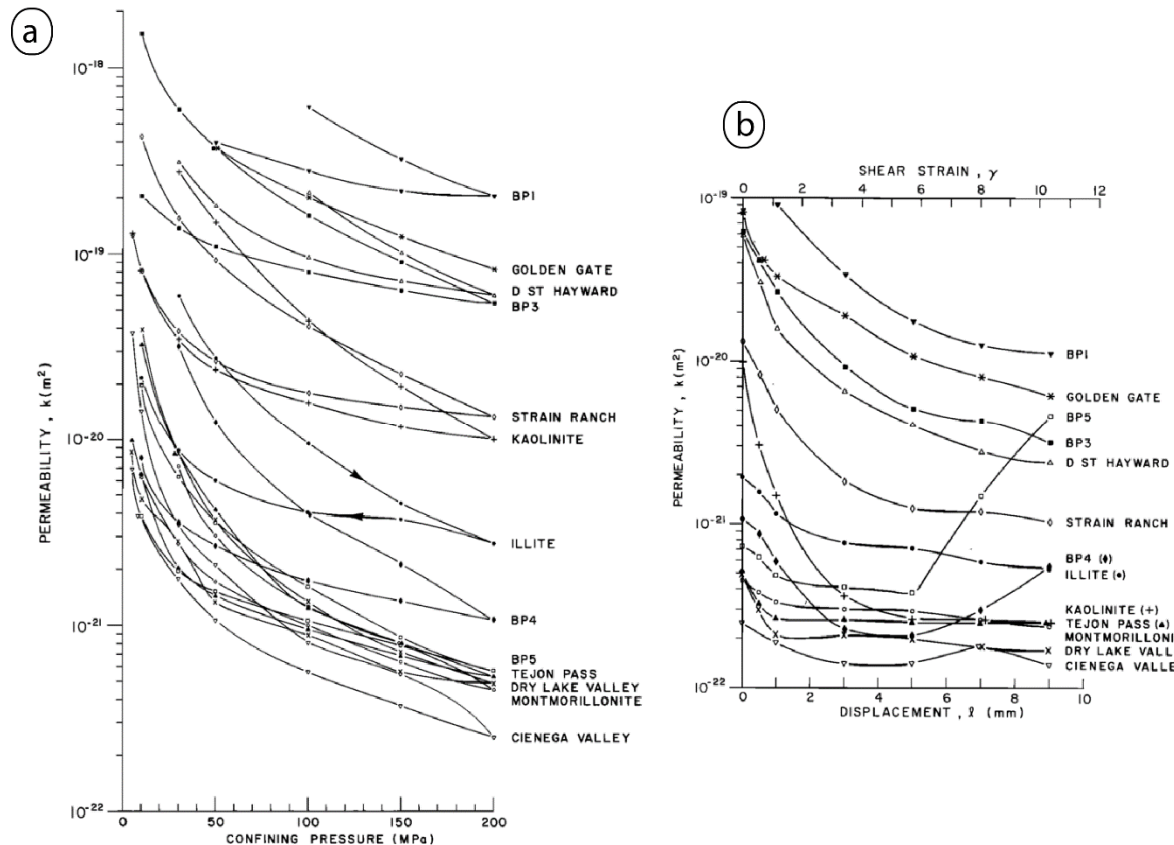
Le cœur de faille est caractérisé par une réduction de la taille de grain (Billi et al., 2003) issu de la déformation qui généralement a tendance à diminuer la perméabilité. Cependant, au cours de la déformation dans le cœur de faille (lors de l'activité de la faille), des effets dilatants peuvent favoriser la circulation de fluides qui elle-même influe sur l'évolution de l'activité de la zone de failles (Rice et al., 1979).

Les études de Morrow et al., (1984) se focalisent la perméabilité des zones de gouge dans les cœur de faille sous pression de confinement et sous sollicitation mécanique. Différents types de gouges sont testés ; certaines contiennent des quantités variables de minéraux argileux et d'autres sont composées uniquement d'argile. (i) Un des premiers résultats est que la perméabilité de l'ensemble de gouge testé varie de plus de quatre ordres de grandeur (Fig. 14a). En effet les perméabilités des gouges testées sont comprises entre  $10^{-18}$  et  $10^{-22} \text{ m}^2$ . La perméabilité diminue avec l'augmentation de la pression de confinement car les échantillons de gouges se compactent pour accommoder la déformation. Pour tous les échantillons de gouge,

la perméabilité lors du déchargement est inférieure à la perméabilité au cours de chargement en raison du compactage des grains qui n'est pas complètement réversible.

(ii) Un autre résultat intéressant est la valeur de perméabilité de ces gouges en fonction du déplacement cisailant (Fig. 14b).

Lors du déplacement, trois types de comportements ont été observés selon les différents types de gouge. Pour les gouges à grains grossiers, la perméabilité diminue fortement (jusqu'à plus d'un ordre de grandeur) et pour les gouges à grains fins, la perméabilité diminue de manière moins significative (Morrow et al., 1984). La perméabilité des gouges non argileuses diminue pour des faibles longueurs de déplacement puis augmente très significativement. Cette augmentation radicale de perméabilité signifie que les gouges non argileuses sont affectées par un comportement dilatant après 4mm de déplacement.



**Figure 14 :** a) Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0 % compris) et des argiles pures, en fonction de la pression de confinement. Les chemins de chargement et de déchargement sont illustrés par une flèche sur la courbe correspondant aux argiles de type illite. b) Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0% compris) et des argiles pures, en fonction de

*la déformation cisaillante (axe supérieur) et de déplacement (axe inférieur). Lors de ces expériences, la pression de confinement est de 200 MPa (d'après Morrow et al., 1984).*

### **1.2.3 Zone de failles en milieu argileux**

#### **1.2.3.1 Bref rappel sur les formations argileuses et leurs intérêts**

Les minéraux argileux, encore appelés phyllites, sont des phyllosilicates hydratés caractérisés par des petits cristaux de quelques  $\mu\text{m}$ . Ils sont constitués d'atomes de silicium, d'aluminium, d'oxygène et d'ions hydroxyles qui se combinent sous forme de couches (appelée feuillet). Ces feuillets sont constitués soient de tétraèdres, soient d'octaèdres selon l'organisation des oxygènes ou hydroxyles. La superposition des feuillets est responsable de l'anisotropie des argiles. En fonction de la composition atomique, des substitutions foliaires ou encore des espaces inter-foliaires, différentes catégories de minéraux argileux ont été définies : la kaolonite, les illites, les smectites (montmorillonite), les minéraux interstratifiés et les minéraux fibreux qui comprennent les micas et les chlorites.

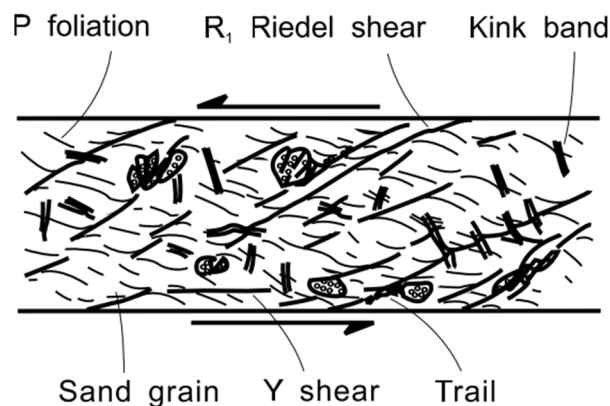
Les formations argileuses contiennent au moins 50% de minéraux argileux. Le caractère anisotrope des argiles est renforcé par la compaction subie lors de la diagenèse, qui participe à l'alignement des feuillets et à sa faible perméabilité. Les formations argileuses présentent de nombreux intérêts d'ordre scientifique, en géo-ingénierie ou encore dans le cadre de l'industrie pétrolière :

- L'intérêt scientifique est principalement la reconstitution des conditions et interactions milieu/climat en fonction du type d'argile rencontré.
- L'intérêt en géo-ingénierie des argiles réside dans leurs propriétés physico-chimiques et plus particulièrement, dans leur capacité à absorber de nombreux éléments (on dit qu'elles ont une grande capacité d'échange cationique) ce qui (i) leur permet de contenir des polluants (métaux lourds par exemple) et, (ii) par leur très faible perméabilité de favoriser l'isolement des déchets aux composés radiogéniques et radioactifs. C'est l'exemple du site de stockage de Meuse-Haute-Marne de l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs) localisée dans les argilites Callovo-Oxfordiennes (150 Ma).
- L'intérêt des argiles pour l'industrie pétrolière est dans le caractère peu perméable qui constitue des barrières et par conséquent des pièges d'hydrocarbures. Ainsi que le

confinement de liquides qui peuvent se former au cours de leur dégradation. Ainsi les formations argileuses trouvent aussi une application fondamentale dans les domaines de l'exploration et de l'exploitation des réserves d'hydrocarbures. Notons aussi, plus accessoirement qu'un type de smectite appelé bentonites sont employées dans les forages pétroliers pour obtenir une « boue de forage » qui a pour rôle d'empêcher la remontée des fluides sous pression présents dans les roches traversées. Enfin, les roches mères sont souvent argileuses, leur exploitation dans le cadre des gisements d'hydrocarbures dits non-conventionnels et la compréhension des processus de maturation et de migration dans ces roches représentent aussi des enjeux très importants.

#### 1.2.4 Propriétés des zones de failles en milieux argileux

Les zones endommagées dans les formations argileuses sont caractérisées par leur capacité d'auto-guérison, en autre terme, il s'agit d'une faculté à colmater leurs fractures (Horseman, 2001). Ce colmatage se fait essentiellement par minéralisation de calcite. Ainsi l'augmentation de la perméabilité dans les zones endommagées dans les milieux argileux est souvent freinée par ce processus d'auto-colmatage (Constantin et al., 2004).

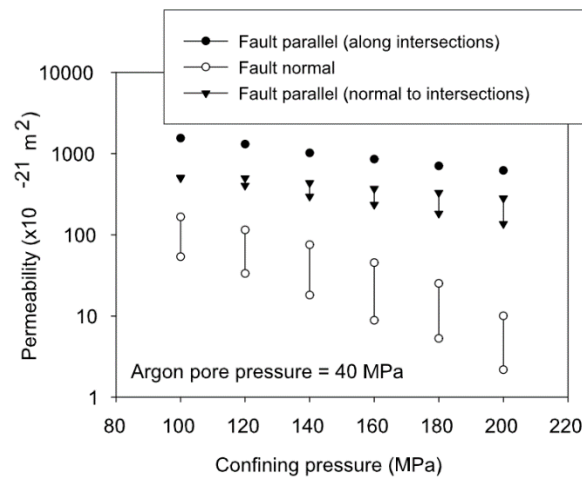


**Figure 15 :** Structures typiques rencontrées dans les cœurs de faille argileux, les plans correspondants aux flèches représentent les plans de glissement principaux, d'après Rutter et al., 1986.

Lors de l'activité de la faille, le cœur de faille argileux, a une grande capacité à se réorganiser selon le modèle structural présenté dans la figure 15 (Rutter et al., 1986 ; Faulkner, 2004). Ce réarrangement structural met en avant une foliation liée à la déformation relativement parallèle à la direction des plans principaux de glissement. Cette organisation structurale typique des

cœurs de faille, a de grandes implications sur la perméabilité selon l'orientation du profil par rapport à la direction de la faille.

En effet, des expériences en laboratoire sur les cœurs de faille riches en minéraux argileux indiquent une perméabilité plus grande de près de trois ordres de grandeur dans la direction parallèle à celle de la faille que la perméabilité perpendiculaire à la direction de la faille (Fig. 16, Faulkner et Rutter, 1998 ; Faulkner, 2004).

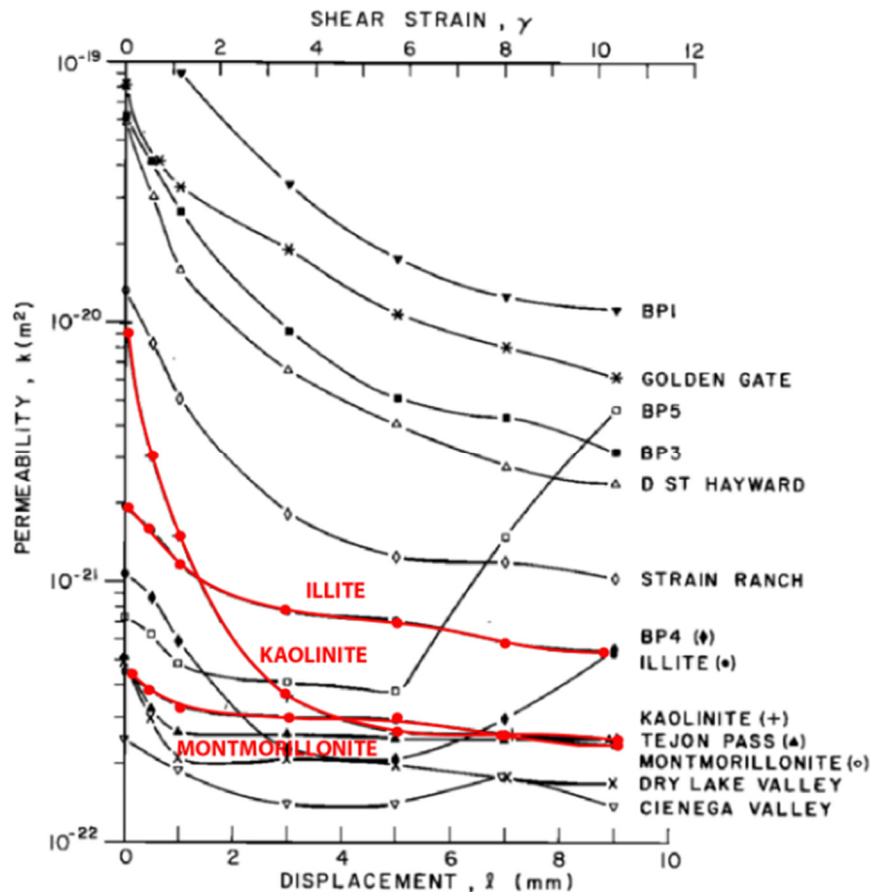


**Figure 16 :** Anisotropie de perméabilité d'un échantillon de cœur de faille riche en minéraux argileux, d'après Faulkner et Rutter, 1998).

Les expériences de Wibberley, sur des échantillons similaires ont indiqué que pour une porosité et une contrainte effective données, le cisaillement conduit généralement à la diminution de la perméabilité à la fois le long et perpendiculairement de la zone de cisaillement (Wibberley et al., 2008). Pour ces raisons, les cœurs de failles argileux sont considérés comme ayant une faible perméabilité dans le même ordre que celle de la roche intacte (Nussbaum et al., 2004). Cependant, la porosité et la perméabilité peuvent augmenter lorsque le chemin de contraintes appliquées sur l'échantillon montre un comportement dilatant (Zhang et Cox, 2000).

Les études de Morrow et al., 1984 mettent en évidence l'évolution de la perméabilité des cœurs de faille en fonction de leur teneur en argile au cours du déplacement, sous une pression de confinement de 200 MPa (Fig. 17). Les échantillons BP4 et BP5 ne contiennent aucun minéral argileux et les échantillons illite, kaolinite et montmorillonite (smectite) sont purement composés d'argile (courbes rouge, Fig. 17).





**Figure 17 :** Perméabilité de gouge de faille comprenant différentes proportions de minéraux argileux (0% compris) et des argiles pures, (en rouge) en fonction de la déformation cisailante (axe supérieur) et de déplacement (axe inférieur). Lors de ces expériences, la pression de confinement est de 200 MPa (d'après Morrow et al., 1984).

Les autres échantillons ont des teneurs en minéraux argileux intermédiaires. Au début, (entre 0 et 3mm de déplacement) il n'y a pas vraiment de différence dans le comportement de la perméabilité, entre les différents échantillons. C'est pour un déplacement compris entre 3 et 9 mm, que la perméabilité soit (i) ne varie quasiment plus pour les argiles. (ii) diminue doucement, pour les échantillons contenant une certaine proportion d'argile ou (iii) augmente brutalement après 5mm de déplacement pour les échantillons sans argile.

Cependant, la présence de veines de calcite dans les zones de failles en milieu argileux suggère que la migration de fluides peut se produire lors de l'activation ou du mouvement de la faille. (Cabrera et al., 2001; Constantin, 2002). D'autres observations de terrain (exemples des décollements de prisme d'accrétion de Costa Rica et de la Barbade) indiquent que les failles

actives peuvent être hydrauliquement conductrices malgré la faible perméabilité des formations riches en argile.

Si les expériences de laboratoire sur des échantillons riches en argile mettent généralement en évidence que pour une contrainte effective moyenne donnée, le cisaillement tend à réduire la perméabilité (Dewhurst et al, 1996; Zhang et Cox, 2000 ; Wibberley et al, 2008), il est aussi observé des augmentations significatives de perméabilité ( $\times 10$ -100) sur des échantillons de silt/argile cisailés ou faillés dans des conditions très sur-consolidées (Zhang et Cox, 2000; Bolton et al 1999; Nygard, 2006). Les modèles existants de perméabilité de faille ont proposé une dépendance exponentielle de la perméabilité sur la pression effective (Rice et al., 1992; Fisher et al, 1996;. Revil et al, 2002).

La faille de Nankai est un exemple de faille active très peu perméable car elle présente une forte teneur en argile (smectite, illite). À proximité de cette faille, il est courant d'observer des zones à accumulation d'hydrate de gaz et de volcans de boue liés à la production de gaz en profondeur de types biogénique et/ou thermogénique (Gamo et al., 1992 ; Tsunogai et al., 1998 ; Kobayashi et al., 2002 ; Henry et al., 2002 ; Nouzé et al., 2004). La plupart des fluides proviennent de la compaction des sédiments dans le prisme d'accrétion qui ne semblent pas migrer le long de la surface de décollement mais plutôt le long des couches de sable.

## **1.3 Contexte géologique de la zone de failles étudiée**

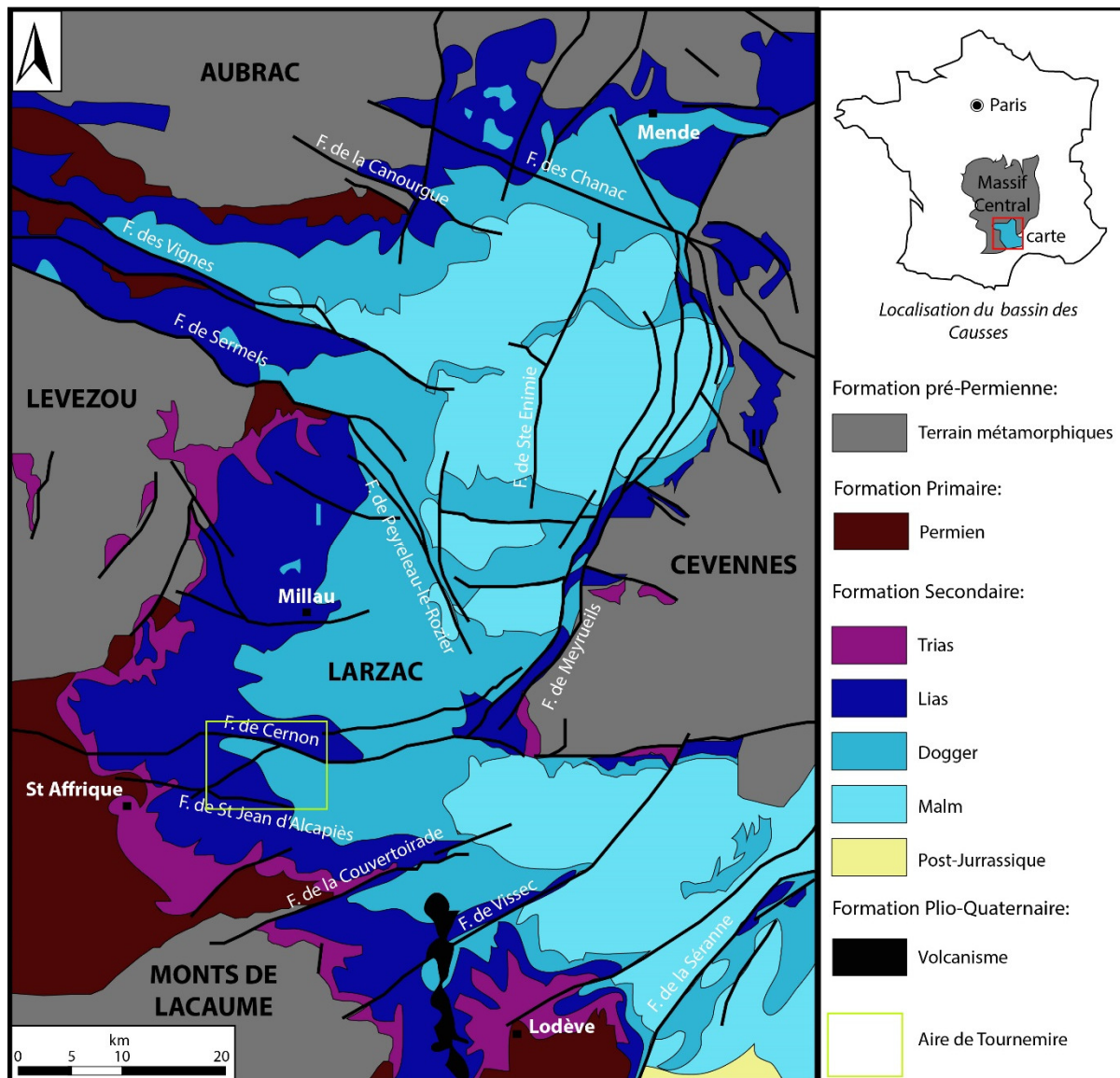
### **1.3.1 Le bassin des Causses**

#### **1.3.1.1 Localisation et description générale**

Le bassin des Causses est localisé au Sud-Est du Massif Central (France). Le bassin Permo-Mésozoïque des Causses est orienté Nord-Sud. Il est délimité par quatre grands massifs pré-Permien ; à l'Est, par le massif des Cévennes, au Nord, par le massif de l'Aubrac, à l'Ouest et Sud-Ouest par le massif du Lézou et le Mont de Lacaune respectivement (Fig. 18).

Les massifs pré-Permien (Aubrac, Lézou, Les Cévennes et le Mont Lacaune) sont composés principalement de roches métamorphiques ou cristallines. Hormis la présence des formations sédimentaires du Permien, le remplissage du bassin est constitué principalement des formations Mésozoïques. Le Permien est observé dans les sous-bassins de St Affrique (à l'Ouest) et de Lodève (au Sud) mais aussi entre les massifs de l'Aubrac et du Lézou (Au Nord-Ouest du bassin des Causses). Les formations du Secondaire comprennent le Lias jusqu'au Portlandien

(Les formations du Crétacé-Tertiaire sont absents de la feuille de Millau). Différentes injections volcaniques d'âges variés sont observées. Un premier épisode volcanique alcalin à la fin du Bajocien supérieur sous forme de pillow-lava, un deuxième épisode type basanite à la fin du Paléocène supérieur, un troisième épisode datant du Miocène très présent mais disséminé sous forme de patches dans le bassin et enfin le dernier épisode d'âge Plio-Quaternaire responsable de la chaîne de l'Escandorgue (Sud du bassin, Fig. 18).



**Figure 18:** Carte géologique simplifiée du bassin des Causses (Figure modifiée d'après Constantin, 2002).

Le bassin des Causses est affecté par un grand nombre de failles d'extension plurikilométrique. Le bassin est d'une part limité par des failles NNE-SSW et d'autre part, découpé par des systèmes de failles selon différentes orientations. Au Nord, les failles affectant le bassin, sont

principalement orientées NW-SE (Faille de la Canourgue, Faille des Chanac) et NNE-SSW (Faille de Sainte Enimie), alors qu'au centre du bassin, elles sont E-W (faille de Cernon, Faille de St Jean d'Alcapiès) et SSE-NNW (Faille de Peyreleau-le-Rozier) et au Sud du bassin, les failles sont orientées NE-SW (Faille de Vissec, Faille de la Séranne). La plupart de ces structures montrent aujourd'hui un jeu inverse ou décrochant.

### **1.3.1.2 Histoire géologique du bassin des Causses**

#### **1.3.1.2.1 La genèse du bassin**

- Carbonifère supérieur/Permien:

Au cours du Stéphanien, la compression Hercynienne laisse place à une phase extensive liée à l'ouverture de l'océan Téthysien permettant la formation de sous-bassins Permien (exemple de Saint-Affrique et de Lodève). Le jeu normal de failles héritées tardi-Hercyniennes accompagne la structuration des bassins sédimentaires. Les failles bordant le bassin des Causses à l'Est et l'Ouest sont principalement NNE-SSW à N-S. Les formations Stephano-Permien sont composées de dépôts lagunaires et continentaux alimentés par le produit de l'érosion du relief de la chaîne Hercynienne tel que le Lézou cristallin, à l'ouest du bassin des Causses. L'Autunien présente à sa base, un conglomérat grossier puis au-dessus, des shales noirs avec des intercalations de grès fins. L'ensemble de l'Autunien présente une épaisseur supérieure à 140m. Le Saxonien se présente dans son faciès classique sous forme de pélites lie-de-vin et présente une épaisseur plurikilométrique. Ces fortes épaisseurs de dépôts sont renforcées par la synchronisation entre le processus de remplissage de bassin et la dynamique active des failles.

#### **1.3.1.2.2 Le remplissage du bassin durant l'extension Mésozoïque**

- Trias/Lias:

Les formations du Trias Inférieur reposent en discordance faible sur le Saxonien. Le Trias est principalement composé de dépôts sédimentaires de types fluviaux et continentaux. Le Trias Inférieur épais de 70 à 100m se compose de conglomérat, grès et marnes. L'épaisseur du Trias Moyen est de 45 à 60m et est composé principalement de grès et de marnes. Le Trias Supérieur est épais de 90 à 100m et rassemble dolomie, grès, marne, gypse et conglomérat.

Il faut attendre l'Hettangien (Lias Inférieur) pour que l'ouverture de l'océan Téthys entraîne le passage à une sédimentation en zone marine. Les formations du Lias Inférieur (Hettangien, Sinémurien et Carixien) sont principalement de type calcaire-dolomie et représentent une épaisseur comprise entre 300 et 500m. Le changement abrupt de faciès des formations au Lias Supérieur (Domérien et Toarcien) présentant essentiellement des argiles et des marnes d'environ 250m d'épaisseur, indique un accroissement franc de la profondeur de dépôt engendré par une tectonique extensive syn-sédimentaire. La transgression maximale se situe au cours du Toarcien Moyen. L'extension est E-W (Constantin et al., 2002) et s'exprime par l'individualisation des bassins en les fractionnant le long des failles tardi-Hercyniennes.

– Dogger/Malm/Crétacé inférieur:

L'extension liée à l'ouverture du bassin Piémontais se poursuit au cours du Dogger et devient NW-SE. Elle est accompagnée par un volcanisme de type alcalin (basalte des Vignes). Le début de l'Aalénien supérieur jusqu'au Portlandien (Malm), s'accompagne d'un retour à un faciès de type calcaire et dolomie. L'ensemble des formations du Dogger (Aalénien, Bajocien, Bathonien et Callovien) comptabilise entre 300 et 500m d'épaisseur. L'extension devient N-S au cours du Malm ou pendant le Crétacé (Constantin et al., 2002).

Le Portlandien (Malm supérieur) est la formation du Mézosoïque la plus récente observée dans le bassin des Causses hormis quelques patches de Turonien (Crétacé Supérieur) rencontrés à proximité de Millau. Il est alors difficile de déterminer avec précision l'histoire géodynamique post-Jurassique du bassin. C'est en observant les dépôts post-Jurassique des bassins à proximité que l'histoire géodynamique a été reconstituée. En effet, ce sont principalement les dépôts du Dogger et du Malm qui marquent actuellement les reliefs des Grands Causses.

Alors que l'individualisation du bassin se poursuit suivant des failles E-W, une transgression marine se produit au Crétacé Inférieur (du Valanginien au Barrémien) suite à laquelle se développe la plate-forme Urgonienne.

### **1.3.1.2.3 L'exhumation du bassin au cours de la compression Pyrénéenne**

– Crétacé supérieur/Eocène:

Un changement de régime tectonique intervient durant la transition entre le Crétacé Supérieur et le Crétacé Inférieur. La collision des plaques africaine et européenne va entraîner une translation du bloc Ibérique (début de l'orogénèse Pyrénéenne). A partir du Paléogène, le bassin

des Grands Causses restera essentiellement en domaine continental. Le régime tectonique compressif est NE-SW et devient NW-SE au cours de l'Eocène (Constantin et al, 2002). L'ensemble du bassin est alors progressivement soulevé par réactivation en inverse des failles E-W et en décrochement pour des failles NE-SW à N-S.

#### **1.3.1.2.4 Evènements post-Oligocènes**

Alors qu'une période extensive principalement E-W associée à l'ouverture de l'Océan Ligure débute dès l'Oligocène jusqu'au Miocène Inférieur, le bassin des Grands Causses, n'enregistre quasiment plus de déformation.

Au Miocène Supérieur, l'orogénèse Alpin entraîne de nouveau un régime compressif qui se traduit principalement dans la région des Causses, par l'implantation des réseaux hydrographiques et le creusement de vallées accompagnés par un épisode volcanique (associé à celui du Massif Central).

Un nouvel épisode volcanique survient au cours du Plio-Quaternaire exprimé au travers de filons basaltiques localisés souvent dans des cavités karstiques du Jurassique.

### **1.3.2 Le secteur de Tournemire**

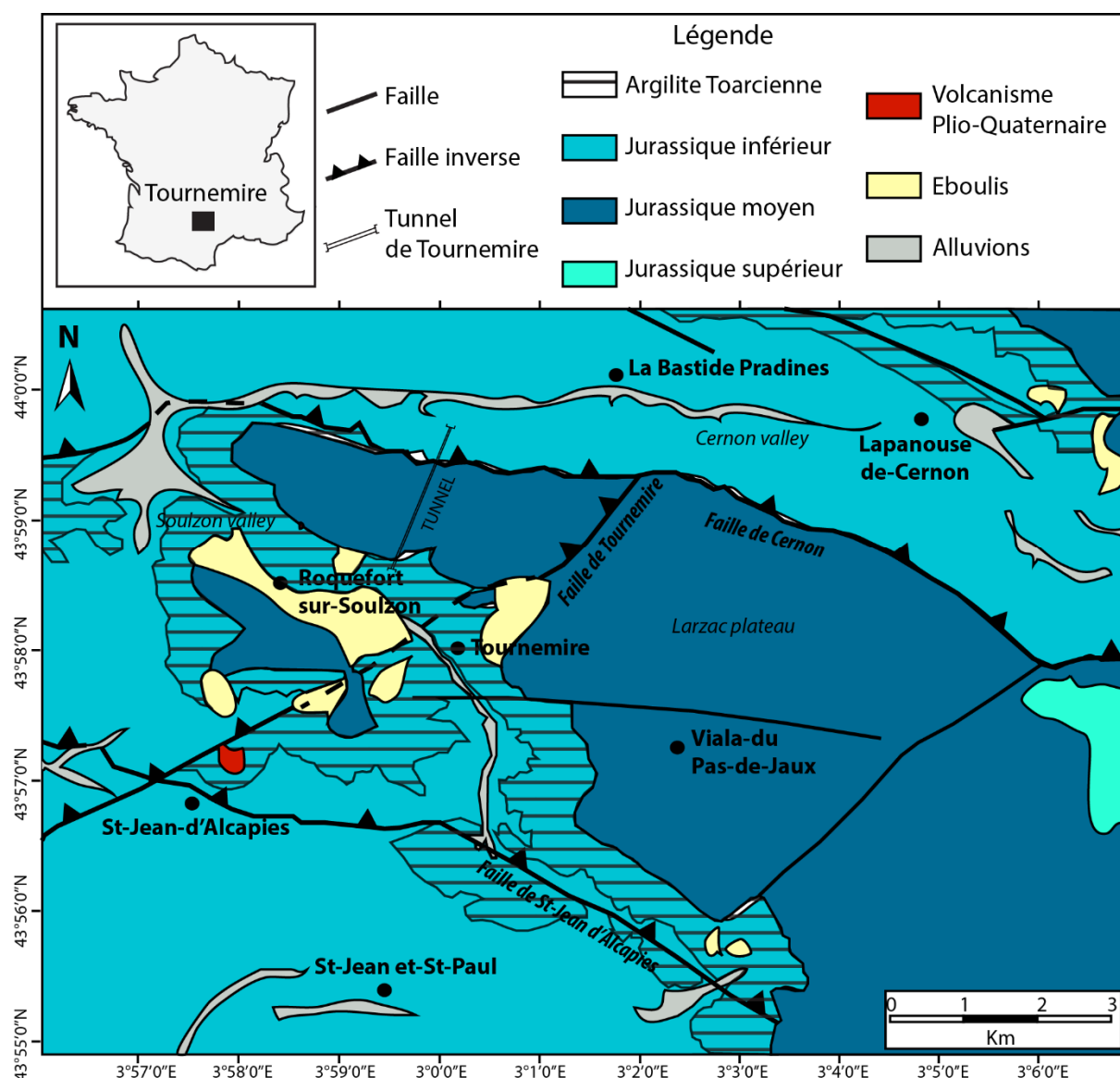
#### **1.3.2.1 Géologie structurale du secteur de Tournemire**

Le secteur de Tournemire est situé sur la bordure Ouest du bassin des Causses, à une dizaine de kilomètres à l'Est de Saint-Affrique et à une vingtaine de kilomètres au Sud de Millau.

Le secteur de Tournemire se présente sous forme d'un bloc E-W qui consiste en une structure monoclinale tabulaire avec un léger pendage de 5° à 10° vers le Nord (Fig. 19 et 23). Schématiquement, le secteur de Tournemire est composé de trois grandes unités stratigraphiques: à savoir, d'une couche marneuse-argileuse de 250m d'épaisseur (Toarcien-Domérien), encadrée par deux couches de calcaire et dolomie (Batonien-Bajocien-Aalenien et Carixien-Simémurien) d'environ 300 à 500m d'épaisseur respectivement (Fig. 23). La formation d'argilite est par conséquent, encadrée par deux aquifères calcaires; l'aquifère de l'Aalénien dans la partie supérieure et l'aquifère du Carixien dans sa partie inférieure.

En regardant la carte géologique, l'ensemble de cette structure est affecté par trois accidents d'échelle pluri-kilométrique: Les failles de Cernon, de Saint-Jean d'Alcapiès et de Tournemire.

La faille de Cernon (au Nord) et la faille de Saint Jean d'Alcapiès (au Sud) ont une direction E-W et délimitent le secteur de Tournemire. Ces deux failles présentent un fort pendage vers le Nord ainsi qu'un rejet inverse. Concernant la faille de Cernon, son rejet a été estimé en moyenne à 400m, et s'exprime en surface par le contact entre les calcaires de l'Hettangien (au Nord) et les calcaires du Bathonien (au Sud), (Fig. 19). La faille de Tournemire a une direction N040° avec un pendage de 60° vers l'Ouest présentant aussi un rejet inverse, estimé en moyenne à 100m. Longue de 6km, elle recoupe la faille de Saint Jean d'Alcapiès, traverse le plateau du Larzac et s'arrête sur la faille de Cernon. Ces trois accidents régionaux sont des structures héritées de l'orogénèse Hercynienne (De Charpal et al., 1974; Bonijoly and Delpont, 1982).



**Figure 19:** Localisation du bassin des Causses et carte géologique simplifiée du bassin des Causses (Figure modifiée d'après Constantin, 2002).

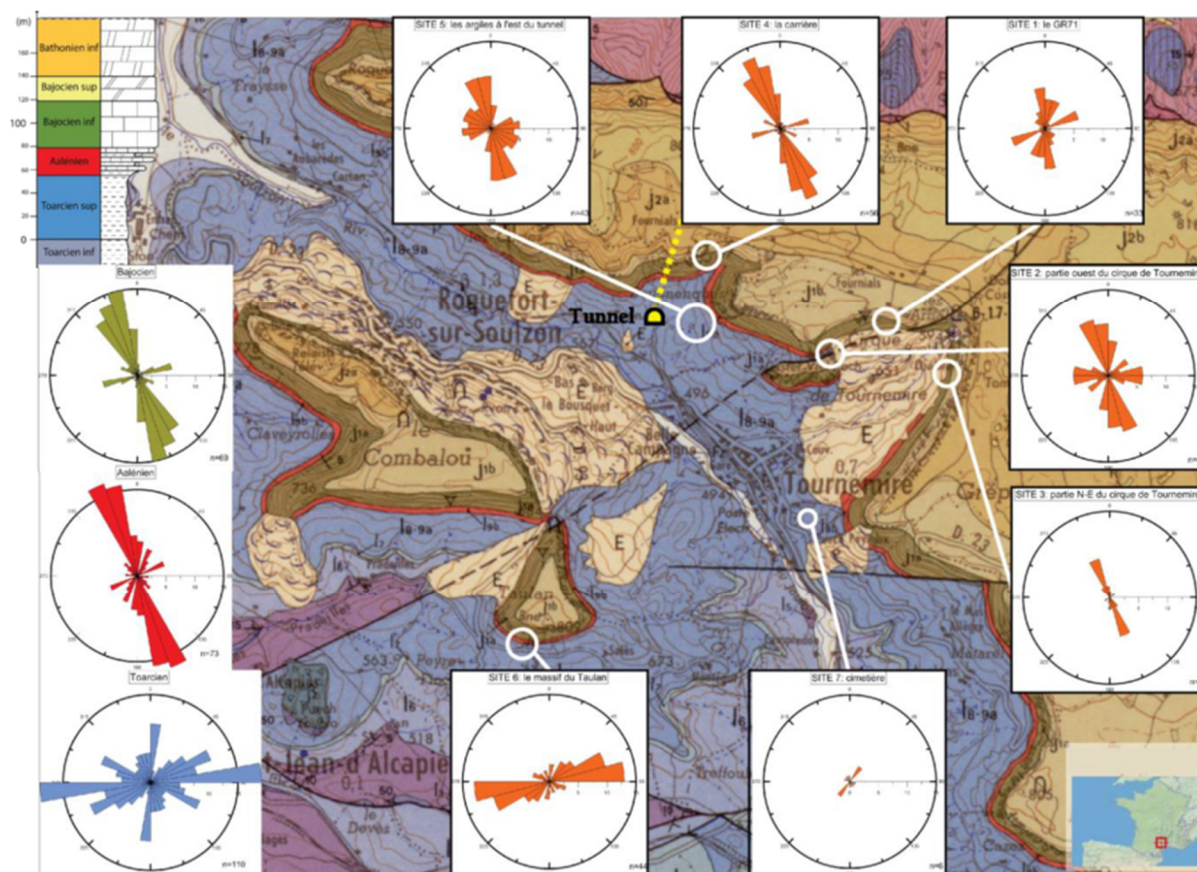


### 1.3.2.1.1 Observations structurales de terrain supplémentaires

Différentes observations de terrain sont ici présentées, certaines complètent des aspects de fracturation différentielle entre les diverses lithologies et d'autre amènent à réinterpréter la carte géologique du BRGM.

#### *Fractures mesurées*

Une cartographie de fractures a été réalisée dans le secteur de Tournemire et plus particulièrement dans 7 sites. (Martin, 2015). Le site 1 qui se trouve sur le GR71, au sud des Fournials, le site 2 qui se situe dans la partie ouest du cirque de Tournemire, le site 3 qui est localisé dans la partie nord-est du cirque de Tournemire, le site 4 qui se trouve dans une carrière au-dessus du tunnel de Tournemire, le site 5 se trouve dans la vallée entre le village de Tournemire et le tunnel, le site 6 se situe dans le massif du Taulan (au sud de Roquefort-sur-Soulzon) et le site 7 est localisé au sud du village de Tournemire (Fig. 20).



**Figure 20 :** Localisation sur la carte géologique du BRGM au 25 000 des sites où les fractures ont été analysées dans le secteur de Tournemire. En orange est représentée l'orientation des fractures pour chaque site. Le code couleur vert, rouge et bleu représente le Bajocien inférieur, l'Aalénien et le Toarcien supérieur (Martin, 2015).



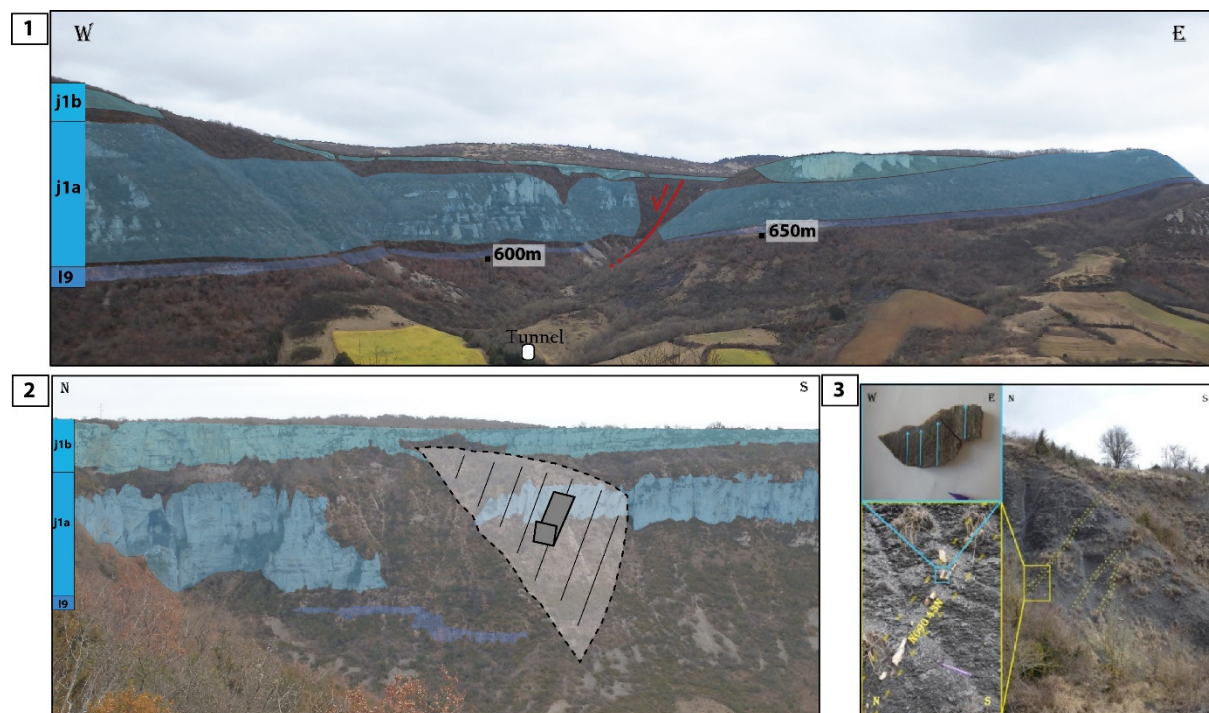
Au nord et à l'est du secteur de Tournemire, la fracturation est majoritairement N150° à N180° (sites 1, 2, 3, 4 et 5, Fig. 20). Au sud du secteur (sites 6 et 7, Fig. 20), la direction prédominante de la fracturation est N040° à N090°. Cependant le site 6 se trouve à proximité de la faille de St Jean d'Alcapiès de direction moyenne E-W. On constate que les formations du Bajocien inférieur sont principalement affectées par des fractures orientées N170° et N080°, celles de l'Aalénien sont principalement N160°, N070° et N020° et enfin pour les formations Toarciennes, on observe des fractures N-S, E-W, N070 et N110°. La famille de fractures constamment observée dans tous les niveaux stratigraphiques (Bajocien inférieur, Aalénien et Toarcien supérieur) est la famille N160° à N180° qui est parallèle aux zones de failles présentes dans le tunnel de Tournemire mais dont la direction ne correspond à aucun accident structural majeur présent dans le secteur.

### ***La faille de Tournemire***

En observant le tracé de la faille de Tournemire sur la carte géologique du BRGM au 25 000, nous constatons qu'il s'agit d'un accident de taille importante qui s'étend sur une dizaine de kilomètres avec un comportement rectiligne qui n'interagit pas ou très peu avec le relief (Fig. 19). En général, les failles qui n'interagissent pas avec le relief sont des failles verticales. Or, la faille de Tournemire ne correspond pas à un accident à très fort pendage. Sur le terrain, entre le massif du Combalou et de Taulan, nous avons pu constater que la faille montre un décalage entre les deux massifs d'une dizaine de mètres au maximum. Et que contrairement aux indications fournies par la carte du BRGM, la faille de Tournemire n'est pas visible sur le plateau du Larzac et aucun décalage n'est observé au niveau du cirque de Tournemire. Cependant, dans les calcaires sous-jacents du Bajocien inférieur, on observe d'importantes variations d'épaisseur latérale (Fig. 21-1 et 21-2).

En effet, au niveau de la terminaison nord-est du cirque de Tournemire, une importante épaisseur de Bajocien inférieur (80m) est observée alors qu'au niveau des bordures est et ouest, ce même banc n'excède pas les 40m d'épaisseur (Fig. 21-2). Ces variations brutales sont séparées, à l'est et à l'ouest par deux zones chaotiques. Les calcaires du Bajocien supérieur sont continus avec une épaisseur relativement constante, ce qui indique la présence de failles normales syn-sédimentaires, scellées par le Bajocien supérieur. Le même scénario est observé au niveau de l'entrée du tunnel de Tournemire (Fig. 21-1), où à l'ouest du vallon la série calcaire est massive (>150m) alors qu'à l'est, la même série est beaucoup moins épaisse (<100m). La différence d'altitude entre la base de l'Aalénien à l'ouest (altitude 600m, Fig. 21-1) et à l'est

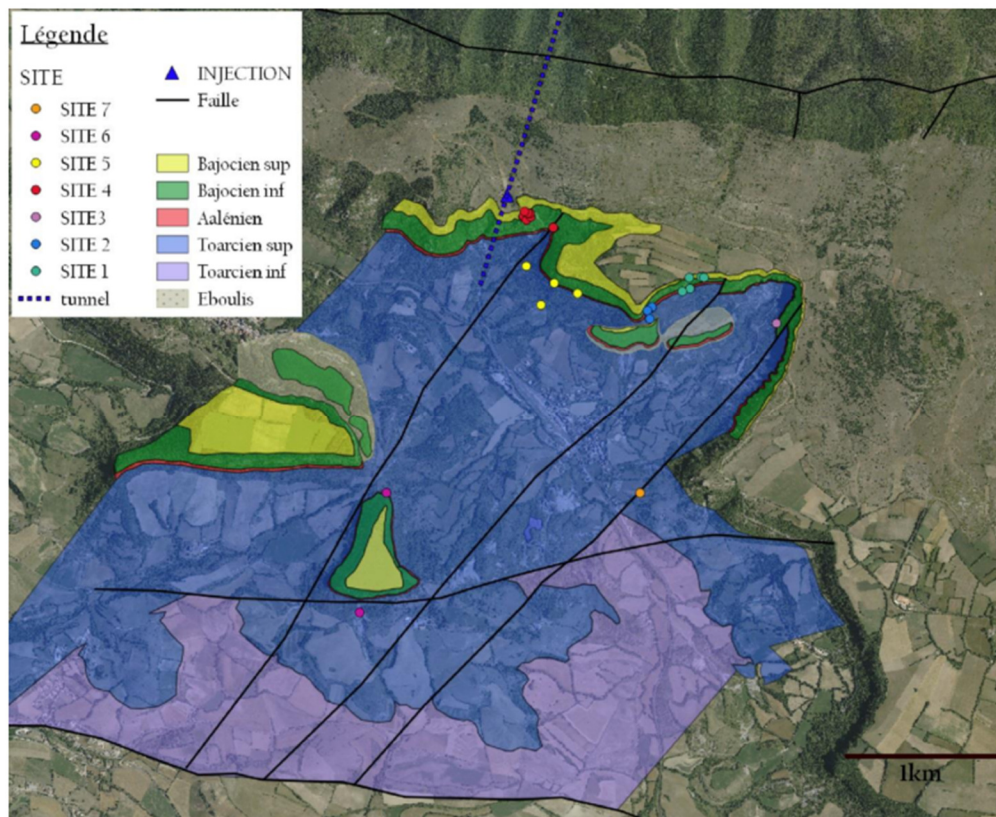
(altitude 650m, Fig.21-1) est de 50m. En considérant le pendage moyen de 5-10° vers le nord, on peut alors suggérer un rejet d'ordre décimétrique.



**Figure 21 :** 1- Faille normale syn-sédimentaire au niveau de l'entrée du tunnel de Tournemire (j9, j1a et j1b l'Aalénien, le Bajocien inférieur et le Bajocien inférieur, respectivement). 2- Faille normale syn-sédimentaire à l'est du cirque de Tournemire. 3- Faille calcifiée N090 50N dans les argiles Toarciennes dans le secteur du site 6 (Martin, 2015).

Une autre faille a été observée au sud du massif de Taulan; c'est une faille calcifiée dans le secteur 6 (Fig. 20) qui présente une orientation de N090E 50N 90 avec une cinématique normale pure (Fig. 21-3).

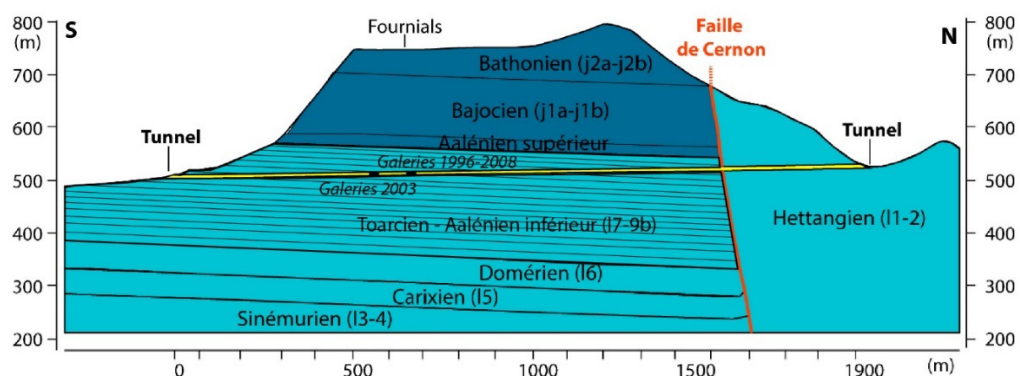
Ainsi on localise le passage de trois failles syn-sédimentaires d'orientation N-S à N040°, deux au niveau du cirque de Tournemire et une à proximité du tunnel de Tournemire. Elles ont été extrapolées en utilisant les données de topographie sur photo aérienne et se terminent sur la faille de St Jean d'Alcapiès, au sud et sur la faille de Cernon, au nord. Ces données permettent de proposer une nouvelle interprétation structurale du secteur de Tournemire (Fig. 22). Durant la période de compression Pyrénéenne (compression NE-SW à NW-SE), ces trois failles ont été réactivées en jeu inverse associé à la formation de plusieurs réseaux de fractures. Ce polyphasage induit une géométrie complexe de ces zones de failles.



**Figure 22 :** Carte géologique du secteur de Tournemire remplaçant la faille de Tournemire par un système de trois failles syn-sédimentaires (Martin, 2015).

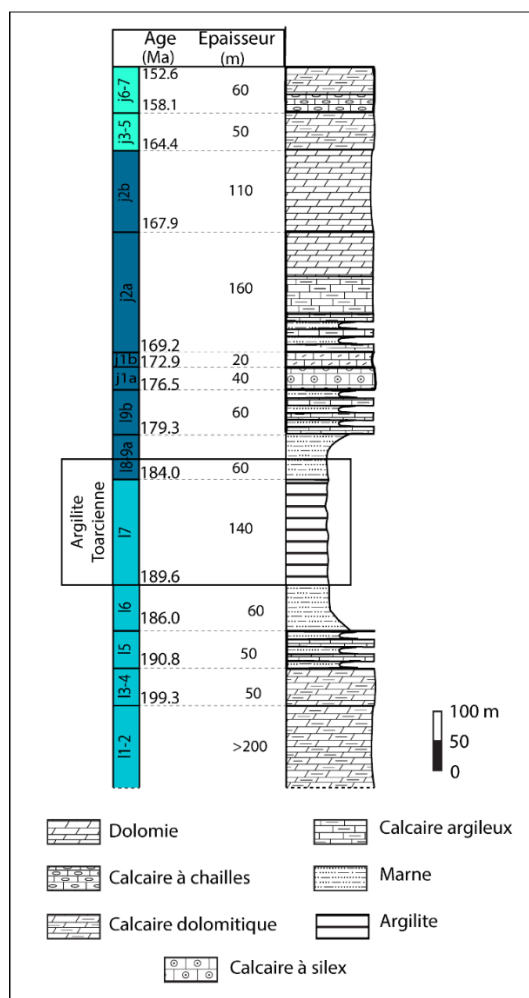
### 1.3.2.2 La station expérimentale de Tournemire

La station expérimentale de Tournemire (aussi appelée tunnel de la Boutinenque) a été acquise par l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) en 1992.



**Figure 23:** Coupe géologique du secteur de Tournemire suivant l'axe du Tunnel de l'IRSN (en jaune). La station expérimentale se situe au niveau des galeries 1996-2008 et 2003 notées par des rectangles noirs le long du tunnel ferroviaire.

Elle est localisée au sein d'un tunnel ferroviaire du XIX<sup>ème</sup> siècle qui passe sous l'extrémité occidentale du Causse du Larzac, en bordure Sud du Massif Central (Sud de l'Aveyron). Ce tunnel long de 1.89km, orienté N018° traverse depuis l'entrée Sud, ~1500m d'argilite Toarcienne, la faille de Cernon et ~390m de calcaires Hettangiens et permet ainsi, une facilité d'accès à une formation d'argilite dont la position structurale est relativement simple (Fig. 23).



**Figure 24:** Log stratigraphique du secteur de Tournemire. Sont représentés par: (l1-2), l'Héttangien; (l3-4), le Sinémurien; (l5), le Carixien; (l6), le Domérien, (l7), le Toarcien inférieur; (l8-9a), Le Toarcien supérieur à l'Aalénien inférieur; (l9b), l'Aalénien s supérieur; (j1a), le Bajocien inférieur; (j1b), le Bajocien supérieur; (j2a), le Bathonien inférieur; (j2b), le Bathonien supérieur; (j3-5), le Callovien à l'Oxfordien inférieur; (j6-7), l'Oxordien supérieur au Kimméridgien inférieur.

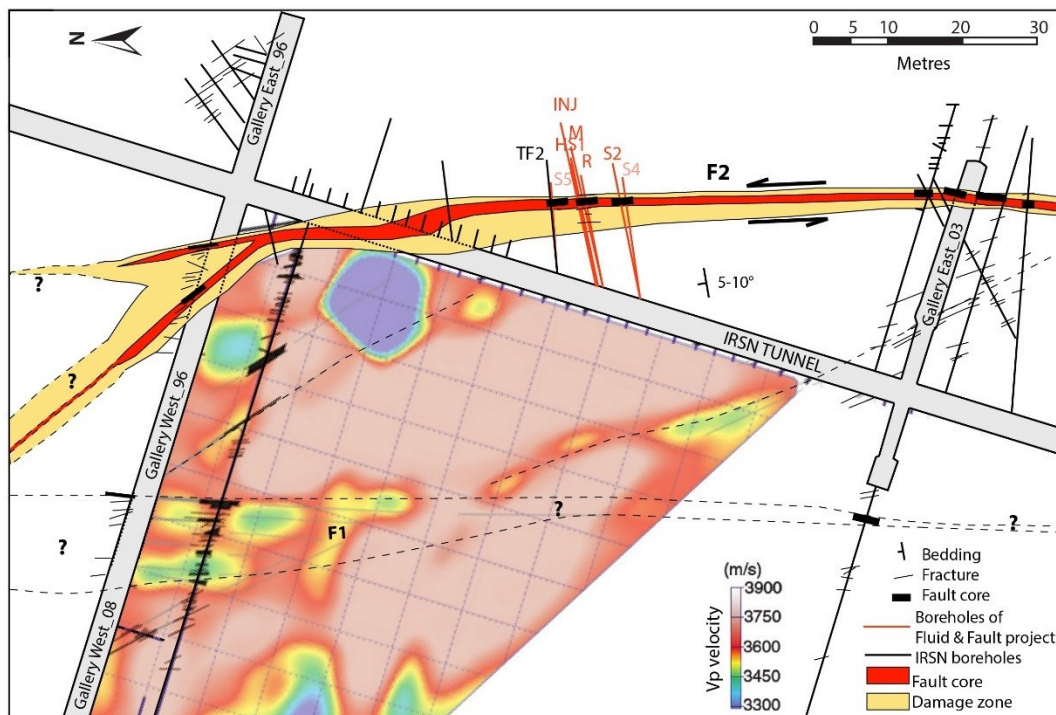
La station expérimentale de Tournemire représente un laboratoire idéal pour effectuer des recherches scientifiques et techniques sur le stockage en couche géologique profonde des déchets radioactifs. Elle comptabilise aujourd'hui six galeries élaborées en 1998, 2003 et 2006



représentants près de 285m et plus de 200 forages creusés depuis 1990, suivant différentes direction à partir du tunnel ou des galeries. La station expérimentale de Tournemire est l'un des quatre laboratoires de recherche souterrains en milieux argileux en Europe avec les laboratoires de Mol (Belgique), de Bure (France) et de Mont Terri (Suisse).

### 1.3.2.3 La fracturation au sein de la station expérimentale de Tournemire

La station expérimentale de Tournemire est traversée par deux zones de failles (F1 et F2) séparées par un domaine relativement peu déformé (Fig. 25). Les galeries et les nombreux forages de l'IRSN ont permis de reconstituer la géométrie de ces deux zones de failles. Elles ont une longueur supérieure à 100m, et sont caractérisées par un pendage et une direction relativement similaires qui varie spatialement entre N170 et N010° avec un pendage entre 60 et 80° W (Fig. 25). Ces deux failles présentent un mouvement décrochant senestre avec une composante inverse et montrent un rejet d'environ 4-5m (Dick et al., 2015).



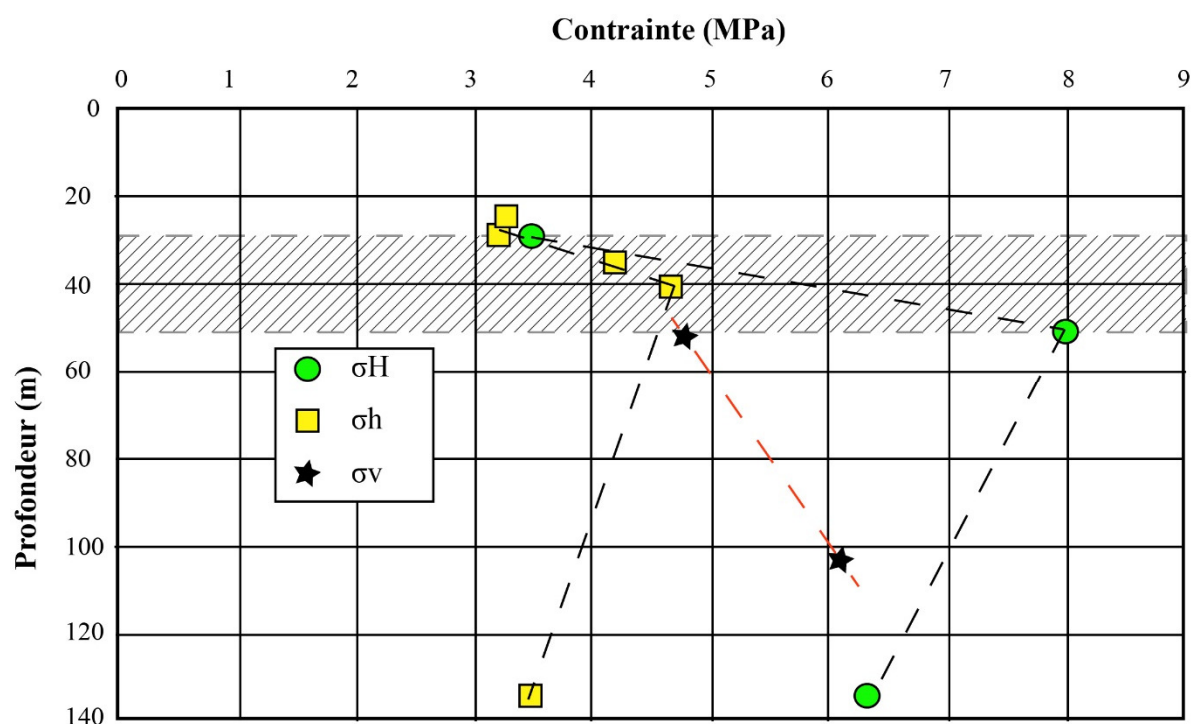
**Figure 25:** Présentation du tunnel de Tournemire (Vue du dessus) avec les différentes galeries/forages et carte des failles et des fractures rencontrées au sein du tunnel, avec en gris les failles secondaires, F1 et F2 les deux grandes zones de failles dont est la zone endommagée et la zone de cœur de faille sont représentées en orange et en rouge, respectivement. Cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014.

Deux domaines de déformation ont été définis en fonction des types de structures rencontrées et de l'intensité de la déformation. La zone endommagée (en orange, Fig. 25) est composée de discontinuités localisées de type failles secondaires, fractures et veines. La zone de cœur (en rouge, Fig. 25) présente de nombreuses structures telles que des plans de cisaillement, des zones de brèches et de la gouge. La frontière entre la zone endommagée et la zone de cœur représente le plan principal de cisaillement. L'épaisseur de la zone de failles (zone endommagée et zone de cœur) est très variable mais n'excède pas le 20m (Fig. 25). Seule la faille F2 présente une zone de cœur bien définie qui est elle aussi d'épaisseur variable. La zone endommagée de la faille F2 est par endroit (entre les galeries Est\_03 et West/East\_96) beaucoup plus développée dans le compartiment Ouest de la zone de failles (hanging wall).

En dehors de ces deux zones de failles, des structures plus petites, de dimension métrique à décamétrique ont été observées (en gris, Fig. 25). Leurs orientations varient entre N130 et N020° et leurs pendages sont très variables. Il est probable que les structures N130 à N150° pourrait connecter les deux grandes zones de faille, F1 et F2 (Bretaud et al., 2014).

#### **1.3.2.4 Etat de contrainte actuel au sein du Tunnel de Tournemire**

L'état de contrainte actuel au sein du Tunnel de Tournemire a été déterminé par une série de leak-off tests (Cornet, 2000). Ces séries de tests ont été effectuées principalement dans un forage vertical (appelé ID180), à des profondeurs comprises entre 24 et 135m. L'évolution des valeurs de contraintes principales en fonction de la profondeur est présentée dans la figure 26. Nous remarquons que l'évolution des contraintes principales horizontales ne présente pas une augmentation ou une diminution systématique avec la profondeur. Ceci est sûrement lié à des variations latérales attribuées à la présence d'hétérogénéités localisées entre 30-50m (zone hachurée, Fig. 26) de type réseaux de fractures à remplissage de calcite présents dans les informations de forage. Le gradient vertical de la composante verticale est de 0.026 MPa/m (Fig. 28b, Rejeb et al., 2003). Au voisinage du tunnel, la magnitude des contraintes est de  $4.0 \pm 2.0$  MPa pour  $\sigma_1$  qui est horizontale et orientée N162°±15°E, de  $3.8 \pm 0.4$  MPa pour la contrainte  $\sigma_2$  qui est inclinée de 7 à 8° par rapport à la verticale dans la direction N072° et de  $2.1 \pm 1.0$  MPa pour la contrainte  $\sigma_3$  qui est inclinée de 7 à 8° par rapport à horizontale dans la direction N072°. L'amplitude et l'inclinaison de la contrainte  $\sigma_2$  sont probablement affectées par les effets de la topographie du site de Tournemire. Cette orientation du tenseur des contraintes est relativement proche de celle du tenseur estimé lors du deuxième épisode compressif Pyrénéen (Constantin, 2002).



**Figure 26:** Evolution des contraintes principales en fonction de la profondeur, campagne de 1999. Modifié, d'après Rejeb et al., 2003.

### 1.3.2.5 Contexte hydrogéologique

Le secteur de Tournemire se caractérise par la couche d'argilite Toarcienne très peu perméable encadrée par un aquifère sommital composé de calcaires Aaléniens à Bajociens et un aquifère basal composé de calcaires Domériens à Sinémuriens. Les aquifères sont intensément karstifiés. Le réseau karstique est étroitement lié avec la fracturation héritée de l'histoire tectonique de la région. Des traçages artificiels ont mis en évidence un fort contrôle de l'organisation d'une grande partie du réseau karstique par la fracturation d'orientation N160°-N180° (Cabrera et al., 1999). Au niveau du tunnel de Tournemire une source permanente et des zones humides pluri-métriques sont observées au niveau de l'intersection entre la faille de Cernon et de la limite Nord du tunnel. La faille de Cernon serait une discontinuité majeure hydrauliquement active, drainant une partie de l'aquifère supérieur. Les argilites intactes sont considérées comme étant saturées à une distance d'un mètre des galeries (Matray et al., 2007). Les pressions mesurées dans les argilites sont influencées par le gradient de pression entre les aquifères supérieur et inférieur encadrant les argilites et par le drainage local aux parois des galeries. Loin de l'effet des galeries, les charges hydrauliques mesurées se répartissent plus ou moins linéairement entre

les calcaires de l'Aalénien (charge de l'ordre de 580mNGF dans l'aquifère supérieur) et les calcaires du Carixien (charge de l'ordre de 280mNGF dans l'aquifère inférieur). Cela donne une charge d'environ 550-570mNGF dans les argilites intactes (Patriarche, 2001). En effet, les forages traversant la zone de failles F2 ont permis de mettre en évidence des zones humides traduisant un drainage potentiel des argilites intactes par les failles (Cabrera et al., 1999). De plus, la zone de failles F2 pourrait connecter l'aquifère calcaire supérieur (Bathonien-Bajocien) sous la forme d'une importante zone fracturée (>10m), (Cabrera et al., 1999).

### **1.3.2.6 Propriétés des argilites Toarciennes de Tournemire**

#### **1.3.2.6.1 Composition minéralogique**

Les argilites du Toarcien Supérieur, traversées par le tunnel de Tournemire présentent une composition minéralogique relativement homogène (Tremosa et al., 2012). Elles contiennent 40 à 50% de phyllosilicates principalement composés de smectite, illite, kaolinite, chlorite et des micas, 10 à 20% de quartz, 10 à 30% de calcite, dolomie et sidérite en faible proportion ainsi que 4 à 8% de feldspaths principalement potassiques. En plus faible quantité, la matrice argileuse contient aussi des pyrites framboïdales et de la matière organique (Cabrera et al., 1999).

#### **1.3.2.6.2 Propriétés physiques et mécaniques**

Pour une meilleure lecture, les propriétés physiques et mécaniques des argilites de Tournemire ont été répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Des études récentes (dont notre campagne) ont révélé une porosité de la formation d'argilite un peu plus élevée que celle déterminée par Boisson et al., 2001 qui serait comprise entre 10 et 13% avec une teneur en eau comprise entre 4 et 6%. Soulignons ici la faible perméabilité de la formation d'argilite qui est estimée entre  $10^{-14}$  et  $10^{-15}$  m/s (soit entre  $10^{-21}$  et  $10^{-22}$  m<sup>2</sup>) en laboratoire, et entre  $10^{-11}$  et  $10^{-14}$  m/s (soit entre  $10^{-18}$  et  $10^{-21}$  m<sup>2</sup>) in situ (Cabrera et al., 1999).



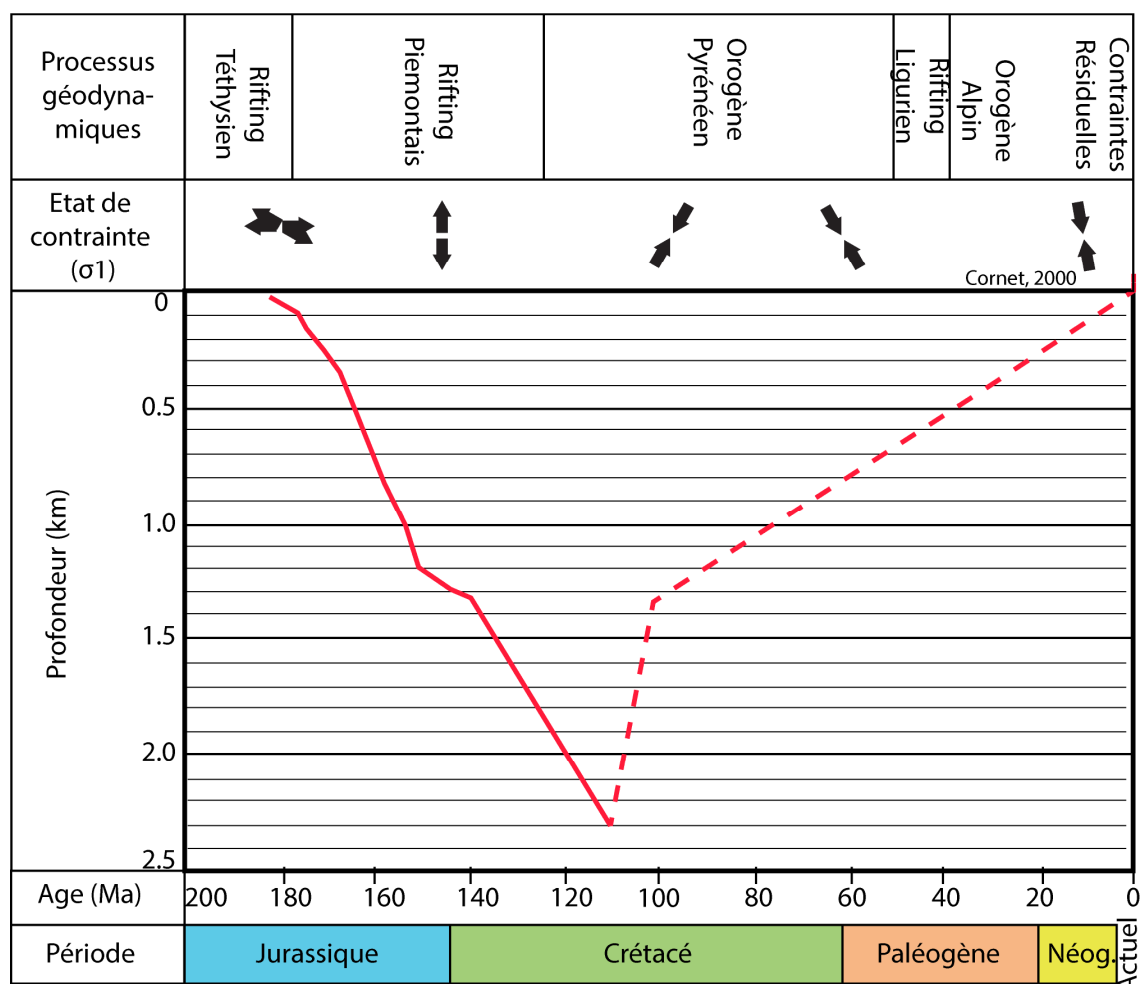
| Propriétés                                                                | Valeur                 |                     |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------|
|                                                                           | Min                    | Max                 |
| Teneur en eau <sup>a</sup> (wt%)                                          | 3                      | 5                   |
| Porosité <sup>a</sup> (wt%)                                               | 6                      | 9                   |
| Taille des pores <sup>b</sup> (nm)                                        | 2.5                    |                     |
| Densité <sup>e</sup> (kg/m <sup>3</sup> )                                 | $2.5 \times 10^3$      | $2.6 \times 10^3$   |
| Densité des grains <sup>g</sup> (kg/m <sup>3</sup> )                      | $2.7 \times 10^3$      |                     |
| Salinité de l'eau interstitielle <sup>b</sup> (mg/l)                      | $1.5 \times 10^3$      |                     |
| Viscosité de l'eau interstitielle <sup>c</sup> (Pa.s)                     | $1.005 \times 10^{-3}$ |                     |
| Pression interstitielle dans les pores <sup>g</sup> (MPa)                 | 0.2                    | 0.6                 |
| Coefficient de diffusion à l'eau tritiée <sup>a</sup> (m <sup>2</sup> /s) | $1 \times 10^{-12}$    | $2 \times 10^{-11}$ |
| Conductivité hydraulique <sup>f</sup> (m/s)                               | $1 \times 10^{-15}$    | $1 \times 10^{-14}$ |
| Perméabilité (laboratoire) <sup>d</sup> (m <sup>2</sup> )                 | $10^{-22}$             | $10^{-21}$          |
| Perméabilité (in situ) <sup>d</sup> (m <sup>2</sup> )                     | $10^{-22}$             | $10^{-19}$          |
| Capacité d'échange cationique <sup>e</sup> (meq/100g)                     | 9.5                    | 10.8                |
| Module de Young <sup>a</sup> (MPa)                                        | $9 \times 10^3$        | $1.5 \times 10^4$   |
| Coefficient de Poisson <sup>b</sup>                                       | 0.15                   | 0.25                |
| Module d'élasticité (MPa)                                                 | $4.3 \times 10^3$      | $1 \times 10^4$     |
| Module de cisaillement (MPa)                                              | $3.9 \times 10^3$      | $6 \times 10^3$     |
| Angle de frottement interne <sup>h</sup> (degré)                          | 20                     |                     |
| Cohésion <sup>h</sup> (MPa)                                               | 6.7                    | 10.8                |
| Résistance à la traction <sup>e</sup> (MPa)                               | 2                      | 10                  |
| Gradient géothermique <sup>f</sup> (°C/m)                                 | 0.052                  |                     |
| Champ de contrainte <sup>g</sup> (MPa)                                    | 4                      |                     |

Tableau 1: Propriétés physiques et mécaniques des argilites de Tournemire. D'après (<sup>a</sup>), Boisson et al., 2001; (<sup>b</sup>), Cabrera et al., 1999; (<sup>c</sup>), Davi et al., 2007; (<sup>d</sup>), Cabrera et al., 2001; (<sup>e</sup>), Cosenza et al., 2007; (<sup>f</sup>), Tremosa et al., 2012; (<sup>g</sup>), Rejeb et al., 2006 et (<sup>h</sup>) Ben Ouanas, 2010.

### 1.3.2.6.3 Enfouissement des argilites Toarciennes de Tournemire

Pour déterminer la profondeur d'enfouissement des argilites de Tournemire au cours de l'histoire géologique, Séranne, 2014 a reconstitué la courbe de subsidence des argilites Toarciennes. Celle-ci prend en compte des données de forage (plus précisément le forage appelé Nant, situé au Sud-Est du bassin des Causses). Séranne, (2014) ajoute 1000m de subsidence au cours du Néocomien en supposant qu'aujourd'hui toute cette épaisseur fut érodée lors de la surrection du bassin. En effet, les traces de fission évoquent un enfouissement d'ordre kilométrique survenu au cours du Crétacé Inférieur (Barbarand et al., 2001, Séranne et al., 2002; Peyaud et al., 2005) qui aurait été totalement érodé lors de la surrection du bassin. La courbe

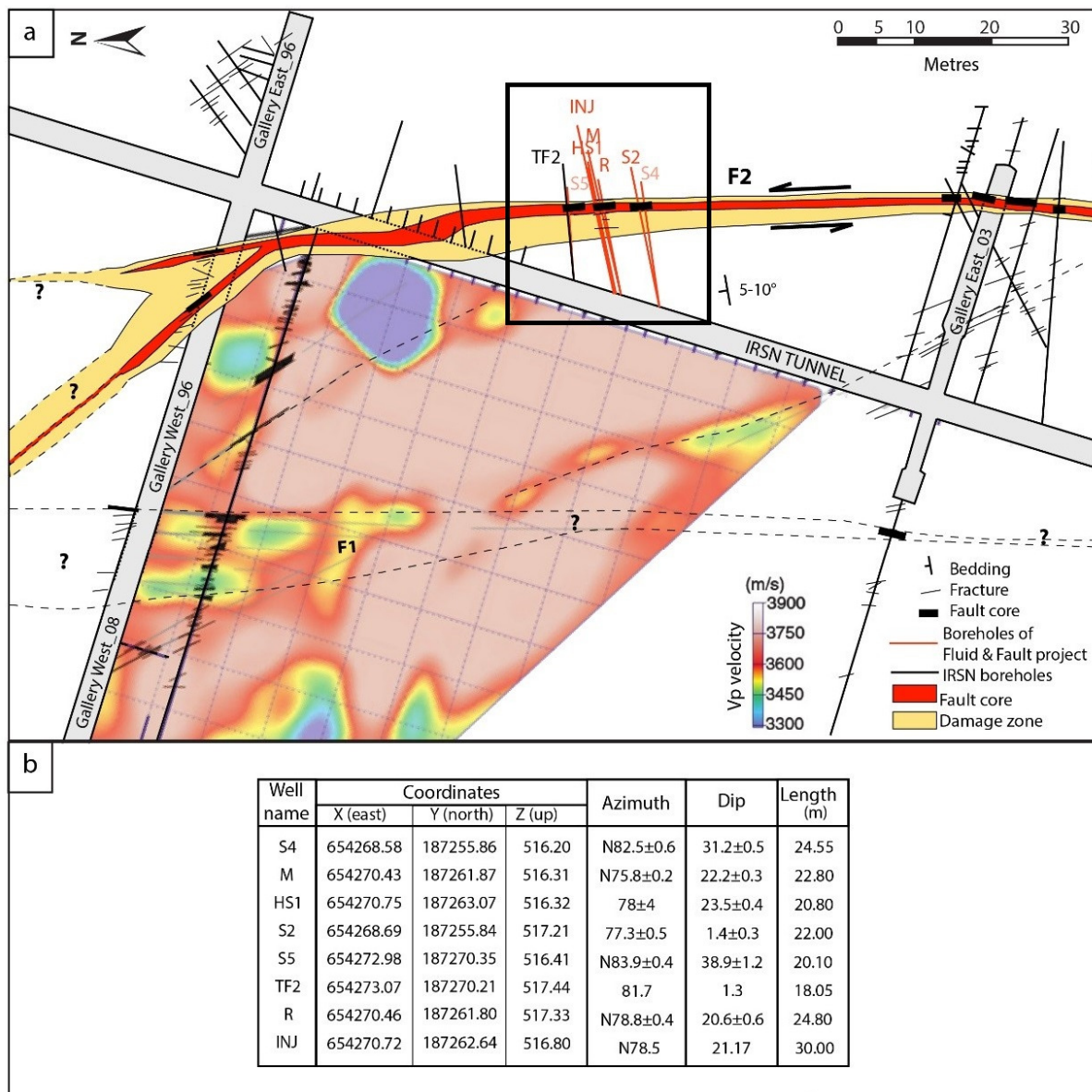
de subsidence (Fig. 27) montre une profondeur d'enfouissement maximum de 2.3 à 2.4km. Cette gamme de profondeur d'enfouissement des argilites de Tournemire correspond approximativement à des contraintes d'inhumation de l'ordre de 57 à 62MPa au début de l'inversion du bassin. En utilisant les macles de calcite constituant le remplissage de failles dans le secteur de Tournemire (1km<sup>2</sup> autour du Tunnel de Tournemire), Constantin et al. (2007) ont estimé le paléo-état de contrainte déviatorique ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) lors de l'inversion tectonique Pyrénéenne >40-50MPa. Ainsi une gamme de magnitudes des contraintes principales du tenseur de paléocontraintes peut être estimée avec une contrainte  $\sigma_1$  quasiment horizontale et supérieure à 70MPa, une contrainte  $\sigma_2$  quasiment verticale et d'environ 60MPa et une contrainte  $\sigma_3$  quasiment horizontale de l'ordre de 30 à 40MPa.



**Figure 27:** Courbe de Subsidence des argilites Toarciennes de Tournemire. (Figure modifiée d'après Séranne et al., 2014).

### 1.3.3 La zone d'étude « Fluides & Failles »

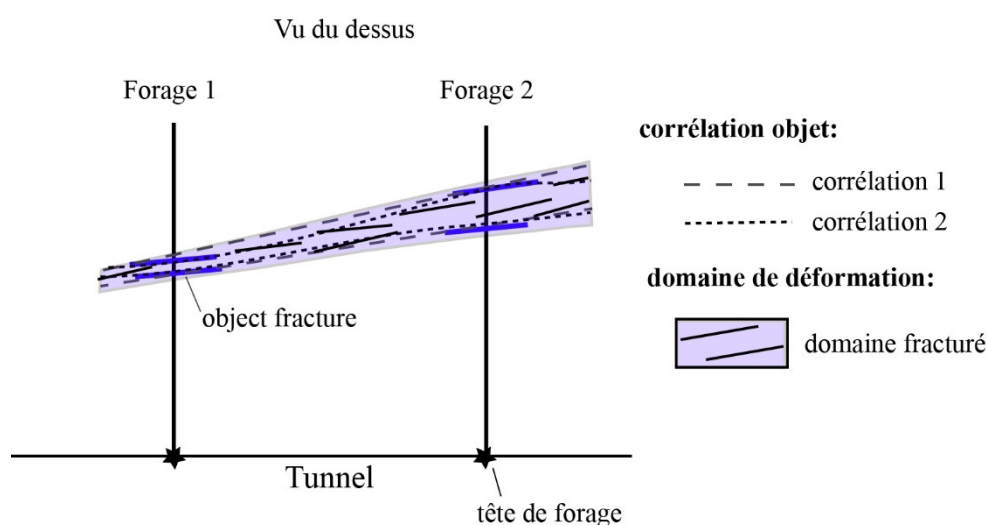
La zone d'étude se situe le long de la paroi Est du Tunnel URL, entre les galeries de 2003 et 1996. Elle comprend huit forages qui ont été forés de manière à traverser perpendiculairement et entièrement la zone de failles F2 (en rouge, Fig. 28). La longueur des forages varie entre 18 et 30m de long et ils sont orientés entre N076° et N084° avec une inclinaison comprise entre 01° et 38° (par rapport à l'horizontal). Leur diamètre est compris entre 92 et 146mm. La liste des caractéristiques des forages (X, Y, Z, azimuth, inclinaison et longueur) est représentée dans la figure 28-b.



**Figure 28:** a, Localisation de la zone d'étude, cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014. b, caractéristiques des forages. Le système de coordonnées utilisé est Lambert III.

Le cœur de faille est traversé entre 12 et 21m en fonction des forages (distance à partir de la tête de forage qui est situé sur la paroi Est du Tunnel principal). L'épaisseur du cœur de faille varie d'une dizaine de centimètres à plus d'un mètre. Parfois plusieurs zones de cœur de faille sont observées le long d'un même forage. Le plan principal de faille qui est caractérisé par l'interface entre la zone endommagée et le cœur de faille a une orientation moyenne de N173°; 62°W. La zone endommagée est principalement composée de fractures pour la plupart calcifiées et quelques failles. Le cœur de faille est associé à de la micro-fracturation et à la déstructuration des textures préexistantes du protolithe.

Il n'est pas toujours évident de définir précisément la localisation de la faille. En effet, il est rare de pouvoir faire des corrélations simples entre plans de faille, même en présence d'un nombre important de forages. Outre tenter la corrélation entre plans discontinus (en tant qu'objets), un autre moyen de caractériser cette zone de failles est de définir des faciès de déformation (en tant que domaines) qui sont eux corrélables sur de plus grandes dimensions (Fig. 29). Cette idée est développée dans le chapitre « Structure 3D de la zone de failles ».



**Figure 29:** Schéma qui présente deux forages horizontaux interceptant des objets de type fracture (traits bleus). Exemple de deux corrélations « objet à objet » (traits pointillés) et de l'interprétation en tant que domaine/faciès de déformation, ici définies en termes de faciès fracturé.

## **2 LES DIFFERENTES APPROCHES**

### **2.1 L'étendue des données**

Les données rassemblent un ensemble de mesures diagraphiques qui comprend les images optiques des parois de forage, le gamma spectral, profil d'induction ainsi que les carottes.

En plus des mesures diagraphiques, des mesures pétro-physiques ont été effectuées à partir d'un échantillonnage ponctuel au sein des carottes. En plus de cette zone d'étude, un échantillon a été prélevé dans la galerie Est, parois Nord, au niveau de la transition entre le cœur de faille et la zone endommagée.

#### **2.1.1 Les données structurales**

##### **2.1.1.1 Les carottes**

Les carottes mesurent 1m de long. Pour les forages S5, M, R, S4, S2 et HS1, le diamètre des carottes est de 53mm pour des forages de diamètre de 76mm. Pour le forage INJ, le diamètre des carottes est de 118mm pour un forage de diamètre 146mm. Les carottes sont orientées à l'aide d'une génératrice qui est tracée sur chaque carotte et qui représente le haut de la carotte. Cet axe est tracé en considérant les plans de stratification dans la position N005°-N010° dans la zone intacte. Dans la plupart des cas, une fois la génératrice tracée sur les premières carottes extraites, il suffit d'emboîter les carottes pour tracer la continuité. Cependant, une fois dans le cœur de faille, il n'est plus possible de tracer cette génératrice. Et une fois passé le cœur de faille qui est principalement composé de petits morceaux d'argile qui ont tourné dans la foreuse, il est difficile de retrouver la génératrice. Par convention, dès que l'on retrouve les plans de stratification, on réoriente de manière à ce que les plans de stratification soient N005°-N010°. Après échantillonnage, les carottes sont conservées hermétiquement dans des core-liners (tube en plexi-glace) afin d'éviter les effets de désaturation. Les descriptions des carottes ont été répertoriées dans des logs structuraux.

##### **2.1.1.2 Les CT-scans des carottes**

Le CT-scan est une méthode d'analyse non destructive par tomographie d'absorption des rayons X qui utilise un rayonnement électromagnétique qui va interagir avec la matière de l'échantillon et permet de reconstituer sa structure interne. L'ensemble des carottes de la zone endommagée et de la zone de cœur sont passées au CT-scan afin de caractériser au mieux la déformation et

les variations de CT (Computed Tomography) au sein d'une zone de failles. Le CT-scan utilisé est le modèle Discovery CT750 HD (GE Healthcare) et l'acquisition est dite axiale, c'est-à-dire que la carotte est couchée lors de l'acquisition des données. La résolution est d'une image tous les 0.625 mm, le courant est de 370 mA et la tension est de 140 KV. L'appareil a été calibré de manière à ce que l'air ait une valeur de CT de -1000 et que l'eau ait une valeur de CT de 0. La distribution des valeurs de CT est visualisée par une carte de niveaux de gris, où du noir au blanc sont balayées les valeurs de CT des plus faibles au plus fortes.

### **2.1.1.3 La diagraphie optique des parois de forage**

Les images diagraphiques des parois de forage ont été obtenues à l'aide d'un système de sonde OPTV (borehole OPTical TeleViewer probe). La sonde OPTV possède un magnétomètre 3 axes et une tête optique composée d'une caméra et d'un miroir conique. Le miroir conique permet de réfléchir la totalité de la surface de parois ainsi la tête optique permet d'obtenir une image continue et de haute résolution (1140 pixels/360°) des parois du forage. Le magnétomètre 3 axes permet lui d'obtenir la trajectométrie du forage. C'est-à-dire que chaque pixel est caractérisé par des coordonnées x, y et z. Les images de parois couplées à la trajectométrie du forage permettent d'obtenir une image diagraphique sous forme de déroulé orienté (360°) en vraies couleurs. La diagraphie optique est un excellent support à l'interprétation structurale.

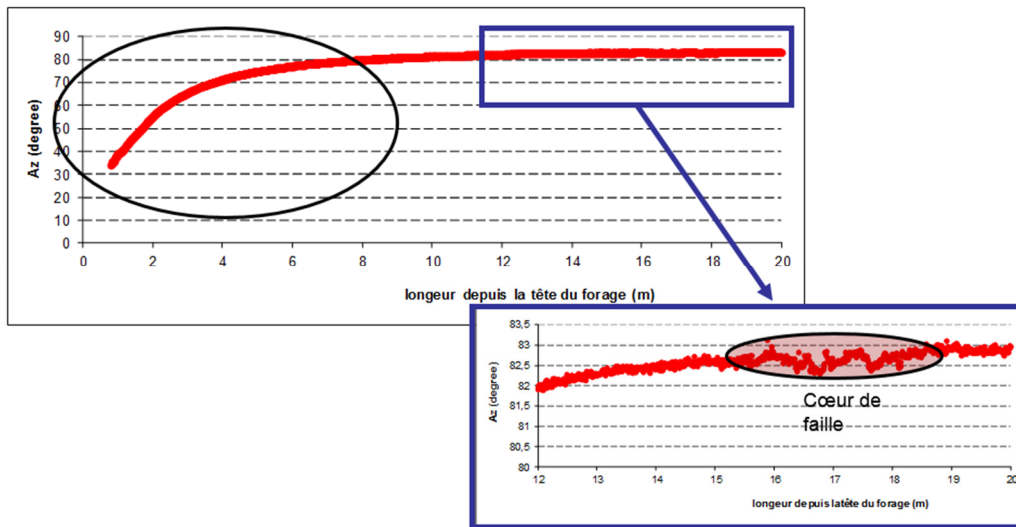
Une fiche technique de la sonde OPTV se trouve en annexe 1.

### **2.1.1.4 Les corrections de données liées à la diagraphie optique**

#### **2.1.1.4.1 Les perturbations magnétiques**

Des perturbations dans la trajectométrie ont été observées systématiquement pour tous les forages. Ces perturbations concernent uniquement l'azimut (et non l'inclinaison) et sont localisées dans les 7 à 9 premiers mètres à partir de la tête du forage (Fig. 30). Elles sont attribuées à la présence de la voie ferroviaire qui traverse le tunnel URL et elles ont été corrigées en extrapolant sur ces premiers mètres, une valeur moyenne calculée sur la trajectométrie des zones plus en profondeur non perturbées. Des variations d'azimut sont aussi observées au niveau du cœur de faille (Fig. 30). Ces variations sont sûrement liées aux petits fragments de roche nombreux dans le cœur de faille qui provoqueraient des obstacles, des rugosités lors de

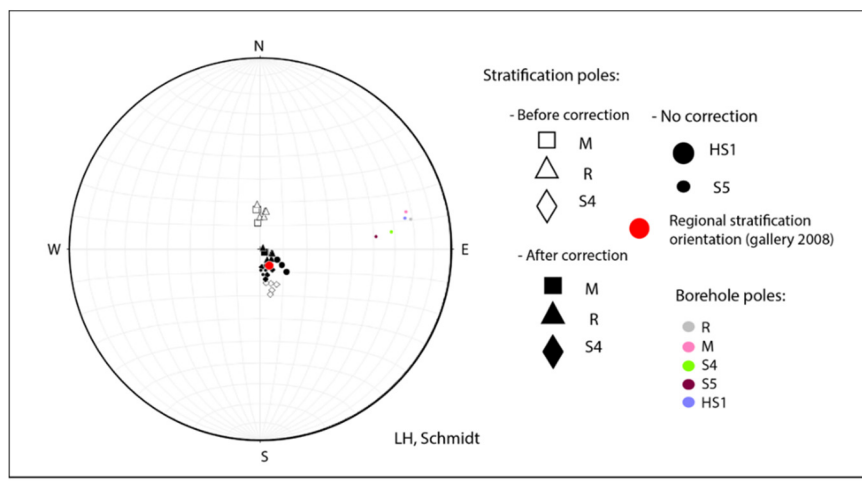
l'acquisition de la mesure. Une autre hypothèse est la présence de perturbations magnétiques dans le cœur de faille.



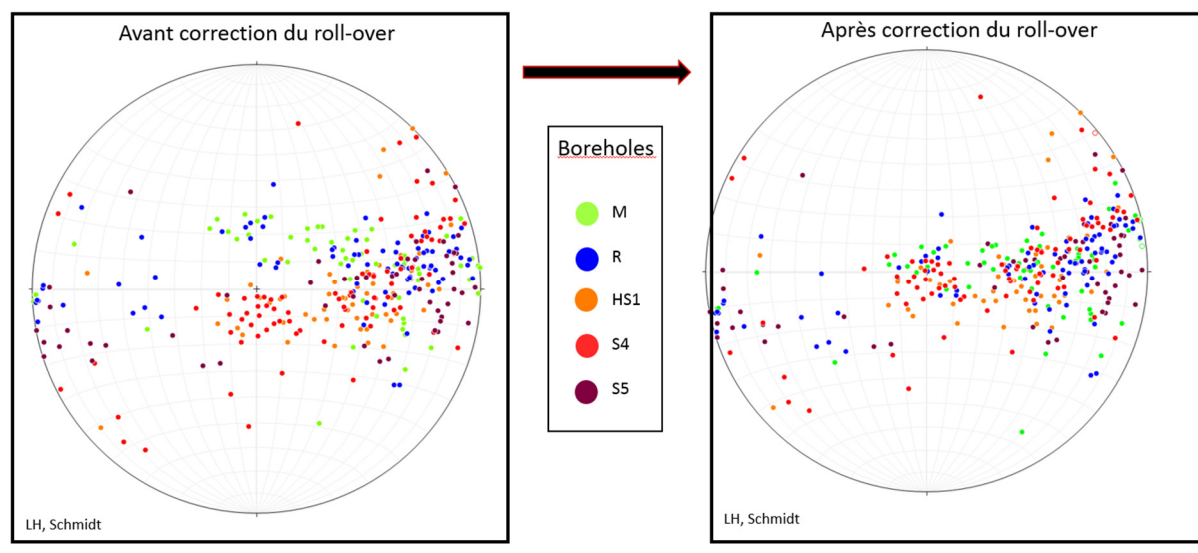
**Figure 30** : Exemple de perturbation d'azimut dans les 7-9 premiers mètres du forage (l'origine représente la tête du forage) et dans le cœur de faille.

#### 2.1.1.4.2 Le roll-over

Lors de l'acquisition des données de trajectométrie, la sonde peut tourner selon l'axe du forage. Cette rotation (roll-over) implique un artéfact dans la position des pixels de la diagraphie optique et donc dans le positionnement et la géométrie des structures observées. Afin d'identifier et de corriger ces biais, nous avons considéré un plan de stratification moyen constant pour l'ensemble des forages. La valeur considérée est celle mesurée dans la galerie 2008, à l'aide d'un niveau à nodules qui est de N049; 8-10°NW. Pour chaque forage, les plans de stratification ont été digitalisés puis en utilisant les données de trajectométrie, ils ont été projetés dans un stéréo afin d'obtenir l'orientation moyenne des plans de stratification. Or les plans de stratification moyens des forages M, R et S4 sont éloignés de la valeur de stratification moyenne considérée (Fig. 31). Pour déterminer la valeur du roll-over, on fait subir une rotation dans l'axe de ces forages jusqu'à ce que les plans de stratification des forages coïncident avec la stratification régionale. Les valeurs de roll-over sont de  $8^\circ \pm 2^\circ$  pour S4 et de  $-20 \pm 2$  pour M et R (le signe « + » correspond à une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Une fois ces rotations appliquées, l'ensemble des données d'orientation des structures rencontrées dans les forages est plus cohérent. (Fig. 32). Pour le forage S2, il n'a pas été possible d'établir le roll-over car ce forage est quasiment horizontal et ne recoupe pas les plans de stratification.



**Figure 31 :** Détermination et correction du roll-over en utilisant l'orientation des plans de stratification.



**Figure 32 :** Comparaison entre la projection des pôles des structures rencontrées dans chacun des forages (Schmidt, hémisphère inférieure) avant et après correction des roll-over.

## 2.1.2 Les données pétrophysiques

### 2.1.2.1 La conductivité/résistivité

Les mesures de conductivité du milieu sont obtenues à l'aide d'une sonde DIL38. La sonde DIL38 est composée d'une bobine émettrice (39.062 kHz) et de deux bobines réceptrices. Un courant alternatif est envoyé au sein de la bobine qui émet un premier champ électrique dans le milieu. Un champ secondaire est généré qui est proportionnel à la conductivité du milieu. Le champ électrique total est mesuré à l'aide des deux bobines réceptrices. Grâce au champ initial



et au champ total, le champ secondaire et déduit ainsi que la conductivité électrique du milieu. Dans le cas de la sonde DIL38, deux mesures de conductivité électrique sont acquises simultanément ; une proche et une lointaine. La mesure de conductivité électrique proche est obtenue avec un espacement de 520mm entre l'émission et le récepteur (rayon d'investigation). La mesure de conductivité électrique lointaine est obtenue avec un rayon d'investigation de 845mm.

Une fiche technique de la sonde DIL38 se trouve en annexe 2.

### 2.1.2.2 Les mesures porosité/saturation sur échantillons

Pour chaque échantillon, la teneur en eau gravimétrique ( $WC_{dry,150^{\circ}C}$ ), le volume d'humidité ( $\theta$ ), la porosité totale ( $n_{tot}$ ) et le degré de saturation ( $S$ ) ont été déterminées (Matray et al., 2007; Lavielle et al, 2012). L'obtention de ces paramètres demande la connaissance de la masse totale de l'échantillon humide ( $M_{tot}$ ), la masse de l'échantillon après séchage ( $M_{150^{\circ}C}$ ), le volume total de l'échantillon ( $V_{tot}$ ) et un nombre additionnel de paramètres. La méthode utilisée est décrite dans Matray et al, 2007 qui consiste à déterminer les poids des échantillons volumétriques immédiatement après l'extraction (humide) et après séchage à  $150^{\circ}C$  (à sec). En détail :

- $V_{tot}$  ( $cm^3$ ) est déterminé avec la technique de Monnier et al., (1973), qui utilise le principe d'Archimède dans le kerdane (un dérivé de pétrole)
- $n_{tot}$  (sans dimension) représente le ratio du volume de pores sur le volume total apparent de l'échantillon ( $n_{tot} = V_{pores} / V_{tot}$  avec  $V_{pores} = V_{tot} - V_{solids} = V_{tot} - M_{150^{\circ}C} / \rho_{s150^{\circ}C}$  où  $\rho_{s150^{\circ}C}$  la densité de grain calculée à  $150^{\circ}C$ ).
- $S$  (sans dimension) représente la proportion de l'espace vide occupé par l'eau ( $S = V_w / V_{pores}$  avec  $V_w = (M_{tot} - M_{150^{\circ}C}) / \rho_w$  où  $\rho_{s150^{\circ}C}$  la densité de grain calculée à  $150^{\circ}C$ ).
- $\theta$  (sans dimension) est fonction du degré de saturation et de la porosité totale ( $\theta = S \times n_{tot}$ ).
- $WC_{dry,150^{\circ}C}$  (sans dimension) représente le rapport d'eau dans la masse ( $WC_{dry,150^{\circ}C} = 100 \times (M_w / M_{150^{\circ}C})$ , avec  $M_w = M_{tot} - M_{150^{\circ}C}$ , où  $M_{tot}$  est la masse totale de l'échantillon non-déshydraté, après extraction et  $M_{150^{\circ}C}$  est la masse de l'échantillon après un passage de 2-3 jours dans une étuve à  $T=150^{\circ}C$ , jusqu'à stabilisation de la masse).

Les masses ont été déterminées en utilisant une balance OHAUS (Aventurier AR3130). Le volume apparent total a été obtenu en utilisant un kit de mesure de densité 01 Sartorius YDK. La densité de grain a été déterminée en utilisant un Micromeritics AccuPyc II 1340 100 CC (pycnométrie à l'He). La densité de l'eau est obtenue en utilisant la composition chimique de l'eau en équilibre avec le protolithe.

## **2.1.3 Les données chimiques**

### **2.1.3.1 La spectrométrie gamma spectral**

L'analyse du rayonnement gamma naturel est effectuée à l'aide d'une sonde GRS. Elle est composée exclusivement d'un détecteur gamma naturel qui acquiert le spectre d'énergie du rayonnement gamma de la formation avec une résolution de 10cm. En décomposant ce spectre, les teneurs en Uranium (U), Thorium (Th) et Potassium (K) sont déterminées.

Une fiche technique de la sonde GRS se trouve en annexe 3.

## **2.1.4 L'échantillonnage**

### **2.1.4.1 Sur carottes**

Après la description systématique des carottes, quatre types d'échantillon sont prélevés: (figures 33 et 34). Tous les échantillons ont été sciés à secs immédiatement après la sortie du carottier.

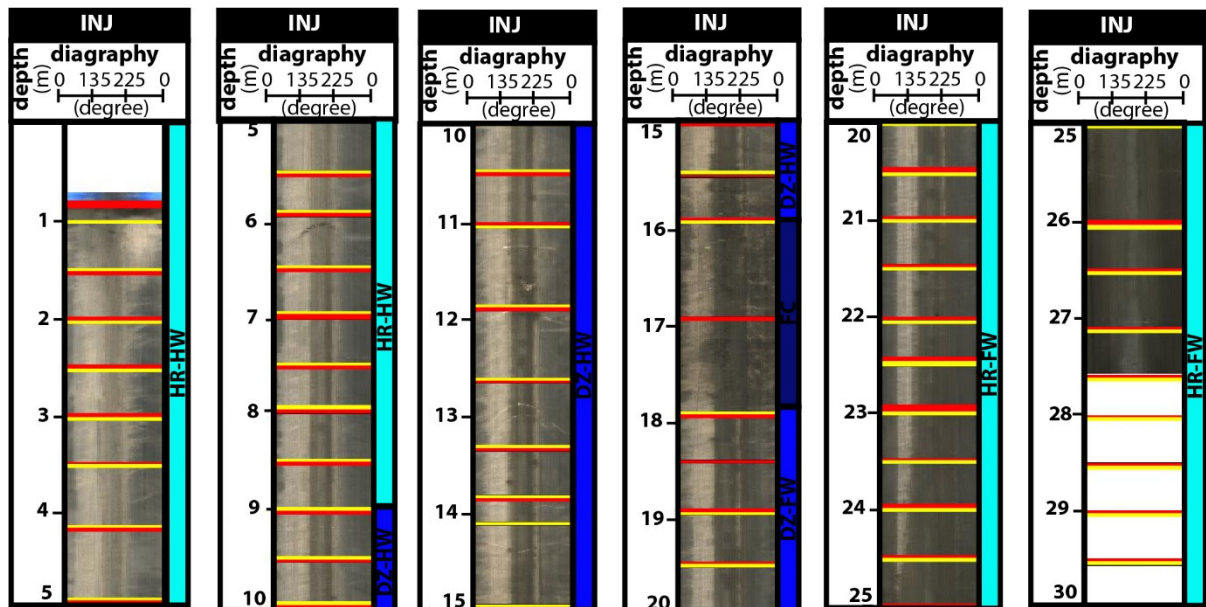
- Les CLU(*CLUster*) représentent des sections moyennes de 5cm. Chaque section a été divisée en trois sous-échantillons, compris entre 10 et 30g de masse. Les CLU sont pris au centre de la section d'éviter des perturbations liées à la rotation de la foreuse lors de l'élaboration du forage. On compte entre 100 et 130 échantillons prélevés par forage. Ces échantillons comprennent des mesures de densité, de porosité, de saturation, de composition élémentaire de la roche totale par fusion alcaline et ICP optique, minéralogie de la roche totale et des argiles par diffraction X et capacité d'échange cationique.
- Les PET (*PETrophysiques*) représentent des sections moyennes de 15cm. Ces échantillons ont été utilisés pour des mesures pétrophysiques (Vp, BET).
- Les CON (CONductivité): représentent des sections moyennes de 3cm. Ils concernent les mesures à deux électrodes avec un analyseur de composants (marque Wayne-Kerr)

à 40 kHz. Le couplage entre les électrodes et l'échantillon est assuré avec des filtres imbibés d'une solution en équilibre avec la formation (Tremosa et al., 2012).

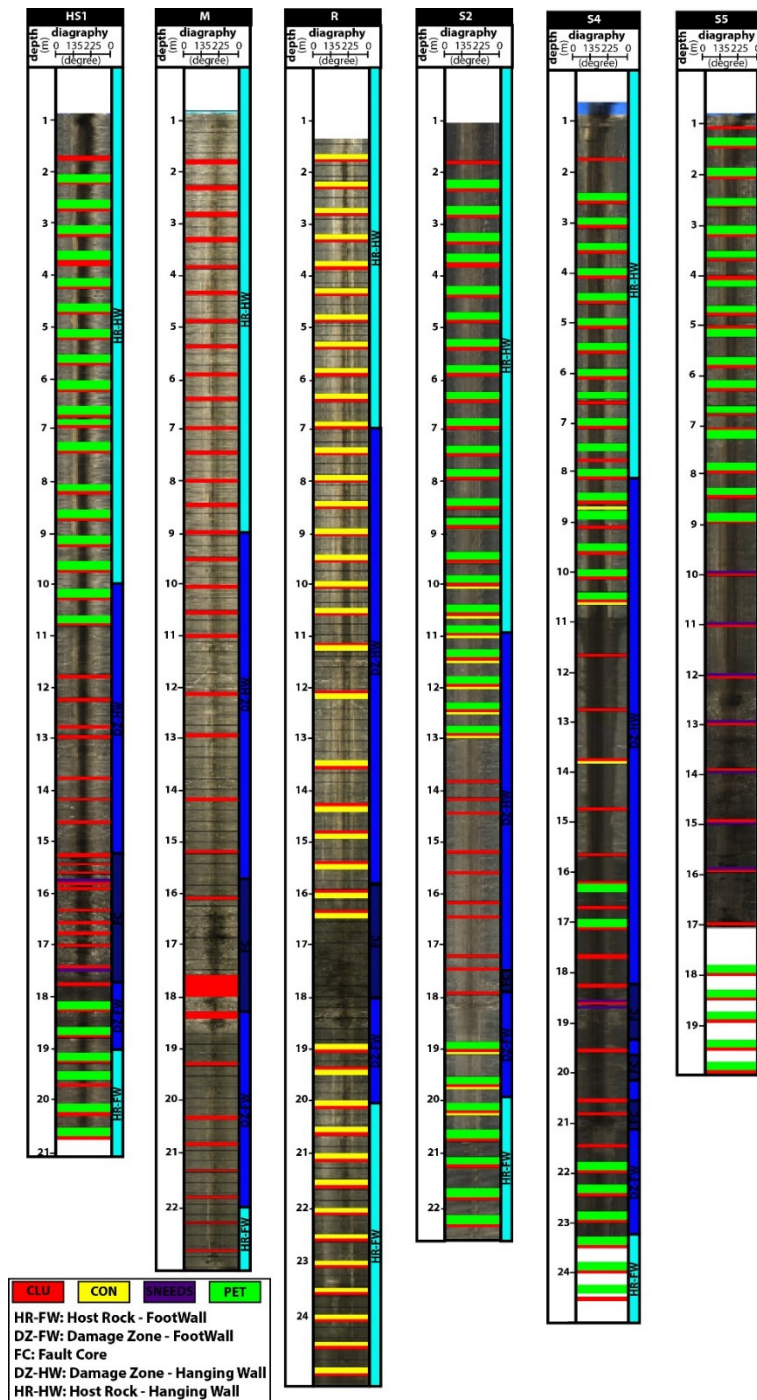
- Les SNEEDS (NEEDS sur la PétroFabrique de l'Argilite de Tournemire (PFAT)) Ils représentent des sections moyennes de 2-3cm qui sont localisés dans le cœur de faille. Ces échantillons sont étudiés par microscopie électronique avec reconstruction du volume FIB. La minéralogie magnétique a aussi été étudiée sur ces échantillons.

Les prélèvements ne sont pas toujours systématiques et certains prélèvements supplémentaires ont été effectués après acquisition des différentes mesures (porosité, degré de saturation ...) pour compléter des tendances ou des lacunes. De cette manière, nous observons l'évolution de ces paramètres le long de la zone de failles.

Le plan d'échantillonnage est présenté dans les figures 33 et 34.



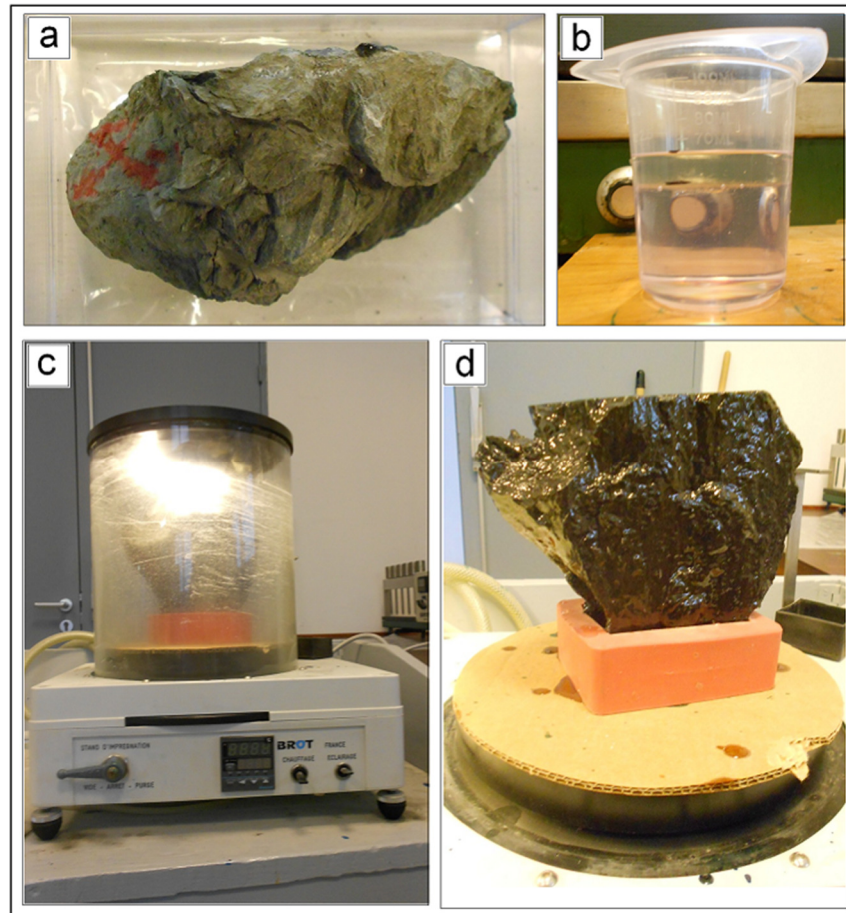
**Figure 33 :** Plan d'échantillonnage des échantillons CLU/CON le long du forage INJ représentés en rouge et jaune, respectivement. Les domaines de déformation ; HR ; roche intacte (FW) compartiment footwall, (HW); compartiment hanging wall, DZ; zone endommagée, (FW) compartiment footwall, (HW) compartiment hanging wall et FC ; fault core sont représentés en bleu clair, bleu moyen et bleu foncée, respectivement.



**Figure 34 :** Plan d'échantillonnage des échantillons CLU/CON/SNEEDS/PET le long des différents forages HS1, M, R, S2, S4 et S5, représentés en rouge, jaune, violet et vert, respectivement. Les domaines de déformation ; HR ; roche intacte (FW) compartiment footwall, (HW) ; compartiment hanging wall, DZ ; zone endommagée, (FW) compartiment footwall, (HW) compartiment hanging wall et FC ; fault core sont représentés en bleu clair, bleu moyen et bleu foncée, respectivement.

#### 2.1.4.2 Echantillon de la galerie 2003

Trois échantillons ont été prélevés dans la galerie 2003 Est, paroi Nord. Le premier a été prélevé au niveau de la zone endommagée du compartiment Ouest de la zone de failles F2. Le deuxième au niveau du plan principal de faille F2, c'est-à-dire entre la zone endommagée compartiment Ouest (hanging wall). Le cœur de faille et le troisième échantillon a été prélevé dans le cœur de faille. Seul le deuxième échantillon comprenant le plan principal de faille a été étudié.



**Figure 35 :** Préparation de l'échantillon. a) Imprégnation de l'échantillon à la résine époxyde. b) résine époxyde composée d'araldite et de durcisseur (liquide jaune). c) Mise sous vide dans l'échantillon. d) Séchage pendant près de 72h.

Suite à son prélèvement, l'échantillon a été imprégné dans une résine époxyde transparente qui est composée d'araldite et d'un durcisseur. Une fois imprégné, l'échantillon est mis sous vide afin de faire remonter la résine dans l'ensemble des fractures ou fissures ouvertes au sein de l'échantillon. Le durcisseur permet la consolidation de la résine après 72h de séchage (Fig. 35).

Une fois l'échantillon consolidé et hermétique, il a été scié à sec selon deux faces perpendiculaires au plan de faille (face horizontale supérieure et face verticale Nord). Ses

dimensions sont alors de 12×8×8cm. L'échantillon est passé au CT-scan. L'échantillon a ensuite été coupé en treize cubes de 22×22×22mm. Trois de ces cubes ont été analysés à la  $\mu$ XRF. Les dix cubes restants ont permis de réaliser 8 lames minces dans la face horizontale supérieure et 2 lames minces dans la face verticale Nord, qui ont été analysées au microscope et à la cathodoluminescence.

Les résultats concernant cet échantillon sont publiés dans l'article intitulé ; « Paleo-fluid circulations during activity of a strike-slip fault in the Toarcian shales (Tournemire tunnel, Southern France) », (Chapitre 4).

## 2.2 Synthèse de données

### 2.2.1 Les fiches de puits

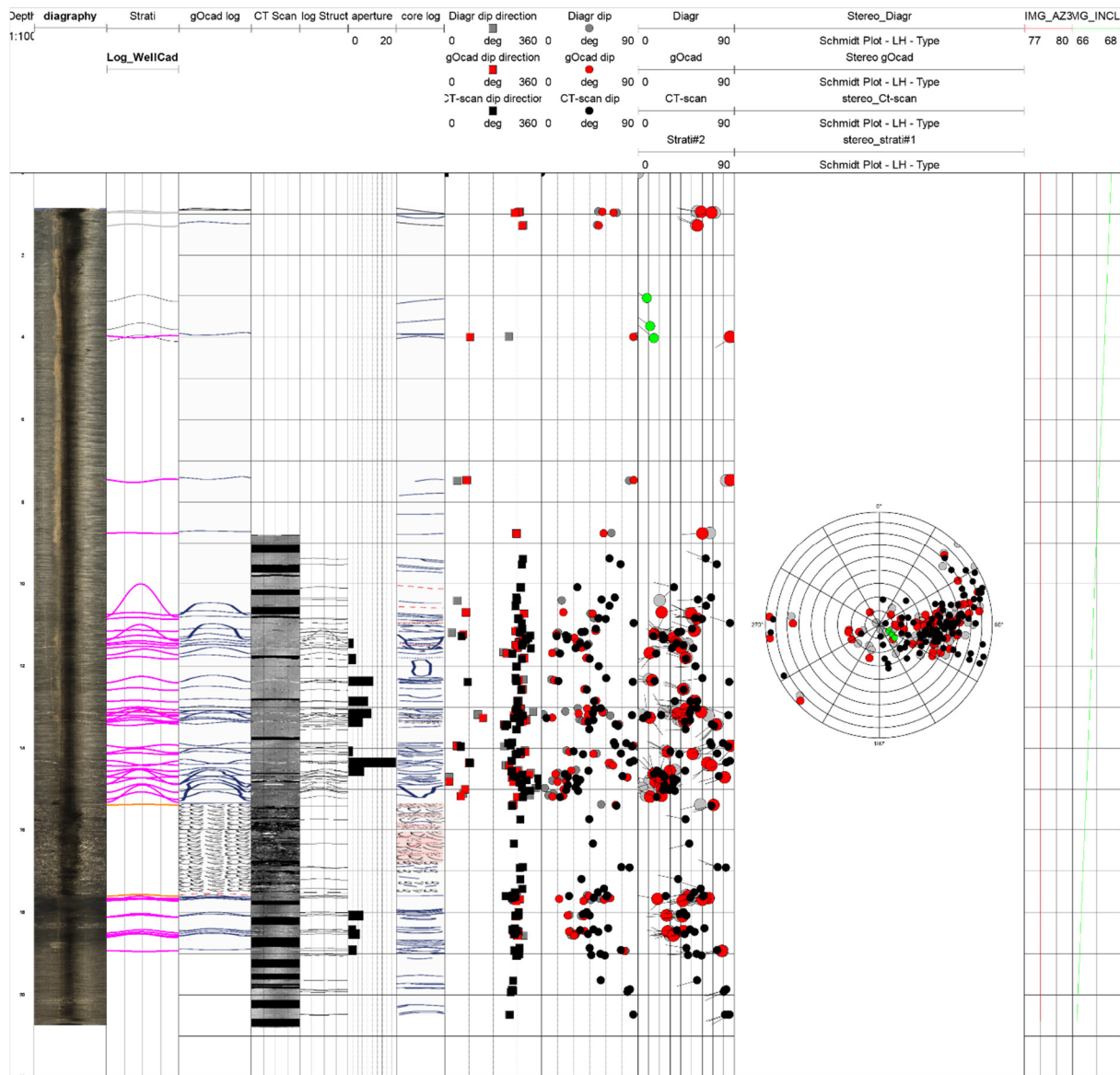
L'ensemble des données est répertorié dans des fiches de puits. Les fiches de puits sont créées à l'aide du logiciel WellCAD. Elles permettent de confronter clairement les différentes données entre elles le long d'un puits. Trois fiches de puits sont réalisées pour chaque forage; (i) une fiche de puits qui rassemble l'ensemble des données structurales, (ii) une fiche de puits qui rassemble l'ensemble des données pétro-physiques et (iii) une fiche de puits qui résume les principales données pétro-physiques et structurales.

- **Pour les fiches de puits structurales (Fig. 36)**; l'image diagraphique de la paroi de forage (*diagraphy*), du CT-scan des carottes (*CT scan*) et la trajectométrie corrigée du forage (*IMG\_AZ* et *ING\_INL* représentant l'azimut et l'inclinaison du forage en fonction de la profondeur, Fig. 36) sont chargées dans le logiciel de WellCad. Ainsi qu'une image représentant la description de carotte effectuée directement lors de l'élaboration du forage (*core log*). Sur ce log structural, un code couleur permet de caractériser les différents types de structures rencontrées (faille, fracture, cœur de faille...). La légende des logs structuraux est représentée dans la figure 37.

La fiche de puits structurale est basée sur l'analyse des images optiques des parois du forage et des déroulés CT-scans des carottes (Fig. 36). Les structures sont directement pointées dans le logiciel WellCad sur la diagraphie optique des parois du forage (*Log\_WellCad*) et sur le déroulé CT-scan des carottes (*Log\_Structral*). Les structures planaires visibles sur le déroulé de la diagraphie optique des parois de forage / CT-scan sont représentées par des sinusoïdes dont l'amplitude est une fonction de l'inclinaison et l'emplacement de l'amplitude maximale est fonction de la direction du plan. En associant les données de trajectométrie du forage, le diamètre du forage/carotte avec la forme de la sinusoïde, les orientations des structures sont

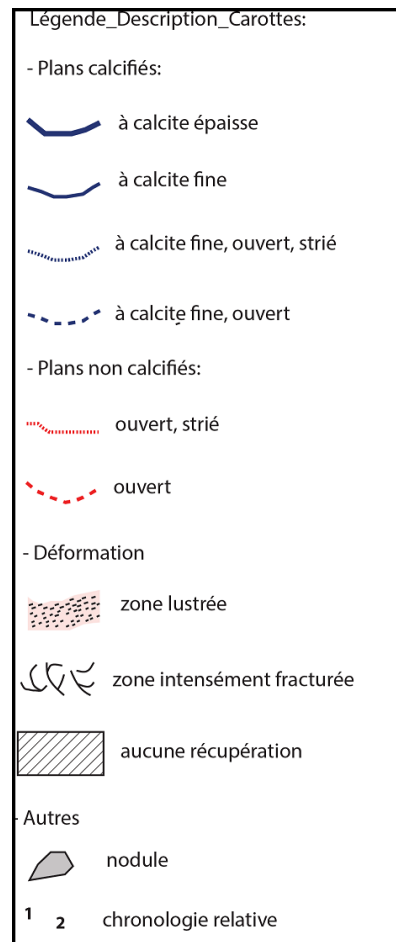
calculées. De la même manière, en fonction de l'épaisseur de la sinusoïde en cas de remplissage minéralisé et de la trajectométrie du forage, l'épaisseur réelle de minéralisation peut être calculée (*Aperture*). En parallèle un modèle 3D structural sous gOcad (présenté dans la § 2.2.2) est réalisé à partir de tracés des structures sur diagraphie optique (*gOcad log*). Donc pour une structure visible sur diagraphie optique, CT-scan et modélisée sous gOcad, trois mesures d'azimut et de pendage sont répertoriées. En rouge est représentée l'orientation déduite après modélisation 3D du plan sous gOcad, en gris, l'orientation basée sur le tracé sous WellCad sur diagraphie optique des parois du forage et en noir, l'orientation basée sur le tracé sous WellCad sur le CT-scan des carottes. Différentes représentations des orientations de structure sont disponibles sous WellCad; la représentation la plus utilisée dans les fiches de puits est sous forme de têtards où le corps du têtard représente le pendage et la queue représente la direction du plan. Cependant cette représentation n'est pas la plus performante pour observer les variations dans les azimuts des structures le long du puits. Les mesures de pendage et d'azimut le long du puits sont donc répertoriées dans des colonnes individuelles (*Diagr\_dip direction ; Diagr\_dip*). L'ensemble des orientations (totalité du forage) est représenté dans un stéréogramme de Schmidt, hémisphère inférieur (*Schmidt Plot*). Le code couleur est respecté dans l'ensemble des colonnes. En vert, sont représentées quelques valeurs de plans de stratification, afin de s'assurer que la trajectométrie corrigée a bien été prise en compte.





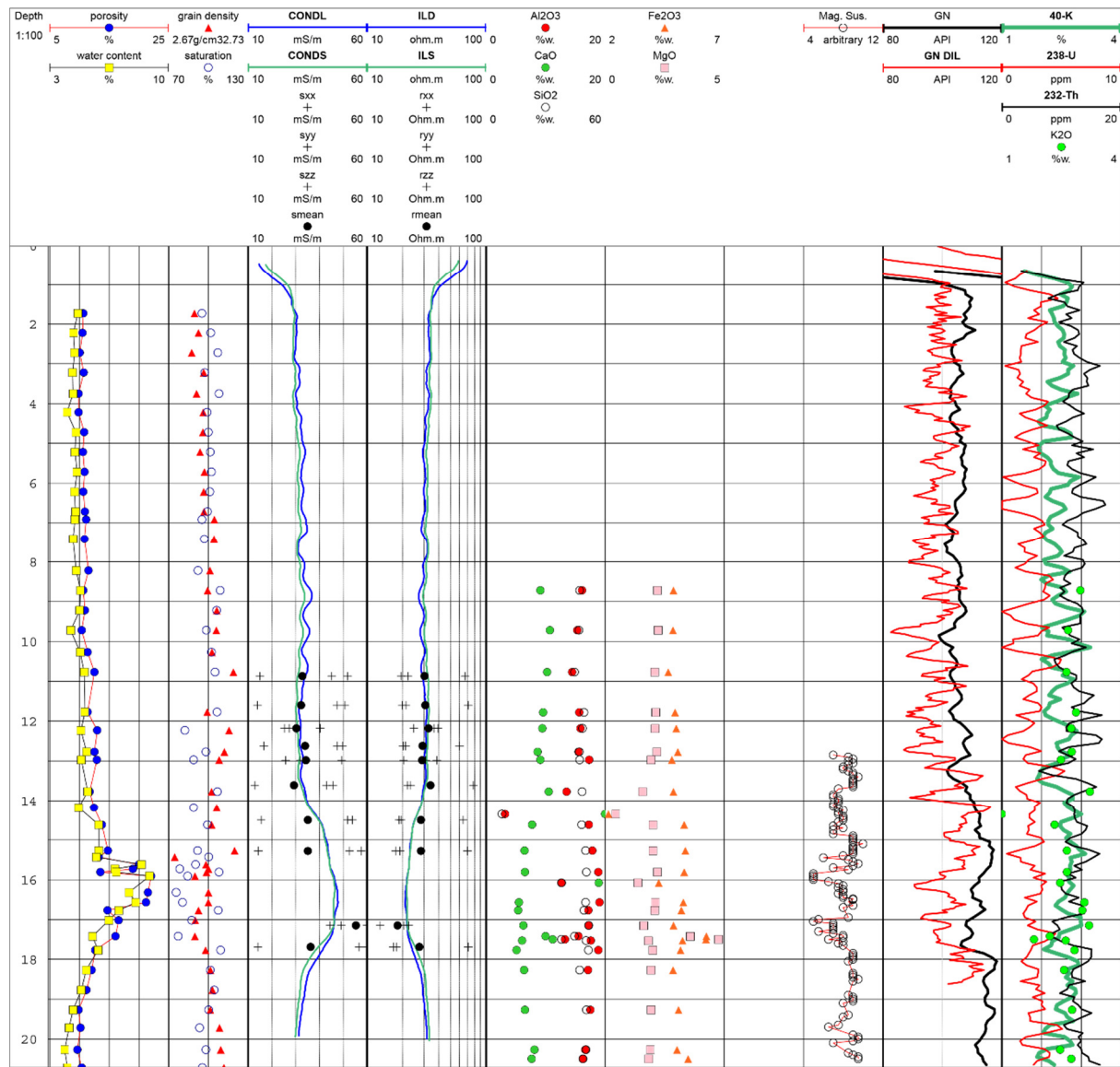
**Figure 36 :** Exemple de fiche de puits structurale avec de gauche à droite ; l'image optique des parois du forage (diagraphy). Les tracés des structures et de quelques plans de stratification WellCad sur diagraphie optique (Log\_WellCad, Strati). Les tracés des structures sur diagraphie provenant du logiciel gOcad (gOcad Log). Déroulé du CT-scan des carottes (CT-scan). Les tracés sur CT-scan (Log structural). L'épaisseur de minéralisation basée sur le CT-scan (aperture). L'image du log structural de la carotte (core log). Le Dip direction, pendage et tétard pour chaque structure, en rouge, gris, noir provient de la modélisation gOcad, du tracé WellCad diagraphie, du tracé WellCad CT-scan. La représentation des orientations sous stéréogramme Schmidt, hémisphère inférieure (Stereo plot) et les valeurs d'azimut et d'inclinaison corrigées du forage (IMG\_AZ et IMG\_INCL).





**Figure 37 :** Légende du log structural utilisée dans les fiches de puits structurales.

- **Pour les fiches de puits pétrophysiques (Fig. 38);** Les données issues des mesures diagraphiques ou de mesures sur échantillons sont chargées dans le logiciel WellCad (Fig. 38). Cette fiche de puits répertorie les mesures pétrophysiques sur échantillon, c'est-à-dire, la porosité (*porosity*) la teneur en eau (*water content*), la densité de grain (*grain density*), le degré de saturation (*saturation*), les teneurs en éléments chimiques ( $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$  et  $MgO$ ), la conductivité/résistivité dans trois directions et moyenne ( $sxx/rxx$ ,  $syy/ryy$ ,  $szz/rzz$  et  $smean/rmean$ ) et la susceptibilité magnétique (*Mag. Sus*). Sont ajoutées les mesures pétrophysiques par diagraphie en forage, c'est-à-dire les mesures de conductivité/résistivité proches et lointaines faite à partir de la sonde DIL38 (*CONDL/CONDS* et *ILD/ILS*), le gamma naturel (*GN*) et les teneurs en Uranium, Potassium et Thorium mesurées à partir de la sonde GRS (*40-K*, *238-U* et *232-Th*).

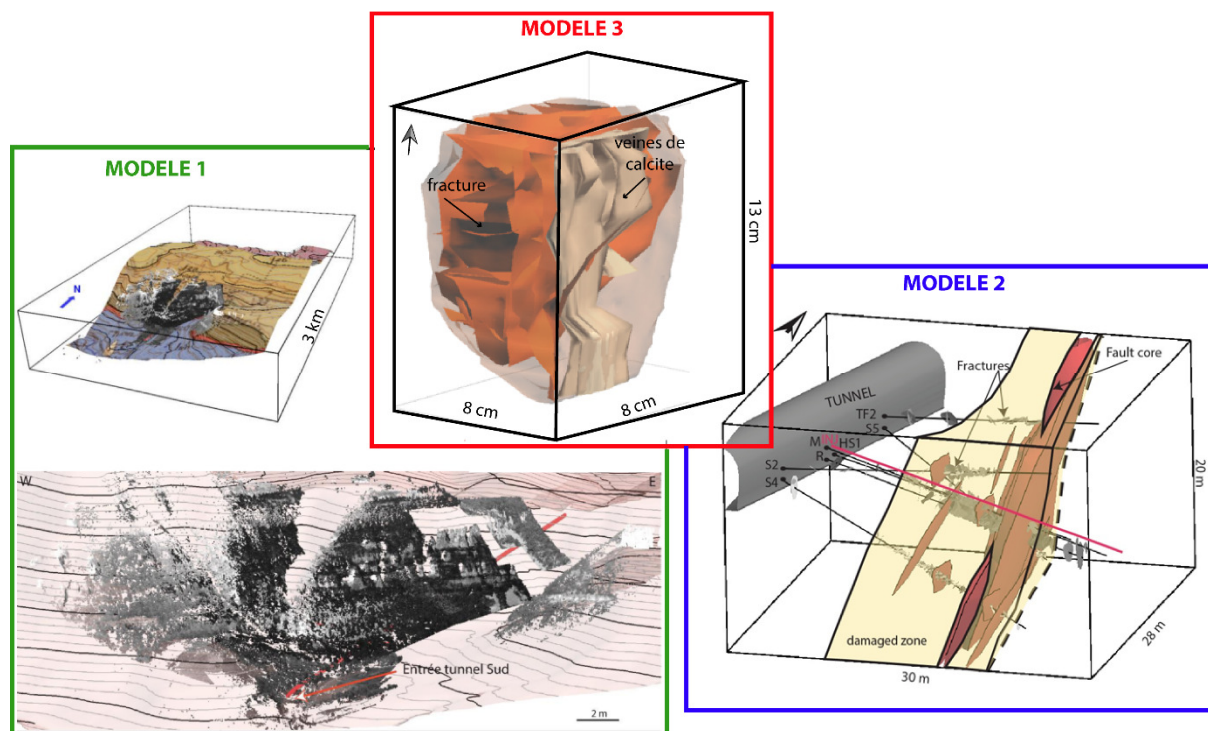


**Figure 38 :** Exemple de fiche de puits pétrophysique avec de gauche à droite ; la porosité et la teneur en eau (porosity, water content) mesurées sur échantillons. La densité de grain et le degré de saturation (grain density, saturation) mesurés sur échantillons. La conductivité mesurée sur échantillon (sxx, syy, szz et smean, dans la direction x, y, z et moyenne) et par la sonde DIL38 (CONDL, CONDS, long et court espacement, respectivement). Les teneurs en  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  et  $MgO$  mesurées sur échantillons. La valeur de susceptibilité magnétique sur échantillons (Mag. Sus.). Le Natural gamme (GN, GN DIL) et enfin les teneurs en Potassium, Uranium et Thorium mesurées à partir de la sonde GRS (40-K, 238-U et 232-Th) et les valeurs de  $K_2O$  sur échantillon ( $K_2O$ ).

L'ensemble des fiches de puits (structurales, pétrophysiques et résumés) sont disponibles en annexes (annexe 4 à 21).

## 2.2.2 La modélisation 3D

Trois modèles 3D principaux ont été construits à l'aide du logiciel gOcad. Ces trois modèles se focalisent sur trois échelles d'étude différentes. Le premier est à l'échelle du massif de Tournemire et du tunnel URL, le deuxième est à l'échelle du site d'expérience et le troisième modèle à l'échelle centimétrique qui représente l'échantillon de la galerie 2003 (Fig. 39).

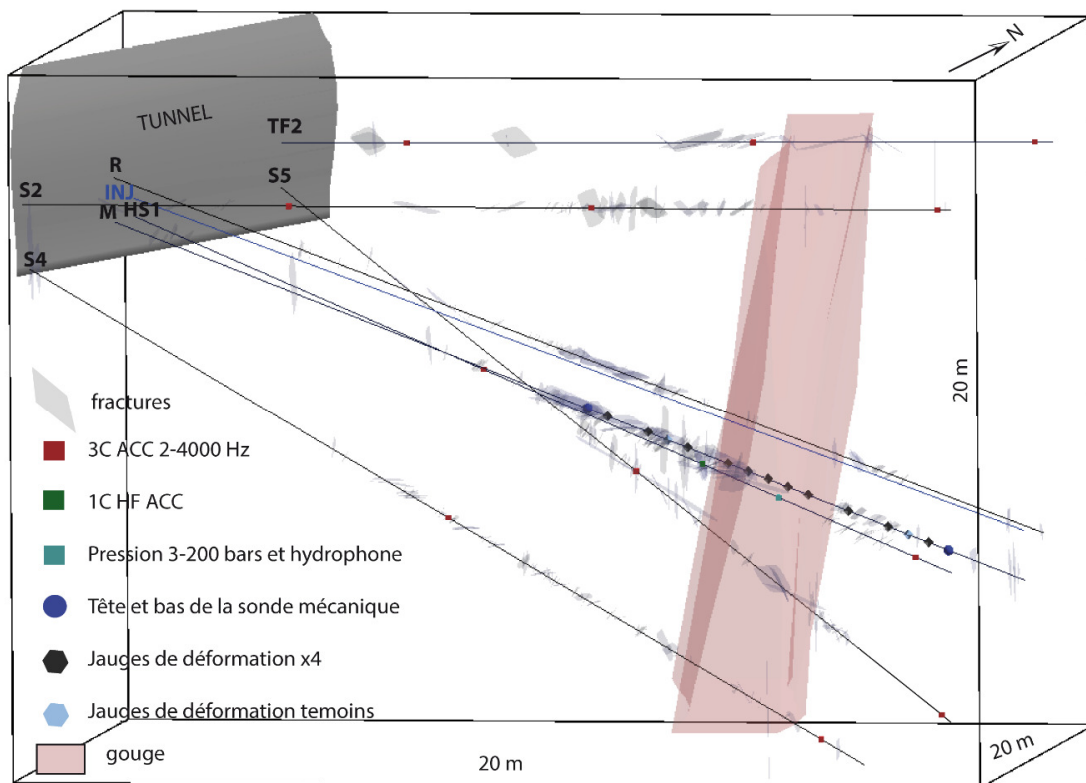


**Figure 39 :** Présentation des trois échelles modélisées. Le premier est à l'échelle du massif (kilométrique), le deuxième modèle est à l'échelle du site d'expérience (pluri-métrique) et le troisième à l'échelle d'un échantillon prélevé dans la galerie 2003 (centimétriques).

Le premier modèle est composé du plan du tunnel et des galeries, du MNT (1/50 000) et de la carte géologique de Millau (1/50 000) qui est projetée sur la topographie ainsi que les données LIDAR (LIDAR-ILRIS-HD, Optech).

Le deuxième modèle est à l'échelle du site d'expérience (~30×30×30m), il rassemble la position précise des forages et l'ensemble des données issues des mesures diagaphiques. Le but principal de ce modèle est la représentation structurale 3D de la zone de failles à partir des forages. Cette représentation 3D est primordiale pour comprendre l'agencement des structures dans l'espace. La construction des structures rencontrées dans les forages (fractures, failles, failles secondaires, failles principales, plans de stratification, délimitation du cœur de faille, de la zone endommagée...) se fait à partir des observations structurales sur les diagaphies optiques des parois de forage et sur les enveloppes du CT-scan des carottes. L'avantage des

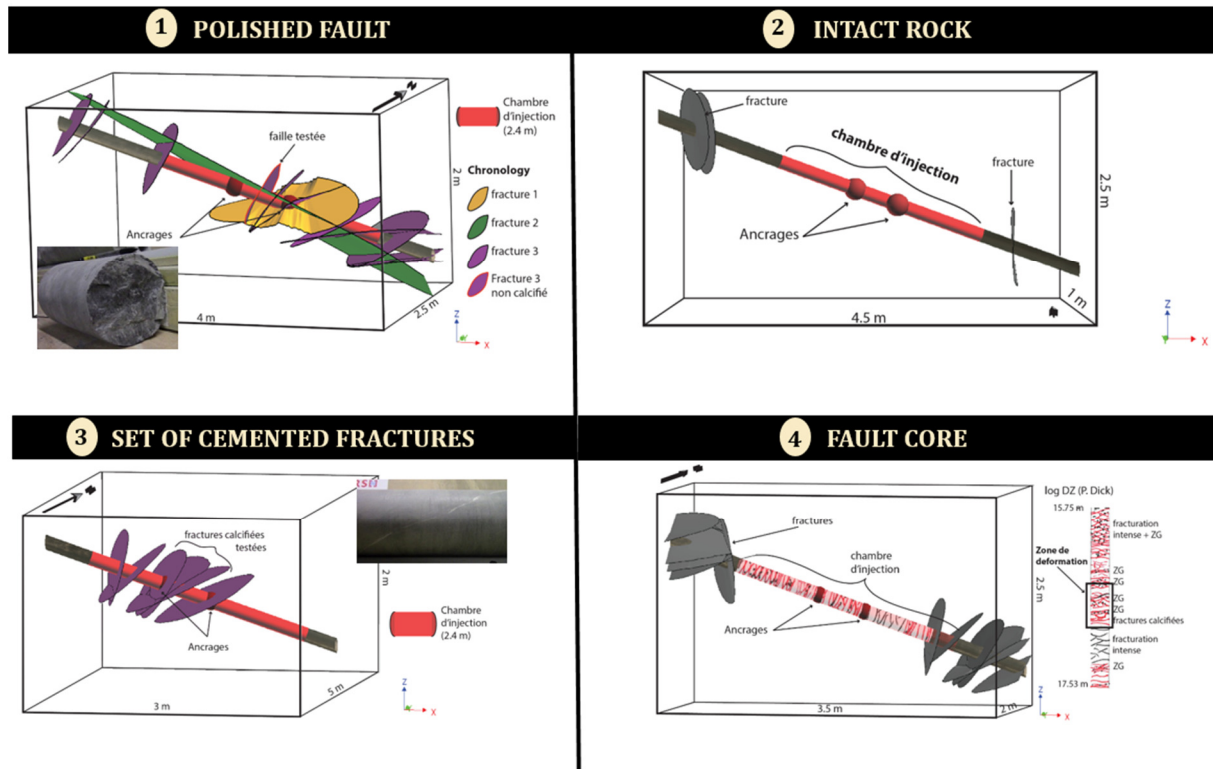
observations sur diagraphie optique est l'exactitude dans le positionnement et l'orientation des structures, cependant, la diagraphie optique ne permet pas d'observer les structures non minéralisées. En effet, les structures visibles sur diagraphie optique représentent des fines transitions brutales de couleur, souvent blanc due au remplissage principalement de calcite. Cette lacune est complétée avec les observations structurales de CT-scan qui permettent d'observer toutes les structures y compris les structures non calcifiées. Cependant, les carottes peuvent avoir subi une rotation dans les core-liners, où la génératrice n'a pu être suivie sur certaines carottes spécifiquement dans le cœur de faille, par exemple. Pour pallier à ce problème, les données issues du CT-scan sont calées sur les données issues de la diagraphie optique. La comparaison entre les structures observées sur diagraphie et CT-scan a montré que la majorité des fractures présentent un remplissage.



**Figure 40 :** Report en trois dimensions des différentes informations (fractures, cœur de faille schématique, capteurs sismiques, jauges de déformation...) en vue de réaliser un modèle intégré.

Les différentes structures sont alors digitalisées puis importées dans le logiciel gOcad avec le déroulé de l'image de diagraphie et la trajectométrie du forage donné. L'image diagraphique et le tracé des structures sont enroulés autour de l'axe (à partir de la trajectométrie) du forage en

respectant le diamètre du forage et l'orientation de la diagraphie. Une fois la diagraphie enroulée autour de l'axe, chaque tracé est interpolé suivant une surface triangulée qui fit au mieux le tracé de la structure. Ainsi chaque structure est représentée par un plan défini par sa position (x, y, z) et son orientation (azimut, dip). Cette méthode est expliquée dans un article soumis dans le 33rd gOcad Meeting (§ 2.2.4).



**Figure 41 :** Modélisation des zones testées hydrauliquement. Le test 1 se trouve dans la zone endommagée du compartiment ouest (hanging wall) de la zone de failles et plus précisément, c'est une faille lustrée qui est testée. Le test 2 se trouve dans le compartiment Est (footwall) de la zone de failles, et plus précisément la zone intacte. Le test 3 se situe aussi dans le footwall, dans la zone endommagée, et concerne une série de fractures calcifiées. Le test 4 se trouve dans le cœur de faille.

Il est alors possible d'exporter ces propriétés géométriques afin d'effectuer des analyses spatiales des données de fracturation. Cette représentation 3D permet d'étendre les observations le long des forages au volume d'expériences comprenant l'ensemble des forages. Des domaines représentant le cœur de faille et la zone endommagée sont construits en analysant la densité de fracturation le long des forages. Ces derniers sont extrapolés afin de coïncider aux données diagraphiques. De la même manière le plan principal de faille et quelques failles secondaires ont pu être corrélés entre différents puits. Mais pour la majorité des plans de fractures, il semble que leur dimension est inférieur à l'espacement entre des puits les plus proches (soit < 1m). Ce

modèle structural haute définition de la zone de failles F2 au niveau du site d'expérience permet aussi de localiser les différents instruments/capteurs du projet Fluides & Failles en fonction de l'architecture de la faille (Fig. 40, Fig. 39). Ce modèle a servi au dimensionnement d'une étude de caractérisation plus globale. Il permet aussi de représenter diverses données et de les confronter avec les données architecturales. Divers exemples peuvent être cités ; confrontation entre les fuites d'eau lors de tests d'injection avec la localisation des failles ouvertes qui amène vers un modèle hydrogéologique. La confrontation entre les propriétés pétro-physiques et l'état de fracturation.

Le troisième modèle 3D est construit à partir des données CT-scan de l'échantillon de la galerie 2003. De la même manière que pour les forages, les structures visibles sur les tranches de CT-scan ont été digitalisées puis importées dans le logiciel gOcad avec les images de tranches l'échantillon. Une fois les tracés projetés sur les tranches d'image relocalisées en trois dimensions, chaque tracé est interpolé suivant une surface triangulée qui fit au mieux le tracé de la structure sur plusieurs tranches. Cette étape nécessite d'identifier les structures qui traversent différentes tranches. Ainsi chaque structure est représentée par un plan défini par sa position (x, y, z) et son orientation (azimut, dip).

L'article qui suit a été présenté lors du 33th gOcad meeting et explique en détail, la méthode de construction/modélisation trois-dimensions et haute résolution des discontinuités (fractures/failles) basée sur l'analyse de diagraphies optiques de parois de forage.

### **2.2.3 Coupling of gOcad, COMSOL and 3D-Stress codes to estimate stress induced permeability variations in a fault zone-(33th gOcad Meeting, Sept 2013)**

#### **2.2.3.1 Présentation de l'article:**

L'analyse des variations de perméabilité lors de l'activité d'une zone de failles est d'un grand intérêt pour les prévisions/évaluations des risques de fuites (réservoirs). Dans cet article, nous proposons une méthode pour estimer les variations de perméabilité suivant différentes directions en fonction de l'architecture reconstituée en trois-dimensions et haute définition (< 1m) des discontinuités rencontrées dans la zone endommagée de la zone de failles et en fonction de l'état de contrainte. Pour estimer à l'échelle du mètre, le potentiel d'activation hydromécanique d'une zone de failles, nous avons utilisé une combinaison de trois logiciels (3D-Stress/gOcad/COMSOL).

La zone de failles étudiée (appelée F2) est située au sein des argilites Toarciennes dans le laboratoire souterrain situé à Tournemire (SW France) appartenant à l'Institut français de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). Un forage de direction normale à la direction de la faille avec un pendage de  $21^\circ$ , traverse la zone de failles composée d'un cœur de faille d'une épaisseur moyenne de 2m et une zone endommagée d'une épaisseur moyenne de 10m. Les fractures/veines sont identifiées comme les principales structures de la zone endommagée de la zone de failles et ont été identifiées par l'analyse des diagraphies optiques des parois du forage. Une reconstruction 3D des failles/fractures est réalisée avec le logiciel gOcad. Ce modèle 3D gOcad est ensuite maillé et exporté (i) dans le logiciel COMSOL qui utilise le calcul de débit et permet d'estimer le tenseur de perméabilité et (ii) dans le logiciel 3D-Stress qui utilise le calcul de la contrainte effective permettant d'estimer l'influence de différents scénarios d'états de contrainte sur les déformations des fractures/failles de la zone de failles.

Les valeurs de perméabilité calculées sont de l'ordre de  $10^{-16} \text{ m}^2$ . Ces valeurs sont plus élevées d'un facteur de  $10^5$  à  $10^6$  par rapport aux valeurs de perméabilité mesurées dans la roche intacte. Les valeurs de perméabilité dans la zone de failles sont probablement surestimées car les fractures sont considérées comme ouvertes sans aucun remplissage. Néanmoins, la zone endommagée apparaît clairement comme une zone de perméabilité élevée où l'analyse des contraintes montre que l'état de contraintes actuel est favorable à la réactivation par ouverture des fractures. Cette analyse simple peut être utilisée pour des analyses de stabilité de forage, et aider à la définition de stratégies de fracturation hydraulique dans des forages horizontaux qui traversent des zones de failles.

#### **2.2.4 Article: Coupling of gOcad, COMSOL and 3D-Stress codes to estimate stress induced permeability variations in a fault zone-(33th gOcad Meeting, Sept 2013)**



## Coupling of gOcad, COMSOL and 3D-Stress codes to estimate stress induced permeability variations in a fault zone

M. LEFEVRE <sup>a</sup>, Y. GUGLIELMI <sup>a</sup>, P. HENRY <sup>a</sup>, S. VISEUR <sup>a</sup>, C. GOUT <sup>b</sup>, P. DICK <sup>c</sup>

<sup>a</sup> CEREGE, University of Aix-Marseille, 13331 Marseille, France

<sup>b</sup> TOTAL, CSTJF, Av. Larribau, 64018 Pau, France

<sup>c</sup> IRSN, Av. du Gen. Leclerc, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

September 2013

### Abstract

Permeability variation with fault activation is a question of interest for seismologists and reservoir engineers in the predictions and the risk assessments of natural or induced earthquakes and fault leakage. Such studies are often performed at large scale considering simplistic representations of fault architecture and properties. In this paper, we propose a method to estimate the permeability tensor variations related to three-dimensional fault architecture and state of stress using a high-accuracy 3D numerical representation of fault zone heterogeneities at the meter scale. The studied fault zone, is located in the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) underground laboratory located at Tournemire (SW France) in the Toarcian shale formation. The fault corresponds to a 2m thick and a few hundred meters long vertical strike-slip fault zone. One fully cored borehole crosses the intact rock, the fault damage and the gouge zones with a dip of 21° and a direction normal to the fault's direction. Fractures, joints and veins with different filling are identified as the main fault zone structures with optical logging of the borehole wall. A 3D reconstruction of existing heterogeneities is conducted with *gOcad*. Then, 3D *gOcad* model is meshed and exported (i) in a flow calculation model to estimate the permeability tensor using *COMSOL* software and (ii) in an effective stress calculation model to estimate the influence of different regional stress scenarios on the fault zone deformations using *3D-Stress* software.

Permeability values of  $10^{-16} \text{ m}^2$  are computed, a factor of  $10^5$  to  $10^6$  higher than the intact rock values measured in the field. Such high values probably overestimated the real fault zone permeability as we only considered open fractures simple geometry without any filling material. Nevertheless, the fault damage zone clearly appears as the highest permeability zone where stress analysis shows that the actual stress state may favor tensile reopening of fractures with a moderate risk of fault slip activation. The *gOcad-COMSOL-3D-Stress* coupling thus appears as an interesting way to estimate meter scale fault zone properties and their potential hydromechanical activation. Such simple analysis can be used for borehole stability



analyses, and to help defining hydro-fracturing strategies in horizontal holes intersecting fault zones.

**Keywords:** Fault Zone, Fractures, Fluid flow, Permeability, Slip, Dilation, 3D modeling.

## Introduction

Brittle fault zones are considered as specific structures that play a complex and predominant role on fluid flow in the earth crust. They are schematically composed of a fault core/gouge and of a damaged/fractured zone (Faulkner et al., 2010). Most of the frictional sliding deformation is accommodated in the fault core (Zhang et al., 1999) which display various shear structures such as P foliation, R1 Riedel shear plane and Y shear (Rutter et al., 1986). The damage zone can be assimilated to a complex fractured zone where some fractures may have experienced shearing, dilation, and wearing. Such structures induce strongly heterogeneous fluid flows through the fault zone (Mandl et al., 1977). For example, permeability measurements made on clay fault gouge samples have shown permeability anisotropy of three orders of magnitude; the permeability being high parallel to the P foliation - R1 Riedel planes intersections and low normal to the fault direction (Faulkner, 2004).

In this project, we conduct an estimation of the 3D permeability tensor variation within a fault zone using a high-accuracy 3D numerical representation of fault zone heterogeneities (fractures, joints and mineralization). The fault geology is first reconstructed in 3D using gOcad. Then, the gOcad fault model is exported in a COMSOL fluid flow calculation and in a 3D-Stress calculation to compare the effects of fault geometry and of the state of stress on fault permeability variations.

## 1. Studied site overview

The studied fault zone outcrops in the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) underground laboratory located at Tournemire (SW France) on the Southern edge of the French Massif Central. The fault cuts a 250m thick Toarcian shale formation and is part of a complex kilometer scale fault network (Constantin et al., 2004). The fault corresponds to a roughly N-S trending, 2m thick in the studied zone and a few hundred meters long sub-vertical strike-slip fault zone (Fig.1).

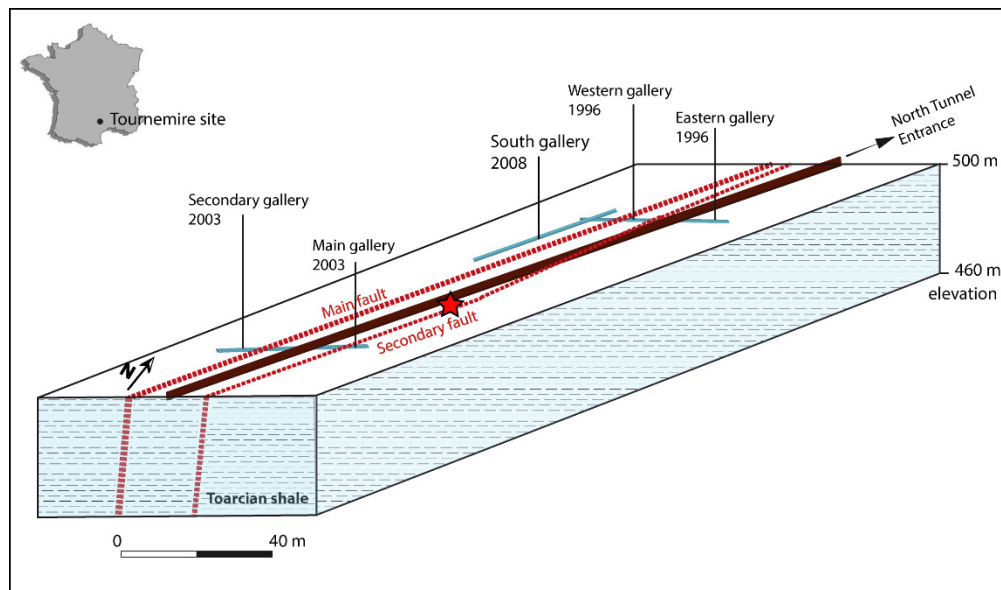


Figure 1: Location of the studied fault in Tournemire's tunnel plane (red star shows the location of the borehole that will be used in this paper to reconstruct fault zone permeability).

A slanted borehole (20.8m long, 92mm diameter, oriented N80° and dipping 21°) was drilled normal to the fault direction, long enough to completely cross the fault zone. The fault structure contains a 7.9m thick damage zone (crossed between 10.73 and 18.63m in the hole), and a 2.25m thick gouge zone (crossed between 15.37 and 17.62m in the hole). Intact rock permeability values from Tournemire's in situ hydraulics tests are  $1 \times 10^{-22}$  to  $1 \times 10^{-21}$  m<sup>2</sup> (Bertrand et al., 2002; Savoye et al., 2008).

## 2. Methodology

The adopted workflow is the following (Fig.2):

- (1) Digitalizing the main fault zone structures (fractures plane, mineralized fractures filling) on the borehole's optical logging images (Note: the fault gouge was not detailed in this preliminary work).
- (2) Importing the borehole images and the interpreted structures as curves in *gOcad*. The borehole's geology is reconstructed by winding the image and the curves around a cylinder modelling the well envelope.
- (3) Building the 3D geometry of the structures: For each digitalized fractures trace, an initial triangulated surface is built as its medium plane. The areal dimensions of this medium plane are defined to include the borehole section. Then, the obtained surface mesh is densified and used to interpolate more accurately a complex surface that best fits the structure curve/trace on the borehole wall using DSI (Mallet, 2002).
- (4) Computation of slip and dilation tendency computations. The modelled surface geometries of fractures are imported into *3D-Stress* software. This software calculates the fractures surface's tendency to slip and dilate (Ts and Td, respectively) given a regional stress state and considering a cohesionless surface (Morris et al., 1996; Ferril et al., 1999). The slip tendency is the ratio of shear stress to normal stress applied to a surface of given strike and dip directions (Eq.1). Slip is possible if the shear stress is higher than the normal stress. The dilation tendency is controlled by the normal stress which acts against fracture opening (Eq.2).

$$Ts = \frac{\tau}{\sigma_n} \quad (\text{Eq. 1}) \quad Td = \frac{(\sigma_1 - \sigma_n)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Ts is the slip tendency, Td the dilation tendency,  $\tau$  the shear stress (Pa),  $\sigma_n$  the normal stress (Pa),  $\sigma_1$  the maximum principal stress (Pa) and  $\sigma_3$  the minimum principal stress (Pa).

- (5) Construction of fractures apertures network on a 2D plane. With *gOcad*, a 3D distance map is computed in a high-resolution grid to represent in each cell the lowest distance to a modeled fracture surface. Then, these surfaces representing walls of open fractures are built by extracting the surfaces corresponding to the isovalue 0.5cm (average thickness of mineralization in a fracture) in that 3D grid. Finally, polygonal lines representing the fracture walls in 2D are computed by intersecting between the fracture's walls surfaces and the plane defined by the horizontal of a section of the borehole and the axis of the borehole (a 20.8×0.092 m, 21° dipping plane).

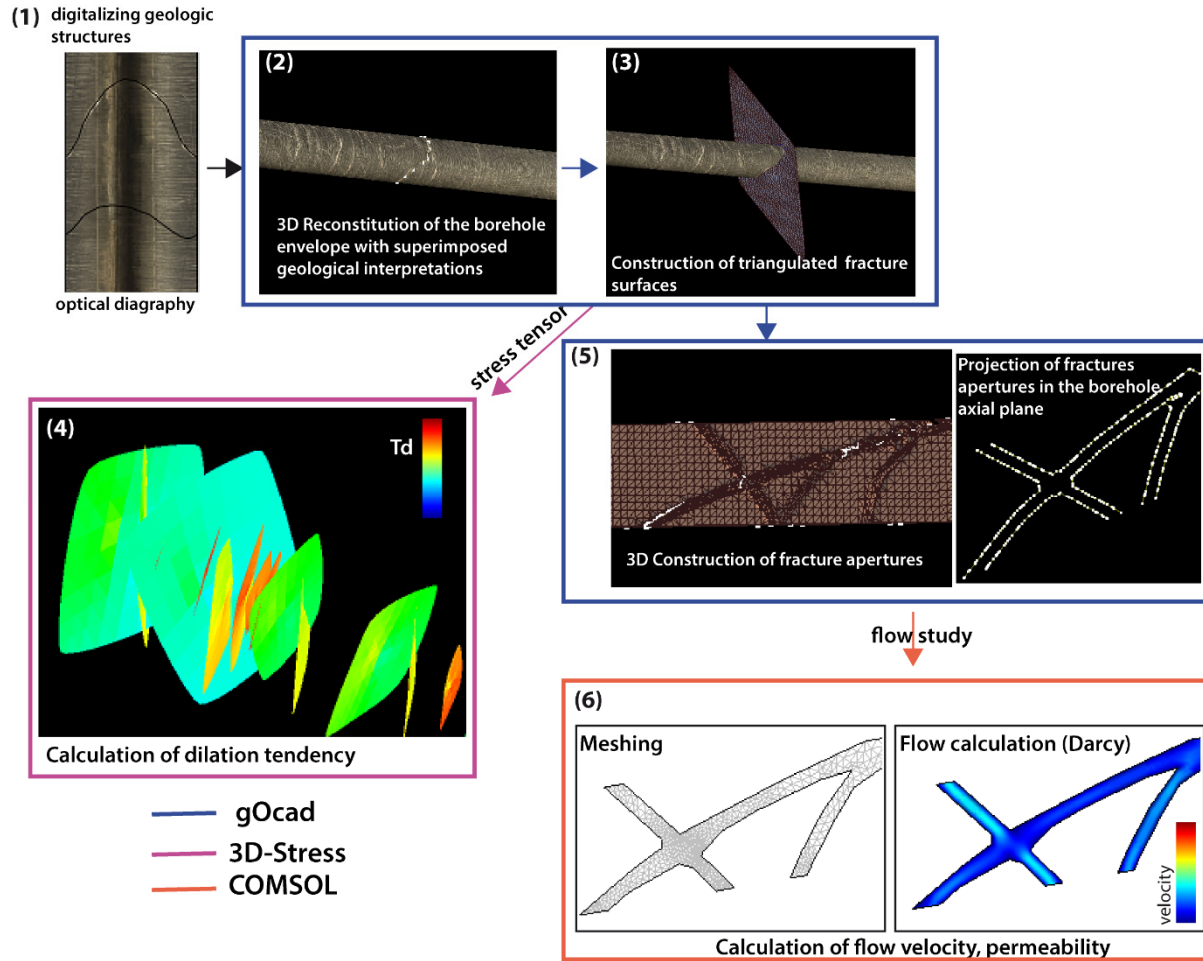


Figure 2: Diagram representing the different stages of the adopted workflow

(6) These polygonal lines are imported in *COMSOL* and the area bounded by two adjacent lines is meshed to represent the fracture's aperture. A fluid flow calculation is conducted after imposing a pressure gradient and defining the fluid properties (viscosity, density of water). The flow velocity is averaged over the entire fracture zone (Eq.3) and the Darcy law (Eq.4) is used to estimate fracture permeability.

$$U = \frac{1}{S_T} \int_{S_R} V \times \partial S \quad (\text{Eq.3})$$

$$k = - \frac{\mu_f |U|}{|\nabla P|} \quad (\text{Eq.4})$$

$U$  corresponds to the average flux per surface area across the model boundary (Darcy velocity,  $\text{m.s}^{-1}$ ),  $S_T$  the total surface ( $\text{m}^2$ ),  $S_R$  the area open to fluid flow ( $\text{m}^2$ ),  $V$  the local fluid velocity ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $k$  the permeability ( $\text{m}^2$ ),  $\mu_f$  the fluid viscosity ( $\text{Pa.s}$ ) and  $P$  the pressure ( $\text{Pa}$ ).

### 3. Preliminary results and interpretations

#### 3.1. Stress analyses

The slip tendency and dilation tendency analysis should allow to infer which state of stress prevailed during the fault activity or which state of stress is necessary for fault reactivation. For this purpose, a first calculation is made with *3D-Stress* using the current state of stress as boundary condition. As the

fault is not currently active, sensitivities are run using the 3D model to evaluate the impact of the principal stress amplitude, stress tensor orientation and of fluid pore pressurisation.

The full 3D borehole model is simulated with 3D-Stress, the distribution and statistics of dilation and slip tendency of the 58 fractures are analysed and compared among 4 selected models:

- Case 1: the current Tournemire site stress deduced from hydraulic fracturing tests (Cornet, 2000):
- $\sigma_1 = 4 \pm 2$  MPa, horizontal and oriented  $N162^\circ \pm 15^\circ E$ .
- $\sigma_2 = 3.8 \pm 0.4$  MPa, slightly inclined by  $7-8^\circ$  from vertical in the  $N72^\circ$  direction.
- $\sigma_3 = 2.1 \pm 1$  MPa, slightly inclined by  $7-8^\circ$  from horizontal in the  $N72^\circ$  direction.

Fracture planes display a highly varying dilation tendency ranging 0 to 1 and a small slip tendency between 0 and 0.33 (Fig.3). In detail, 85% of fractures have a slip tendency greater than 0.19 (40% than 0.28) and 70% of fractures have a dilation tendency greater than 0.50 (20% than 0.90). These results suggest that most fractures in the damage zone cannot slip under the present state of stress, assuming a friction coefficient of 0.45-0.58 (Albi et al., 2012; Niandou et al., 1997). Furthermore, the main fault plane is oriented  $N170-180$  nearly normal to  $\sigma_3$  and thus not favorably oriented. Thus, the left-lateral strike slip activity most probably occurred with a different state of stress.

- Case 2: the same stress tensor with increasing  $\sigma_1$ . It is demonstrated that the slip tendency increases as soon as  $\sigma_1$  is equal to 13 MPa. For  $\sigma_1$  is equal to 13 MPa, 50% of fractures display a slip tendency greater than 0.8 but it doesn't modify much the fractures dilation tendency (case 2, Fig.3).

- Case 3: the current stress tensor is rotated clockwise so that the main fault plane would be activated as a right-lateral (rather than left lateral). With this condition, the dilation tendency is increased. For a rotation about the vertical axis by  $40^\circ$  ( $\sigma_1$ :  $N202^\circ$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$ :  $N112^\circ$ ), 60% of fractures having a dilation tendency greater than 0.90 but it doesn't modify much the fractures slip tendency (case 3, Fig.3).

- Case 4: it is the case 3 (rotated) stress tensor combined with to a 1.8 MPa pore pressure increasing. This will generally increase the slip tendency. In this stress state, 70% of fractures display a slip tendency greater than 0.8 and 60% of fractures display a dilation tendency greater than 0.9.

The results and statistics of the 4 cases are compared in Table 1 and Fig.3.

|        | Td   |      | Ts    |      |
|--------|------|------|-------|------|
|        | >0.5 | >0.9 | >0.28 | >0.8 |
| case 1 | 70%  | 20%  | 40%   | 0%   |
| case 2 | 70%  | 20%  | 90%   | 50%  |
| case 3 | 90%  | 60%  | 50%   | 0%   |
| case 4 | 90%  | 60%  | 90%   | 70%  |

*Table 1: Proportion of fracture displaying a dilation tendency (Td) greater than 0.5 and 0.9 and a slip tendency (Ts) greater than 0.28 and 0.8 of each case 1 to 4.*

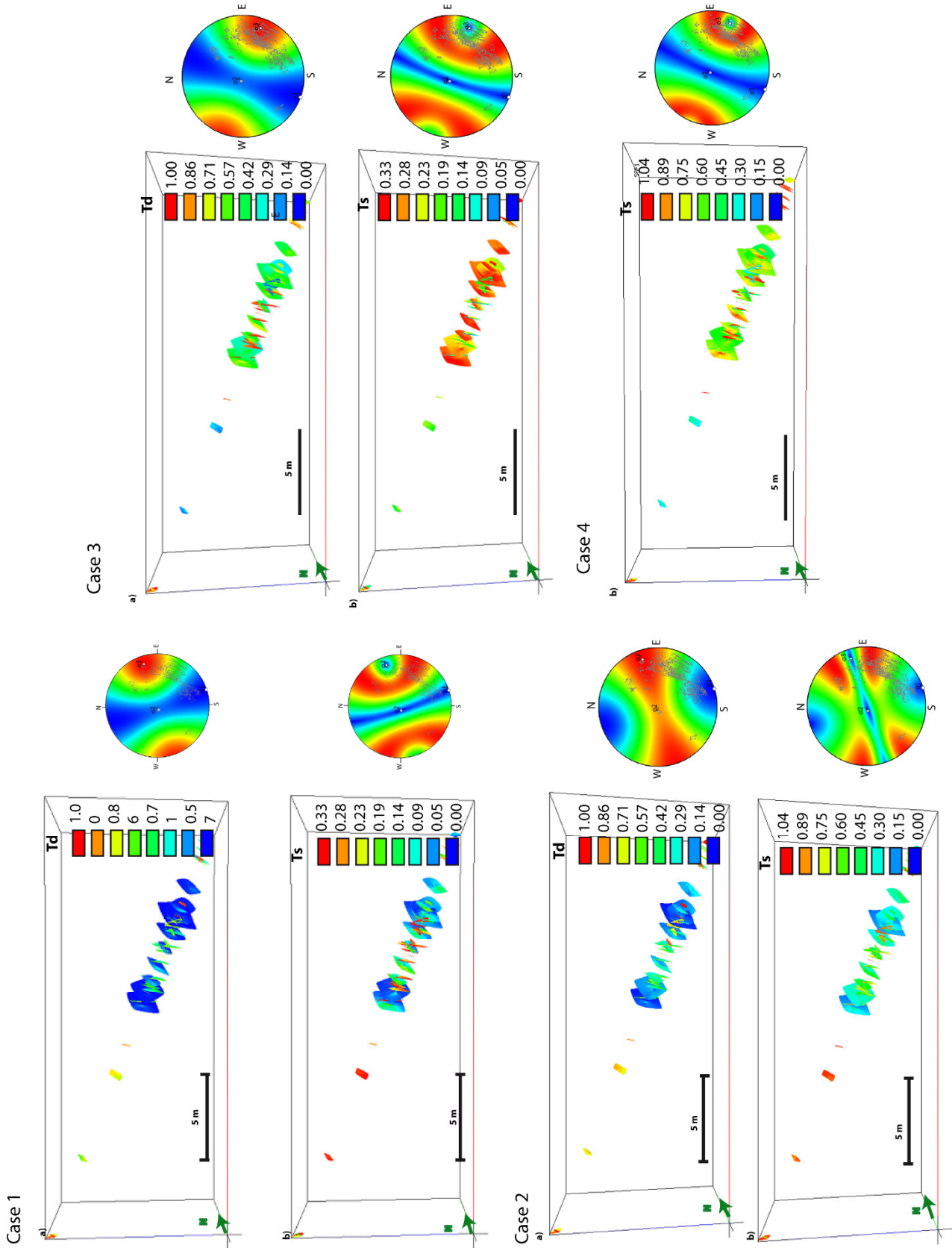
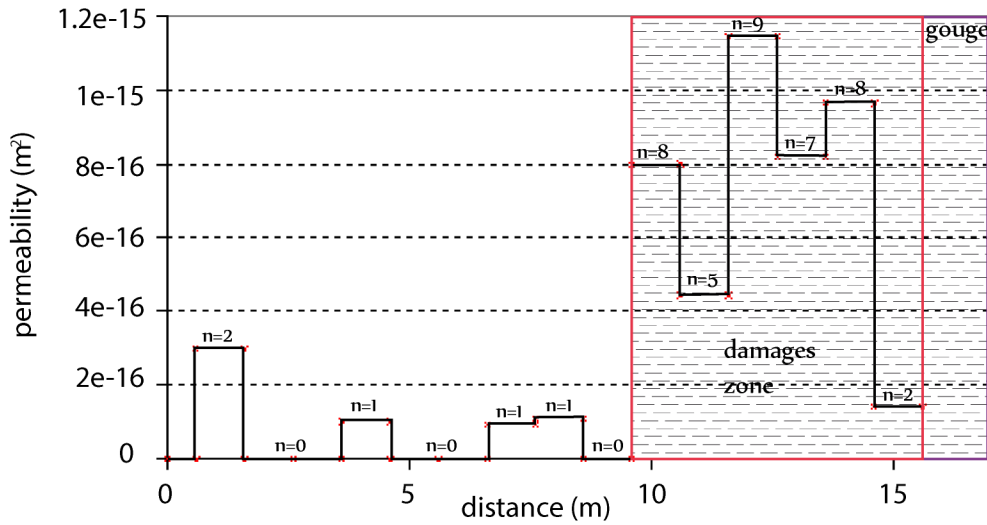


Figure 3: Distribution of fracture dilation (Td) and slip tendency (Ts) in the borehole and on a stereograph respectively left and right of each case 1 to 4. The stereograph used is a Schmidt projection in the lower hemisphere and fractures poles (i.e., pole of each triangle of the fracture surfaces) are plotted as grey points.

### 3.2. Permeability analysis

The permeability simulation aims at identifying the impact of the observed fault associated fracture network in the increase of permeability in the shale. The assumption in this early exploratory work is that each described fracture is open (while some mineralized fractures are observed) and that the distribution and connectivity modeled in the borehole axial plane is representative of fault zone volumes. The *COMSOL* simulation is run using a constant fracture aperture of 0.005m (thickness of mineralization in fractures typically observed on the walls of the laboratory gallery).

The fracture permeability of the whole core is  $8.89 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ . Given the assumptions and the limitations of this simple model, figure 4 shows that the high fracturation of the fault damage zone induces a permeability increase of a factor 5.



**Figure 4:** Estimated fracture linked permeability variations (averaged every meter), (n) corresponds to number of fractures encountered.

### Conclusion

Coupling *gOcad-3DStress-COMSOL* has enabled us to estimate the effects of a potential activation on fault zone permeability variations. We show that, in the actual state of stresses, the fault damage zone fractures may potentially dilate under an effective stress variation, and flow paths could be generated enhancing the damage zone permeability. However, such permeability enhancement even if it could favor fault damage zone pressuring will not display the conditions for fault slip activation. Fracture propagation may rather be influenced by tensile opening of preexisting damage zone fractures.

Our approach based on the *gOcad-3D-stress* coupling also suggests that the current stress conditions are not the ones responsible of the faulting, although the large uncertainty on the stress tensor still needs to be addressed. The stress measurements were conducted in the intact rock relatively far from the fault zone and the values obtained represent the regional state of stresses than the local stress within the fault zone.

*gOcad* 3D representation finally appears as a straightforward way to estimate the slip and the flow tendencies of a fault zone at the borehole scale. The developed workflow, based on a coupling between *gOcad*, *COMSOL* and *3D-Stress* is an excellent tool to test a real 3D fault model, sensitivities to stress field orientation and magnitude, fracture fluid pressure, connectivity and aperture of fracture networks associated to the fault. It specially allows to explore a wide range of combination to estimate fault reactivation conditions and associated permeability variation. Such simple analysis can be used for



borehole stability analyses, or to help defining hydrofreaking strategies in horizontal holes intersecting fault zones.

## Acknowledgments

The authors would like to thank ParadigmGeo and the ASGA for providing, respectively, the *gOcad* software and the research plugins used in this study, Total for funding the project and IRSN for granting access to the Tournemire laboratory facility.

## Reference

Albi, H., D. Labrie., T.S. Nguyen., J.D. Barnichon., G. Su., E. Evgin., R. Simon., M. Fall., 2012. Laboratory investigation and preliminary modelling of the mechanical behaviour of a transversely isotropic shale. Proceedings of GeoManitoba.

Bertrand, L., R. Lavignerie., J. Cabrera., J.M. Matray., S. Savoye., 2002. Instrument for measuring pore pressure and permeability in low permeability rock. In: Intern. Meeting Clay in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement, Reims, France.

Constantin, J., J.B. Peyaud, P.Vergely, M. Pagel, J. Cabrera, 2004. Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. Physics and Chemistry of the Earth. VOL.29, 25-41.

Cornet, F.H., 2000. Détermination du champ de contrainte au voisinage du laboratoire souterrain de Tournemire. Rapport du Laboratoire de Mécanique des Roches, Département de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris.

Faulkner, D. R., 2004. A model for the variation in permeability of clay-bearing fault gouge with depth in the brittle crust. Geophysical Research Letters, VOL. 31, L19611.

Faulkner, D.R., C.A.L. Jackson., R.J. Lunn., R.W. Schlische., Z.K. Shipton., C.A.J. Wibberley., M.O. Withjack., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology. VOL.32, 1557-1575.

Ferril D. A., J. Winterle., G. Wittmeyer., D. Sims., S. Colton., A. Armstrong., A. P. Morris., 1999. Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain Nevada. GSA TODAY, A Publication of the Geological Society of America. VOL. 9, No.5.

Mallet, J.L., 2002, Geomodelling. Applied Geostatistics Series. Oxford University Press, 624.

Morris, A. P., D. A. Ferrill., D. Brent Hendreson., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, VOL.24, No.3, 275-278.

Mandl, G., Jong, L. N. J., Maltha, A., 1977. Shear Zones in Granular Material, An Experimental Study of Their Structure and Mechanical Genesis. *Rock Mechanics* 9, 95-144.

Niandou, H., Shao, J.F., Henry, J.P., Fourmaintraux, D., 1997. Laboratory Investigation of the Mechanical Behavior of Tournemire Shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. VOL. 34, 3-16.

Rutter, E. H., R. H. Maddock, S. H. Hall, S. H. White., 1986. Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges, *Pure and Applied Geophysics* 124, 3-30.

Savoye, S., 2008. Apport des traceurs à la compréhension des processus de transport au sein de formations argileuses indurées. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherche*.

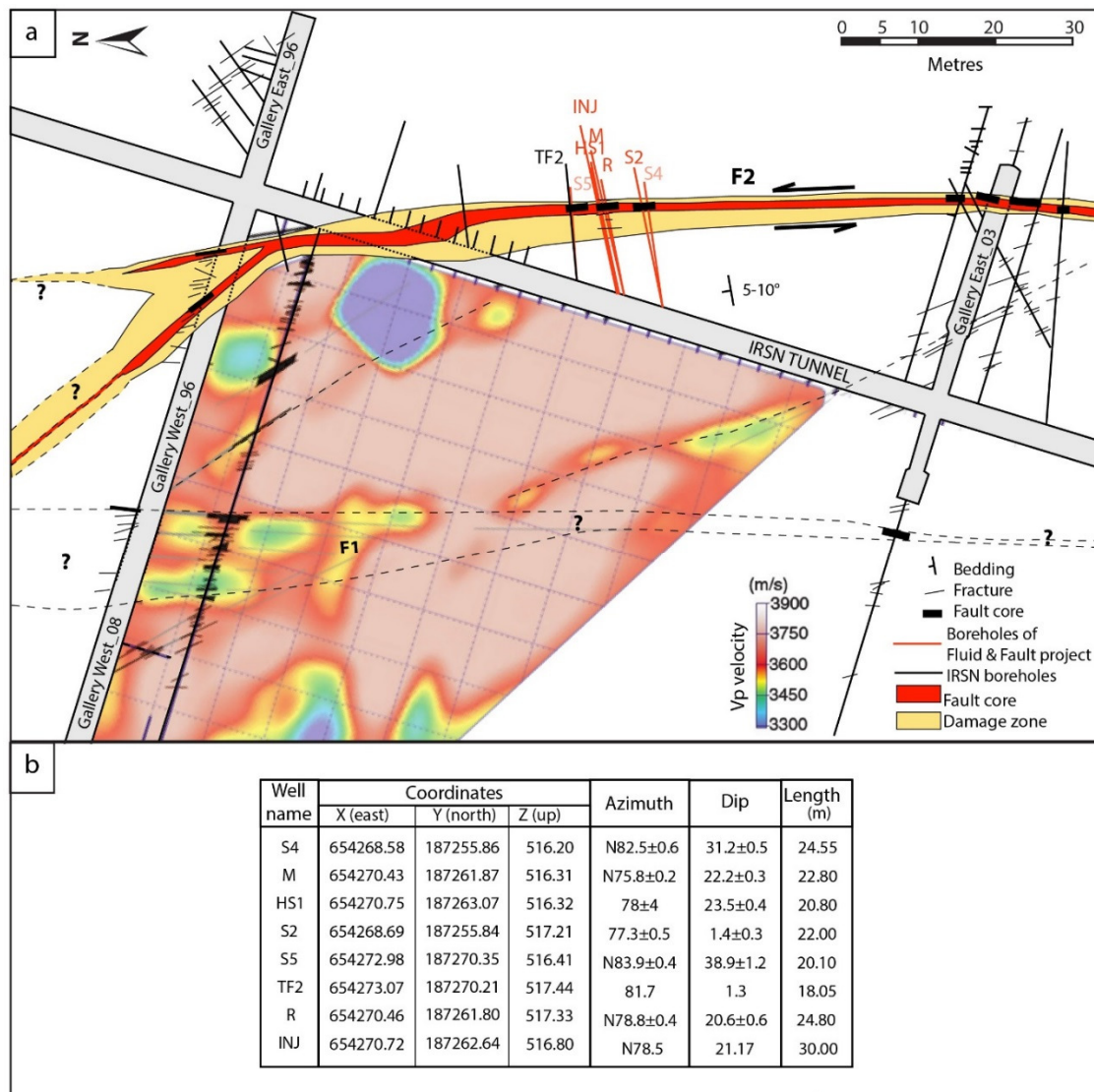
Zhang, S., Tullis, T. E., Scruggs, V. J., 1999. Permeability anisotropy and pressure dependency of permeability in experimentally sheared gouge materials. *Journal of Structural Geology* 21, 795-806.



### 3 STRUCTURE 3D DE LA ZONE DE FAILLES

#### 3.1 Présentation de l'article

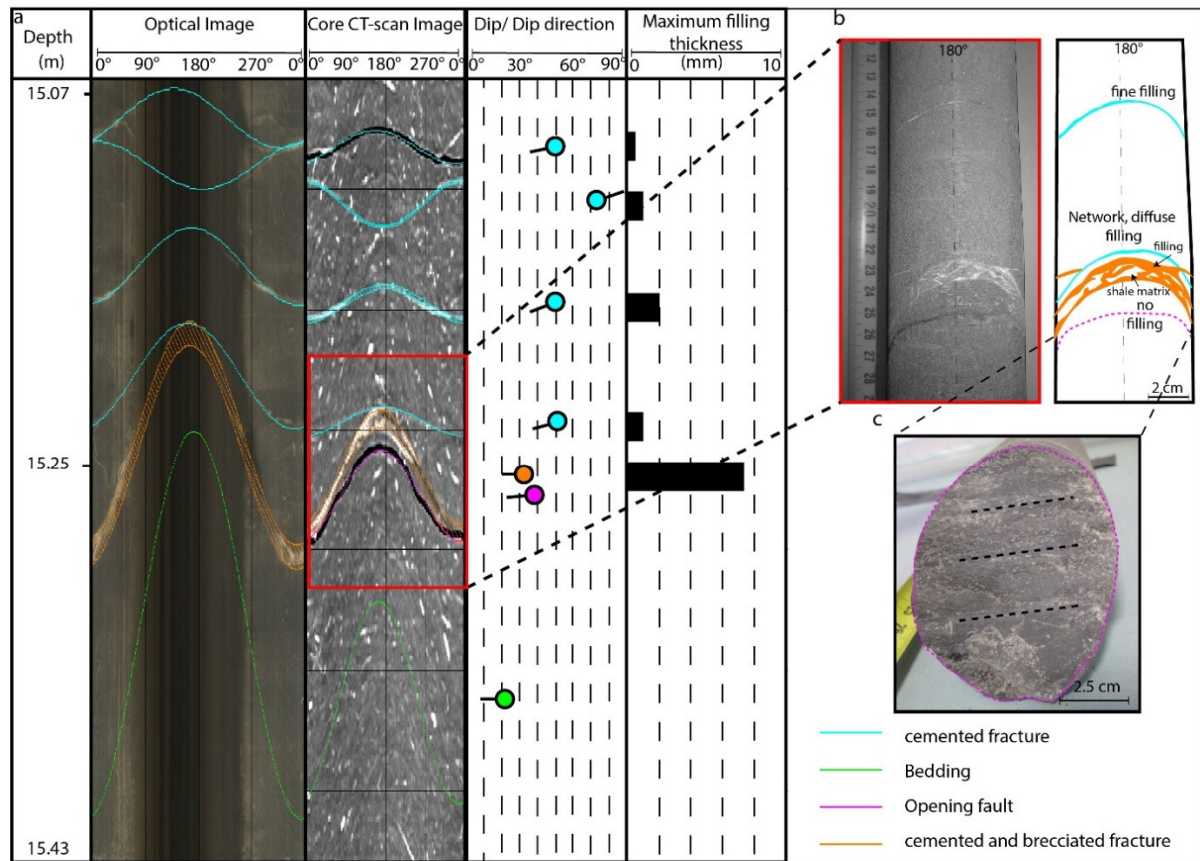
Le but de cet article est de caractériser l'architecture 3D d'une zone de failles argileuse. Cette étude se focalise sur un volume de 20×20×20m comprenant la zone de failles F2 et huit forages (Fig. 42a). Pour cela, nous avons principalement utilisé les données issues des forages, c'est-à-dire; les diagraphies optiques des parois de forage, les carottes et les CT-scans des carottes. Ces données proviennent de huit forages dont les caractéristiques sont listées dans la figure 42b.



**Figure 42 :** a, Localisation de la zone de failles étudiée F2 et des forages utilisés, cartographie de la vitesse des ondes P, d'après Bretaudeau et al., 2014. b, caractéristiques des forages. Le système de coordonnées est Lambert III.

A partir des analyses des données issues des forages, différents types de structures ont été observés dans la zone de failles:

(i) **Du point de vue cinématique**, nous avons défini deux types de structures, les failles et les fractures. Contrairement aux fractures, les failles sont identifiées par la présence de stries sur les épontes ouvertes. L'identification des stries se fait uniquement sur les carottes (rose, Fig. 43b et c).



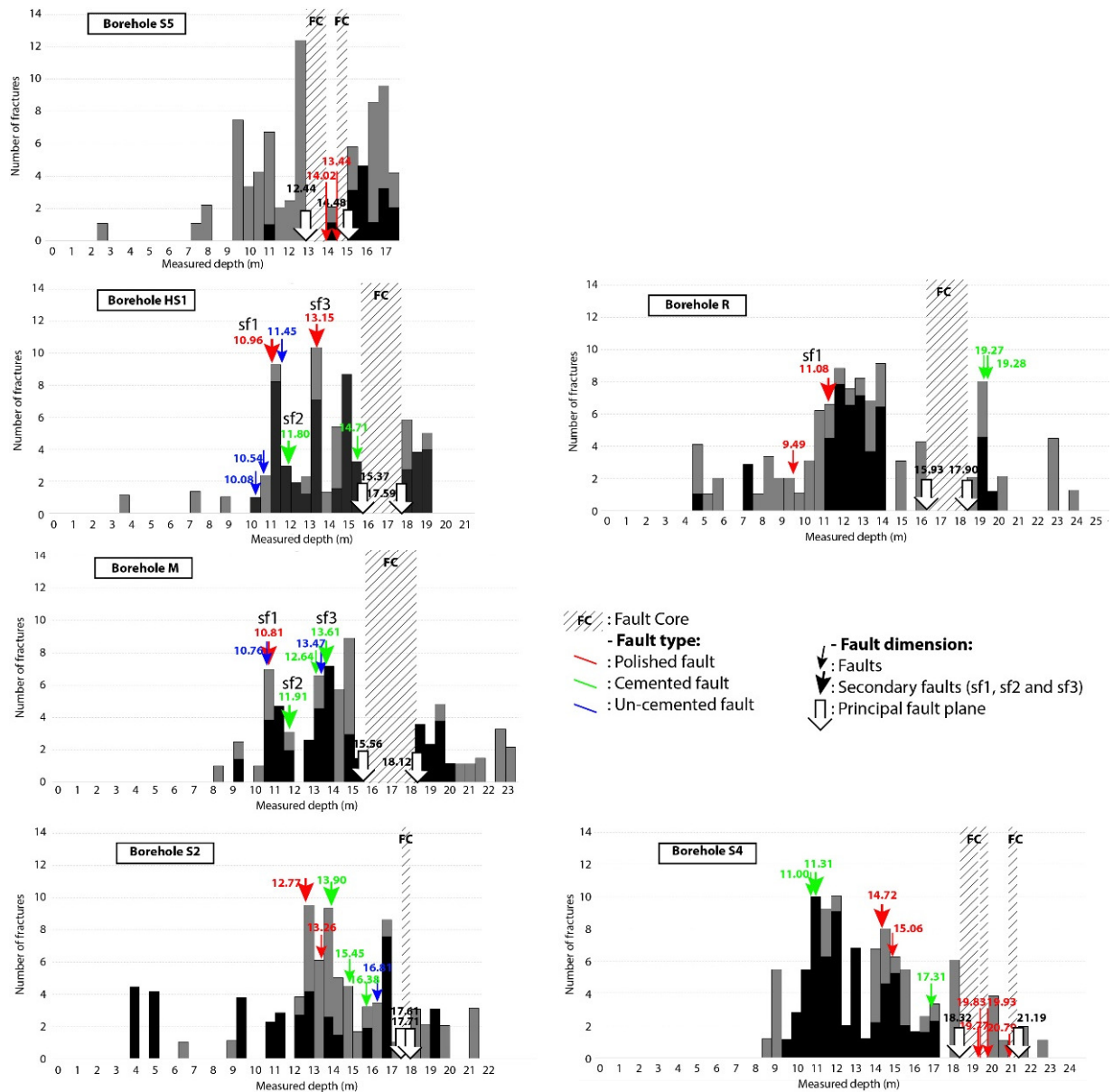
**Figure 43 :** a, Identification et acquisition des données de failles/fractures dans une portion du forage S4. De gauche à droite, la diagraphie optique de la paroi de forage, l'image du CT-scan de la carotte, le dip et le dip direction de la structure (faille/fracture) digitalisée sur la diagraphie/CT-scan et l'épaisseur maximum de cimentation (calcite) de la structure digitalisée. b, Observations de deux types de fracture et d'une faille non calcifiée (rose) sur carotte. Les deux types de fracture sont; les fractures finement calcifiées (bleu) et les fractures cimentées et bréchifiées (orange). c, Photo de l'éponte ouverte d'une faille présentant des stries.

(ii) **Du point de vue du remplissage**, nous avons distingué les failles/fractures non calcifiées présentant un aspect lustré et poli (typiquement pour les failles, rose, Fig. 43b et c), finement calcifiées (bleu, Fig. 43a et b), et calcifiées/bréchifiées (orange, Fig. 43a et b).

(iii) **Du point de vue de la dimension**, trois dimensions de structures ont été observées. La majorité des fractures et quelques failles ont une dimension inférieure à 1m, en effet, en considérant leur position (x, y, z) et orientation (azimuth, pendage), il est difficile de corréliser les structures d'un forage à un autre. Seulement quelques structures ont pu être corrélées lorsque la distance entre forages est inférieure à un mètre (HS1, INJ, R et M). En effet, quelques failles et fractures (principalement des failles) sont retrouvées dans les forages les plus proches, leurs dimensions sont donc supérieures à 1m. Une troisième dimension est observée, en effet dans tous les forages, on observe des plans de faille qui bordent le cœur de faille. La dimension de ces plans est supérieure à 20m. On définit donc trois types de faille en fonction de leurs dimensions, les failles ( $D < 1m$ ), les failles secondaires ( $D > 1m$ ) et les failles principales ( $D > 20m$ ). Nous avons constaté que les failles de dimension inférieure à 1m se présentent sous forme de faille « unique » alors que pour les failles de dimension supérieure, les failles secondaires se présentent sous forme de petites zones de failles pouvant contenir des zones bréchiques et donc possèdent une épaisseur (pluri-centimétrique). Notons aussi que l'aspect des failles secondaires peut changer latéralement de, (i) faille secondaire calcifiée à (ii) faille secondaire non calcifiée et (iii) se terminer en réseau de fractures calcifiées.

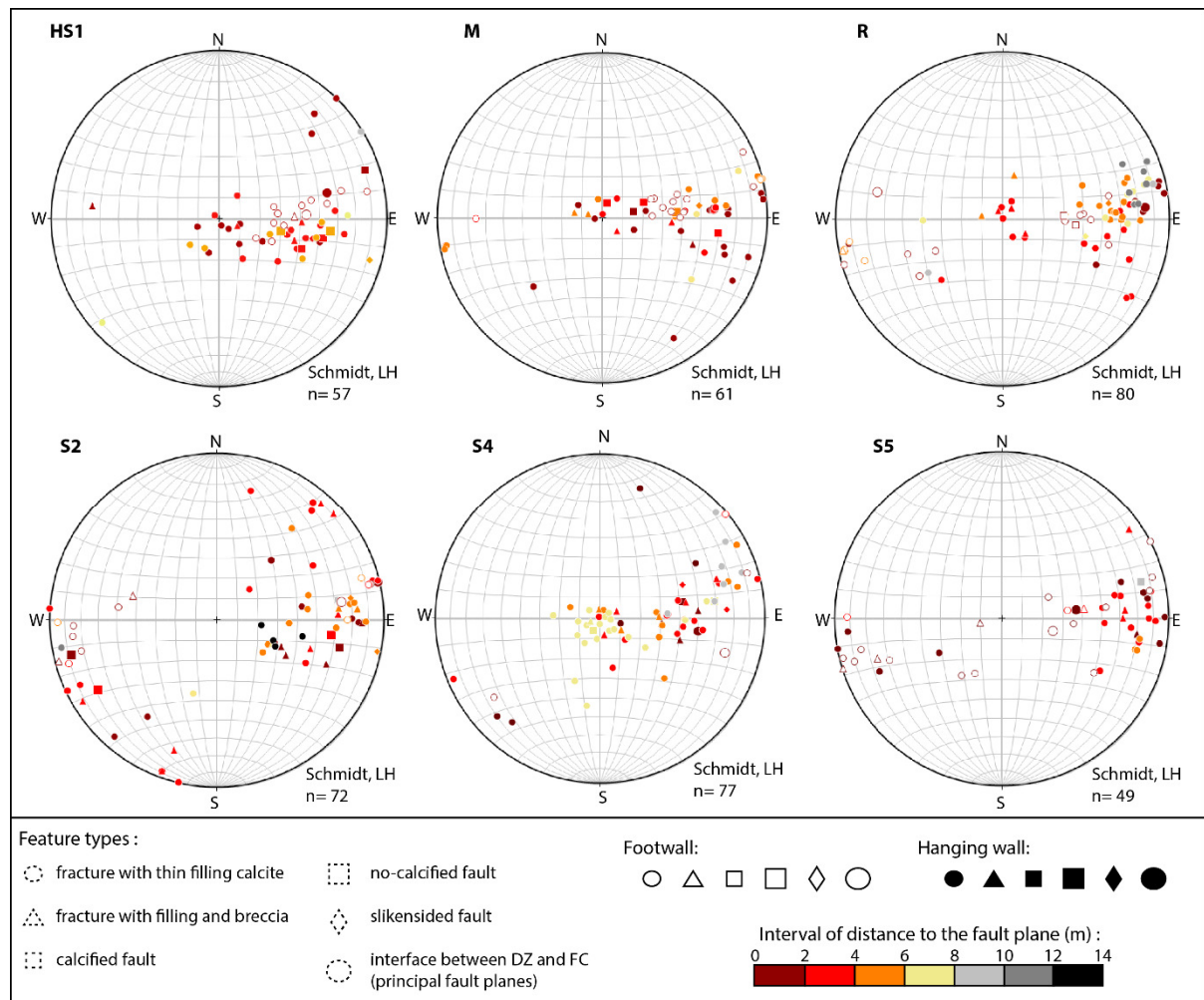
On constate que la densité de fractures n'augmente pas de manière graduelle en s'approchant du cœur de faille mais on observe des augmentations locales de densité de la fracturation à proximité des failles secondaires (noté sf, Fig 44). Ces zones fortement fracturées représentent des zones endommagées associées à ces failles secondaires. La densité de failles secondaires n'est pas corrélée à la proximité du cœur de faille, et elles se localisent principalement dans le compartiment supérieur de la zone de failles. De manière générale, le hanging wall est plus affecté par la fracturation que le footwall (Fig. 44). Certains forages (S5 et S4) présentent plusieurs cœurs de faille (2 et 3, respectivement). L'épaisseur de la zone fracturée ne dépend pas de l'épaisseur du cœur de faille (Fig. 44).

L'orientation des structures (Fig. 45) présente une majorité des structures (toutes failles/fractures confondues) comprises entre  $N160^{\circ}$ - $N020^{\circ}$  avec une grande variation dans la valeur du pendage. En effet, on observe des structures avec des pendages très faibles (quasiment horizontaux) que nous appellerons par la suite des « bed-parallel fractures » et des structures verticales. Il n'y a pas de loi de distribution de la direction et du pendage en fonction de la distance au plan principal de faille. Une nette asymétrie est observée dans la direction du pendage des structures, en effet, 78.5% des structures présentent un pendage vers l'ouest (Fig. 45).



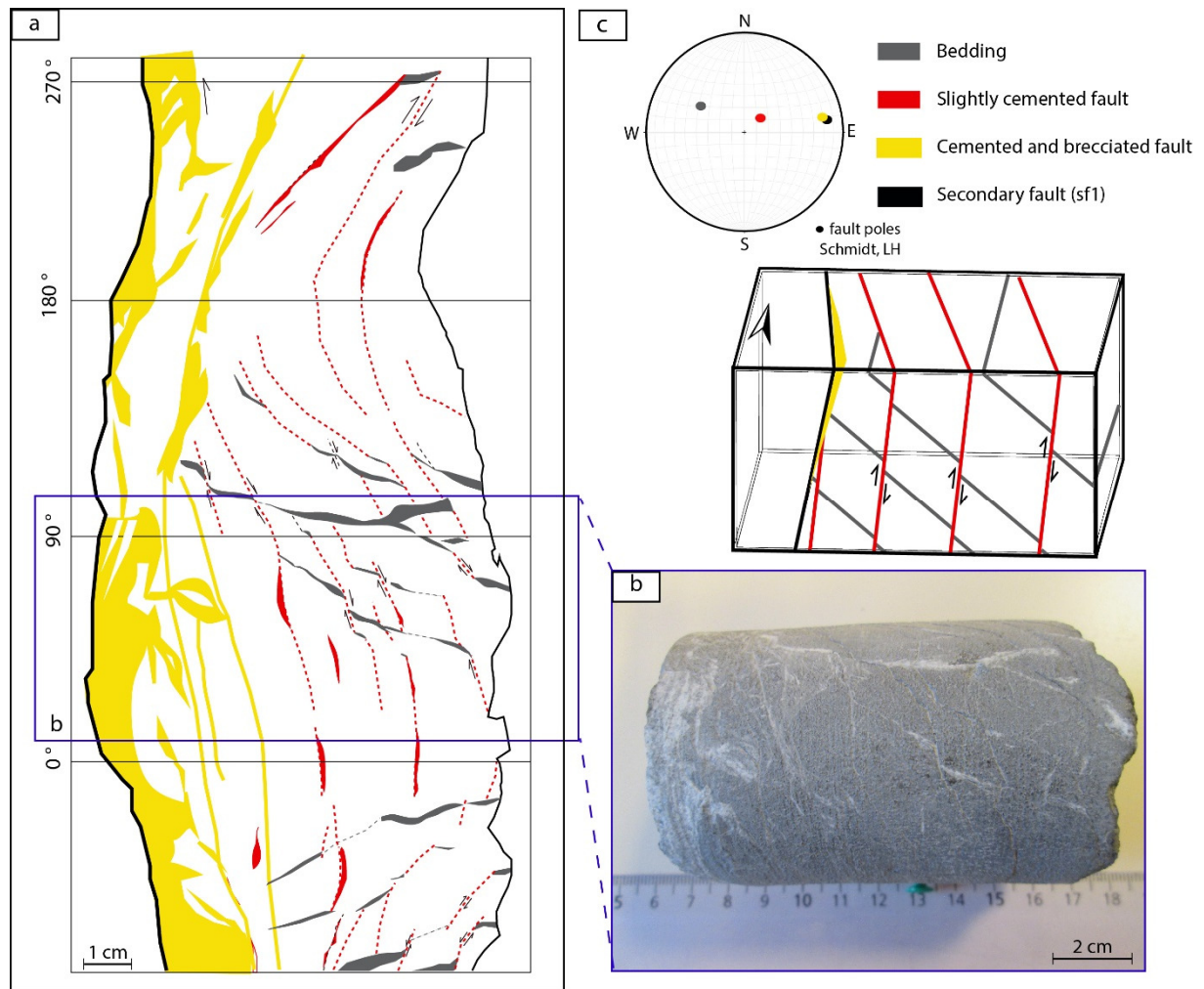
**Figure 44 :** Histogrammes présentant la densité de fractures (post-correction de Terzaghi) le long des forages (S2, HS1, R, M, S4 et S5), l'origine du graphique correspond à la tête du forage. La zone hachurée (FC) représente le cœur de faille. En noir sont représentées les fractures avec un pendage  $< 45^\circ$ ; en gris avec un pendage  $> 45^\circ$ ; les petites flèches représentent les failles; les flèches moyennes représentent les failles secondaires (sf1, sf2 et sf3); les grandes flèches représentent le plan principal de faille. Les failles/failles-secondaires polies/lustrées, cimentées et non cimentées sont représentées en rouge, vert et bleu, respectivement.





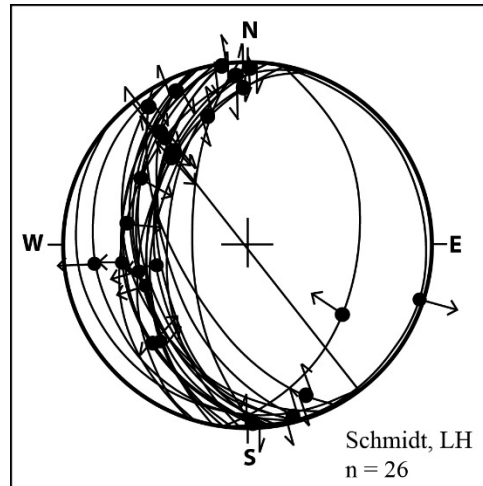
**Figure 45 :** Canevas de Schmidt, hémisphère inférieure où sont représentés les pôles des structures rencontrées dans chaque forage (HS1, M, R, S2, S4 et S5). Les fractures avec un fin remplissage de calcite, avec un remplissage de calcite et de brèche, les failles/failles-secondaires calcifiées, les failles/failles-secondaires non calcifiées, les failles/failles-secondaires lustrées/polies et les failles principales sont représentées par des petits cercles, triangles, carrés, losanges et des grands cercles, respectivement. Les structures appartenant au hanging wall sont représentées par des symboles pleins et les structures appartenant au footwall sont représentées par des symboles vides. La gamme de couleur représente la distance de la structure au plan de faille principale (interface entre le DZ/FC). La couleur rouge représente les structures les plus proches au plan de faille principale et la couleur noire représente les structures les plus éloignées du plan de faille principal.

Les quelques structures avec un pendage vers l'est peuvent correspondre à un basculement des plans de stratification sous forme de crochon associée à un mouvement sénestre des failles secondaires (Fig. 46).

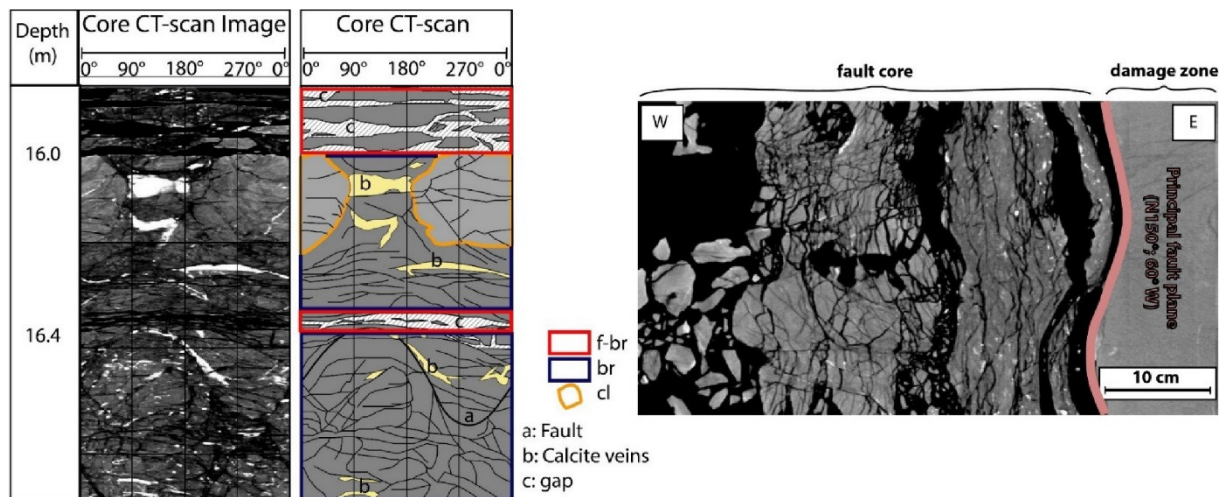


**Figure 46 :** a, Carte des structures d'une portion (11.08-11.20m) de carotte du forage R comprenant la faille secondaire sf1. b, Photo de la portion de carotte. c, Projection des poles des failles observées sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieur. Les plans de stratification, des failles finement cimentées, les failles cimentées et bréchifiées et la faille secondaire sf1 sont représentées en gris, rouge, orange et noir, respectivement.

Du point de vue du type de cinématique des failles; tous les types de cinématique (normale, inverse, décrochante dextre et sénestre) sont observées dans des proportions similaires (Fig. 47).



**Figure 47 :** Projection des failles rencontrées dans le forage INJ sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieur.



**Figure 48 :** A gauche: Portion du CT-scan de carotte du forage S4 présentant deux domaines de déformation différents ; la brèche de faille (f-br) et la brèche (br) en rouge et bleu, respectivement. (cl), claste de taille pluri-centimétrique présent dans la brèche, (a), faille traversant la totalité de la carotte, (b), veines de calcite et (c), vide, c'est-à-dire pas de récupération de matière lors de l'extravasation de la carotte. A droite: Portion du CT-scan du forage INJ comprenant le plan de faille principal (N150° ; 60°W°) séparant la zone de brèches de faille à l'ouest et le domaine endommagé à l'Est.

Le cœur de faille est ici considéré comme une zone de brèches de faille qui rassemble des zones de brèches de faille non-cohésives et des zones de brèches cohésives.

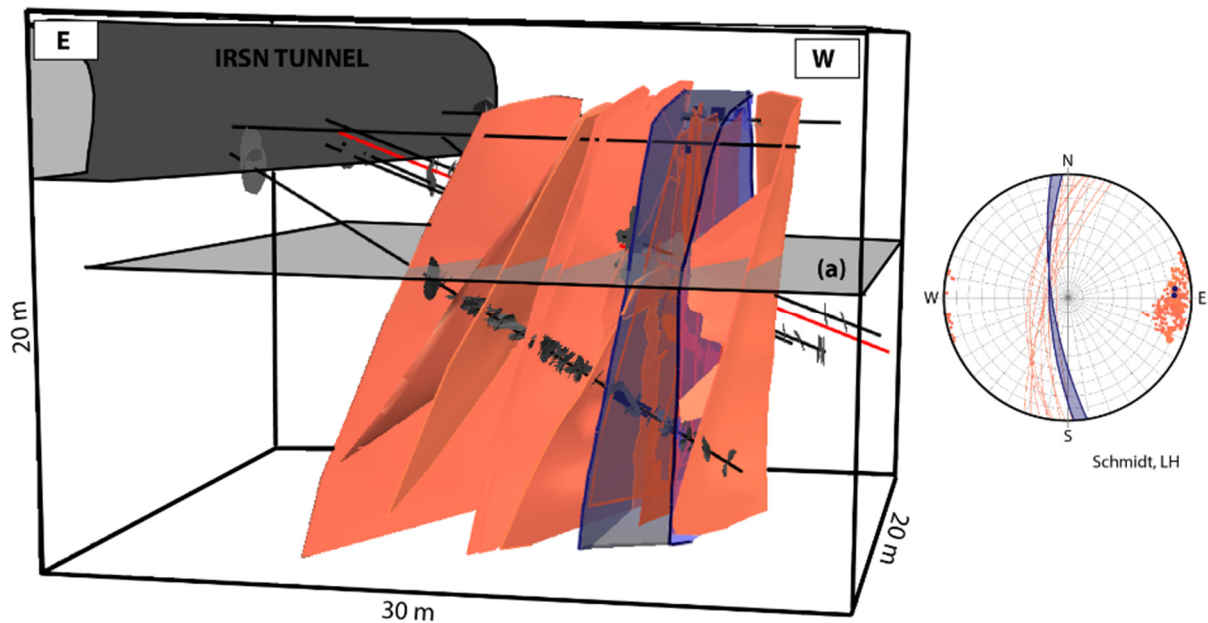
Le matériel non cohésif (f-br, Fig. 48) se présente sous forme de clasts disloqués de quelques centimètres d'épaisseur (<10cm) qui résulte de la faible récupération lors de l'extraction de la

carotte. La brèche cimentée est dominante dans l'ensemble du matériau récupéré où la brèche non-cohésive se présente ou s'intègre sous forme de zones minces dans la brèche cimentée. Ces zones représentent souvent un clivage disjonctif anastomosé et donc peuvent aussi être décrites comme de la scaly clay. Les zones les plus déformées n'ont pas de fragments visibles et apparaissent homogènes sur le CT-scan, elles peuvent donc être classées comme des zones de gouge plutôt que des zones de brèche (Fig. 48).

Les brèches cimentées (br, Fig. 48) contiennent des fragments centimétriques à pluri-centimétriques dans une petite proportion (<10%) de matrice riche en calcite. Les petits fragments présentent une fracturation intense avec une grande variabilité de d'orientation (Fig. 48). Les clastes pluri-centimétriques (>10cm, cl, Fig. 48) présentent une déformation relativement moins intense et apparaissent comme des blocs légèrement fracturés. Le CT (computed tomography) de ces blocs apparaît plus élevé que la formation avoisinante indiquant une plus faible porosité. Quelques veines de calcite épaisse (b, Fig. 48) se sont développées entre les fragments.

Avant d'établir un modèle conceptuel de la zone de failles, un modèle numérique 3D architectural haute résolution a été réalisé. Les méthodes de réalisation du modèle gOcad sont présentées dans le papier du 33th gOcad-meeting (§ 2.2.4). Nous avons considéré des plans moyens représentant des zones fracturées et un domaine rassemblant toutes les zones de FC (Fig. 49). Ainsi dans ce volume de 20×20×20m, on observe un domaine de déformation plus intense N170°-N180° ; 70°-80°W avec huit zones fracturées N000°-N030°; 70°-60°W de dimension entre 8 et >20m, principalement présent dans le compartiment supérieur de la zone de failles.

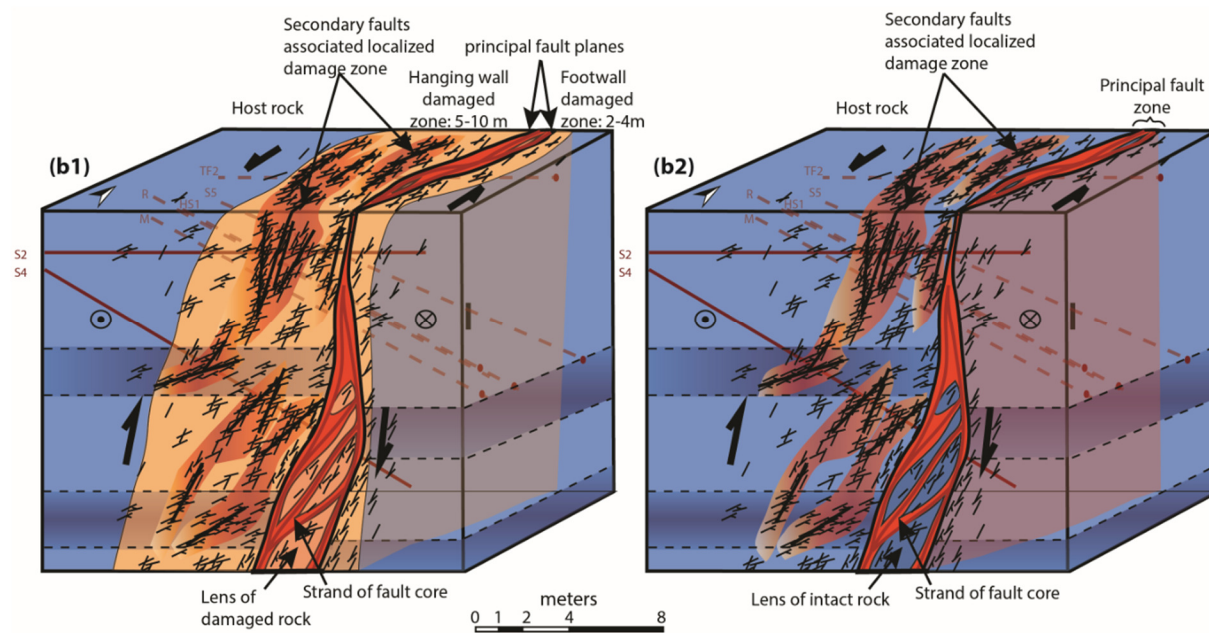




**Figure 49 :** *Vu du modèle 3D gOcad de la zone de failles F2. Les fractures/failles sont représentées en gris, les plans moyens représentant les zones fracturées sont représentés en rose et le domaine bleu englobe toutes les zones de FC.*

Deux modèles conceptuels de la structure 3D sont alors réalisés; (i) le premier modèle (b1, Fig. 50) propose une zone endommagée composée de fractures et de failles (calcifiées, bréchiques, non-calcifiées) de dimension  $<1\text{m}$  et de failles secondaires (calcifiées, bréchiques, non-calcifiées, polies/lustrées). Une grande partie des fractures est localisée à proximité des failles secondaires dont l'aspect (calcifiées, non calcifiées, polies/lustrées) peut changer latéralement. Le cœur de faille est composé de brèche de faille non-cohésive, de brèche cimentée pouvant contenir des clastes de taille pluri-centimétrique relativement intacts, de scaly clay et de zone de gouge. Les deux interfaces entre le cœur de faille et la zone endommagée sont interprétées comme les deux plans de faille principaux dont la dimension est supérieure à  $20\text{m}$ . L'épaisseur de la zone endommagée est asymétrique de chaque côté du cœur de faille. L'épaisseur du cœur de faille est très variable du cm au m, parfois le cœur de faille divisé en plusieurs zones de cœurs de faille, contenant des lentilles de zone endommagée. L'épaisseur de la zone endommagée ne dépend pas de l'épaisseur du cœur de faille. L'orientation des structures montre que la majorité des structures ont un pendage vers l'ouest et que le pendage des structures est très variable. Les observations suivant les différents forages mettent en avant une grande variabilité des structures suivant des profils perpendiculaires et parallèles à la direction du plan de faille principale. (ii) le deuxième modèle conceptuel (b2, Fig. 50) met en avant plusieurs zones de failles. Avec une zone de failles principale  $\text{N}170^\circ\text{-N}180^\circ$  et plusieurs zones de failles

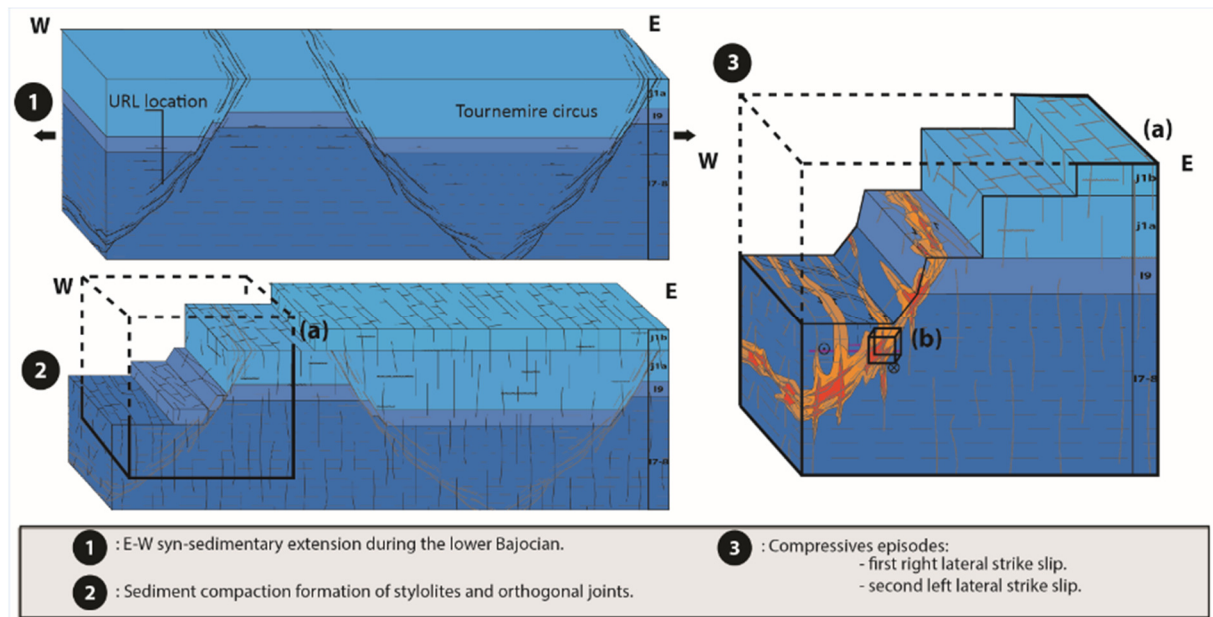
secondaires N000-N030. Avec des zones endommagées localisées à proximité des zones de failles secondaires.



**Figure 50 :** (b1) et (b2) sont deux modèles conceptuels. (b1) met en évidence une zone de failles composée d'un cœur hétérogène avec de fortes variations d'épaisseur et d'une zone endommagée d'épaisseur asymétrique de part et d'autre du FC. Le FC est séparé de la DZ par les plans principaux de failles. Les zones fortement fracturées de la zone endommagée sont concentrées à proximité des failles secondaires. Le modèle conceptuel (b2) met en avant plusieurs zones de failles; avec une zone de failles principale et plusieurs zones de failles secondaires.

Nous proposons pour expliquer la structure 3D de la zone de failles F2 par l'intervention d'une faille normale syn-sédimentaire observée à proximité du laboratoire de l'IRSN. La présence de cette faille normale expliquerait la présence quasi-exclusive des structures à pendage ouest, la présence des failles normales dans la zone endommagée et l'épaisseur importante de la zone endommagée dans le hanging wall. La phase extensive E-W à NW-SE durant le Lias au Malm (Constantin et al., 2004) crée des failles normales syn-sédimentaire N030°-N050° (Fig. 51-1). Au cours du Malm, la phase extensive devient N-S et crée les failles syn-sédimentaires N090°-N120° (failles de Cernon et de St Jean d'Alcapies). Lors de la subsidence post-Bajocien de la série sédimentaire, deux familles de joints relativement orthogonales et verticales se développent (Fig. 51-2). La famille N160°-N190° est plus développée que la famille N080°-N110°. Cet épisode s'exprime par la formation de glissements banc sur banc et des structures à faible pendage observés dans les forages. La première phase de compression Pyrénéenne (NNE-

SSW) développe et réactive les joints N160°-N190° en décrochement dextre. La fracturation et le cœur de faille de F2 se développent principalement au niveau de l'intersection entre les failles N160°-N190° et la faille normale syn-sédimentaire N030°-N055°. Au cours de la seconde phase de compression Pyrénéenne SSE-NNE, F2 est réactivée en décrochement sénestre associée à un système de Riedel N130°-N140° (Fig. 51-3).



**Figure 51 :** (1) Extension E-W du Bajocien inférieur et failles normales syn-sédimentaires N030°-N040°, (2) formation syn-compaction sédimentaire des deux familles de joints (N160°-N190° et N080°-N110°). (3) Compression Pyrénéenne et formation de F2 au niveau de l'intersection entre la faille normale syn-sédimentaire et les joints N160°-N190°. Jeu décrochant dextre au cours de la première phase de compression Pyrénéenne et sénestre au cours de la deuxième phase de compression Pyrénéenne. Les failles N130°-N140° représentent un système de Riedel associé au mouvement sénestre de la zone de failles.

### 3.2 Article Lefèvre et al., 2016: 3D structure of fault zones in shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France).

# **Three-dimensional fault zones architecture in shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France)**

Mélody Lefèvre<sup>a,\*</sup>, Yves Guglielmi<sup>a</sup>, Pierre Henry<sup>a</sup>, Guillaume Martin<sup>a</sup>, Juliette Lamarche<sup>a</sup>,  
Pierre Dick<sup>b</sup>, Raymi Castilla<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, CEREGE UM34, 13545 Aix en Provence, France

<sup>b</sup> IRSN, Avenue du Général Leclerc, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

<sup>c</sup> TOTAL, CSTJF, Avenue Larribau, 64018 Pau, France

[lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr); [guglielmi@cerege.fr](mailto:guglielmi@cerege.fr); [henry@cerege.fr](mailto:henry@cerege.fr); [Guillaumartin@wanadoo.fr](mailto:Guillaumartin@wanadoo.fr);  
[Lamarche@cerege.fr](mailto:Lamarche@cerege.fr); [pierre.dick@irsn.fr](mailto:pierre.dick@irsn.fr); [raymi.castilla@total.com](mailto:raymi.castilla@total.com)

## **Corresponding author:**

\* Mélody Lefèvre +33 (0)4 13 55 12 57; [lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr)

## **Keywords:**

Fault zone; 3D high resolution imaging; drill-core; shales

### **3.2.1 Abstract**

Variations of hydro-mechanical properties in relation to fault slip in shales are of interest for both academic and applied geosciences, to predict and control fluid migration such as hydrocarbons. The present study is focused on a metric scale three-dimensional high resolution imaging of a fault zone structure in shales. Eight boreholes were drilled crossing perpendicularly to a strike-slip fault zone in Toarcian shales (Tournemire, South of France). The fault is located in the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) underground research laboratory (URL). Macroscopic and microscopic cores and borehole walls analyses as well as cores CT-scans reveal that the fault zone is characterized by a juxtaposition of deformation facies rather than a well-defined core-damage zone architecture as usually described in the literature. Main fault characteristics are: (i) Asymmetric damage zones in the foot and hanging walls display different thicknesses, no systematic increase in fractures (dimension < 1m) density towards the mean fault plane but close the secondary faults (dimension > 1m); (ii) A high variability in fracture dip while most structures strike within 40° of the mean fault plane; And (iii) fault cores are composed of fault breccia, partially cemented with intact clasts displaying strong lateral variation in thickness. We show that complexity is related to both multiphase activations of the fault and the strong anisotropic behavior of shales at failure.

### **3.2.2 Introduction**

Permeability and retention capacities of shale formations are fundamental constraints for potential storage of gas and liquids. Studies conducted for many years in underground research laboratories at Bure (France) in Callovo-Oxfordian Clay (Distinguin and Lavanchy, 2007; Samper et al., 2008), Mont Terri (Switzerland) in Opalinus Clay (e.g., Fernández et al., 2014), and Tournemire in Toarcian shale (e.g., Tremosa et al., 2012; Wakim et al., 2009) showed that

intact shales may act as efficient low diffusivity natural barriers for the storage of radioactive waste, CO<sub>2</sub> and hydrocarbon reservoirs (Boisson et al., 2001; Busch et al., 2008).

Nevertheless, intact shale properties may severely be disturbed by natural fractures and fault zones. A fault zone may be described as a thick structure containing one or several cores surrounded by damage zones consisting of transitional zones between the intensely deformed core and the intact host rock (Caine et al., 1996; Chester et al., 1993; Wibberley et al., 2008; Faulkner et al., 2003; Faulkner et al., 2010). In the fault core the deformation is characterized by a few shear layers where most of the fault slip concentrates, and by various structures, such as slip planes, breccias, gouge, cataclasites, ultracataclasites, mylonites and ultra-mylonite (e.g., Kim et al., 2004; Clausen et al., 2003; Wibberley and Shimamoto, 2003). The result is a complete reorganization of the texture of the intact rock in the fault core. The damage zone is characterized by a high fracture density and the presence of subsidiary faults, veins, joints and folds (e.g., Berg and Skar, 2005; Jourde et al., 2002). The intact rock texture may still be observed between fractures. The architecture of the damage zones and fault cores and the local stress field may give the fault zone the role of a fluid conduit, a barrier or a combined conduit-barrier (Agosta et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010; Matonti et al., 2012). Indeed, the increased fracture density in the damage zone may lead to an increased permeability compared to intact rock (Faulkner, et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010) when fractures are hydraulically connected. In contrast, fault cores containing breccia to ultra-mylonite structures of grain size reductions (Billi et al., 2003) may display very low permeabilities. To define the drainage potential of a given fault zone, it is thus necessary to characterize its architecture, as well as its current and past stress/strain histories. In this paper we first characterize a fault zone architecture in shales, imaging at the metric scale the three-dimensional internal structures using borehole and core data. This includes macroscopic observations of core samples, optical images of borehole walls and of core CT-scans. We compare the studied fault zone characteristics to

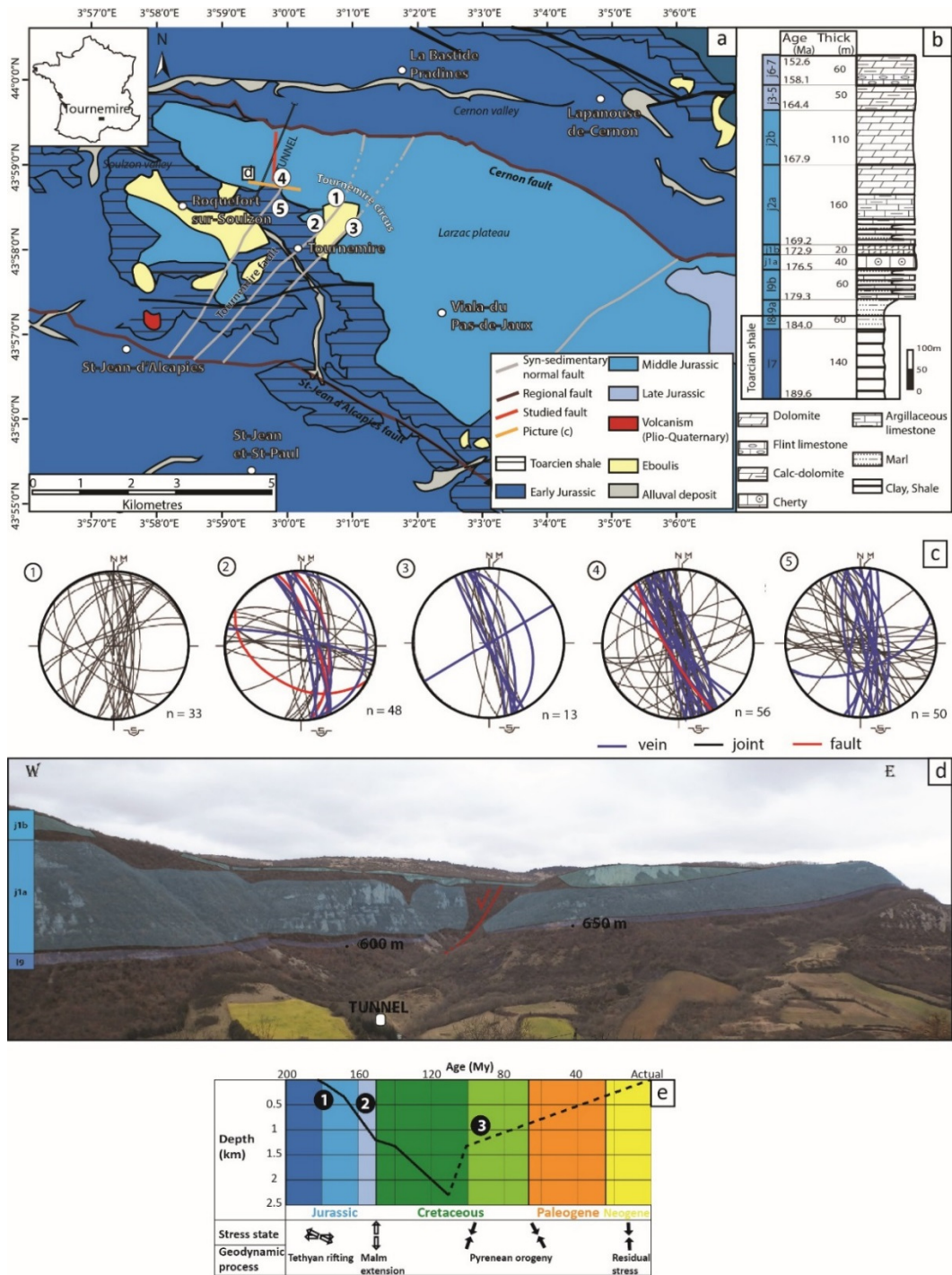
other fault zones described in the bibliography to highlight the typical features of fault zones in shales.

### **3.2.3 Geological setting around the Tournemire area**

The Tournemire area is located on the Mesozoic western part of the French Causses basin (Fig. 1). The basin is located on the south of the Massif Central, and is characterized by Permian to Tithonian sedimentary series.

During the Lias period, the extensional Tethyan continental rifting causes tectonic subsidence, associated with shale and limestone sedimentation and E-W and NE-SW trending syn-sedimentary normal faults activity (Giot et al., 1991; Barbarand, 2001). N030° to N055° syn-sedimentary normal faults are present in the Tournemire area (grey faults in Fig. 1a and Fig. 1d). In the Tournemire cirque and close to the Tournemire URL, the syn-sedimentary normal faults are sealed by the upper Bajocian limestones (Fig. 1a and 1d). These faults (brown lines in Fig. 1a) are bounded by the N090° to N120° Cernon fault in the northern part and by the St Jean d'Alcapies fault in the southern part, both active during a N-S Malm extension (Blès et al., 1989; Martin and Bergerat, 1996, Constantin et al., 2002). They extend down to the basement and are inherited from the Hercynian orogeny (de Charpal et al., 1974; Bonijoly and Delpont, 1982). The tectonic subsidence lasts until the end of the lower Cretaceous. The Toarcian shales which are the target of this study were thus buried at a maximal depth of 2.3 to 2.4km (Fig. 1e, Séranne et al., 2014). The predominance of two directions of sub vertical joints N160° to N190° and N080° to N110° in the Tournemire area (Fig. 1c) intersecting stylolitic joints parallel to bedding is interpreted as an early syn-compaction fracturing.





**Figure 1:** a, the Causse geological map. The studied fault is indicated in red. b, stratigraphic log (i7 and i8-9a; Early and Late Toarcian-Early Aalenian, i9b; Late Aalenian, j1a and j1b; Early and Late Bajocian, j2a and j2b; Early and Late Bathonian, j3-5, Callovian-Early Oxfordian, j6-7 Late Oxfordian-Early Kimmerigian). c, Schmidt projection of joints, veins and fault planes in 1, 2, 3, 4 and 5 sites. The site location are presented in Fig. 1a. d, syn-



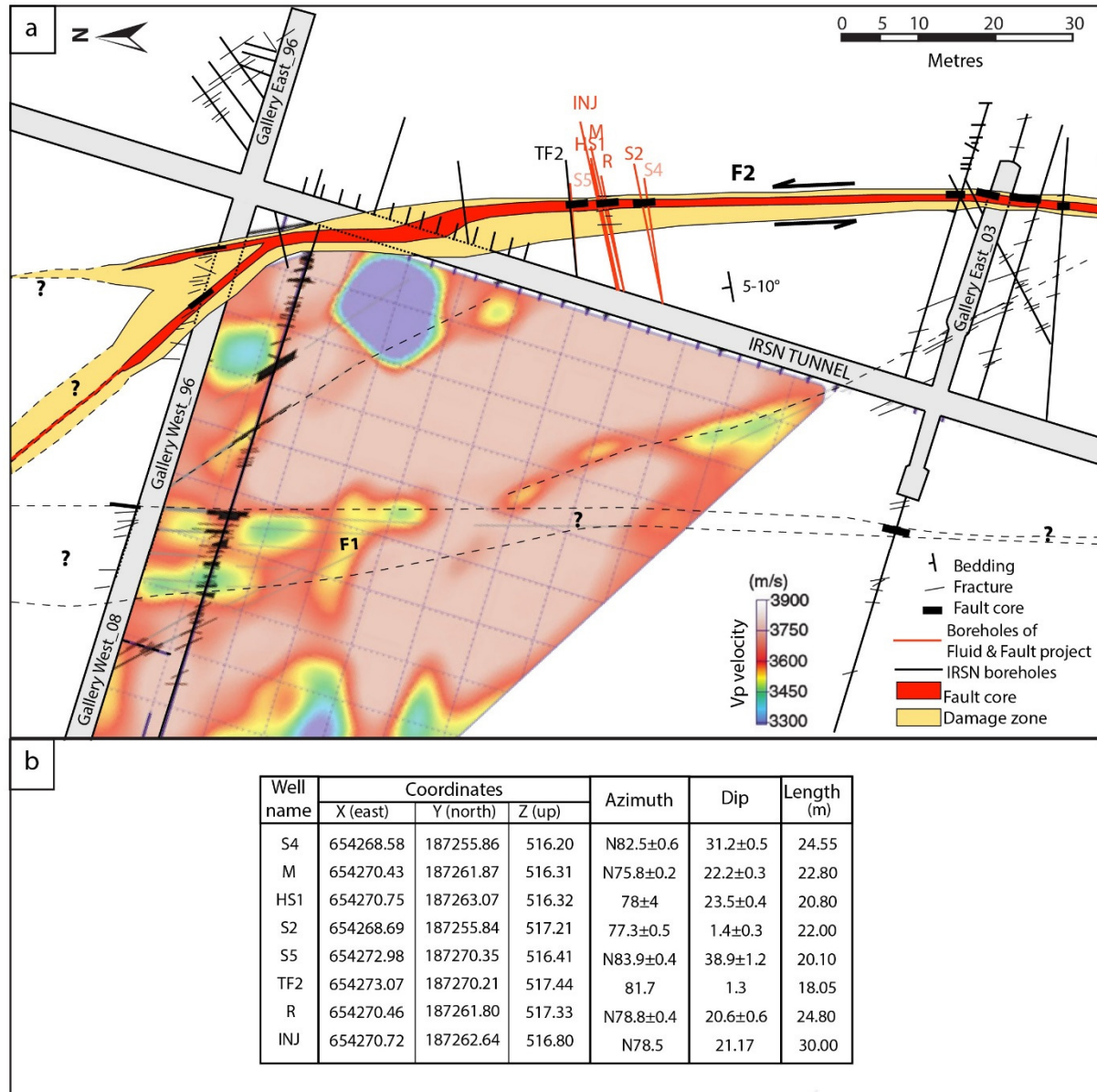
*sedimentary normal fault close to the URL. e, Tournemire shale subsidence curve (modified from Séranne, 2014 based on data from Barbarand et al., 2001; Séranne et al., 2002 and Peyand et al., 2005).*

The Cernon and the St Jean d'Alcapies faults are reactivated as reverse faults during the Pyrenean compression with a cumulative vertical inverse offset of 100 to 400m (Constantin et al., 2002). Compression was characterized by two local pulses with  $\sigma_1$  first N200° to N210° and then rotating to N160° to N170° (Constantin et al., 2002; Constantin et al., 2004). In the volume bounded by the Cernon fault and the St Jean d'Alcapies fault, the compressive regime induced secondary decametre to kilometre scale faults that preferentially grow at the intersection of N160° to N190° sub vertical joints (Fig. 1c) with the N030° to N055° syn-sedimentary faults. This is typically the fault pattern observed in Tournemire Underground Research Laboratory (Fig. 1a and Fig. 2).

### **The Tournemire Underground Research Laboratory (URL)**

The Tournemire URL is located in the Toarcian shales. The site is used by the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN) to study the confining properties of the argillaceous formation (Cabrera et al., 1999; Boisson et al., 2001). The URL is nested in a monoclinical tilted 5° to 10° to the North made of 250m thick shales of 50m thick Domerian and 200m thick Toarcian series lying between two 300 to 500m thick dolomitic layers of Bathonien-Bajocian-Aalenian (on top) and Carixian-Sinemurian (at bottom) age (Cabrera et al., 1999). The shale's mineral composition is relatively homogeneous within the upper Toarcian section, with more than 50 wt.% clay minerals, dominantly illite and illite/smectite, 10-20 wt.% calcite, and 10-20 wt.% quartz. Other components (less than 10 wt.%) include detrital micas, feldspars, pyrite and Fe-dolomite, and organic matter (Boisson et al., 2001; Tremosa et al., 2012). The shale has a porosity of 10 to 13 %, (Dick et al., 2015) a water content of 4 to 6 wt.% and a

hydraulic permeability of  $10^{-14}$  to  $10^{-15}$  m/s ( $10^{-21}$ - $10^{-22}$  m<sup>2</sup>) in the laboratory and of  $10^{-11}$  to  $10^{-14}$  m/s ( $10^{-18}$ - $10^{-21}$  m<sup>2</sup>) in situ (Bonin, 1998; Boisson et al., 2001; Cabrera et al., 1999; Courbet et al., 2013).



**Figure 2:** a, IRSN URL map showing faults (F1 and F2), P-wave velocity map (Breteau et al., 2014) and boreholes location. b, borehole specifications (X, Y, Z Azimuth, dipping and length).

The URL is affected by two main fault zones (F1 and F2) separated by slightly deformed rock (Breteau et al., 2014). The location and the geometry of the fault zones were determined

using boreholes drilled by IRSN and mapping the URL galleries walls (Fig. 2). Both F1 and F2 faults have a similar strike and dip respectively of N170° to N010° and 60° to 80°W (Fig. 2). Faults are suffered both right-lateral and left-lateral motions (Constantin, 2002). Some smaller (meter to decametre long) N130° to N150° trending faults connect F1 and F2 (Constantin, 2002; Bretaudeau et al., 2014).

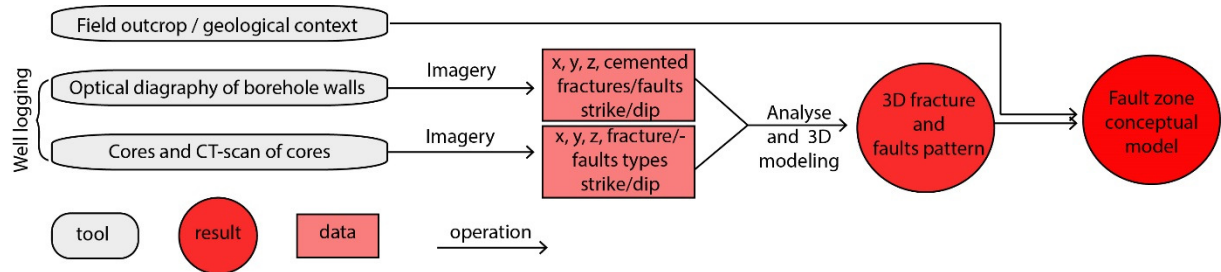
The orientation of the present day stress tensor, determined with a series of leak-off tests performed in a vertical 180m deep borehole (Cornet, 2000), is identical to the paleo-stress tensor's orientation during the second Pyrenean pulse, highlighting a residual strike slip regime on the studied fault. At the present burial conditions of the URL, the stress tensor is characterized by a  $\sigma_1 = 4 \pm 2$  MPa, horizontal and oriented N162°±15°E trending,  $\sigma_2 = 3.8 \pm 0.4$  MPa, dip=83-82° and azimuth N072° and  $\sigma_3 = 2.1 \pm 1$  MPa, dip=7-8° and azimuth N072°. We may thus consider that this state of stresses has been at steady-state since the end of the uplift at the Eocene times.

### 3.2.4 Methodology

In this paper, we focus on fault F2. It is >100m long with a vertical offset estimated at 4 to 5m (Dick et al., 2015). In the main tunnel, eight inclined boreholes were drilled perpendicular to the fault zone direction and long enough to completely cross the fault zone (Fig. 2a). The borehole lengths range between 18 to 30m long. They are trending N076° to N084°, plunging 01° to 38° and their diameters are 92 to 146mm (Fig. 2b).

Optical images of borehole walls, images of core CT-scans and cores are used to determine the location and orientation of fractures, and fault rocks along boreholes. All these structures are integrated in the gOcad three-dimensional geomodeler to extract the distribution of fractures/faults in the damage zone, and to build a three-dimensional structural model of the studied volume. We first describe the observed fault rocks, then we propose a model of the fault

architecture. These results are finally discussed towards the regional geological setting and to other conceptual fault architecture models to extract specificities of fault zones in shales (Fig. 3).



**Figure 3:** Fault architecture characterization workflow.

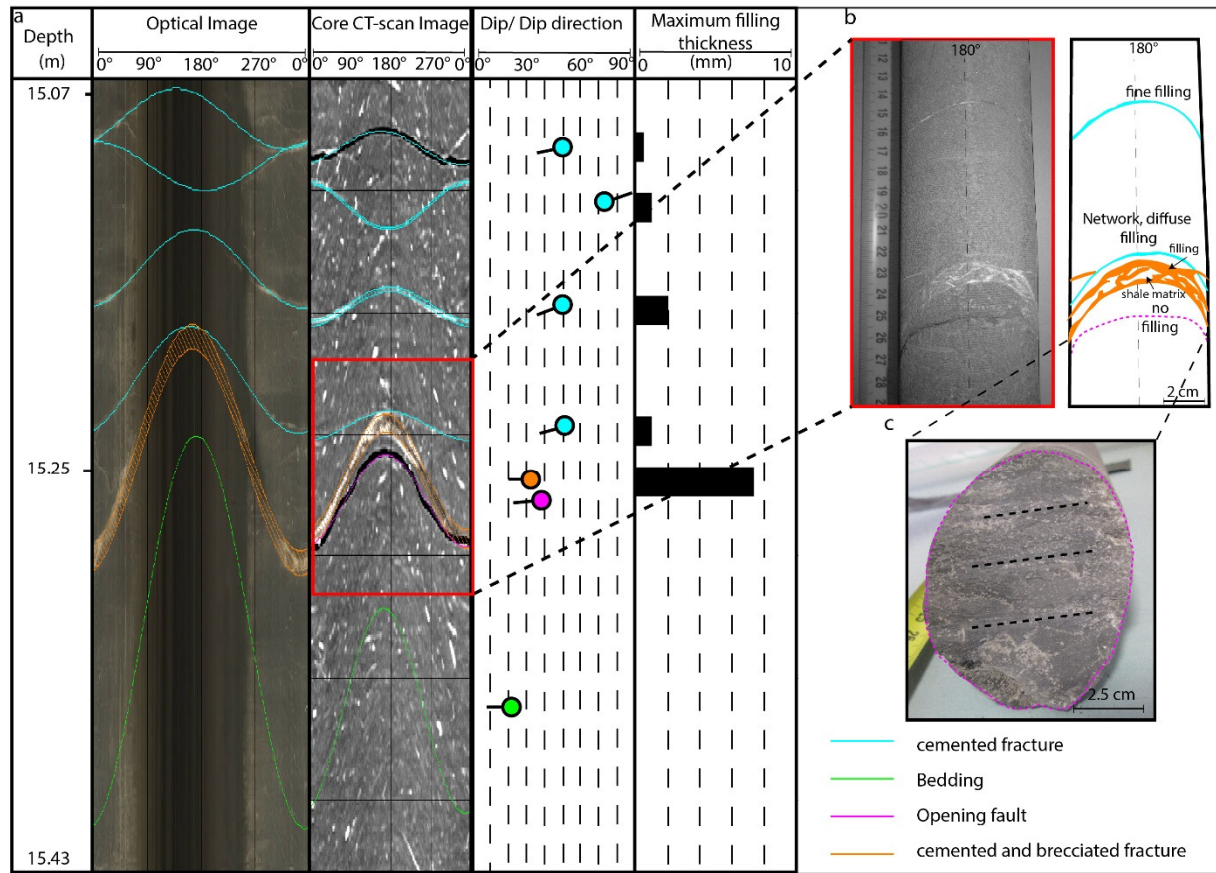
Images of borehole walls obtained with the well logging system OPTV (borehole Optical Tele-Viewer probe) were analyzed to identify and characterize the fault zone (Hubbard et al., 2012). The OPTV probe contains a 3 axes magnetometer and one optical head, composed of a camera and a conical mirror. The optical head is used to provide a continuous, high resolution (1140 pixels/360°) image of the borehole wall. The magnetometer allows orienting the optical imaging. In many lithologies, this device allows the accurate location of the faults/fractures (Hubbard et al., 2012).

Cores were acquired continuously and described on site, then analyzed by CT-scanning. The CT-scan is a non-destructive analysis method by computed tomography X-ray absorption. In our study we used a Discovery CT750HD that allows the 3D reconstruction of CT (computed tomography) image of core samples with a  $187.5 \times 187.5 \times 625 \mu\text{m}$  voxel resolution.

Faults and fractures are represented by sinusoids on the optical and the CT-scan images of the unwrapped borehole-walls and cores. Dip and strike of faults/fractures are given respectively by the amplitude and phase of the sinusoids. Structures were picked on the optical image of borehole walls and on the core CT-scan image using WellCad software. Orientations were corrected using borehole trajectography and calliper data.

On the optical image of borehole walls and CT-scan images of core, the following structures were identified:

- (i) Veins appear as white sinusoidal lines in image log. Filling is rarely regular and may be discontinuous along the fracture planes. To compare the filling thicknesses between veins, we picked the maximum filling thickness of each vein (orange and blue, Fig. 4). As observed on cores many veins display a shear component of movement, characterized by the presence of slickenside on vein surfaces or by shear vein geometry where filled voids appear to be connected by shear surfaces with thin or no cement.
- (ii) Bedding planes appear as color variations defining thin shaly layers (green, Fig. 4). Bedding is clearly visible in the intact rock of the hanging wall. And more difficult to observe close to the fault.
- (iii) Fractures and faults without filling are generally not visible on optical images and thus were mainly identified on the cores and CT-scan images.
- (iv) We call faults open fractures with indication of shear. Three fault types have been observed: cemented faults that have calcite slickensides, un-cemented faults that have shale slickensides and polished faults with shiny surface without slickensides.



**Figure 4:** a, Example of Faults/fractures data acquisition on S4 borehole images. From left to right, the borehole wall image, the core CT-scan, dip and dip direction of digitalized faults/fractures and maximum filling of faults/fractures. b, Three types of structures on a core sample; cemented fracture, opening fault and cemented and brecciated fractures represented with blue, pink and orange color, respectively. c, Photo of the open fault hanging wall

Since a low angle between fractures and borehole axis may cause an underestimation of the number of fractures intersected by the borehole, we conducted a geometric correction of fractures densities measured along the boreholes using Terzaghi (1965), Einstein and Baecher (1983) and Gauthier (2000) method. First, the fractures are located and the distances between fractures are measured along boreholes. Second, the angle between borehole orientation and fracture orientation ( $\theta$ ) is calculated for each fracture. To avoid underestimations, each fracture is statistically weighted, depending on the inverse sine of angle  $\theta$  following Jorhi (2014)

method. A cutoff on the minimum angle  $\theta$  was applied at  $10^\circ$  (because an angle  $\theta$  close to zero gives an infinite corrected weight). In this study, very few fractures make an angle  $\theta$  lower than  $10^\circ$  with the borehole axis.

### **3.2.5 Results**

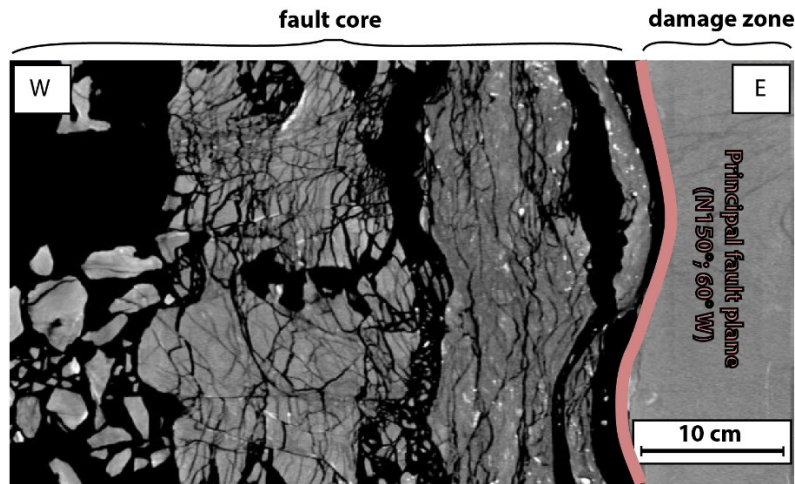
#### **3.2.5.1 Cross hole correlations of fault structures**

The creation of three-dimensional fault/fracture planes in gOcad involves three steps:

- (i) Digitalizing the main fault zone structures on the borehole's optical logging images.
- (ii) Importing the borehole images and the interpreted structures as curves in gOcad. The borehole's geology is reconstructed by winding the image and the curves around a cylinder modelling the well envelope.
- (iii) Building the 3D geometry of the structures: For each digitalized fractures trace, an initial triangulated surface is built as its medium surface. The areal dimensions of this medium plane are defined to include the borehole section. Then, the obtained surface mesh is densified and used to interpolate more accurately a complex surface that best fits the structure curve/trace on the borehole wall using DSI (Mallet, 2002). Surfaces obtained are represented in gray in the figure 11.

The main fault surfaces are defined with three criteria. First, it bounds the thicker fault core (Fig 5). Second, it is continuous between boreholes. Third, the average surface dip and dip direction built with gOcad reasonably matches with fault F2 observed at the intersections with the URL's galleries. This means that the main fault surface length is assumed greater than the maximum distance between the boreholes (>20m).





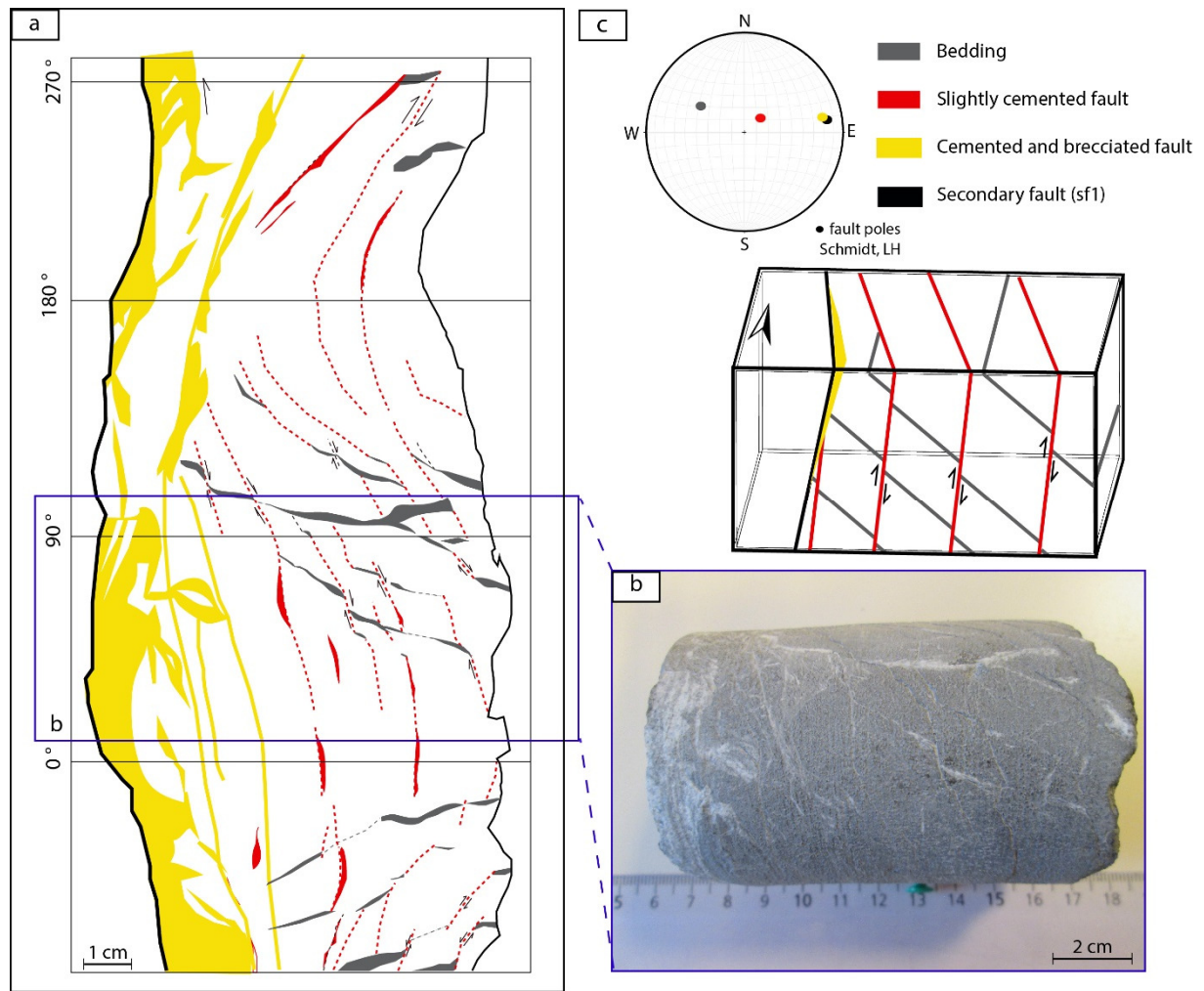
**Figure 5:** Core CT-scan sample of INJ borehole displaying one principal fault plane (N160°; 60°W; Left lateral strike slip) separating fault breccia (west part) and fractured damage zone (east part).

In details, several secondary faults are observed in the boreholes, only a few intersecting all the boreholes. For example, three secondary faults are observed in boreholes HS1, R and M which are 1 meter spaced, which means their dimensions exceed 1 meter (sf1, sf2 and sf3, Fig.7).

sf1 is associated with a fault observed at 10.96m in the HS1 borehole, at 10.81m in the M borehole, at 11.08m in the R borehole and at 11.0m in INJ borehole (Fig. 6 and Fig. 7). sf2 secondary fault is associated with a fault observed at 11.80m in the HS1 borehole, at 11.91m in the M borehole and at 11.83m in INJ borehole (Fig. 7).

Secondary faults strike N172° to N015° and dip 45° to 82°W. They are almost exclusively located in the hanging wall of the main fault where their position is apparently poorly dependent on the distance to the principal fault plane. The aspect of these secondary fault zones varies laterally. For example, sf3 secondary fault corresponds to a polished fault at 13.15m in HS1 borehole and to a cemented with calcite fault at 13.61m in M borehole. The same fault vanishes or ends into a cemented fracture network between 13 and 14m in R borehole.





**Figure 6:** a) Fault map of the R borehole core sample including sf1 secondary fault (11.08 to 11.20m to the borehole head). b) Photo of the R borehole core sample. c) Projection of fault poles in Schmidt stereogram. The bedding, slightly cemented fault, cemented and brecciated fault and sf1 secondary fault are represented in grey, red, orange and black, respectively (corrected to the borehole angle).

Interestingly these secondary faults developed a core and a damage zone respectively centimeter and meter thick. An interval of R borehole (between 11.08 and 11.20m) including sf1 secondary fault zone was studied in details (Fig. 6). sf1 fault zone displays a partly cemented and brecciated core N168° to N177°; 70° to 75°W (yellow, Fig. 6) associated with a dissymmetric meter thick damage zone mainly located in the fault eastern footwall. The shear directions of the calcite slickensides observed on the fault surface display a left lateral strike

slip movement with a reverse component. In the sf1 footwall damage zone, two types of discontinuities are observed (with small vertical < 1cm offsets): N020°; 40°E bedding planes (grey, Fig. 6) localized centimeter scale cemented zones (< 0.5cm thick) and slightly cemented N160°; 80°W faults that crosscut the bedding parallel faults with 1 to 2cm apparently reverse offsets (red, Fig. 6C). Cements on these faults appears as a continuous < 1cm thick calcite layer. In this section, faults with a high dip crosscut the low dipping ones but the opposite is observed in the sf1 damage zone in INJ borehole.

The bedding parallel shearing observed could be consequence of folding. The geometry of the calcite filling on sf1 suggests some of the low angle faults bound dominos that end on sf1 and thus may not predate but be syn-kinematic.

Other remaining faults and fractures do not correlate between holes, meaning that the lengths of these faults/fractures lie between 0.1 and 1m which respectively correspond to the borehole diameter and minimum borehole spacing.

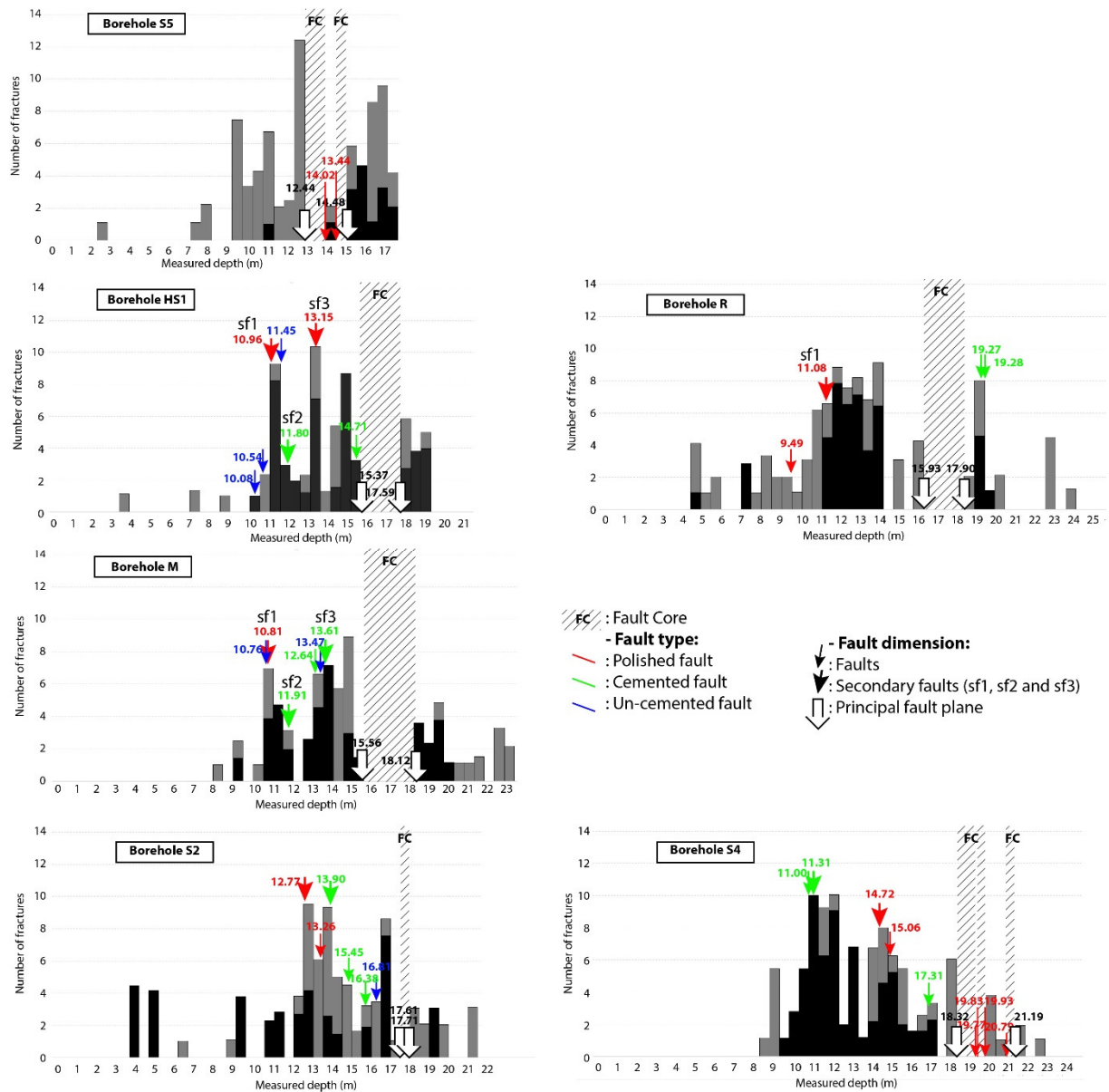
### **3.2.5.2 Fault and fractures properties**

90% of fractures and 10% of faults. 85% of fractures (included veins) are filled with calcite and 15% are filled with breccia and with fine-grained material. Many veins display a shear component of movement that is indicated by the shear vein geometry but the displacement is generally less than on true faults. We measured the following attributes to quantify the damage zone properties (i) the density distribution of fractures and faults and spatial occurrence, (ii) the thickness of the damage zone and (iii) fractures geometry (strike and dip) and fault kinematics.

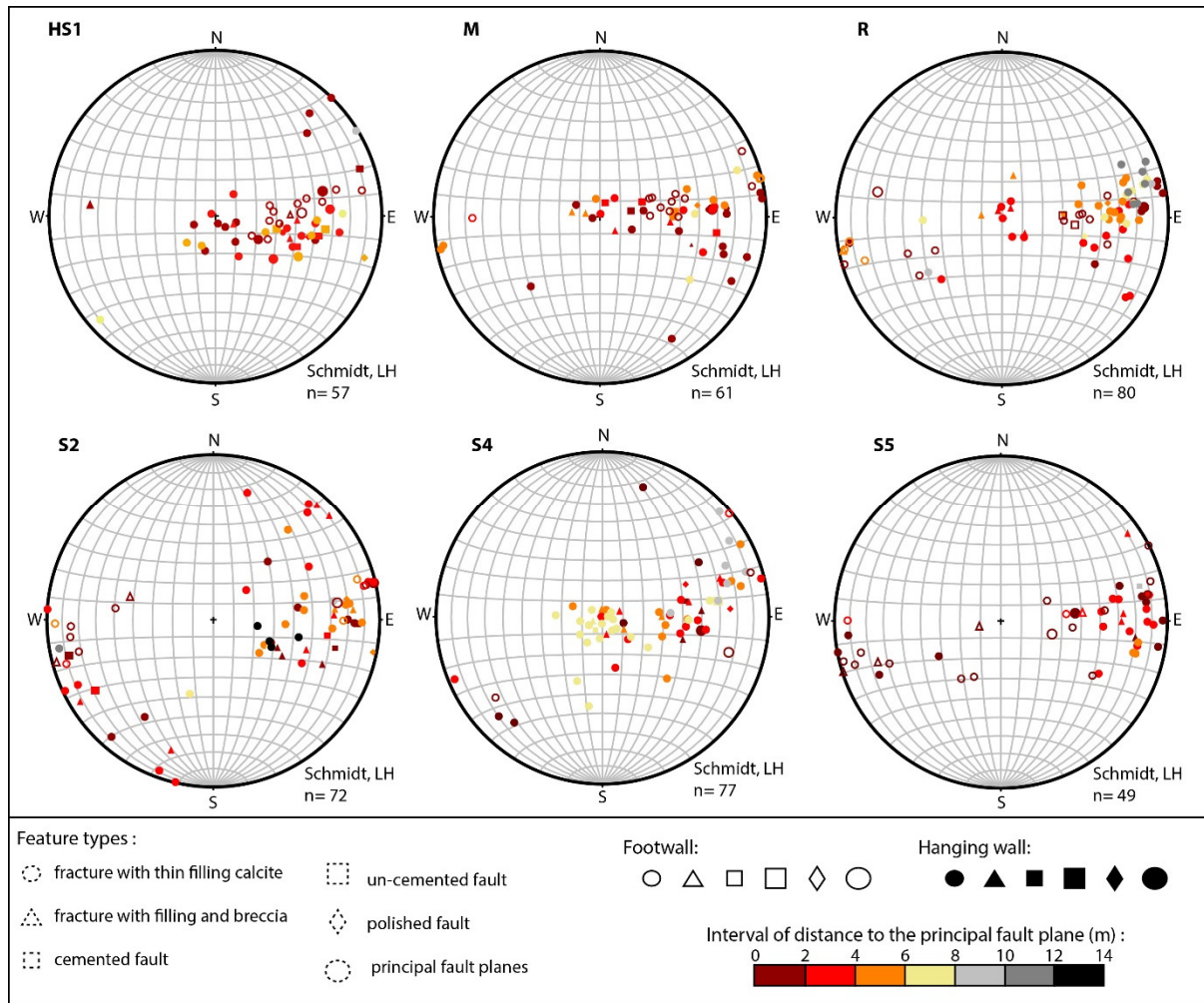
Histogram of fracture density are based on OPTV and CT-scan observations. For all boreholes, maximum values of fracture densities are found in the main fault hanging wall close to secondary faults. The two main fault planes do not coincide with the zones of highest fracture

density. Indeed, decreases in fracture densities are observed close to the principal fault plane (black arrow, Fig. 7) in boreholes HS1, M, R and S2. In boreholes R and S4, intervals of 0.5m are not affected by fracturing, up to one-two meters away from the principal fault plane (Fig. 7), this observation could be explain by the presence of the lithologic heterogeneity. Several fracture density peaks are observed. For example in HS1, 2-3 fractures are observed between 10 and 10.5m, 8 to 9 fractures between 10.5 to 11m, and 2 to 3 fractures between 11 to 11.5m and in borehole R where a peak is observed between 11 and 14m (Fig. 7). These peaks are often associated with the secondary fault (Fig. 7) damage zones. In S2 and S4 boreholes, the density peaks between 12.5 to 13.0m, 13.5 to 14m (S2), 11.0 to 11.5m and 14.5 to 15.0m (S4) possibly correspond to the secondary faults localized at 12.77m and 13.90m in S2 borehole, at 13.31m and 14.72m in S4 borehole (Fig. 7).

The majority of fractures strike N160° to N020° (Fig. 8). Faults and fractures have similar directions. Vertical faults/fractures display the greater variability in strikes. Indeed, fractures dipping less than 45° display N170° to N010° strike variations, whereas fractures dipping more than 45° display N160° to N020° strike variations. The direction of faults/fractures is apparently poorly dependent on the distance to the main fault plane. For example, in the R borehole, close to the main fault plane (< 4 m), two groups of fractures are observed: N170° to N010° <10°W and N165° to N030° >40°W, whereas in the S5 borehole, the first group is missing. In the S4 borehole between 6 and 8m from the principal fault plane, there is a majority of low angle structures. In the R and M boreholes, structures lying between 6 and 8m to the principal fault plane having a significantly higher dip (>50°, beige color). In the S5 and S2 boreholes, the 6 - 8m interval is intact (Fig. 8).



**Figure 7:** Histograms of the fractures density corrected from borehole orientation using Terzaghi method (1965). The x-axis is the borehole head. The hatched area denoted FC represents the fault breccia. In black: fractures with a dip  $< 45^\circ$ ; grey: fractures with a dip  $> 45^\circ$ ; small arrows: minor faults; middle arrows: secondary faults (sf1, sf2 and sf3); large arrows: principal fault plane. Polished fault, cemented fault and un-cemented faults are represented in red, green and blue, respectively.

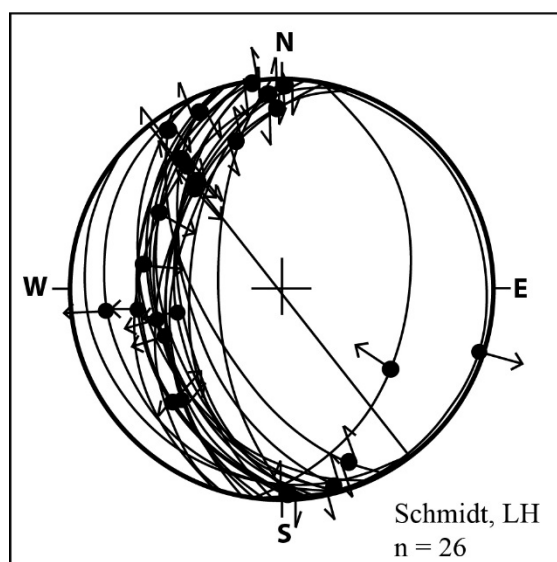


**Figure 8:** Schmidt stereographs, lower hemisphere, with pole projections of the different types of structures encountered in each borehole. Fracture with thin calcite filling, fracture with filling and breccia, cemented fault, un-cemented fault, polished fault and principal fault planes are represented by small circle, triangle, square, diamond and large circle, respectively. The structures present in the footwall are represented with blank symbols and the structures present in the hanging wall are represented by solid symbols. The color range is the distance to the main fault plane. In red color are figured the closest structures to the main fault plane and in black color are figured the most distant structures to the main fault plane.

Dips of faults and fractures vary from horizontal to vertical (HS1, M and S4 boreholes) but their orientation distribution is asymmetric, with structures predominantly oriented westward (78.5 % of faults-fractures for example in the HS1, M and S4 boreholes). We do not observe gradual

dip variation as a function of the distance to the principal fault planes. Some zones are almost exclusively composed of high dipping ( $> 45^\circ$ ) fractures (between 7.5 and 11m in R borehole for example); Others of low dipping ( $< 45^\circ$ ; between 10 and 14m in S4 for example) fractures with dips towards the east are mostly observed in the footwalls (R, S2 and S5 boreholes). In general, the footwall damage zone of the faults shows less shallow dipping fractures than the hanging wall (Fig. 8).

The figure 9 highlights the measured kinematic of faults in the INJ borehole. All the cinematic are observed (normal, reverse, left-lateral strike slip and right-lateral strike slip) but in most cases, the cemented faults have a normal kinematic.



**Figure 9:** Schmidt lower hemisphere projection of fault planes with kinematic type in the INJ borehole.

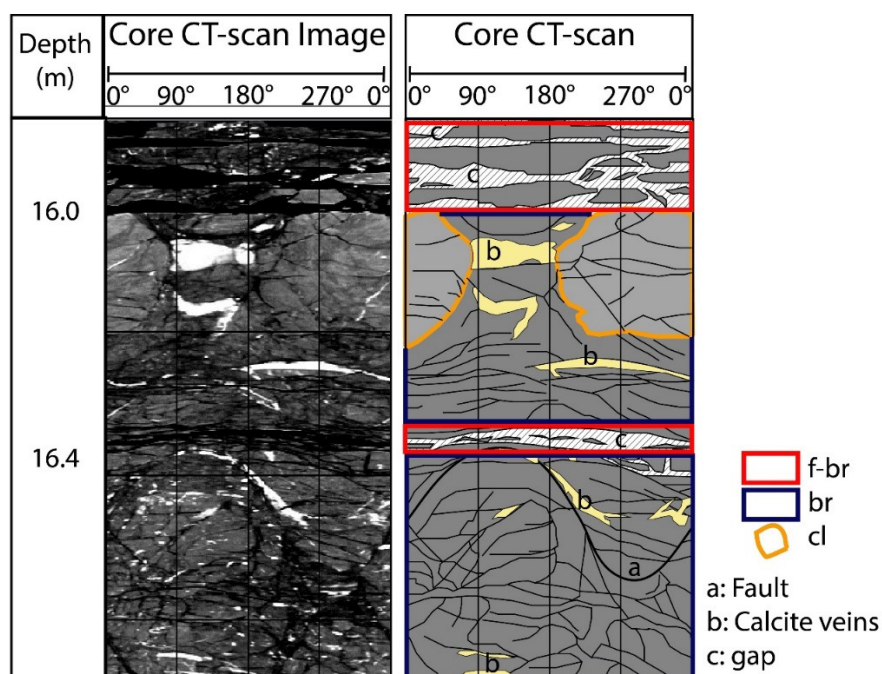
### 3.2.5.3 Fault breccia zone

The fault breccia zones are categorized as un-cohesive fault breccia and cemented breccia (Sibson, 1977; Mort and Woodcock, 2008). Un-cohesive material (f-br, with material loss c, Fig. 10) results in poor core recovery, and cores dislocated into clasts of a few centimeters size



(<10cm). Cemented breccia is thus dominant in the recovered material where, un-cohesive breccia occur as thin zones wrapping, or embedded in the cemented breccia. These zones often display anastomosing disjunctive cleavage, and thus may also be described as scaly clay (Labaume et al., 1997; Vannucchi et al., 2003). The most deformed zones have no visible clasts and appear homogeneous on the CT-scan and thus should be classified as gouge rather breccia (Fig. 5).

The cemented breccia contain centimeter to pluri-centimeter thick clasts in a small proportion (<10%) of calcitic matrix (br, Fig. 10). Small clasts display an intense fracturing, with a large variability of orientation (a, Fig. 10). Pluri-centimeter clasts (>10cm cl, Fig. 10) display relatively less deformation and appear as slightly fractured blocks. The CT (computed tomography) of these blocks appears higher than the surrounding formation indicating different petrophysical properties (lower porosity). Some thick calcite veins (b, Fig. 10) developed between the large clasts.



**Figure 10:** Sample of core CT-scan highlighting cemented breccia (f-br, red) and un-cemented breccia (br, blue) with large clasts (cl, orange).

The breccia fault zone thickness varies from 0.30 to 2.4m (in S2 and HS1 boreholes, respectively). One single breccia zone is present in HS1, R, M, INJ and S2 boreholes and several ones are present in the S4 and S5 boreholes (3 and 2 in S4 and S5 boreholes, respectively, Fig. 6). Except for S2, where several zones are present, their individual thickness is smaller than when only one fault core is observed. Indeed, S4 borehole displays three breccia zones with 1.3, 0.08 and 0.3m thick (from west to east) and S5 borehole displays two with 0.8 and 0.3m thick (from west to east). While, for R, M and HS1 boreholes, the unique fault breccia zone thickness is 2m to 2.4m. In the case where multiple breccia zones are observed, the fault cores are close to each other (Fig. 7). The maximum distance between two breccia zones is less than 1m (S4 borehole).

### **3.2.6 Synthesis: towards a conceptual model**

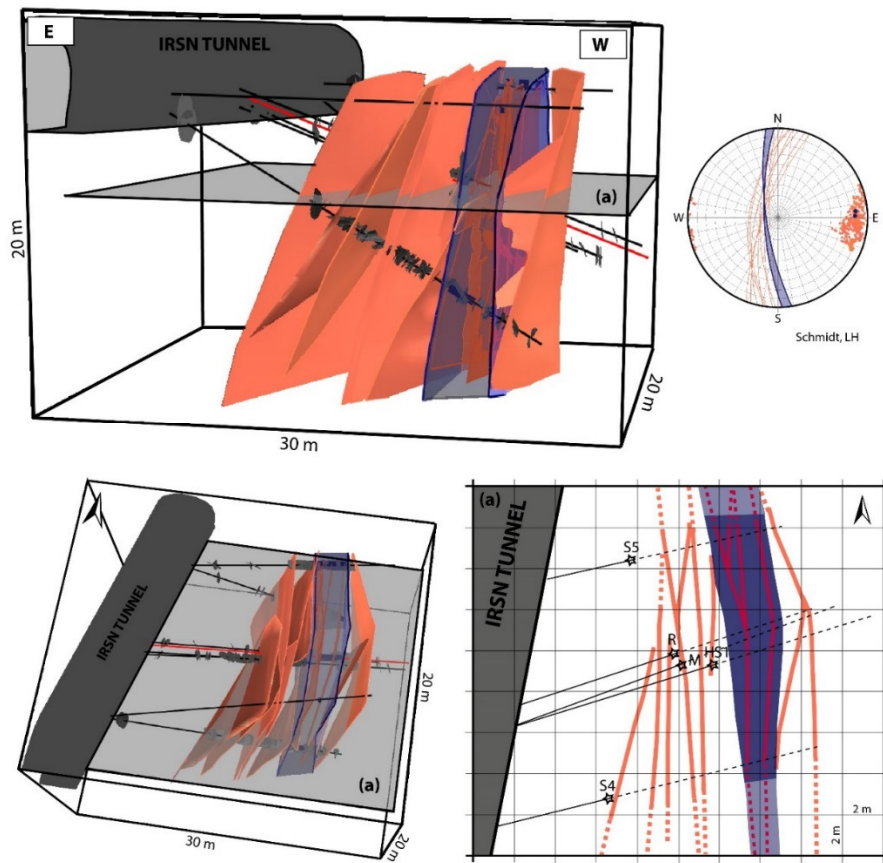
One conceptual model is presented on the figure 12b; the conceptual fault zone model proposes two interpretations;

(i) The fault zone contains two domains of deformation, a damage zone (DZ in orange, Fig. 12c) and a fault core (FC in red, Fig. 12c) separated by the main fault planes (PFP, Fig. 12c). The DZ structures are composed of 90% of fractures (included veins) of length  $< 1\text{m}$ . Three types of fracture are observed; bed-parallel, slightly cemented and cemented-breccia-filling fracture. Secondary faults length are  $>1\text{m}$ , may be cemented, un-cemented or polished and contribute  $< 10\%$  to fracture intensity. Their aspect varies laterally from a simple slip plane to a breccia layer associated with a meter thick damage zone, to a sheared-fractured zone which could correspond to a fault tip. The peaks of fracture density are often associated with the presence of secondary faults (red-orange degraded color domains, Fig. 12c). Fractures and faults have the same orientation and are predominantly dipping westwards. The DZ thickness varies by a factor of 1.7 depending on the boreholes and it is independent of the FC thickness.



In average, the damage zone of the hanging wall (DZHW, Fig. 12c) is three times the thickness of the footwall damage zone (DZFW, Fig. 12c) and it contains less bed-parallel fractures than the DZHW. The FC is very heterogeneous and composed of fault breccia, partially cemented with intact clasts, and comprising 1 to 10cm thick scaly fabric zones (LDZ, Fig. 12c).

(ii) The fault zone is considered as a network of secondary fault zones (red-orange degraded color domains, Fig. 12c) connected to a main fault zone (PFZ, Fig. 12c) that includes all the breccia zones (LDZ, Fig. 12c). The main fault zone contains large blocks of intact to moderately fractured blocks intercalated with breccia, and display a highly variable thickness.



**Figure 11:** gOcad view of the Tournemire fault architecture. The fractures are represented in grey, mean planes representing secondary fault zones are represented by pink planes and the blue domain includes the main fault zone with all the breccia zones.

### **3.2.7 Discussion**

#### **3.2.7.1 Fracture density variation with distance to the principal fault plane**

The F2 fault zone displays a hanging wall more developed (thicker and higher fracture density) than the footwall. This characteristic is specific to the normal fault zones (Brogi, 2008; Riley et al., 2010; Reyer et al., 2012; Meier et al., 2015) and may be related to the development of a hanging wall drag fold associated to normal faulting (Berg and Skar, 2005). Other possibilities explaining this characteristic without involving normal fault; (i) Example of principal strike-slip fault of the Arima-Takatsuki Tectonic Line (ATTL) displaying a rhyolitic tuff footwall and a granitic hanging wall damage zones between 20-100m and 100-900m thick, respectively (Lin and Yamashita, 2013). These significant thickness contrast between the damage zones of the hanging wall and the footwall is possibly related to minor lithological difference between the two fault compartments. However, the vertical offset of F2 estimated at 4-5m (Dick et al., 2015) is probably too small to cause a consistent lithologic contrasts across the fault along boreholes that cross the fault at different depths from 0 to 9m beneath the tunnel. (ii) Lin and Yamashita (2013) highlight that the presence of other faults in the fault zone of the ATTL sector and connection processes increase in the thickness of the damage zone. In the Tournemire URL, P-wave velocity profiles made it possible to highlight N130°-N150° (F3) trending faults linking the F1 and F2 faults (Bretaudié et al., 2014, Fig. 2). Although we see a few N130°-N150° trending faults in boreholes, it is possible that close to major faults (F1 and F2), the F3 faults become parallel to the N160°-N180° direction of the major faults. The fault tip between F3 and the major faults can explain the complexity of the fracture density profile in the coalescence fault zone. The distribution of fractures displays strong local variations and no systematic increasing of fracture density toward the FC. In the F2 fault zone, most fracture density peaks correspond to the secondary faults. This characteristic diverges from the classical distribution

of fractures in the fault damage zone (all fault mechanisms combined) where the fracture distribution is modeled as an exponential law, with monotonously decreasing fracture density away from the fault core (Mitchell and Faulkner, 2009). In general, an increase in the fracture density is observed close to the principal fault plane (Mitchell and Faulkner, 2009; Laubach et al., 2014; Reyer et al., 2012; Meier et al., 2015). The examples showing the secondary faults in the hanging wall and no increase in the fracture density towards the principal fault plane were observed in normal fault type (Jorhi et al., 2014; Meier et al., 2015).

### **3.2.7.2 Fracture dip**

In the F2 damage zone, bed-parallel fractures are identified (dip  $<10^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ). The abundance of bed-parallel fractures is characteristic of shale formations and is probably resulting from the high bedding parallel strength anisotropy in shales (Gale et al., 2014). Indeed, most studies of fractures in fault zones affecting other types of host-rock do not find such abundant bedding parallel fractures (e.g., Janssen et al., 2002; Brogi, 2008; Meier et al., 2015). In F2 fault zone, little or no bed-parallel fractures are observed in the footwall. This observation can be explained by a difference in the hanging wall and the footwall lithologies caused by the offset. Indeed, differences in organic content and thermal maturity of shale can affect the difference in abundance of bed-parallel fractures (Rodrigues et al., 2009). Several mechanisms that occur at different stages of burial could give rise to bed-parallel fractures. The bed-parallel fractures may be formed at shallow depth by unloading and exhumation (El Tabakh et al., 1998) and at burial depths of less than hundreds of meters (Al-Aasm et al 1992). At larger depths, mechanisms that can open space along bedding plane include folding, bed-parallel slip and large-scale compressional deformation events (Pashin et al., 2012). In F2 fault zone, most bed-parallel fractures sealed by calcite, are sheared during the fault zone activity. Moreover, some bedding planes were activated as shear planes without prior opening, forming striated or

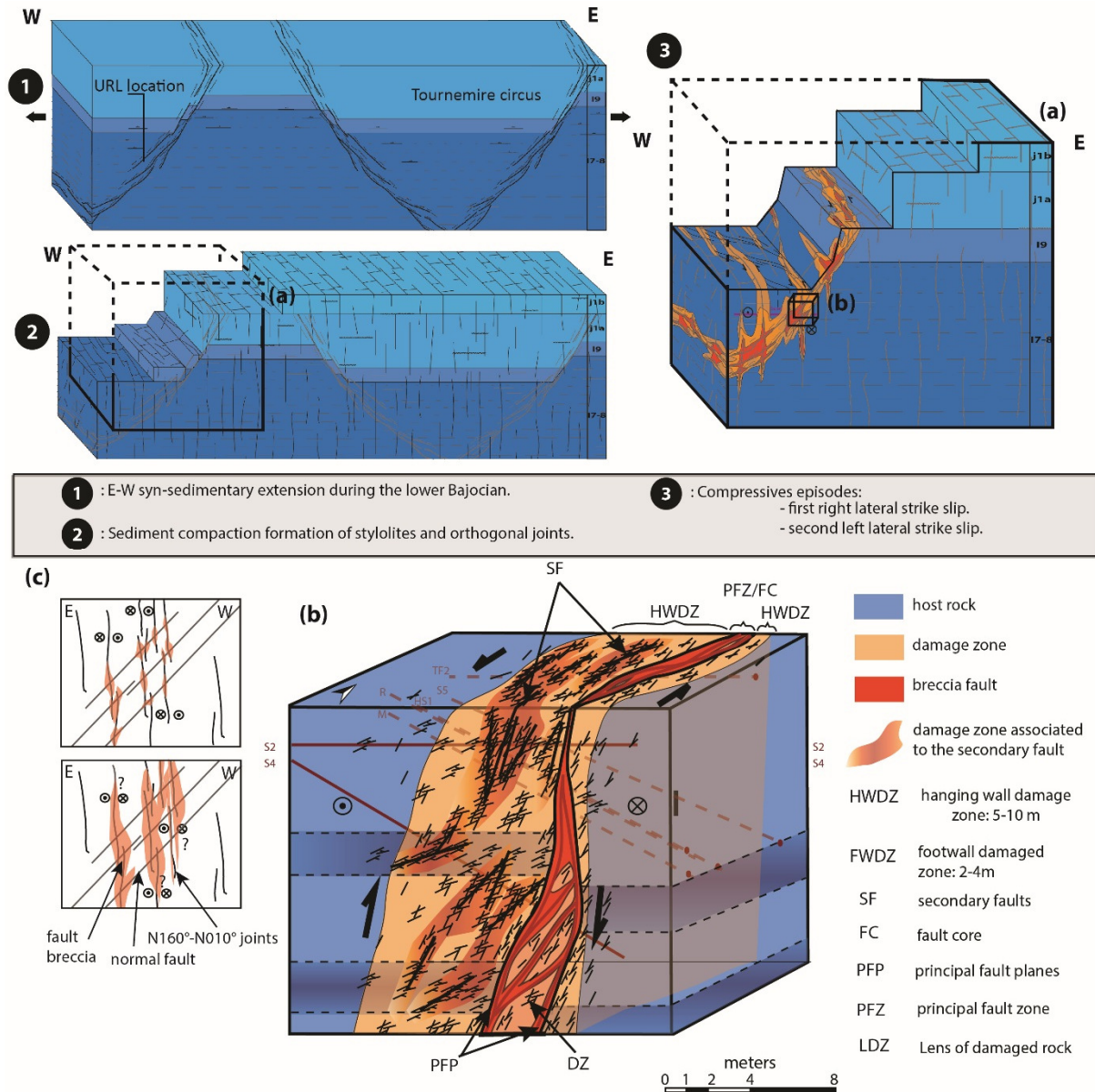
polished surface. It is therefore possible that these structures formed during Mesozoic compaction and were then reactivated as reverse shears associated to the fault zone movement.

### **3.2.7.3 Mechanisms of faulting**

We propose in this part to explain the three-dimension structure of the F2 fault zone involving one of N030° to N055° normal syn-sedimentary fault observed close to the Tournemire URL (Fig. 1d). The presence of this syn-sedimentary normal fault could explain the predominance of west dipping structures, normal faults in the damage zone and a highly fractured zone in the upper compartment (hanging wall) of the F2 fault zone.

E-W to NW-SE extension phase during the Lias to the Malm (Constantin et al., 2004) generates N030° to N055° normal syn-sedimentary faults (Fig. 12-1). In the Tournemire area, three normal syn-sedimentary faults are observed forming a horst and graben system between the Tournemire URL and the circus of Tournemire (Fig. 1a). During the Malm, extension becomes N-S and generates N090° to N120° normal syn-sedimentary faults such as the Cernon fault and the St Jean d'Alcapies fault (Fig. 1a). During the post-Bajocien burial, two orthogonal and vertical joints and veins families are developed in the entire sedimentary sequence (Fig. 12-2). The N160° to N190° joints are more developed than the N080° to N110° joints.

The NNE-SSW first phase of the Pyrenean compression (Constantin et al., 2002) reactivates the N160° to N190° joints in right-lateral strike slip. The fracturing and the breccia zones occur at the intersection of the N160° to N190° faults and the N030° to N055° normal syn-sedimentary fault (Fig. 12c). During the SSE-NNE second phase of the Pyrenean compression, F2 structures are reactivated in left-lateral strike slip involving N130° to N140° faults following a Riedel system (Fig. 12-3).



**Figure 12:** 1, E-W syn-sedimentary extension during the lower Bajocian and N040° normal syn-sedimentary fault. 2, N160°-N010° and N070°-N120° orthogonal joint formation during the sediment compaction phase. 3, Compressive Pyrenean episode with first the right lateral strike slip then the left lateral strike slip reactivation of structures. The three (1,2 and 3 steps) are localized on the subsidence curve in Fig. 1e. (b) is the suggested 3D conceptual models of F2 fault zone.

### **3.2.8 Conclusion**

The fault zones in the shale formation have a complex architecture induced by both a complex failure of intact shales and multiple tectonic reactivation episodes. We highlight the strong effect of the bedding anisotropy that controls many low dipping structures although the main fault planes are almost vertical. Indeed, the studied fault zone must be seen as a network of principal and secondary fault zones, all characterized by intense core deformations surrounded by fractures. In the cores, there is a high heterogeneity characterized by almost intact blocks wrapped in different types of breccia, possibly related to different fault activation events. Fault architecture in shales must better be figured as a juxtaposition of more or less intensely deformed facies than as the “classical” progressive strain increasing zone developing from a principal shear plane. This results is of importance since damage zones in shales may not be so continuously developed along faults, and thus may not favor fluids circulations as in other fault zones types...

### **Acknowledgements**

The authors would like to thank Total SAS for funding of the project and the IRSN for granting access to the Tournemire laboratory facility. The CEREGE belongs to the Grant Program of ParadigmGeo and the authors would like to thank ParadigmGeo and the ASGA to provide the gOcad software and associated plugins.

### **References**

- Agosta, F., Alessandroni, M., Antonellini, M., Tondi, E., Giorgioni, M., 2010. From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics* 490, 197-213.
- Al-Ahmadi, H.A and Wattenbarger, R.A., 2011. Triple-porosity models: One step further towards capturing fractured reservoirs heterogeneity. SPE/DGS Saudi Arabian Technical Session, Paper SPE 149054, 21.

- Antonellini, M., Aydin, A., 1995. Effect of faulting on fluid flow on porous sandstone: geometry and spatial distribution. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79, 642-671.
- Beaudrimont, A.F., Dubois, P., 1977. Un bassin mésogéen du domaine peri-alpin : le Sud Est de la France. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf aquitaine* 1, 264-308.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Review* 127, 171-192.
- Berg, S.S., Skar, T., 2005. Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SU Utah. *Journal of Structural Geology* 27, 1803-1822.
- Bergerat, F., 1987. Paléo-champs de contrainte tertiaires dans la plate-forme européenne au front de l'orogène alpin. *Bulletin de la Société géologique de France* III, 611-620.
- Billi, A., Salvini, F., Storti, F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25, 1779-1794.
- Blès, J.L., Bonijoly, D., Castaing, C., Gros, Y., 1989. Successive post-Variscan stress fields in the French Massif Central and its borders (Western European plate): comparison with geodynamic data. *Tectonophysics* 169, 79-111.
- Bretonneau, F., Gélis, C., Leparoux, D., Brossier, R., Cabrera, J., Côte, P., 2014. High-resolution quantitative seismic imaging of a strike-slip fault with small vertical offset in clay rocks from underground galleries: Experimental platform of Tournemire, France. *Geophysics* 79, No1, B1-B18.
- Bruhn, R.L., Parry, W.T., Yonkee, W.A., Thompson, T., 1994. Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones. *Pure and Applied Geophysics* 142, 609-644.

- Bonin, B., 1998. Deep geological disposal in argillaceous formations: Studies at the Tournemire Test Site. *Journal of Contaminant Hydrology* 35, 315-330.
- Boisson, J.Y., 1996. Caractérisation d'une formation argileuse, rapport 96/11, IPSN-Département de Protection de l'Environnement, 112.
- Boisson, J.Y., Bertrand, L., Heitz, J.F., Moreau-Le Golvan, Y., 2001. In situ laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. *Hydrogeology Journal* 9, 108-123.
- Brogi, A., 2008. Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Rapolano geothermal area (Northern Apennines, Italy). *Journal of Structural Geology* 30, 237-256.
- Busch, A., Alles, S., Gensterblum, Y., Prinz, D., Newhurst, D.N., Raven, M.D., Stanjek, H., Krooss, B.M., 2008. Carbon dioxide storage potential of shales. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2, 297-308.
- Cabrera, J., Volant, P., Baker, C., Pettitt, W., Young, R.P., 1999. Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media: The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site (France). 37th U.S Rock Mechanics Symposium, vail, Amadei & Kranz & Scott & Smeallie (eds), Balkema, 957-964.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture of permeability structure. *Geology* 24, 1025-1028.
- Charpentier, D., Tessier, D., Cathelineau, M., 2003. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing. Case of Tournemire, France. *Engineering Geology* 70, 55-69.
- Chester, F.M., Logan, J.M., 1986. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pure and Applied Geophysics* 124, 79-106.



Chester, F.M., Evans, J.P., Biegel, R.L., 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research* 98, 771-786.

Clausen, J.A., Gabrielsen, R.H., Johnsen, E., Korstgard, J.A., 2003. Fault architecture and clay smear distribution. Examples from field studies and drained ring-shear experiments. *Norwegian Journal of Geology* 83, 131-146.

Combes, P., 1999. Tectonique régionale, evolution géomorphologique et deformation néogène du Causse du Larzac (Basin des Grands Causses). Rapport GTR/IPSN1198 94.

Constantin, J., Peyaud, J.B., Vergély, P., Pagel, M., Cabrera, J. 2004. Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 25-41.

Constantin, J., Laurent, P., Vergély, P., Cabrera, J., 2007. Paleo-deviatoric stress magnitudes from calcite twins and related structural permeability evolution in minor fault: Example from the toarcian shale of the French Causses Basin, Aveyron, France. *Tectonophysics* 429, 79-97.

Cornet, F.H., 2000. Détermination du champ de contrainte au voisinage du laboratoire souterrain de Tournemire. Rapport du Laboratoire de Mécanique des Roches, Département de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris.

Courbet, C., Dick, P., Lefèvre, M., Witterbroodt, C., Matray, J., Barnichon, J., 2013. Estimating Hydraulic Conductivities in a Fractured Shale Formation from Pressure Pulse Testing and 3d Modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #MR11A-2202.

Debrand-Passard, S., Courbouleix, S., Lienhardt, M.J., 1984. Synthèse géologique de SE de la France. Bureau de Recherches Géologiques et Minière, Mémoire 15.

Dick, P., Courbet, C., Wittebrood, C., Dauzere, A, Matray, J-M., 2015. Internal structures of fault zones in low permeability formation and their relationship with fluid flow: insights the Tournemire URL. Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Bruxelles. Abstract 15-21.

- Distinguin, M., and Lavanchy, J.-M., 2007. Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the bore site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several *in situ* investigation techniques. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 379-392.
- Einstein, H.H., Baecher, G.B., 1983. Probabilistic and statistical methods in engineering geology specific methods and examples, part1: Exploration, Rock Mechanics and Rock Engineering 16, n°1, 39-72.
- El Tabakh, M., Schrieber, B.C., Warren, J.K., 1998. Origin of fibrous gypsum in the Newark Rift Basin, eastern North America. *Journal of Sedimentary Research* 68, 88-89.
- Evans, J.P., Forster, C.B., Goddard, J.V., 1997. Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology* 19, 1393-1404.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C., Lewis, Rutter, E.H., 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of a Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics* 367, 235-251.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zone. *Journal of Structural Geology* 32, 1557-1575.
- Fernández, A.M., Sánchez-Ledesma, D.M., Tournassat, C., Melón, A., Gaucher, E.C., Astudillo, J., Vinsot, A., 2014. Applying the squeezing technique to highly consolidated clayrocks for pore water characterization: Lessons learned from experiments at the Mont Terri Rock Laboratory. *Applied Geochemistry* 49, 2-21.
- Gale, J.F.W., Laubach, S.E., Olson, J.E., Eichhubl, P., Fall, A., 2001. Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG Bulletin*, 98, 2165-2216.

- Gauthier, B.D.M., Franssen, R.C.W.M., Drei, S., 2000. Fracture networks in Rotliegend gas reservoirs of the Dutch offshore: implications for reservoir behavior. *Netherlands Journal of Geosciences* 79, 45-57.
- Gillot, P.Y., 1974. Chronométrie par la méthode potassium-argon des laves des Causses et du Bas Languedoc : interprétations. Thèse, Univ. d'Orsay, France, 98.
- Giot, D., Roure, F., Elmi, S., Lajat, D. and Steinberg, M. 1991. Decouverte d'accidents distensifs majeurs d'âge jurassique sur la marge continentale du bassin du sud-est, Ardèche, France, (programme GPF) C. R. Acad. Sci. Paris 312, 747-754
- Gudmunson, A., Simmenes, T.H., Larsen, B., Philipp, S.L., 2010. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *Journal of Structural Geology* 32, 1643-1655.
- Hedan, S., Cosenza, P., Valle, V., Cabrera, J., 2011. Caractérisation par extensométrie optique de la fracturation liée à la désaturation de l'argilite de Tournemire : Impact de l'hétérogénéité et de l'anisotropie structurale. 20<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B., 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics* 482, 3-15.
- Hesthammer, J., Johansen, T.E.S., Watts, L., 2000. Spatial relationships within fault damage zones in sandstone. *Marine and Petroleum Geology* 17, 873-893.
- Hubbard, B., Tison, J.L., Pattyn, F., Dierckx, M., Boereboom, T., Samyn, D., 2012. Optical-televueviewer-based identification and characterization of material facies associated with an Antarctic ice-shelf rift. *Annals of Glaciology* 53, doi:10.3189/2012AOG60A045.
- Jassen, C., Hoffmann-Rothe, A., Tauber, S., Wilke, H., 2002. Internal structure of the Precordilleran fault system (Chile) – insights from structural and geophysical observations. *Journal of Structural Geology* 24, 123-143.

- Jorhi, M., Zoback, M.D., Hennings, P., 2014. A scaling law to characterize fault-damage zones at reservoir depths. *AAPG Bulletin* 98, n°10, 2057-2079.
- Jourde, H., Flodin, E.A., Aydin, A., Durlofski, L.J., Wen, X.H., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurement. *AAPG Bulletin* 86, 1187-1200.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503-517.
- Labaume, P., Maltman, A.J., Bolton, A., Tessier, D., Ogawa, Y., Takizawa, S., 1997. Scaly fabrics in sheared clays from the décollement zone of the Barbados accretionary prism. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 156.
- Laubach, S.E., Eichhubl, P., Hargrove, P., Ellis, M.A., Hooker, J.N., 2014. Fault core and damage zone fracture attributes vary along strike owing to interaction of fracture growth, quartz accumulation, and differing sandstone composition. *Journal of Structural Geology* 68, 207-226.
- Lin, A., Yamashita, K., 2013. Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan. *Journal of Structural Geology* 57, 1-15.
- Mandl, G., Jong, L.N.J., Maltha, A., 1977. Shear Zones in Granular Material, An Experimental Study of Their Structure and Mechanical Genesis. *Rock Mechanics* 9, 95-144.
- Mauldl, G., 2000. *Faulting in Brittle Rocks. An introduction to the Mechanical of Tectonic Fault*. Springer, Berlin.
- Manzocchi, T., Walsh, J.J., Nell, P., Yielding, G., 1999. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience* 5, 53-63.
- Matonti, C., Lamarche, J., Guglielmi, Y., Marié, L., 2012. Structural and petrophysical characterization of mixed conduit/seal fault zones in carbonates: Example from the Castellás fault (SE France). *Journal of Structural Geology* 39, 103-121.

- Meier, S., Bauer, J.F., Philipp, S.L., 2015. Fault zone characteristics, fracture systems and permeability implication of Middle Triassic Muschelkalk in Southwest Germany. *Journal of Structural Geology* 70, 170-189.
- Michard, A.G., Coumoul, A., 1978. La sédimentation liasique dans les Causses: contrôle des minéralisations Zn-Pb associées au Lotharingien. *Bulletin BRGM II*, 2, 57-120.
- Mitchell, T.M., Faulkner, D.R., 2009. The nature and origin of off-fault damaged surrounding strike-slip fault zones a wide range of displacements: A field study from the Atacama fault system, northern Chile. *Journal of Structural Geology* 31, 802-816.
- Mort, K., and Woodcock, N.H., 2008. Quantifying fault breccia geometry: Dent Fault, NW England. *Journal of Structural of Geology* 30, 701-709.
- Nie, X., Zou, C., Pan, L., Huang, Z., Liu, D., 2013. Fracture analysis and determination of *in situ* stress direction from resistivity and acoustic images logs and core data in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Borehole-2 (50-1370 m). *Tectonophysics* 593, 161-171.
- Pashin, J.C., Kopaska-Merkel, D.C., Arnold, A.C., McIntyre, M.R., Thomas, W.A., 2012. Gigantic, gaseous mudwads in Cambrian shale: Cosasauga Formation, Southern Appalachians, USA. *International Journal of Coal Geology* 109, 70-91.
- Pearson, F.J., Tournassat, C., Gaucher, E.C., 2011. Biogeochemical processes in a clay formation *in situ* experiment: Part E – Equilibrium controls on chemistry of pore water from the Opalinus Clay, Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland. *Applied Geochemistry* 26, 990-1008.
- Reyer, D., Bauer, J.F., Philipp, S.L., 2012. Fracture systems in normal fault zones crosscutting sedimentary rocks, Northwest German Basin. *Journal of Structural Geology* 45, 38-51.
- Riley, P.R., Goodwin, L.B., Lewis, C.J., 2010. Controls on fault damage zone width, structure, and symmetry in the Bandelier Tuff, New Mexico. *Journal of Structural Geology* 32, 766-780.

- Rodrigues, N., Cobbold, P.R., Loseth, H., Ruffet, G., 2009. Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ('beef') in a mature source rock (Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin, Argentina): Evidence for overpressure and horizontal compression. *Journal of the Geological Society* 166, 4, 695-709.
- Samper, J., Dewonck, S., Zheng, L., Yang, Q., Naves, A., 2008. Normalized sensitivities and parameter identifiability of *in situ* diffusion experiments on Callovo-Oxfordian clay at Bure site. *Physics and Chemistry of the Earth* 33, 1000-1008.
- Savoie, S., Michelot, J.-L., Matray, J.-M., Witterbroodt, Ch., Mifsud, A., 2012. A laboratory experiment for determining both the hydraulic and diffusive properties and the initial pore-water composition of an argillaceous rock sample: A test with the Opalinus clay (Mont Terri, Switzerland). *Journal of Contaminant Hydrology* 128, 47-57.
- Shipton, Z.K., Soden, A.M., Kirkpatrick, J.D., Bright, A.M., Lunn, R.J., 2006. How thick is a fault? Fault displacement-thickness scaling revisited. *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting*, 193-198. AGU.
- Sibson, R.H., 1977. Fault rock and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society* 133, 191-213.
- Tremosa, J., Arcos, D., Matray, J.M., Bensenouci, F., Gaucher, E.C., Tournassat, C., Hadi, J., 2012. Geochemical characterization and modelling of the Toarcian/Domerian porewater at the Tournemire underground research laboratory. *Applied Geochemistry*, 27, 1417-1431.
- Terzaghi, R.D., 1965. Sources of error in joints surveys. *Geotechnique* 15, 287-304.
- Valès, F., Nguyen Minh, D., Gharbi, H., Rejeb, A., 2004. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France). *Applied Clay Science* 26, 197-207.
- Vannucchi, P., Maltman, A., Bettelli, G., Clennell, B., 2003. On the nature of scaly fabric and scaly clay. *Journal of Structural of Geology* 25, 673-688.

- Wakim, J., Hadj-Hassen, F., De Windt, L., 2009. Effect of aqueous solution chemistry on the swelling and shrinkage of the Tournemire shale. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 1378-1382.
- Wibberley, C.A.J., Shimamoto, T., 2003. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Midian Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan. *Journal of Structural Geology* 25, 59-78.
- Wibberley, C.A.J., Yielding, G., Di Toro, G., 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *The Internal Structure of Fault Zones*, Geological Society London 299, 5-33.
- Wileveau, Y., 1999. Mesures de contrainte in situ dans le tunnel de Tournemire (Aveyron, France) 17/06/99 au 25/06/99, rapport 1 GEOSTRESS.
- Withjack, M.O., Islam, Q.T., La Pointe, P.R., 1995. Normal faults and their hanging wall deformation: an experimental study. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79, 1-18.
- Yielding, G., Øverland, J.A., Byeberg, G., 1999. Characterization of fault zones for reservoir modeling: an example from Gullfaks Field, Northern North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 83, 925-951.

## **4 LES PALEAO-CIRCULATIONS DANS LA ZONE DE FAILLES**

### **4.1 Présentation de l'article**

Ce travail se focalise sur les paléo-circulations de fluides dans une zone de failles argileuse à partir d'un échantillon pluri-centimétrique prélevé au niveau de la limite entre la zone endommagée et le cœur de faille. Les zones de failles argileuses sont considérées comme peu perméables et pourtant, on y observe une concentration de calcite qui suggère que le fluide migre durant l'activité de la faille. Les analyses effectuées sur cet échantillon ont pour but d'examiner les relations entre les structures de déformation et la cristallisation de calcite.

Ce travail permet de mettre en évidence (i) une forte concentration de calcite d'une épaisseur de 5cm au niveau de la zone de transition entre la zone endommagée et la zone de cœur, (ii) deux phases de précipitation de calcite associées à différents processus de déformation de la zone de failles et (iii) les plans de glissement présentant des zones de gouge et bordés par des veines de calcite.

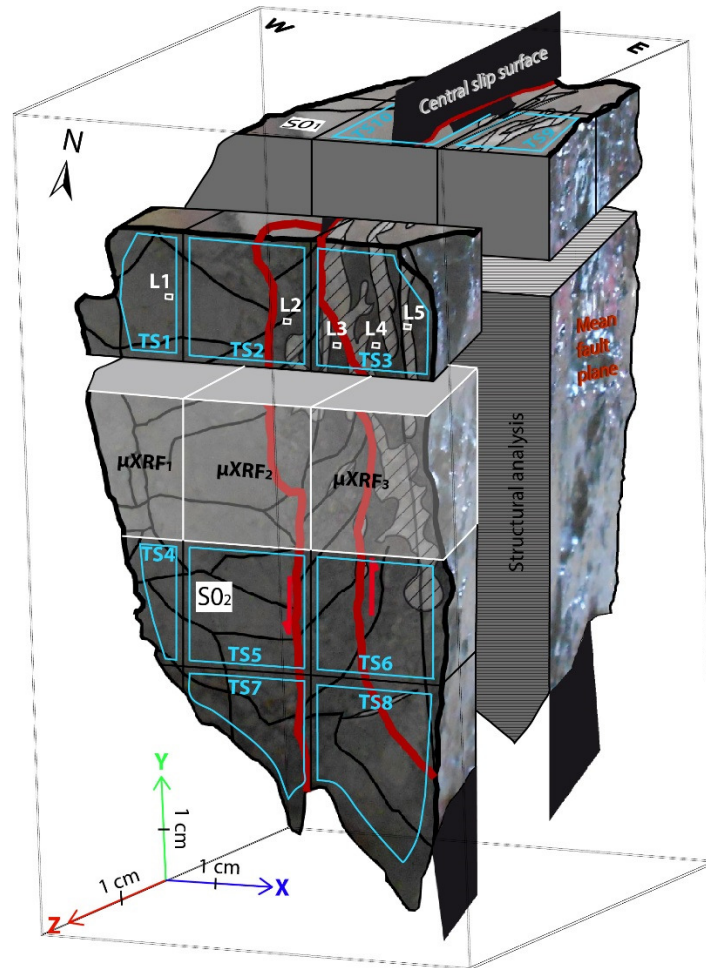
L'échantillon de dimension 12×8×8cm, a été prélevé dans la zone de failles F2, sur la paroi Nord de la galerie 2003, et plus précisément à la frontière entre la zone endommagée du compartiment Ouest et le cœur de faille. Avant de passer au CT-scan, l'échantillon a été imprégné d'époxy (résine) juste après son prélèvement afin d'éviter les effets de dessiccation. Deux surfaces polies perpendiculaires à la direction du plan de faille principal (face supérieure horizontale et face verticale Nord) ont été réalisées afin d'effectuer une analyse structurale (Fig. 52). L'échantillon a ensuite été coupé en treize cubes de 22×22×22mm. Trois de ces cubes ont été analysés à la  $\mu$ XRF ( $\mu$ XRF1,  $\mu$ XRF2 et  $\mu$ XRF3, Fig. 52). Les dix cubes restant ont permis de réaliser des lames minces (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7 et TS8 dans la face horizontale supérieure et TS9, TS10 dans la face verticale Nord, Fig. 52) qui ont été analysé au microscope et à la cathodoluminescence.

L'analyse structurale a permis d'identifier deux épisodes de déformation, ainsi qu'une zone de transition entre la zone endommagée et le cœur de faille épais de 5cm, caractérisée par différentes textures dilatantes et affectée par une forte concentration de calcite.

L'échantillon est divisé en deux parties: (i) un compartiment Ouest fracturé et (ii) un compartiment Est caractérisé par une forte intensité de déformation, qui est adjacent au plan

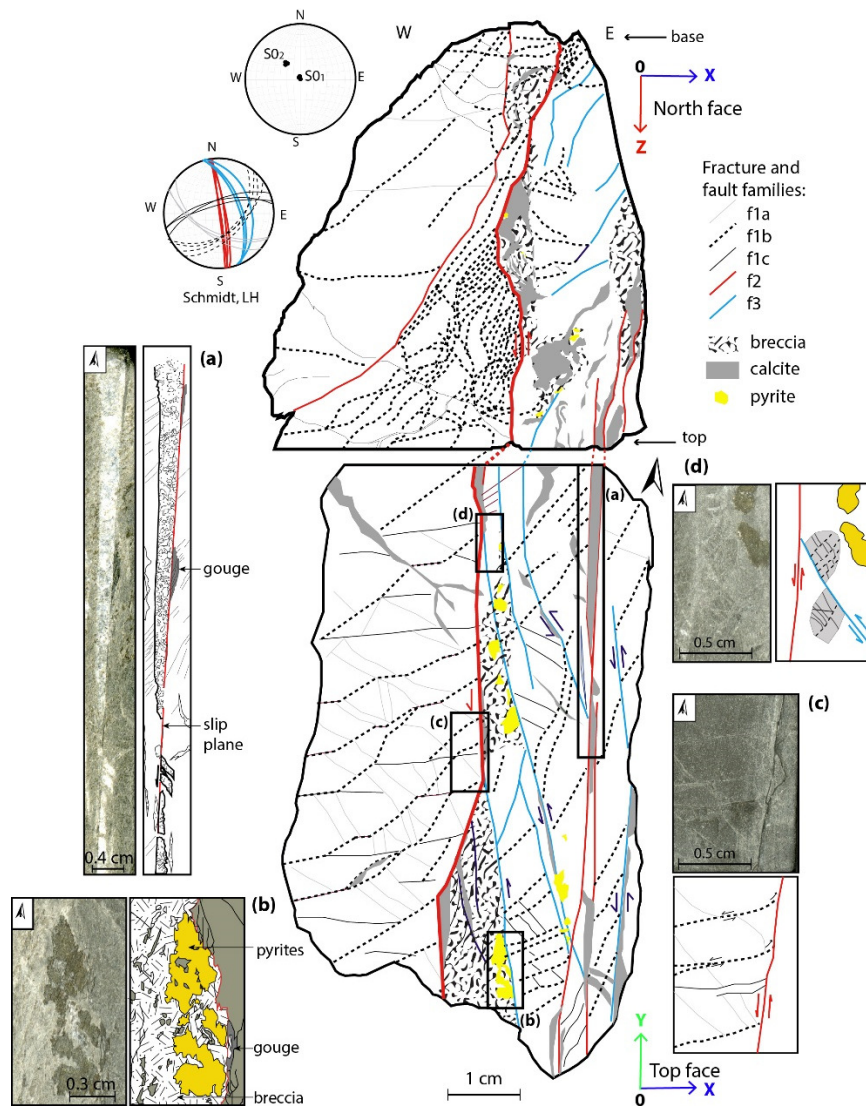


principal de faille (face Est de l'échantillon, Fig. 52). La limite entre les deux compartiments est définie par un plan de glissement central.



**Figure 52 :** Présentation de l'échantillon. Les faces grises et hachurées ont été l'objet d'une analyse structurale présentée dans la figure 53. Les contours bleus (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9 et TS10) représentent la localisation des lames minces. Les rectangles blancs (L1, L2, L3, L4 et L5) représentent la localisation des analyses sur lames minces présentées sur la figure 55. Les cubes blancs ( $\mu XRF_1$ ,  $\mu XRF_2$  et  $\mu XRF_3$ ) représentent les zones analysées au  $\mu XRF$  présentées dans la figure 54. Les notations S01 et S02 représentent la localisation des mesures des plans de stratification de la figure 53.

L'échantillon est affecté par cinq familles de failles (f1a, f1b, f1c, f2 et f3, Fig. 53). Les familles f1a, f1b et f1c (N110°-à-N130°; 55°-à-65°SW ; N030°-à-N060°; 45°-à-60°SE et N060°-à-N080°; 60°-à-80°N) sont recoupées par les familles de failles f2 et f3 (N150°-à-N160°; 60°-à-80°E et N170°-à-N180°; 80°-à-90°E/W).



**Figure 53 :** Analyse structurale des faces verticale Nord ( $0zx$ ), et horizontale supérieure ( $0xy$ ) perpendiculaire à la direction du plan de faille principal. Les lignes grises, pointillées noires et noires représentent la famille de fractures  $f1a$ ,  $f1b$  et  $f1c$ . Les lignes bleues et rouges représentent les familles de failles  $f2$  et  $f3$ . A- Zoom sur un plan de cisaillement  $f3$ . B- Zone de brèches. C- Zoom sur la rotation antihoraire et le jeu senestre de la famille de fractures  $f1$  à proximité d'un plan de faille  $f3$ . D-Zoom sur le jeu senestre de la famille de failles  $f2$ .  $S01$  et  $S02$  représentent les mesures de plans stratigraphiques (localisation sur figure 52).

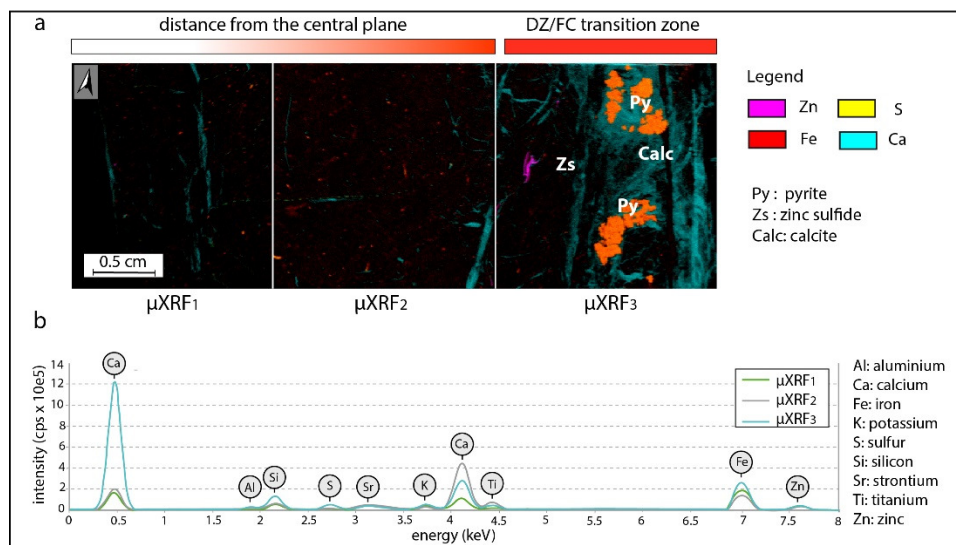
Les familles  $f1a$ ,  $f1b$  et  $f1c$  sont principalement observées dans le compartiment ouest. On observe une rotation antihoraire et des déplacements d'ordre millimétrique mettant en évidence une réactivation senestre des familles  $f1b$  et  $f1c$  au niveau des intersections entre les familles  $f1$  et  $f3$  (Fig. 53-C). Les familles  $f2$  et  $f3$  sont exclusivement présentes dans le compartiment Est. La famille  $f2$  est caractérisée par des failles senestres qui viennent se brancher sur la famille

f3 (Fig. 53-D). Elles pourraient correspondre à des Riedel de type R1 associées à la famille f3. Les failles de la famille f3 sont senestres et recoupent la totalité de l'échantillon (Fig. 53). Cette famille comprend le plan de glissement central qui délimite le compartiment ouest du compartiment est. On observe dans le compartiment ouest une rotation antihoraire et une verticalisation des plans de stratification à proximité du plan de glissement central. La famille f1 peut être expliquée par l'état de contrainte lors du début de l'inversion tectonique du bassin et l'anisotropie des argiles liée aux plans de stratification. Une autre explication pour la famille f1, est de se rapporter à un système de cisaillement de type Riedel, en accord avec un mouvement dextre au moyen d'un plan de faille préexistant. Ce système est en accord avec la première phase de compression Pyrénéenne, orientée NE-SW. Les familles de failles f2 et f3 sont en accord avec une réactivation senestre qui pourrait concorder avec le deuxième épisode compressif Pyrénéen, orientée NW-SE. Ainsi, la zone de failles a enregistré deux épisodes de déformation lors de la compression Pyrénéenne suivant deux directions, NE-SW et SE-NW, qui génèrent des structures dextres puis senestres bien que dans l'échantillon étudié, ce sont ces dernières structures qui sont les plus développées.

Dans le compartiment est, les plans de stratification sont très déformés et seulement visibles dans des zones centimétriques préservées. Le compartiment ouest est aussi caractérisé par des zones de brèches composées de minéraux argileux cimentés avec des larges cristaux de calcite et de pyrite. Ces zones de brèches sont localisées au niveau des branchements entre les familles f2 et f3 (Fig. 53-B). Le long des failles de la famille f3 sont observées des bandes noires ressemblant à des zones de gouge et des veines de calcite (Fig. 53-A). Ainsi, le compartiment ouest présente une texture caractéristique de la déformation de la zone endommagée tandis que le compartiment Est est une zone de transition entre la zone endommagée et la zone de cœur de faille présentant des structures fragiles/ductiles et des blocs résiduels très fracturés. Ici, ce domaine correspond à une zone de 5cm d'épaisseur caractérisée par des plans de stratification parallèles à la surface de faille, des plans de cisaillement de Riedel associés à des concentrations en calcite ainsi que des déplacements de l'ordre du centimètre et des textures dilatantes comme l'ouverture le long des plans de stratification ou encore les zones de brèches.

L'analyse par  $\mu$ XRF des cubes  $\mu$ XRF1,  $\mu$ XRF2 et  $\mu$ XRF3 a permis de mettre en évidence que la zone de transition entre la zone endommagée et la zone de cœur de faille (soit  $\mu$ XRF3) présente une plus forte concentration en Ca et en Fe que le compartiment ouest (Ca $\times$ 6 et Fe $\times$ 2, Fig. 54) ainsi que l'apparition de sulfure de zinc. Dans cette zone de transition, la forme des veines de calcite est en accord avec un mouvement sénestre puis évolue parallèlement aux

failles de la famille f3. Dans cette zone, des pyrites recristallisées de taille plus importante sont déformées et associées à la réactivation des structures de la famille f3.



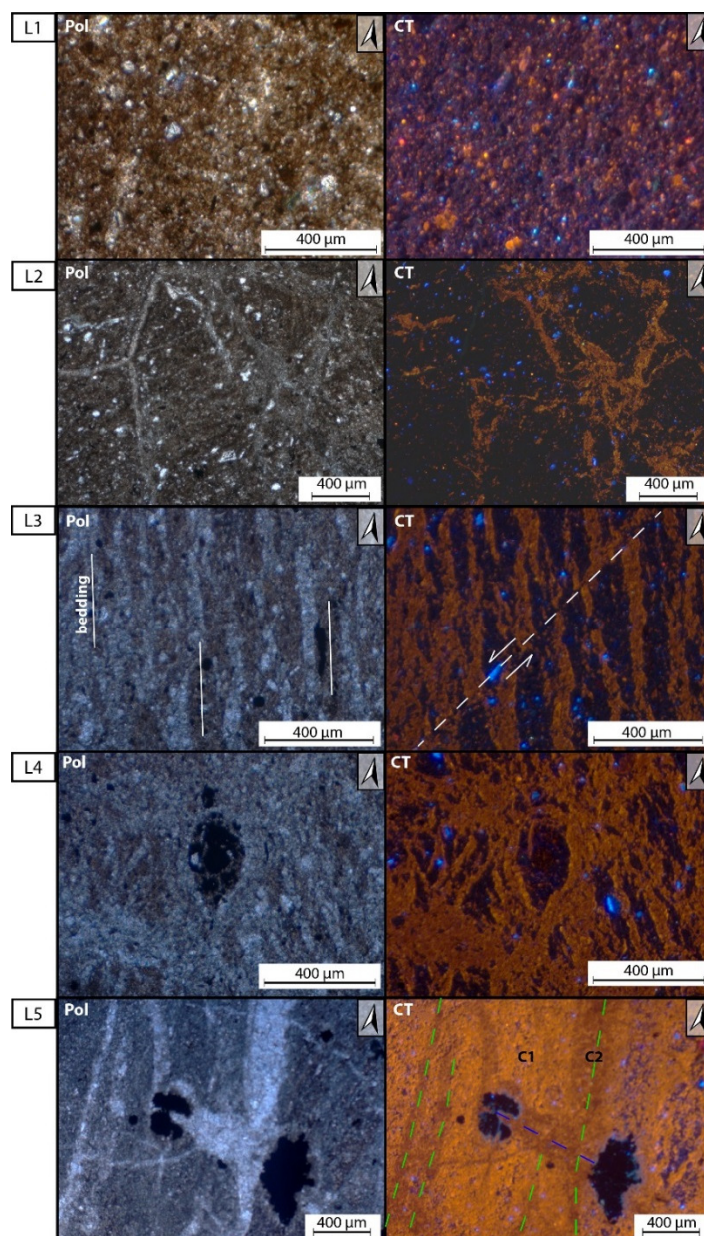
**Figure 54 :** a- Zones étudiées au  $\mu\text{XRF}$ .  $\mu\text{XRF}_1$  et  $\mu\text{XRF}_2$  sont localisées dans la zone endommagée et  $\mu\text{XRF}_3$  est localisée dans la zone de transition entre la zone endommagée et le cœur de faille (localisation dans figure 52). b- Spectre chimique moyen pour chaque zone ( $\mu\text{XRF}_1$ ,  $\mu\text{XRF}_2$ , et  $\mu\text{XRF}_3$ ) mettant en évidence des variations chimiques entre la zone endommagée et la zone de transition et entre la zone endommagée et le cœur de faille.

L'analyse par cathodoluminescence a permis de mettre en évidence deux phases de circulation de fluides.

Dans le compartiment ouest, les vues L1 et L2 (Fig. 55) montrent des structures typiques de la zone endommagée. L1 présente une répartition homogène des minéraux (minéraux argileux, pyrite framboïdale et calcite en grain à fort CL) sans déformation apparente. L2 présente des micro-cracks remplis de calcite à fort CL. Les vues L3, L4 et L5 (Fig. 55) sont localisées dans le compartiment est, soit dans la zone de transition entre la zone endommagée et le cœur de faille. L3 présente des alternances de lentille de calcite et d'argile subparallèles au plan central de cisaillement. La présence de pyrites framboïdales en bordure et orientées parallèlement aux lentilles laisse suggérer que ces veines se sont formées selon l'ouverture des plans de stratification et ont subi une rotation de manière à se paralléliser au plan de glissement. L4 présente une zone de brèches composée d'un réseau complexe de veines de calcite autour d'une pyrite framboïdale de forme irrégulière contenant de la calcite dans ses pores. Ces gros cristaux de pyrite semblent recristallisés et apparaissent également modifiés par rapport aux vues L1-à-L3. L5 est localisée près d'une faille f3, et présente deux phases de calcite. Une calcite à



luminosité intense (fort CL) dite C1 qui est recoupée par une calcite caractérisée par une luminosité plus faible (faible CL) et des grains plus importants, dite C2. C1 ressemblant à la calcite de la matrice argileuse, on peut alors supposer que C1 est originaire de la formation. C2 recoupe C1 selon deux grandes directions qui connectent les failles de la famille f3.



**Figure 55 :** Observations sur lames minces dans différents endroits de la zone de failles. Pour chaque observation, la notation (Pol) représente les analyses par microscope polarisant et (CT) par cathodoluminescence. Les observations L1 et L2 sont localisées dans la zone endommagée (provenant des lames minces TS1 et TS2, Figure. 50). L3, L4 et L5 sont localisées dans la zone de transition entre la zone endommagée et le Cœur de faille (provenant de la lame mince TS3, Fig. 50).

Ainsi, les études de cathodoluminescence indiquent deux phases de calcite. La première phase coïncide avec une circulation de fluides le long d'une zone dilatante d'une épaisseur centimétrique. La seconde est associée au re-cisaillement le long de plan de faille f3, de l'ordre du millimètre, et beaucoup plus localisée.

Ces résultats mettent en évidence que dans les argiles, les fluides peuvent migrer dans des volumes dilatants d'échelle centimétrique lors de l'activation d'un plan de glissement. De plus, la migration de fluides s'effectue à proximité du plan de glissement et non exactement suivant ce plan. Cette migration est contrôlée premièrement par l'anisotropie de l'argile intacte comme les plans de stratification puis favorisée par la bréchification, la réorientation des structures et les processus induits par les effets de colmatage de la calcite.

**4.2 Article: Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P., Gout, C., 2016. Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France). Journal of Structural Geology 83, 73-84.**

– Sous presse –

DOI information: 10.1016/j.jsp.2016.01.002

URL de la publication: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.01.002>

# **Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France)**

Mélody Lefèvre<sup>a, \*</sup>, Yves Guglielmi<sup>a</sup>, Pierre Henry<sup>a</sup>, Pierre Dick<sup>b</sup>, Claude Gout<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, CEREGE UM34, 13545 Aix en Provence, France.

<sup>b</sup> IRSN, Avenue du Général Leclerc, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France.

<sup>c</sup> TOTAL, CSTJF, Avenue Larribau, 64018 Pau, France.

[lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr);      [guglielmi@cerege.fr](mailto:guglielmi@cerege.fr);      [henry@cerege.fr](mailto:henry@cerege.fr);      [pierre.dick@irsn.fr](mailto:pierre.dick@irsn.fr);  
[claud.gout@total.com](mailto:claud.gout@total.com)

## **Corresponding author:**

\* Mélody Lefèvre +33 (0)4 13 55 12 57; [lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr)

## **Keywords:**

Shale; fault activation; paleo-fluids migration; seal; vein geochemistry

### **4.2.1 Abstract**

The reactivation of faults induced by natural/human induced fluid pressure increases is a major concern to explain subsurface fluid migration and to estimate the risk of losing the integrity of reservoir/seal systems. This study focusses on paleo-fluid migration in a strike slip fault with >100m long, affecting a Toarcian shale (Causses Basin, France). A high calcite concentration is observed in a 5cm thick zone at the boundary between the fault core and damage zone. Cumulated displacements in this zone are of millimeter to centimeter-scale offsets and different dilatant deformation textures are observed. The zone is affected by thin slip planes containing

gouge. Cathodo-luminescence observations indicate that two phases of vein formation occurred. The first phase coincides with the fluid migration along this centimeter thick dilatant zone. The second one is associated to re-shear along the millimeter thick slip planes that results in more localized mineralization, but also in a better hydrologic connection through the shale formation. These results show that in shales fluids may migrate off a slipping surface in centimeter scale dilatant volumes, at first controlled by the intact shale anisotropy related to bedding and then favored by brecciating, structures re-orientation and strengthening processes induced by calcite sealing effects.

#### **4.2.2 Introduction**

Fluid pressurization effects on the re-activation of faults affecting shale formations are a crucial process to understand fluid migration through seal layers, locally producing loss of the reservoir/seal systems integrity. The reservoir/seal system integrity is of key prime importance for many applied domains (oil and gas extraction, storage site of radioactive waste/CO<sub>2</sub>, geothermal projects...).

It is commonly admitted that a fault cannot be considered as a single continuous surface but corresponds to a rock volume having various deformation structures on different scales of space and intensity (Gudmundsson et al., 2001; Constantin et al., 2004; Faulkner et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010). Typically, a fault zone is composed of a core surrounded by a damage zone consisting of a transitional zone between the core and the intact host rock (Caine et al., 1996; Chester et al., 1993; Wibberley et al., 2008; Faulkner et al., 2010) or multiple fault cores (Faulkner et al., 2003). The fault core/damage zone boundary sometimes is gradual, but more often appears as a sharp interface interpreted as a fault plane. The fault core is composed of various structures such as slip surface planes, breccia, gouge, cataclasite, ultra-cataclasites, mylonites and ultra-mylonite (Sibson, 1977; Chester and Logan, 1986; Chester et al., 1993; Bruhn et al., 1994; Caine et al., 1996; Clausen et al., 2003; Kim et al., 2004). Structures



observed in the damage zone are fractures, subsidiary faults, veins, folds and cleavages (Chester and Logan, 1986; Chester et al., 1993; Caine et al., 1996; Hesthammer et al., 2000; Jourde et al., 2002; Berg and Skar, 2005).

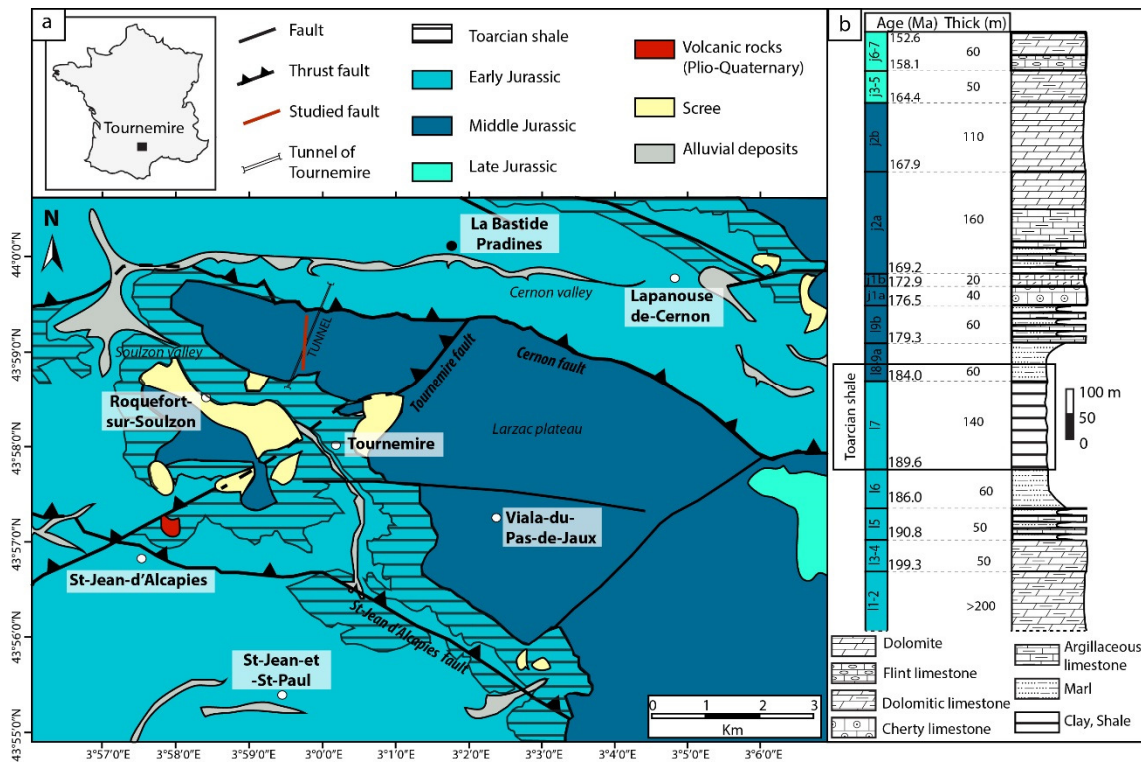
Such structural heterogeneity of fault zones induces strongly heterogeneous fluid flow in the fault zone (Evans et al., 1997; Mandl et al., 1977; Manzocchi et al., 1999; Yielding et al., 1999). The intensification of the fracture network in the damage zone may lead to an increased permeability with respect to less fractured zone (Caine et al., 1996; Faulkner et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010). Fault core, contain specific grain size reducing structures (Billi et al., 2003) that generally result in decreasing permeability. On the other hand, during shear movement on the fault, dilatant effects may favor permeability increase, which in return may influence the evolution of fault slip (Rice et al., 1979).

In fault zones affecting shale formations, self-healing of fractures and sealing with calcite cement, limits the permeability increase of both the damage and core zones (Constantin et al., 2004; Nussbaum et al., 2011). Other processes than grain size reduction can influence the permeability of the fault core, such as mineral reorientation (Charpentier et al., 2003; Constantin et al., 2007; Arch and Maltman, 1990). Laboratory experiments on clay rich fault cores show that, for a given porosity and effective stress, shearing generally results in permeability decrease both along and across the shear zone (Wibberley et al., 2008). For these reasons, shale faults are considered to have a low permeability in the same order as that of the intact rock (Nussbaum et al., 2004). However, porosity and permeability can increase when the stress path applied to the sample results in a dilatant behavior (Zhang and Cox, 2000). Moreover, the concentration of calcite veins in fault zones suggest that fluid migration can occur during fault activation or movement. The key question is under which stress/strain processes the permeability does increase during faulting in shales.

This study investigates the relationships between structural deformations and calcite crystallizations close to the main slipping surface at the interface between the damage zone and the fault core, of a pluri-hectometre reverse-strike slip fault affecting the Toarcian shales in the Tournemire Underground Research Laboratory (URL, France). The aim is to identify processes causing permeability increase during faulting in shale that include dilatancy occurring off the main slipping plane.

### **4.2.3 Fault geology in the Tournemire URL and paleo-circulations**

The Tournemire Underground Research Laboratory (URL) located in the Mesozoic sedimentary basin of the French Causses (Massif Central, France, Fig. 1), is operated by the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN), to study the confining properties of an argillaceous formation (Cabrera et al., 1999; Boisson et al., 2001). The URL is nested in a monoclinical structure tilted 5° to 10° to the North (Constantin et al., 2004) in a 250m thick shale formation respectively composed of 50m thick Domerian and 200m thick Toarcian series intercalated between two 300 to 500m thick dolomitic limestone layers of Bathonien-Bajocian-Aalenian ages and Carixian-Sinemurian ages (Cabrera et al., 1999) (Fig. 1). The shale's mineral composition is relatively homogeneous within the upper Toarcian section, with more than 50 wt.% clay minerals, dominantly illite and illite/smectite, 10-20 wt.% calcite, and 10-20 wt.% quartz. Other components (less than 10 wt.%) include detrital micas, feldspars, pyrite and Fe-dolomite, and organic matter (Boisson et al., 2001; Tremosa et al., 2012). The shale formation has a porosity of 10 to 13 %, (Dick et al., 2015) a water content of 4 to 6 wt% and a hydraulic permeability of  $10^{-14}$  to  $10^{-15}$  m/s ( $10^{-21}$ - $10^{-22}$  m<sup>2</sup>) in the laboratory and of  $10^{-11}$  to  $10^{-14}$  m/s ( $10^{-18}$ - $10^{-21}$  m<sup>2</sup>) in situ (Bonin, 1998; Boisson et al., 2001; Cabrera et al., 1999; Courbet et al., 2013).



**Figure 1:** a- Geological map, the studied fault is indicated in red and b- simplified stratigraphic log. The studied fault is indicated in red. (l1-2, Hettengian; l3-4, Sinemurian; l5, Carixian; l6, Domerian; l7, Early Toarcian; l8-9a, Late Toarcian-Early Aalenian; l9b, Late Aalenian; j1a, Early Bajocian; j1b, Late Bajocian; j2a, Early Bathonian; j2b, Late Bathonian; j3-5, Callovian-Early Oxfordian and j6-7 Late Oxfordian-Early Kimmeridgian).

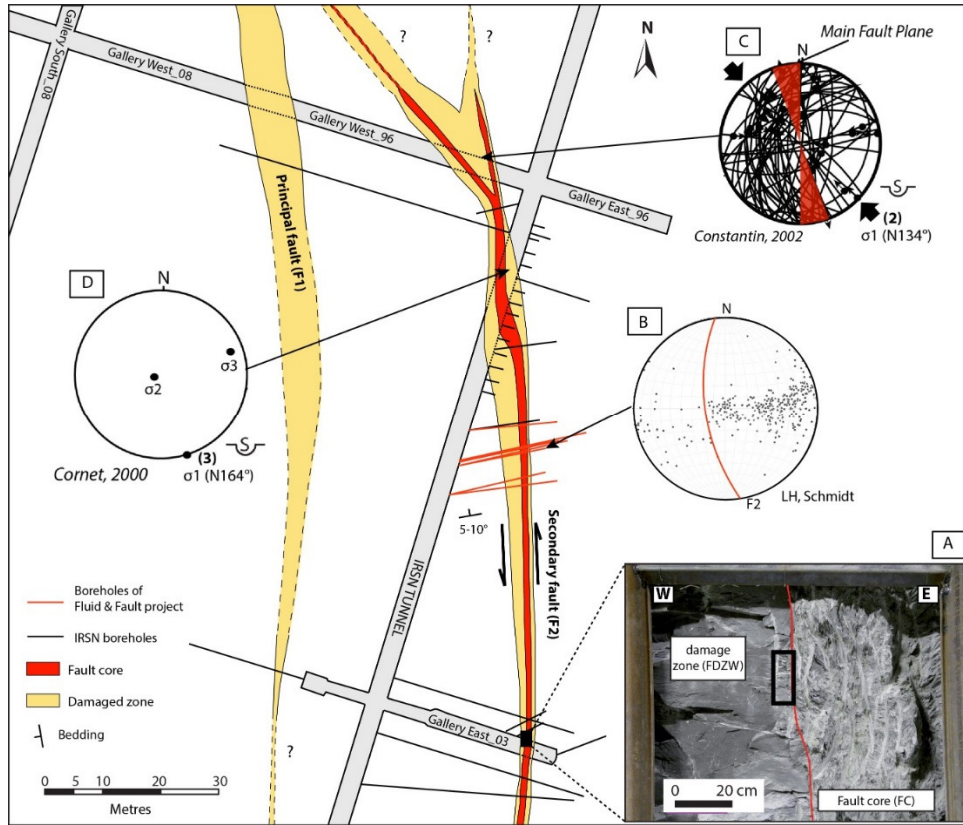
The URL is crossed by two main parallel fault zones (F1 and F2) separated by relatively undeformed rock (Bretaudeau et al., 2014). The location and the geometry of the fault zones were reconstructed using boreholes previously drilled by IRSN and by mapping the intersections between the faults and the URL galleries' walls (Fig. 2). Both faults (F1 and F2) have a similar dip and dip-direction spatially varying from N170° to N010°; 60° to 90°W (Fig.2), characterized by left-lateral strike slip movement with a reverse component (Peyaud et al., 2006). Some small (meter to decameter long) N130° to N150° faults connect F1 and F2 (Constantin, 2002; Bretaudeau et al., 2014). Faults F1 and F2 are crossing a tectonic block bounded to the North by the N090° Cernon fault, to the South by the N090° St Jean d'Alcapies fault and the N040° Tournemire fault (Fig. 1) (Constantin et al., 2004). These three faults extend

into the basement and are considered to be inherited structures from the Hercynian orogeny (De Charpal et al., 1974; Bonijoly and Delpont, 1982).

Two main tectonic stress regimes have affected the Causses basin. An extension during the Upper Jurassic and the Lower Cretaceous (Blès et al., 1989; Martin and Bergerat, 1996, Constantin et al., 2002), characterized by  $\sigma_3$  oriented N–S was followed by a Mid-Cretaceous to Eocene Pyrenean compression during which  $\sigma_1$  varied from NE/SW to NW/SE, with two main pulses striking N020° to N030° and N160° to N170°. (Constantin et al., 2002; Constantin et al., 2004). The Cernon and the St Jean d'Alcapies faults were reactivated as normal faults during the Mesozoic extension and as reverse faults during the Pyrenean compression. These faults display a cumulative vertical inverse offset of 100 to 400m (Constantin et al., 2002). F1 and F2 faults presumably are associated to the compressive Pyrenean tectonic phase. Consequently, these faults may have activated as a right lateral strike-slip during the first compressive pulse, and a left-lateral ones during the second (or last) pulse. Left lateral strain features appear more developed in the fault zone, Constantin (2002) determined a  $\sigma_1$  oriented N134° from microstructural analyses conducted in the northern part of the fault zone (Fig. 2C). However, this principal stress direction has not been found outside the Tournemire URL, and could result from local stress rotation during the faulting process associated to the N160° tectonic episode (Constantin, 2002). The analysis of calcite twins on several veins in fault zones in the studied area (1km<sup>2</sup> around the Tournemire URL, Fig. 1), Constantin et al. (2007) estimated that the paleo-deviatoric stress ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) at the onset of the Pyrenean tectonic inversion was  $\geq 40$  to 50 MPa.

In order to determine the burial depth of the Toarcian shales during the Pyrenean compression period, Séranne (2014) have reconstructed a subsidence curve based on data from Barbarand et al., (2001); Séranne et al., (2002); Peyaud et al., (2005). This gives a range of maximal burial depths of 2.3 to 2.4km roughly corresponding to burial stresses of 57 to 62 MPa at the onset of

the Basin inversion, and at the potential activation time of the studied fault. Thus an estimated magnitude range of paleostress tensor's can be inferred from the principal stresses applied on the studied fault considering a strike slip regime with a sub-horizontal  $\sigma_1 > 70$  MPa, a sub-vertical  $\sigma_2 \sim 60$  MPa and a sub-horizontal  $\sigma_3 \sim 30$  to 40 MPa.



**Figure 2:** IRSN URL structural map (F1 and F2); A- Picture of the principal fault plane ( $N0^{\circ}$ - $N170^{\circ}$ ;  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$ W) at the boundary between the western compartment of the damage zone (FDZW) and the fault core (FC), in the Gallery East\_03. The black rectangle shows the block sample location. (Fig. 3) B) Poles of fracture and fault planes were determined on the image of borehole walls and from core analyses of Fluids & Faults project boreholes drilled from the tunnel. C) Paleo-stress orientation determined by slickensides analyses in Gallery West\_96 (Constantin, 2002). D) Actual tensor orientation determined by leak off tests (Cornet, 2000).

One should note that the present day stress tensor orientation determined with a series of leak-off tests performed in a vertical 180m deep borehole (Cornet, 2000) is identical to the

paleostress tensor's orientation during the second Pyrenean pulse, revealing a “residual” strike slip regime on the studied fault (Fig. 2D). At the URL depth, stress magnitudes are characterized by  $\sigma_1 = 4 \pm 2$  MPa, horizontal and oriented  $N162^\circ \pm 15^\circ E$ ,  $\sigma_2 = 3.8 \pm 0.4$  MPa,  $7-8^\circ$  inclined from vertical in the  $N072^\circ$  direction and  $\sigma_3 = 2.1 \pm 1$  MPa,  $7-8^\circ$  inclined from horizontal in the  $N072^\circ$  direction (Fig. 2C). We may thus consider that this state of stresses has been at steady-state since the end of the uplift period at the Eocene times.

Previous studies (Peyaud et al., 2006) of carbon and oxygen isotopic composition of carbonates from the Tournemire URL highlighted two fluid sources: formation fluids contained in veins affecting the intact Toarcian formation (same composition than the shale cement) and meteoric fluids that influence the composition of veins in the main fault zones (and in a meter size alteration halo around the fault). In the fault zones, some mobility of iron, zinc and REE (rare earth element) was also reported. Peyaud et al., (2006) observed that pyrite recrystallization is associated with early calcite cements, which iron content may exceed 1%, indicating reducing conditions prevailed despite of some meteoric water input. Zoned calcite filling in some geodes indicates fluctuating redox conditions, episodic connections with the overlying Aalenian aquifer, and an evolution in time toward a more open hydrogeologic system (Peyaud et al., 2006).

The fault zone studied in this paper (F2) is >100m long and the vertical offset is estimated to be 4 to 5 meters (Dick et al., 2015). The total thickness of the damage zone (footwall and hanging wall) varies spatially between 9 to 15m depending on the location (estimations were conducted in borehole figured in red in Fig. 2). The damage zone thickness in the hanging wall (west fractured damage zone; FDZW) is about three times that in the footwall (east fractured damage zone; FDZE). While in the Gallery East\_03 (Fig. 2), the FDZW and the FDZE roughly have the same thickness. Different fracture and fault orientations characterize the FDZ (Fig. 2A and 2B); with main directions respectively trending  $N40^\circ$  to  $N90^\circ$  and dipping  $10^\circ$  to  $90^\circ$  NW

or SW: N160° to N020° dipping 20° to 90° W, and N160° to N170° dipping 75° to 90°W (Constantin, 2002). Image of borehole (in red in Fig. 2) walls obtained by the well logging system OPTV (borehole Optical TeleViewer probe) and cores were used for the geological structures analysis. 10 to 20% of fractures are parallel or close to bedding. Most of the other fractures (>70%) display a dominant strike of N160° to N020° with large dip variations (Fig. 2B). Subvertical planes oriented N160° to N020° often expose slickenlines indicating strike-slip motion. The two first direction families display large calcite fillings and some geodes (Peyaud et al, 2006), while the third one is characterized by polished striated planes.

In the studied zone, the fault core (FC) is 0.1 to 2.4m thick. It displays a structural heterogeneity characterized by centimeters thick shear zones filled with gouge material bounded by 0.1 to 0.2m thick highly fractured zones as well as lenses of intact shale. The main orientation of the shear zones follows the N170° to N010°; 80°W average orientation of the fault (Fig. 2A). Millimeter to centimeter thick calcite veins are observed at the FDZW / FC boundary.

#### **4.2.4 Methodology**

In this paper, we describe a detailed study of calcite veins localized at the boundary between the damage zone and the fault core of F2 fault (Fig. 2). This interface is fragile, thus when drilling the boundary between the damage zone and the fault core is systematically damaged and only poor quality samples can be recovered. The gallery\_03 and gallery\_96 walls are the only places where this interface is exposed for favorable sampling conditions. The studied sample comes from the gallery\_03 where the fault's architecture is more simple compared to gallery\_96 where two fault cores are observed. Neither the less similar calcite structures are observed in the two galleries. We have sampled a 12×8×8cm block (Fig. 2A and Fig. 3). The block was sealed in epoxy resin before being CT-scanned to avoid any fracturing induced by shale desiccation. A microstructural study was then conducted on polished vertical and horizontal sections. Then, the block was cut into a series of thirteen 22x22x22mm cubes, which

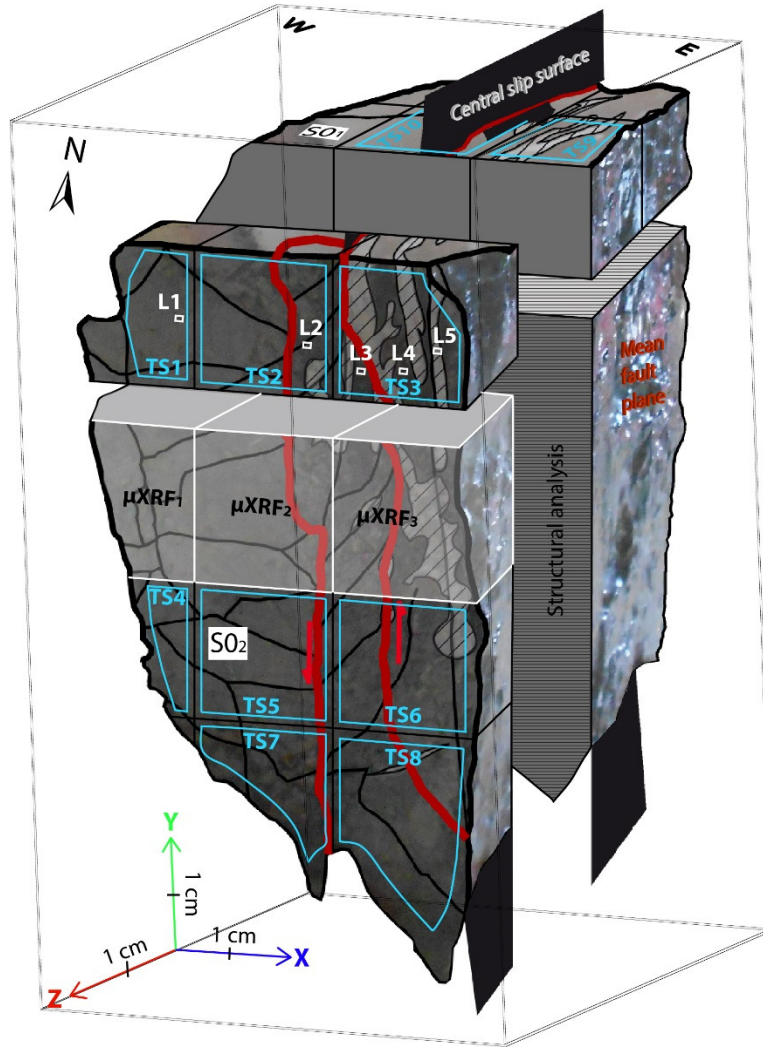
were analyzed by cathodo-luminescence (CL) on thin sections; three of the cubes were analyzed by micro X-Ray Fluorescence ( $\mu$ XRF). The  $\mu$ XRF is an effective method to perform semi-quantitative chemical non-destructive micro-analyses and chemical mapping with 2D high spatial resolution (10-100  $\mu$ m) (Devès et al., 2012).

The  $\mu$ XRF is operated on an X-ray analytical microscope (XGT-7000) combining micro-X-ray fluorescence with X-ray microscopy. The XGT-7000 consists of an excitation source, a parabolic capillary and an Energy Dispersive Sensor (EDS) detector. The excitation source of the XGT-7000 is an X "primary" ray (XR) produced by an X-ray tube equipped with an anode of rhodium (Rh) to which is applied a voltage of 30 kV.

The parabolic capillary provides a 10  $\mu$ m diameter very intense ( $10^8$  photons/s) incident XR beam which "excites" the atoms in the sample in order to generate an X fluorescence emission spectrum. Under the influence of X-rays, electrons can be torn from the energy level on which they are located. The free place is then likely to be filled by electrons located at a higher energy level. These substitutions are accompanied by photon emissions (fluorescence radiation) collected by an EDS detector. This detector can quickly and simultaneously detect a wide energy band of the X fluorescence emitted by several elements (U-Na). Intensities of radiation-emitted fluorescence are proportional to the number of excited atoms and wavelengths (energy) being characteristic of these atoms.

Eight polished thin sections (3 from the eastern compartment adjacent to the main fault plane displaying a higher intensity of deformation and 5 from the western fractured compartment, TS1 to TS8, Fig. 3) were examined by optical microscopy and cathodo-luminescence. A Technosyn Cold Cathode Luminescence Model 8200 Mk II is attached to an Olympus<sup>TM</sup> BH2 microscope and to a Zeiss<sup>TM</sup> MRc5 digital camera in order to compare the results from optical microscopy and CL. The main purpose is to provide information on the distribution of the calcite and sulphides phase in the microstructures.





**Figure 3:** Studied block sample (Location in the Fig. 1A). Grey hatched block vertical and horizontal surfaces were subjected to a micro structural study presented in the Fig. 4. Contoured blue areas (TS1, TS2, TS3, TS4, TS5, TS6, TS7, TS8, TS9 and TS10) represent thin sections locations. White rectangles (L1, L2, L3, L4 and L5) represent the locations of the thin sections photographs presented in Fig. 5. White cubes ( $\mu\text{XRF}_1$ ,  $\mu\text{XRF}_2$  and  $\mu\text{XRF}_3$ ) represent  $\mu\text{XRF}$  analyzed zones presented in the Fig. 8. S01 and S02 represent location of stratigraphic plane measurement presented in the Fig.4.

## 4.2.5 Results

### 4.2.5.1 Shear induced dilation at the FDZ/FC transition zone inferred from microstructural analyses

The sampled block may be divided in two: (i) a western fractured compartment and (ii) an eastern compartment adjacent to the main slickenlined fault surface that bounds the block (eastern extremity of sample, Fig. 3). The eastern compartment displays a higher deformation intensity. The boundary between the two corresponds to a shear surface (Fig. 3 and Fig. 4). In the western compartment, an increase of the bedding dip is observed from horizontal at the block west boundary to 35°SE close to the central slip surface (stereo in Fig. 4 and S0<sub>1</sub> and S0<sub>2</sub> locations in the Fig. 3). In the eastern compartment, the bedding is strongly deformed, and only preserved into centimeter-thick zones.

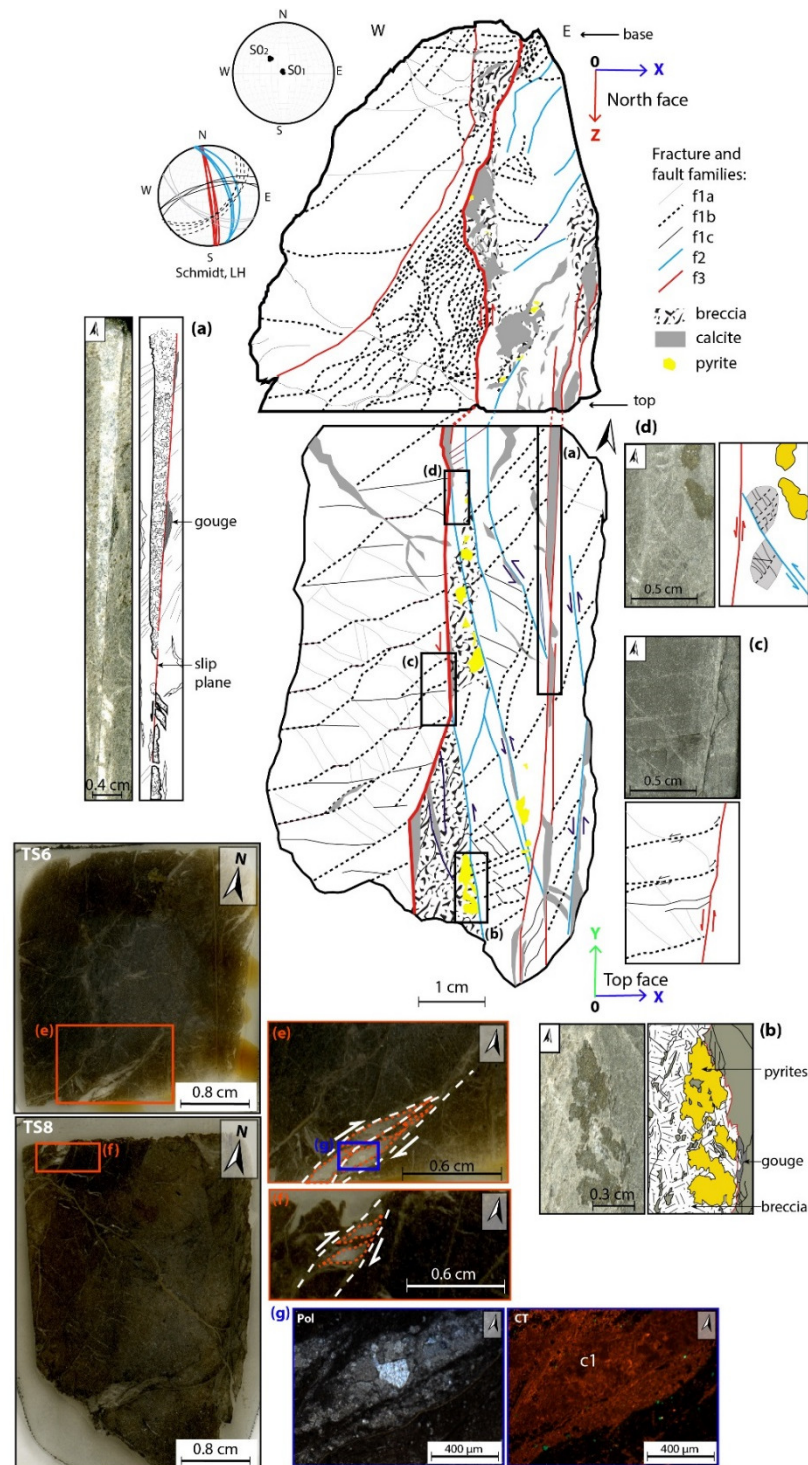
The block is affected by five geometric faults families (f1a, f1b, f1c, f2 and f3):

- Families f1a, f1b and f1c (thin grey continuous lines, dashed dark lines and black continuous lines in Fig. 4) correspond to faults N110° to N130°, dipping 55° to 65°SW; N030° to N060°, 45° to 60°SE and N060° to N080°, 60° to 80°N. Towards the East, the faults are cut by f2 and f3 faults, both strike and dip were rotated anticlockwise, respectively to N30° and >60° to 80° dip. f1a, f1b and f1c faults are mostly observed in the western part of the block where they entirely cut the block (Fig. 4). They are less observed in the eastern part of the block. Sigmoidal veins indicating a dextral movement are observed on f1b fault (Fig. 4e-4f), and an anticlockwise rotation and a left-lateral strike slip reactivation (Fig. 4c) are observed on f1b and f1c fault close to f3 faults. The apparent offsets are small (a few mm at most).
- f2 (blue lines in Fig. 4) corresponds to left-lateral strike slip faults N150° to N160° dipping 60° to 80° to the E. These faults are mainly located in the eastern part of the block (Fig. 4d). They do not cut the entire block and branch on to the f3 fault surfaces.

They may be considered as Riedel R1-shear planes associated to f3 shear planes during the second compression episode, oriented NW-SE.

- f3 (red lines in Fig. 4) corresponds to strike slip faults N170° to N180° dipping 80° to 90° to the E or W (Fig. 4c). A left lateral movement is observed with a small vertical component characterized by slickensides dipping 10° to 20°N. This family includes the main slickenlined fault surface, the central fault surface bounding the two compartments, and several (4 to 5) faults located within the eastern compartment of the block. The minimum offset estimated from the displacement of small calcite shear veins along each plane is several centimeters, thus the total slip on the fault surface may in fact exceed block's length (>5cm, Fig. 4 and Fig. 4a).

Compared with the western block compartment, the eastern one displays a higher intensity of deformation characterized by brecciated zones composed of shale material elements cemented with large amounts of calcite intercalated with deformed shale (Fig. 4b) where the bedding appears rotated anticlockwise. Thin discontinuous black bands (no calcite, Fig. 6b) show, strong deformation looking like gouge material and calcite shear veins are observed along several f3 slip planes (Fig. 4a and Fig. 6b). Along the central slip plane, at the branching with the f2 faults, centimeter-thick breccia made of shale and fractured pyrite elements cemented with calcite are observed (Fig. 4b), These cemented breccia thus formed during left-lateral strike-slip motion. In these local highly dilatant zones, the breccia displays poorly matrix-supported to cement-supported textures.



**Figure 4:** Structural analyses of vertical (0zx) and horizontal (0xy) surfaces perpendicular to the principal fault plane direction (location in Fig. 2). Grey lines, dashed dark and black lines represent family 1a, 1b and 1c fractures (f1a, f1b and f1c), blue lines and red lines represent family 2 and 3 fractures (f2 and f3), respectively. a- Zoom of a slip plane zone. b- Zoom of a brecciated zones cemented with calcite. c- Zoom of anticlockwise rotation and a left-lateral

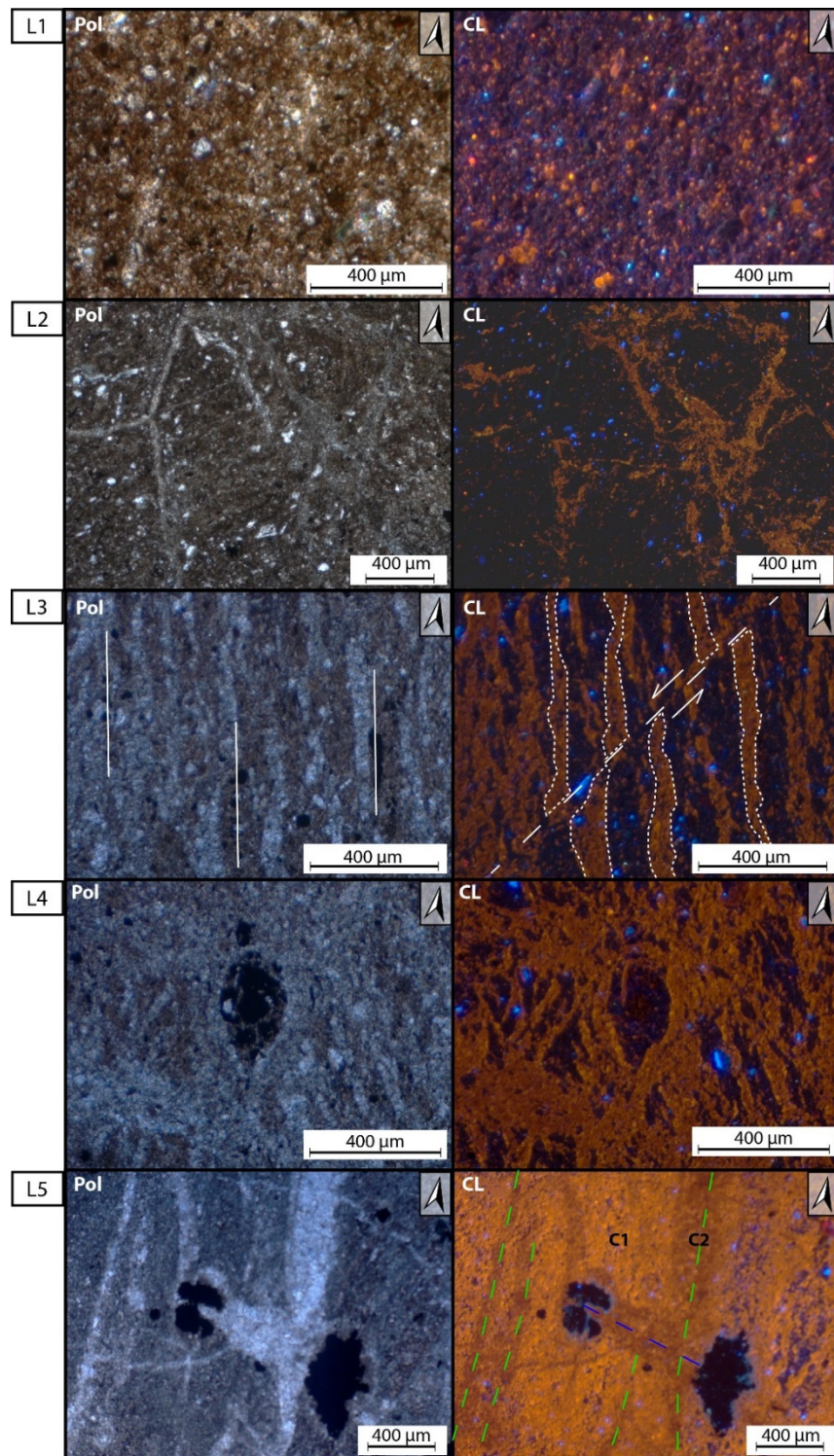
*strike slip of family 1 faults close to left-lateral strike family 3 faults. d- Zoom of left-lateral strike slip of family 2 faults indication. e- and f- Details of sigmoidal veins of f1b fault observed in TS6 and TS8 thin sections, respectively (location in Fig. 3). g- (Pol) is the observation with a polarizing microscope and (CL) are the cathodo-luminescence observations (location in Fig. 4e). S01 and S02 represent stratigraphic plane measurement (location in Fig. 3).*

To summarize, the western compartment bearing fractures between intact rock zones, appears characteristic of the fault damage zone deformation texture, while the eastern compartment represents the edge of the damage zone/fault core (DZ/FC) transition zone with brittle/plastic structures and highly fractured residual blocks. Here, this zone corresponds to a 5cm thick zone where bedding is rotated parallel to the fault surface. Riedel shear are observed, associated with high concentrations of calcite, centimeter scale displacements and dilatant textures such as opening along pre-existing bedding and breccia.

#### **4.2.5.2 Episodes of calcite cementation**

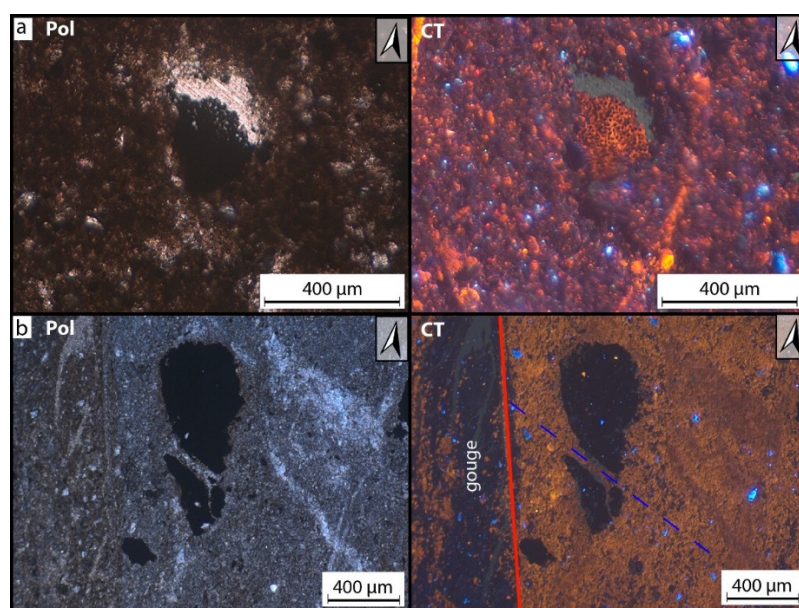
The views L1 and L2 respectively from thin sections TS1 and TS2 (Fig. 3) show two typical microstructures of the FDZW (Fig. 5). L1 is representative of relatively intact or slightly-deformed rock, composed of carbonates in the form of highly cathodoluminescent and bright orange (in CL) calcite grains, bioclasts, quartz, framboidal pyrite and a dominant fraction of clay minerals. The mineral distribution is relatively homogeneous without any apparent deformation. L2 shows carbonates (mainly high CL calcite cement) concentrating into N010° to N170° and N080° to N100° micro-cracks and fractures while the neighboring clay matrix has fewer calcite grains when compared to L1.





**Figure 5:** Thin sections of different fault zone materials. For each thin section, (Pol) is the observation with a polarizing microscope and (CL) is the cathodo-luminescence observation. L1, L2 analyzed zones are localized in the FDZW (in TS1 and TS2 thin sections, Fig. 3) and L3, L4 and L5 are localized in the DZ/FC transition zone (in TS3 thin section, Fig. 3).

L3, L4 and L5 are views (Fig. 5) from the thin section TS3 cut perpendicularly to the central slip surface in the DZ/FC transition zone (Fig. 3). L3 is located in the eastern wall of the central slip surface, a zone where stripes of calcite irregularly alternate with stripes of clay material. Stripes are roughly oriented N160° to N170° and are hundreds of micrometer long. They are sub-parallel to the central fault plane and are cross cut by a N040° left lateral shear fault (associated with f1b, dashed white line in L3, Fig. 5), which could in this context be tentatively interpreted as a R2 shear during the first compression episode, oriented NE-SW. The framboidal pyrite which is located in the bedding plane in the intact rock (L1 sample) here is located in the stripes. This observation suggests that the calcite stripes formed from opening of the bedding and were rotated parallel to the main fault surface (figured by the white continuous lines in L3, Fig. 5).



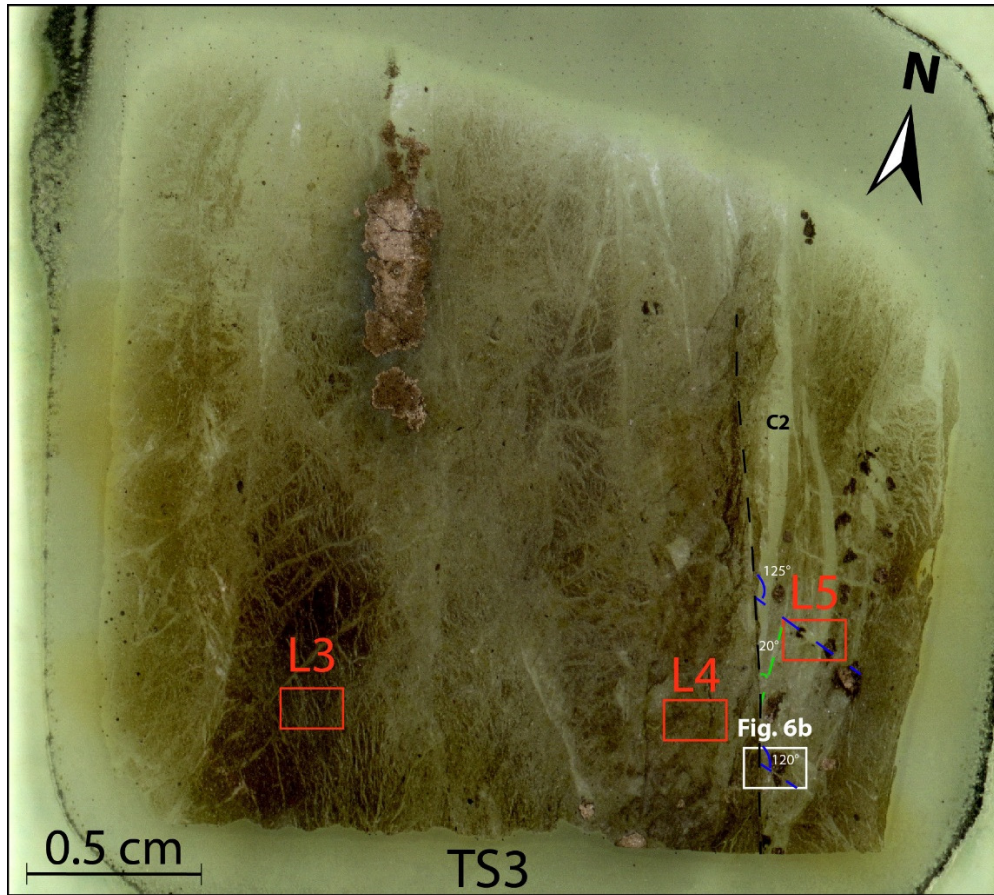
**Figure 6:** a- Luminescent calcite (C1) fills the pores of framboidal pyrite. b- Analyze from TS3, thin section, in the DZ/FC transition zone, (Fig. 3). Presenting a partly recrystallized pyrite cut by N110° to N120° cracks (dashed blue line) with no apparent shear displacement. The dark zone (lack of calcite and grain reduction) along a family 3 fault (red line) represent a gouge band. (Pol) is observation with a polarizing microscope and (CL) is cathodo-luminescence observations.

The L4 thin section is located in a brecciated DZ/FC transition zone (Fig. 3). The stripe pattern in L4, appear to be more complex than in L3 as calcite veins more or less surround a partly recrystallized pyrite framboid bearing larger crystals of irregular shape. Luminescent calcite fills the pores in some framboidal pyrites, which also appear altered compared to L1-3 thin sections (Fig. 6a).

The thin section L5 is located close to the f3 shear zone (Fig. 3). There are few shale fragments and quartz grains remaining. Two phases of calcite veins appear, intense CL calcite (C1) being cross-cut by a low luminescent (C2) one (L5, Fig. 5). C1 luminescence is close to the calcite luminescence observed in the intact shale matrix in thin sections L1 and L2, which could support the hypothesis that C1 originates from the intact shale formation. Likewise, the sigmoid veins indicating a dextral movement, thus presumably formed early in the strike-slip fault history, are composed of the C1.

C2 calcite crosscuts the C1 phase along two main directions. One corresponds to centimeter-thick cracks connecting to the f3 shear planes with an angle of about 20° (dashed green line in L5, Fig. 5 and Fig. 7) and then evolving into subparallel secondary planes. The other one corresponds to thin (<0.1mm) 0.2 to 0.5cm cracks making an angle of 120° to 130° (dashed blue line in L5, Fig. 5 and Fig. 7) with the f3 shear planes (dashed black line in Fig. 7). These N110° to N120° cracks (dashed blue line in L5, Fig.5 and Fig. 7) cut the recrystallized framboidal pyrite with no apparent shear displacement, while the N180° to N020° (green line in L5, Fig. 5 and Fig. 7) veins induce a stretching of the pyrite crystals (Fig. 6b).





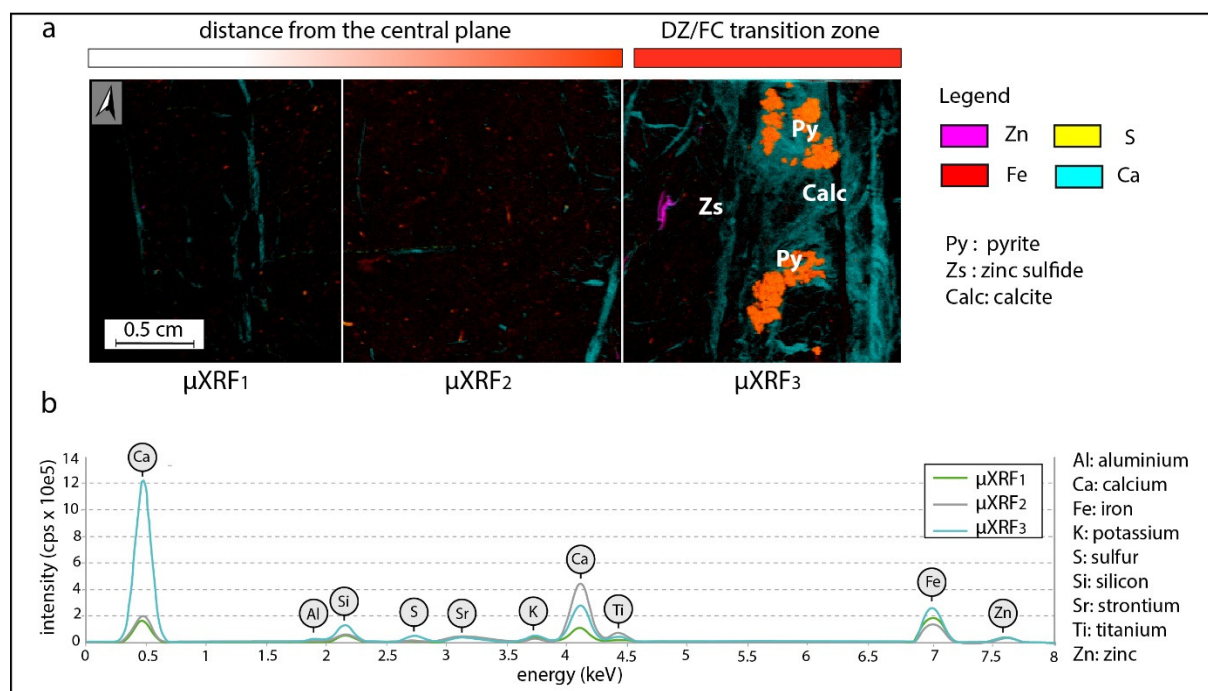
**Figure. 7:** Picture of the TS3 thin section with L3, L4, L5 (presented in Fig. 5) and Fig. 6b.

#### 4.2.5.3 Micro-analyses

The main identified chemical elements are Ca, Fe, Zn, S, Si, Al, K, Sr (Fig. 8). The  $\mu$ XRF chemical mapping of three horizontal thin sections along a profile perpendicular to the fault slip surface (Fig. 3 and Fig. 8a) shows a difference in the distribution of Ca and Fe in the DZ/FC transition zone (eastern compartment of the sample:  $\mu$ XRF<sub>3</sub>, Fig. 3) compared to DZ (western compartment  $\mu$ XRF<sub>1</sub> and  $\mu$ XRF<sub>2</sub>). Figure 8b shows an increase in the Ca (Ca intensity peak  $\times$  6) and Fe (Fe intensity peak  $\times$  2) concentrations and the appearance of zinc sulphides in the DZ/FC transition zone.

In the damage zone ( $\mu$ XRF<sub>1</sub> and  $\mu$ XRF<sub>2</sub> zones in Fig. 8a), Ca concentrates in f1 faults. Close to the main slip plane ( $\mu$ XRF<sub>3</sub> zone upper right in Fig. 8a), f1 faults are sheared by f3 and f2 faults. In the DZ/FC transition zone, there is a high concentration of diffuse Ca zones affected by veins

associated to the f3 shear zones. These shear zones are made of micro to millimeter bands of clay minerals and vein shapes are in good accordance with left lateral slip along the shear zones. In details in  $\mu\text{XRF}_3$  zone (bottom east in Fig. 8a), calcite veins appear thicker at the contact with the shear zone, and then evolve into thin calcite veins parallel to the shear zone. The Fe content is diffuse in the damage zone where it corresponds to the small infra-millimeter framboidal pyrite grains, and concentrated in large 0.3 to 0.5cm patches of mainly recrystallized pyrite in the CZ/FC transition zone (Fig. 8a). In  $\mu\text{XRF}_3$  zone (lower part), the large patch of pyrite displays a sigmoid shape, showing that pyrite is involved in the shear deformation associated to the f3 slip planes.

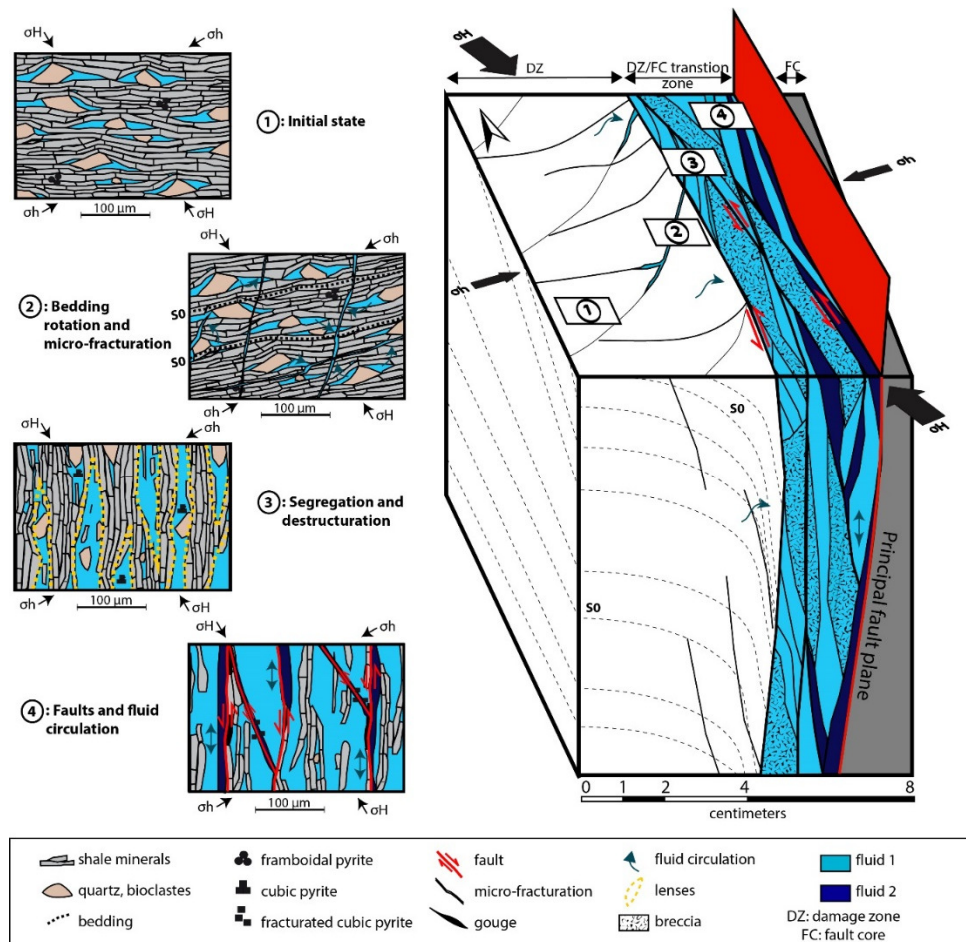


**Figure 8:** a-  $\mu\text{XRF}$  studied zone (1 px = 100 microns, incident: beam: spot 100 microns, 30 kV, anode Rh, counting time: 800 s x 10),  $\mu\text{XRF}_1$  and  $\mu\text{XRF}_2$  are localized in the FDZW and  $\mu\text{XRF}_3$  is localized in the DZ/FC transition zone (see Fig. 3 for locations). b- Mean spectra for each of the  $\mu\text{XRF}_1$ ,  $\mu\text{XRF}_2$ , and  $\mu\text{XRF}_3$  zones showing the chemical variations between the FDZW and the DZ/FC transition zone.

## 4.2.6 Interpretation/Discussion

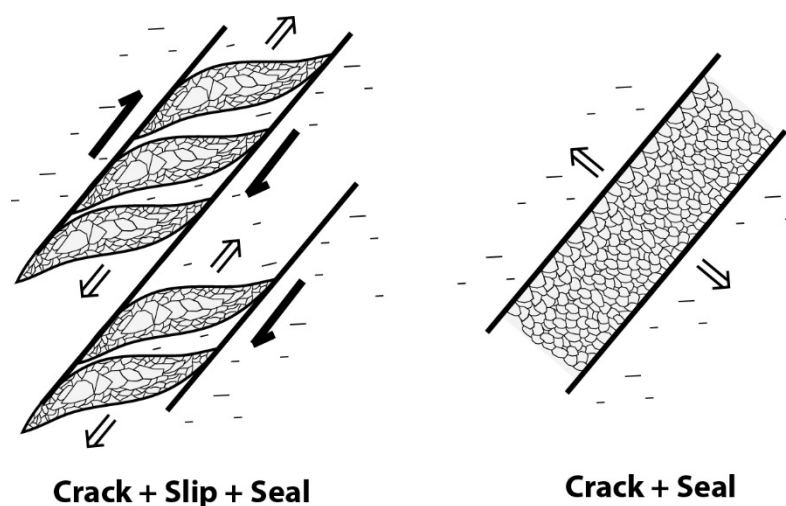
### 4.2.6.1 Relationships between vein growth, fluid composition and deformation within the fault zone

Our observations clearly show (Fig. 9): (i) a concentration of calcite in the most deformed part of the DZ/FC transition zone, (ii) two successive calcite precipitation phases associated to different processes of fault deformations and (iii) that slip planes are composed of clay gouge, most calcite veins being located off the slip planes (Fig. 6b). The figure 10 highlights two deformation sequences observed in the sample for the two calcite phases; the “Crack + Seal” and the “Crack + Slip + Seal” deformation sequences (Petit et al., 1999).



**Figure 9:** Synthesis of the coupled paleofluids-strain observations at the Tournemire fault main slip surface. Family 1 fractures have not shown and the fluid proportion is exaggerated in 3 and 4 pictures, for a better visualization.

The first calcite (C1) phase presumably precipitated from a fluid in equilibrium with the formation. It is associated with f1 to f3 fractures in the damage zone, opening of bedding planes and breccification within the fault DZ/FC transition zone. Pyrite recrystallization occurs more or less synchronously. The second calcite (C2) phase is associated to late dilation associated with slip on f3 shear zones. It is characterized by sigmoid veins branching from f3 shear zones and small mode 1 cracks. Calcite from this phase displays lower orange luminescence than earlier calcite cements, presumably indicating a lower Mn content (e.g. Cazenave et al. 2003). Some larger crystal of partly recrystallized framboidal pyrite associated with the first calcite cementation phase have been fractured and these fractures are filled with low luminescence calcite of the second phase. The second phase is thus associated to late shearing and brittle fracturing within a cemented part of the fault core. There is no evidence of pyrite crystallization during this phase.



**Figure 10:** Representation of “crack, then seal” and “crack + slip + seal” deformation sequences.

Peyaud et al., (2006) show that the later calcite cements are formed under less reducing conditions than the earlier cements. The fault zone studied here displays comparable evolution with an earlier episode of high luminescence calcite precipitation and pyrite recrystallization and a later episode of low luminescence calcite precipitation without pyrite recrystallization. We infer the precipitation of these two phases correspond to a similar evolution from more reducing to less reducing conditions and indicate hydrogeologic opening of the system. The later cements represent a comparatively small volume and only occur in association with left lateral slip surfaces. The earlier cements formed during left-lateral slip as well as during an earlier right-lateral episode and possibly also during a syn-sedimentary extensional episode. The hydrogeologic opening of the system occurs relatively late in the faulting history and we wonder whether this opening is the consequence of a better connectivity of the fracture network in the fault zone or the effect of exhumation, erosion and karst development in the overlying formations.

Faults from f1 may be explained by both the state of stresses during the early Basin tectonic inversion and the intact shale anisotropy related to bedding (transverse isotropy). Indeed, according to laboratory tests (Ambrose et al., 2014), if we consider an early upper-cretaceous pulse characterized by N020° to N030° trending horizontal  $\sigma_1$  (Constantin et al., 2004), magnitude over 70 MPa affecting consolidated shales parallel to bedding and a confining stress of about 60 MPa may generate shear rupture surfaces in the shale matrix creating angles of about 20° to 30° with the bedding. It could explain the reverse faults N110° to N130° dipping 55° to 65°SW and N060° to N080° dipping 60° to 80°N. Another explanation of f1 faulting could relate to a Riedel shear zone system, in accordance with an early dextral movement on a pre-existing main fault plane (during the first NE-SW compression episode).

f2 and f3 faults crosscut f1b and f1c fractures which display an anticlockwise rotation (close to the f3 planes) in good accordance with a left-lateral strike slip reactivation. This reactivation

highlights a second compression episode characterized by a N160° to N170 trending horizontal  $\sigma_1$ , in good accordance with the principal stress rotation during the second Pyrenean pulse (Constantin et al., 2002; Constantin et al., 2004). The C1 phase is associated with dextral movement of the fault probably during the first episode of the Pyrenean compression (NE-SW) and continued at least during the beginning of the left-lateral phase, notably associated with breccia formation at the intersections of slip planes. The C2 phase is exclusively associated with the left-lateral reactivation of the fault during the second episode of the Pyrenean compression (SE-NW). The differences between both calcite microstructures may mainly result from the degree of pre-rupture cementation of the fault zone that may alter the fault compliance, the C2 phase affecting already cemented and less compliant fault rocks than the C1 phase.

#### **4.2.6.2 Permeability variations during faulting**

The distribution of veins in shear zones is controlled by enhanced dilatancy along releasing segments of the shear zones, which may channel fluid flow and locally contribute to resealing the fault by calcite precipitation. Different ways of potential permeability increase related to dilation induced by fault movements affecting shales are observed in the studied block. Most dilation occurs at a distance from the main slipping planes. Patches of brecciated shale with high fracture porosity formed around the intersections between the main shear planes and secondary faults (e.g. R1) or inherited structures such as re-oriented bedding or small faults formed in a different stress regime. Interestingly, these high dilatant zones take place in relatively low strain areas, in the transition zone between the damage zone and the fault core. In this case study, the zone containing potential high permeability conduits for flow is a few centimeters-thick. During the reactivation phase the same dilatant effects may occur much more localized close to a few active shear planes with clay gouge. This is in accordance with permeability tests conducted during laboratory shear tests on a sample pre-cut by a fracture that



showed series of fractures and a complex pattern of deformation occurring off the slipping fracture surface to a distance of about 1mm (Cuss et al, 2011). In addition, Bolton et al. (1999) showed that after being deformed at a high over-consolidation ratio, shear zones in fine-grained sediments can dilate and thereby act as efficient fluid-flow conduits. In the Tournemire shales, both over-consolidation under a high burial stress and calcite sealing may have produced the conditions for brittle dilatant failure in shear and a potentially strong permeability-vs-stress dependency.

#### **4.2.7 Conclusions**

The micro-structural and chemical analyses of a block sample from a fault zone intersected in the Tournemire URL, indicate two calcification phases took place. The fault zone recorded two episodes of compressive deformation during the Pyrenean orogeny along NE-SW and SE-NW directions that result in the formation of both right lateral and left lateral shear structures, the latter being more developed in the block studied. We show that the first calcite phase has fossilized fluids channels conditioned by the brittle dilatant behavior of the anisotropic intact shales under moderate confining stress. Then, sealing of the initial fault zone structures occurred, conditioning much more localized and comparatively less dilatant strain during a late episode of left-lateral slip (Fig. 9). Our observations indicate that dilation occurs in a wider zone during fault initiation (all the studied block is affected) or at least when strain was not localized on discrete slipping surface, than when the fault is reactivated along a main shear plane at the boundary of the fault core. In any case, most dilation occurs off the main shear planes, and is primarily associated to interaction between structures, either pre-existing like bedding or early fractures, or coevolving such as Reidel shears.

Although dilation, as indicated by vein volume, appears more developed during the early stages of deformation, the coeval recrystallization of pyrite suggests the prevalence of reducing conditions. The later opening of the hydrogeological system to more oxidizing conditions is

probably the result of a better hydraulic connectivity of the system during later stages of fault activity.

### **Acknowledgments**

The authors would like to thank Total for funding the project and IRSN to allow access to the Tournemire laboratory facility and their help and participation to the experiments. This study was also financially supported by CNRS program NEEDS-MIPOR. We also would like to thank Lionel Marié for the thin sections and samples realization and Perrine Chaurand for the use of the XRF analysis.

### **References**

- Ambrose, J., Zimmerman, R.W., Suarez-Rivera, R., 2014. Failure of Shales under Triaxial Compressive Stress. American Rock Mechanics association 14-7506.
- Arch, J., Maltman, A., 1990. Anisotropic permeability and tortuosity in deformed wet sediments. *Journal of Geological Research* 95(B6), 9035-9045.
- Barbarand, J., Lucazeau, F., Pagel, M., Séranne, M., 2001. Burial and exhumation history of the south-eastern Massif Central (France) constrained by apatite fission-track thermochronology. *Tectonophysics* 335, 275-290.
- Berg, S.S., Skar, T., 2005. Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SU Utah. *Journal of Structural Geology* 27, 1803-1822.
- Billi, A., Salvini, F., Storti, F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implication for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25, 1779-1794.
- Blès, J.L., Bonijoly, D., Castaing, C., Gros, Y., 1989. Successive post-Variscan stress fields in the French Massif Central and its borders (Western European plate): comparison with geodynamic data. *Tectonophysics* 169, 79-111.



- Bretonneau, F., Gélis, C., Leparoux, D., Brossier, R., Cabrera, J., Côte, P., 2014. High-resolution quantitative seismic imaging of a strike-slip fault with small vertical offset in clay rocks from underground galleries: Experimental platform of Tournemire, France. *Geophysics* 79, No 1, B1-B18.
- Bonin, B., 1998. Deep geological disposal in argillaceous formations: Studies at the Tournemire Test Site. *Journal of Contaminant Hydrology* 35, 315-330.
- Boisson, J.Y., Bertrand, L., Heitz, J.F., Moreau-Le Golvan, Y., 2001. In situ laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. *Hydrogeology Journal* 9, 108-123.
- Bolton, J., Clennell, B., Maltman, J., 1999. Nonlinear stress dependence of permeability: A mechanism for episodic fluid flow in accretionary wedges. *Geology*; March 1999; v. 27; no. 3; 239–242; 3 figures.
- Bonijoly, D., Delpont, G., 1982. Etude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par la télédétection et la géologie structurale. BRGM, Orléans, 46, 64.
- Bruhn, R.L., Parry, W.T., Yonkee, W.A., Thompson, T., 1994. Fracturing and hydrothermal alteration in normal fault zones. *Pure and Applied Geophysics* 142, 609-644.
- Cabrera, J., Volant, P., Baker, C., Pettitt, W., Young, R.P., 1999. Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media: The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site (France). 37th U.S Rock Mechanics Symposium, vail, Amadei & Kranz & Scott & Smeallie (eds), Balkema, 957-964.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture of permeability structure. *Geology* 24, 1025-1028.
- Cazenave, S., Chapoulie, R., Villeneuve, G., 2003. Cathodoluminescence of synthetic and natural calcite: the effects of manganese and iron on orange emission. *Mineralogy and Petrology* 78, 243-253.

Charpentier, D., Tessier, D., Cathelineau, M., 2003. Shale microstructure evolution due to tunnel excavation after 100 years and impact of tectonic paleo-fracturing. Case of Tournemire, France. *Engineering Geology* 70, 55-69.

Chester, F.M., Logan, J.M., 1986. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pure and Applied Geophysics* 124, 79-106.

Chester, F.M., Evans, J.P., Biegel, R.L., 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research* 98, 771-786.

Clausen, J.A., Gabrielsen, R.H., Johnsen, E., Korstgard, J.A., 2003. Fault architecture and clay smear distribution. Examples from field studies and drained ring-shear experiments. *Norwegian Journal of Geology* 83, 131-146.

Constantin, J., Vergély, P., Cabrera, J., 2002. Tectonique et fracturation associée dans le bassin des Causses (Aveyron, France) : le cas du secteur de Tournemire. *Bulletin Société géologique de France* 173, n° 3, 229-243.

Constantin, J., 2002. Fracturation et paléocirculation de fluides dans les formations géologiques de faible perméabilité matricielle: le cas des argilites de Tournemire (Aveyron, France). Thèse, Université d'Orsay, France.

Constantin, J., Peyaud, J.B., Vergély, P., Pagel, M., Cabrera, J. 2004. Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 25-41.

Constantin, J., Laurent, P., Vergély, P., Cabrera, J., 2007. Paleo-deviatoric stress magnitudes from calcite twins and related structural permeability evolution in minor fault: Example from the toarcian shale of the French Causses Basin, Aveyron, France. *Tectonophysics* 429, 79-97.

- Cornet, F.H., 2000. Détermination du champ de contrainte au voisinage du laboratoire souterrain de Tournemire. Rapport du Laboratoire de Mécanique des Roches, Département de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris.
- Courbet, C., Dick, P., Lefèvre, M., Witterbroodt, C., Matray, J., Barnichon, J., 2013. Estimating Hydraulic Conductivities in a Fractured Shale Formation from Pressure Pulse Testing and 3d Modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #MR11A-2202.
- Cuss, R.J., Milodowski, A., Harrington, J.F. (2011). Fracture transmissivity as a function of normal and shear stress: First results in Opalinus Clay. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1960-1971.
- De Charpal, O., Trémolière, P., Jean, Masse, P., 1974. Un exemple de tectonique de plate-forme : les Causses majeurs (sud du Massif central). *Rev IFP* (5) XXIX, 641-659.
- Devès, G., Perroux, A-S., Bacquart, T., Plaisir, C., Rose, J., Jaillet, S., Ghaleb, B., Ortega, R., Maire, R., 2012. Chemical element imaging for speleothem geochemistry: Application to a uranium-bearing corallite with aragonite diagenesis to opal (Eastern Siberia, Russia). *Chemical Geology* 294-295, 190-202.
- Dick, P., Courbet, C., Wittebrood, C., Dauzere, A, Matray, J-M., 2015. Internal structures of fault zones in low permeability formation and their relationship with fluid flow: insights the Tournemire URL. *Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Bruxelles. Abstract 15-21.
- Evans, J.P., Forster, C.B., Goddard, J.V., 1997. Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology* 19, 1393-1404.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C., Lewis, Rutter, E.H., 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of a Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics* 367, 235-251.

Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zone. *Journal of Structural Geology* 32, 1557-1575.

Gudmundsson, A., Berg, S.S., Lyslo, K.B., Skurtveit, E., 2001. Fracture networks and fluid transport in active fault zones. *Journal of Structural Geology* 23, 343-453.

Gudmunson, A., Simmenes, T.H., Larsen, B., Philipp, S.L., 2010. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *Journal of Structural Geology* 32, 1643-1655.

Hesthammer, J., Johansen, T.E.S., Watts, L., 2000. Spatial relationships within fault damage zones in sandstone. *Marine and Petroleum Geology* 17, 873-893.

Jourde, H., Flodin, E.A., Aydin, A., Durlowski, L.J., Wen, X.H., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurement. *AAPG Bulletin* 86, 1187-1200.

Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503-517.

Mandl, G., Jong, L.N.J., Maltha, A., 1977. Shear Zones in Granular Materiel, An Experimental Study of Their Structure and Mechanical Genesis. *Rock Mechanics* 9, 95-144.

Manzocchi, T., Walsh, J.J., Nell, P., Yielding, G., 1999. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience* 5, 53-63.

Martin, P. and Bergerat, F., 1996. Palaeo-stresses inferred from macro- and microfractures in the Balazuc-1 borehole (GPF programme). Contribution to the tectonic evolution of the Cévennes boreder of the SE Basin of France. *Marine and Petroleum Geology*, vol 13, No.6, 671-684.

Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F., Aubourg, C., 2011. Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss. Journal of. Geoscience* 104, 187–210. doi:10.1007/s00015-011-0070-4.

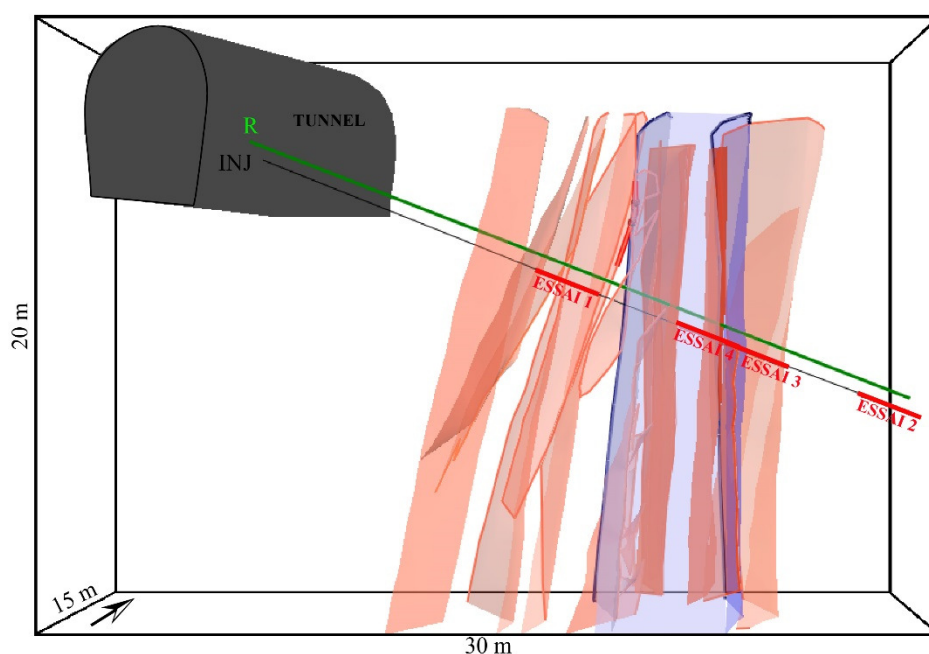
- Nussbaum, C. and Bossart, P., 2004. Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory. Technical Note 2005-10, Mont-Terri Project, Geotechnical Institute Ltd, Switzerland.
- Petit, J-P., Wibberley, C.A.J., Ruiz, G., 1999. Crack-seal, slip: a new fault valve mechanism ? *Journal of Structural Geology* 21, 199-1207.
- Peyaud, J.B., 2002. Diagenèse et transferts en milieu argileux fracture: l'argile de Tournemire (Aveyron-France). Thèse, Univ. d'Orsay, France.
- Peyaud, J.B., Barbarand, J., Carter, A., Pagel, M., 2005. Mid-Cretaceous uplift and erosion on the northern margin of the Ligurian Tethys deduced from thermal history reconstruction. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 462-474.
- Peyaud, J.B., Pagel, M., Cabrera, J., Pitsch, H., 2006. Mineralogical, chemical and isotopic perturbations induced in shale by fluid circulation in a fault at the Tournemire experimental site (Aveyron, France). *Journal of Geochemical Exploration* 90, 9-23.
- Rice, J. R., and J. W. Rudnicki, 1979. Earthquake precursory effects due to pore fluid stabilization of a weakening fault zone, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2177–2193, doi:10.1029/JB084iB05p02177.
- Séranne, M., Camus, H., Lucazeau, F., Barbarand, J., Quinif, Y., 2002. Surrection et érosion polyphasées de la bordure cévenole – Un exemple de morphogenèse lente. *Bulletin de la Société Géologique de France* 173(2), 97-112.
- Séranne, M., Y a-t-il du gaz de schiste en Languedoc? 2014. *Annales de la Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault*. Vol. 154.
- Sibson, R.H., 1977. Fault rock and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society* 133, 191-213.

- Tremosa, J., Arcos, D., Matray, J.M., Bensenouci, F., Gaucher, E.C., Tournassat, C., Hadi, J., 2012. Geochemical characterization and modelling of the Toarcian/Domerian porewater at the Tournemire underground research laboratory. *Applied Geochemistry*, 27, 1417-1431.
- Wibberley, C.A.J., Yielding, G., Di Toro, G., 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *The Internal Structure of Fault Zones*, Geological Society London 299, 5-33.
- Yielding, G., Øverland, J.A., Byeberg, G., 1999. Characterization of fault zones for reservoir modeling: an example from Gullfaks Field, Northern North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 83, 925-951.
- Zhang, S., Cox, S.F., 2000. Enhancement of fluid permeability during shear deformation of a synthetic mud. *Journal of Structural Geology* 22, 1385-1393.

## 5 HYDROGÉOLOGIE DE LA ZONE DE FAILLES A PARTIR DES TESTS D'INJECTION

### 5.1 Imagerie de la circulation d'eau par le système d'acquisition de résistivité électrique.

Dans le cadre du projet «Fluides & Failles», l'entreprise ImaGeau a installé un système d'acquisition de résistivité en continu dans un forage traversant la zone de failles (le forage R) à proximité (moins d'un mètre de distance) du forage d'injection (forage INJ) afin de suivre la circulation de fluides dans le milieu testé (Fig. 56).



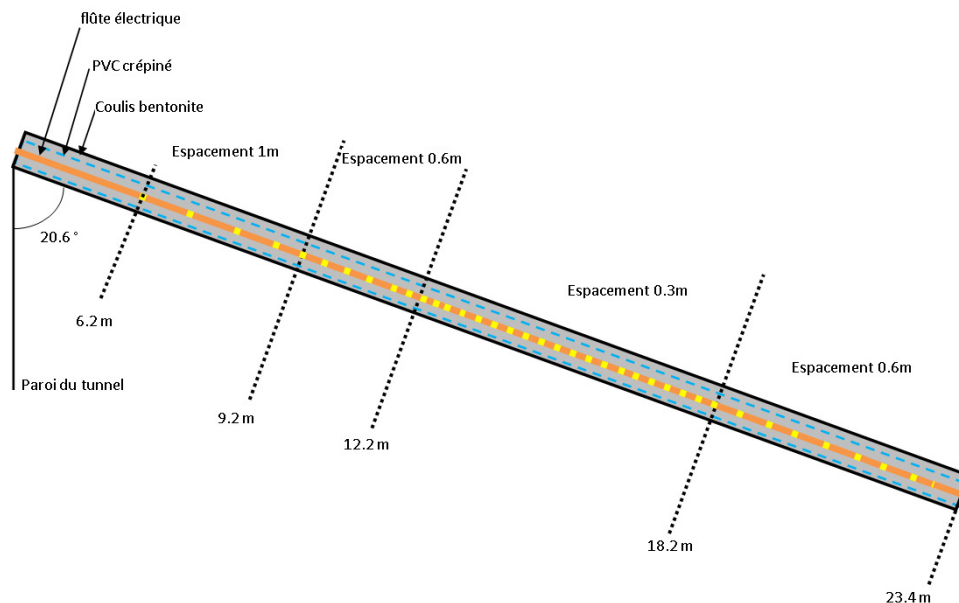
**Figure 56 :** Carte présentant le forage d'injection (INJ, en noir), le forage doté du dispositif de résistivité (R, vert), les intervalles des tests (en rouge) et la géologie du modèle gOcad.

#### 5.1.1 Le dispositif de la flûte de résistivité

La société ImaGeau a installé *in-situ* un système d'acquisition en continu de résistivité pour imager la dynamique du milieu durant les essais d'injection de fluides réalisés par le CEREGE au sein de la zone de failles.

Un tube PVC crépiné a été installé dans le forage afin de recevoir la flûte de résistivité et d'injecter un coulis de bentonite. Pour réaliser une cimentation totale et homogène du forage et de la flûte électrique, le coulis de bentonite a été introduit dans le forage par le biais d'un tuyau

que l'on remonte au fur et à mesure de l'injection du coulis (Fig. 57).



**Figure 57 :** Schéma de l'espacement inter-électrode dans la flûte de résistivité. La localisation par rapport aux autres forages et aux ponts d'injection est présentée dans la figure 54a.

Le coulis de bentonite permet d'assurer le contact électrique des électrodes de la flûte avec la formation d'argile avoisinante, sa résistivité est de  $5\Omega.m$ . Dans cette configuration, la flûte électrique n'est pas centrée dans le puits mais repose sur le tube crépiné. Durant les phases de tests d'injection, l'acquisition est effectuée toutes les 15 minutes afin d'obtenir une évolution dynamique de la résistivité dans la zone de failles.

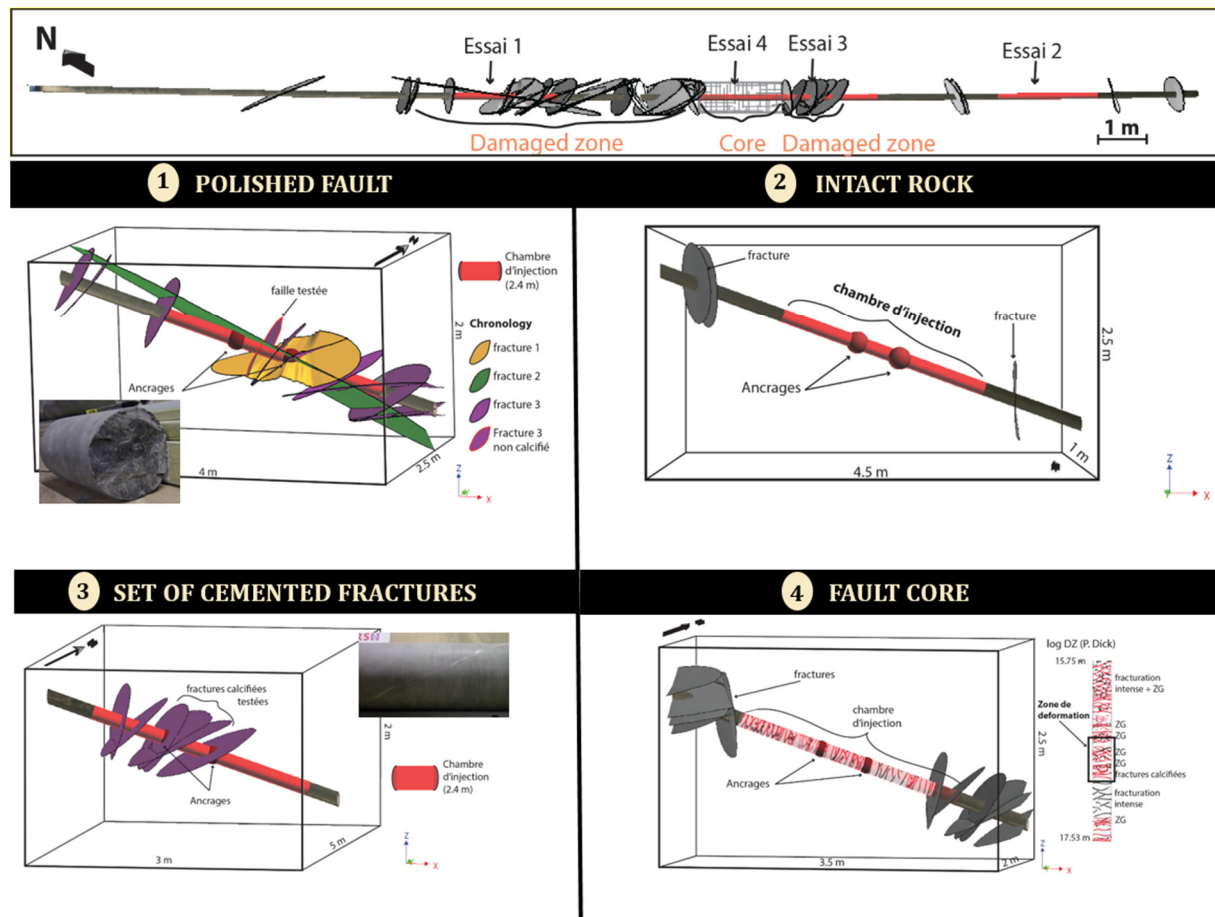
### 5.1.2 Deux phases de test d'injection

La première phase de test a été réalisée à l'aide de la sonde HPPP qui permet une injection entre deux packers distants de 2.4m en différents intervalles du forage d'injection. Chaque test (tests 1 à 4) a duré environ 6 heures en incluant des séquences d'injection par pulse, par paliers et à pression constante.

Cette première phase d'injection a eu lieu entre le 07 avril 2014 et le 10 avril 2014. Quatre intervalles de la zone de failles ont été testés (Fig. 58):

- Deux dans la zone endommagée (domaines fracturés): test 1 (compartiment ouest) et test 3 (compartiment est).
- Un au niveau du cœur de faille (ou zone de failles principale): test 4.
- Un dans la zone intacte: test 2.





**Figure 58 :** Localisation et description des zones testées. Le test 1 se trouve dans la zone endommagée du compartiment ouest (hanging wall) de la zone de failles et plus précisément, c'est une faille lustrée qui est testée. Le test 2 se trouve dans le compartiment Est (footwall) de la zone de failles, et plus précisément la zone intacte. Le test 3 se situe aussi dans le footwall, dans la zone endommagée, et concerne une série de fractures calcifiées. Le test 4 se trouve dans la zone de cœur de faille. La figure 54a présente la localisation de ces différents tests.

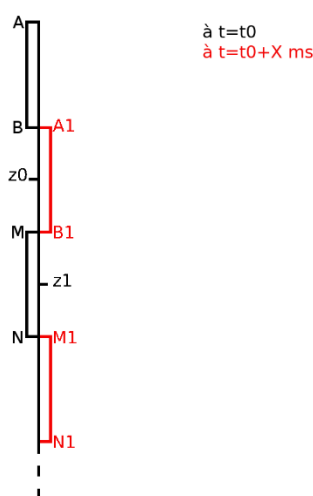
La deuxième phase est composée des tests 5 et 6. Pour le test 5, un demi système, composé d'un seul packer a été installé à 14.5m permettant d'isoler la partie inférieure du forage de la partie supérieure. Ensuite, un test à pression constante a été effectué du 12 Juin 2014 à 18h11 au 16 Juin 2014 à 15h. Il fut arrêté lorsque des fuites observées dans le forage d'injection indiquèrent un contournement du packer. En ce qui concerne le test n°6, le packer a été déplacé à 15.7m. Le test s'est déroulé du 16 Juin 2014 à 15h00 au 18 Juin 2014 à 23h00. Il fut arrêté car il n'était plus possible d'injecter.

### 5.1.3 Mise en évidence des circulations d'eau

#### 5.1.3.1 Par diagraphie électrique continue

Une diagraphie électrique continue représente chaque mesure de résistivité électrique totale en fonction de la profondeur et du temps.

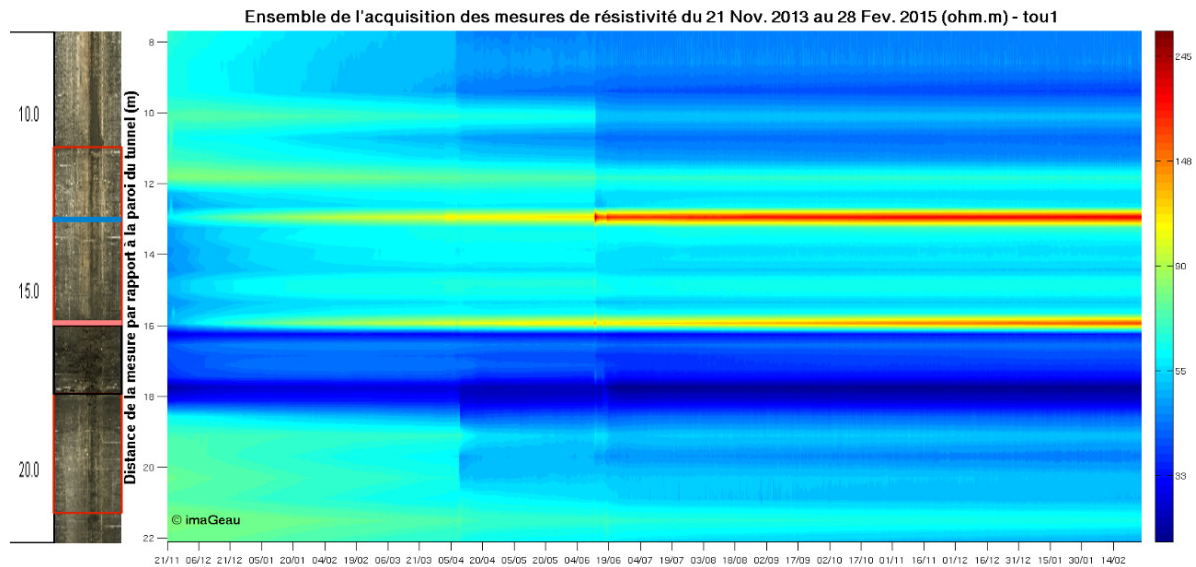
Pour réaliser la diagraphie de résistivité, on considère comme point de mesure la distance d'un point de mesure  $z_i$  situé au centre de chaque couple de dipôle considéré AB-MN (Fig. 59).



**Figure 59 :** Représentation de la position des points de mesure et de la procédure d'acquisition via le dispositif dipôle-dipôle. Chaque changement de couple d'électrodes se fait en 10 ms.

Chaque point de mesure va représenter une cellule sur le graphique avec un lissage entre chaque point de mesure à partir du maillage du graphique. La diagraphie électrique a été acquise durant une longue période qui comporte toute la durée des essais (Fig. 60).

En regardant les mesures diagraphiques de résistivité en continu, avant de réaliser les différents tests d'injection (c'est-à-dire avant le 07/04/2014), nous constatons que la zone endommagée (distances comprises entre 8-16m et 18-22m, pour le hanging wall et le footwall,) et le cœur de faille (16-18m) sont caractérisés par des valeurs de résistivité comprises entre 50 et 75 $\Omega$ .m et inférieures à 44 $\Omega$ .m, respectivement. La lente évolution de la résistivité lors des premiers mois d'acquisition de données dans l'ensemble du forage illustre le séchage de la bentonite. On observe aussi des bandes très localisées où l'on enregistre des pics de résistivité (90-100 $\Omega$ .m) vers 13m et 16m, dans la zone endommagée compartiment ouest.



**Figure 60 :** Graphique représentant la résistivité en fonction de la profondeur et du temps et représentant l'ensemble des données de résistivité totale acquises sur une période d'un an et 3 mois (entre le 21/11/13 au 28/02/2015). L'échelle de couleur correspond aux valeurs de résistivité en  $\Omega.m$ , avec en bleu les valeurs les plus basses et en rouge, les valeurs les plus fortes.

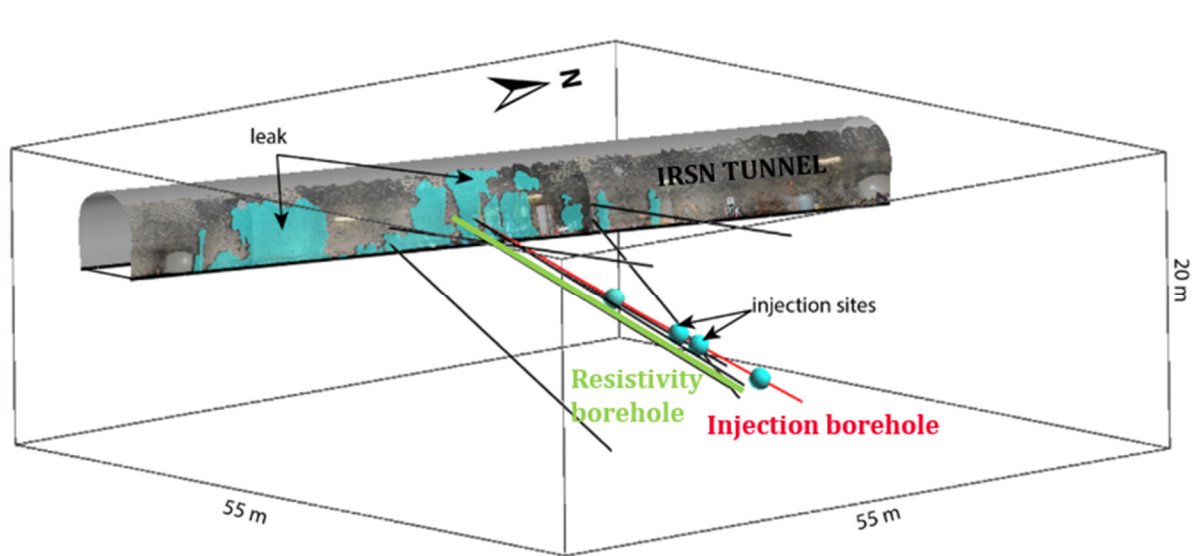
Il est fort probable que ces variations locales et fortes de résistivité soient provoquées par un assèchement de ces zones. Nous constatons que pendant la durée des tests d'injection de la phase 2 (à partir du 12/06/2014), le contraste de résistivité dans ces zones est accentué. Notons que même après la phase 2 (après le 18/06/2014), le contraste de résistivité est conservé.

Une étude plus approfondie des variations de résistivité pendant la phase 1 d'injection est proposée dans la partie 5.1.4.

### 5.1.3.2 Par observation des volumes humides sur parois du tunnel et évaluation des débits de fuite en tête de forage

Une autre manière d'imager la circulation de fluides lors des différents tests d'injection est de repérer les zones humides au niveau des parois Est du Tunnel principal (Fig. 61) et de quantifier le débit des fuites au niveau des têtes de forage (Fig. 62).

En effet, au cours de chaque essai, on observe des fuites au niveau du parement du Tunnel principal ainsi qu'au niveau des têtes de forage. Au cours des essais, différents forages sont affectés par les fuites et l'accès à la tête des différents forages permet à l'aide d'un récipient et d'une balance de précision de mesurer un débit de fuite à différentes phases des tests d'injection.



**Figure 61 :** En bleu, surfaces humides, c'est-à-dire affectées par la circulation de fluides au niveau de la paroi Est du Tunnel principal à la fin de la phase 2 d'injection (le 19/06/2014, à 16h). En rouge, le forage d'injection, en vert, le forage de résistivité et les sphères bleues représentent la localisation des différents essais de la phase 1.

Pendant la phase 1, en termes de volume affecté par les fluides et donc du nombre de forages soumis aux fuites, l'essai 1 (07/04/2014, de 15h29 à 23h13) est le plus impressionnant (Fig. 62). Les forages R, M et S2 présentent des fuites ainsi que les forages RN33, RN32, ISF14 et ISF15 qui sont des forages courts (< 10m) et certaines fuites ont pu être localisées à seulement 60-70cm du parement dans les forages ISF14 et ISF15. Si cet essai provoque autant de fuites, c'est parce qu'il est le seul à se localiser dans le compartiment Ouest (hanging wall) de la zone de failles et qu'il est le plus proche du parement du tunnel principal. En termes de débit, les essais 3 (09/04/2014, de 14h29 à 21h45) et 4 (10/04/2014, de 8h40 à 18h46) présentent des fuites plus localisées (seul le forage R est concerné dans l'essai 3 et R et S2 pour l'essai 4) mais avec des débits très forts, jusqu'à plus de 350 ml/min ont été enregistrés. Ces deux essais se localisent dans le compartiment Est de la zone de failles et dans le cœur de faille

Les caractéristiques (type de débit, type d'essai, heure de début/fin, détail du protocole, pas d'échantillonnage...) des tests de chacun des essais de la phase 1 se trouvent en annexe (annexe 22 à 40).

| ESSAI 1  | Forage R             | Forage M           | Forage S2          | RN33    | RN32                 | ISF 14    | ISF 15 | ESSAI 3 | Forage R             | Forage S2 |
|----------|----------------------|--------------------|--------------------|---------|----------------------|-----------|--------|---------|----------------------|-----------|
| EIPULS1  |                      |                    |                    |         |                      |           |        | E3PAL1  | 17h34 - 386,7 mL/min |           |
| EIPULS2  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h36 - 395 mL/min   |           |
| EIPULS3  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h38 - 451 mL/min   |           |
| EIPULS4  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h40 - 441,5 mL/min |           |
| EIPULS5  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h42 - 422,5 mL/min |           |
| EIPULS6  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h45 - 384,3 mL/min |           |
| EIPULS7  |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h49 - 365,3 mL/min |           |
| EIPULS8  | 17h11                |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h53 - 345,3 mL/min |           |
| EIPULS9  | 17h19                |                    |                    |         |                      |           |        |         | 17h57 - 329,5 mL/min |           |
| EIPULS10 | 17h26                |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h01 - 326,3 mL/min |           |
| EIPULS11 |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h05 - 321,2 mL/min |           |
| EIPULS12 | 17h36                |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h08 - 325 mL/min   |           |
| EIPAL1   | 17h44                | 17h50              | 17h50              |         |                      |           |        |         | 18h12 - 376,8 mL/min |           |
| EIP-CTE1 | 19h15 - 43 mL/min    |                    | 19h17 - 12 mL/min  |         |                      |           |        |         | 18h17 - 366 mL/min   |           |
|          | 19h32 - 41 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h20 - 358,7 mL/min |           |
|          | 19h29 - 46 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h26 - 336,8 mL/min |           |
|          | 19h57 - 40 mL/min    |                    |                    | 17h50   | 17h50                |           |        |         | 18h30 - 335,5 mL/min |           |
|          | 21h02 - 39 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h38 - 325,3 mL/min |           |
|          | 21h19 - 47,9 mL/min  |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h39 - 319,5 mL/min |           |
|          | 21h36 - 20 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h42 - 315 mL/min   |           |
|          | 21h39 - 11,5 mL/min  |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h46 - 299,5 mL/min |           |
| EIP-CTE2 | 22h02 - 340 mL/min   | 22h07              | 22h06 - 147 mL/min |         |                      |           |        |         | 18h50 - 289,7 mL/min |           |
|          | 22h07 - 516 mL/min   |                    |                    |         |                      |           |        |         | 18h55 - 285 mL/min   |           |
|          | 22h15 - 489 mL/min   |                    | 22h17 - 221 mL/min |         |                      |           |        |         | 19h03 - 277,7 mL/min |           |
| EIPAL2   |                      |                    | ?                  |         |                      |           |        |         | 19h08 - 279,3 mL/min |           |
|          | 22h42                |                    | ?                  | 22h20   | 22h20                |           |        |         | 19h13 - 255,6 mL/min |           |
|          | 22h44                | 22h44              | ?                  |         |                      | 22h44     | 22h44  |         | 19h17 - 262,5 mL/min |           |
| ESSAI 4  | Forage R             | Forage S2          |                    | ESSAI 2 | Forage R             | Forage S2 |        |         | 19h21 - 240,6 mL/min |           |
| E4PAL1   |                      |                    |                    | E2PULS1 |                      |           |        |         | 19h26 - 177 mL/min   |           |
| E4PULS1  |                      |                    |                    | E2PULS2 |                      |           |        |         | 19h30 - 133,3 mL/min |           |
| F4PAT2   | 16h32 - 29 mL/min    | 16h28              |                    | E2LOT1  | 23h42                |           |        |         | 19h33 - 129,8 mL/min |           |
|          | 16h35 - 75,57 mL/min |                    |                    | E2LO12  | 23h55                |           |        |         | 19h37 - 125,3 mL/min |           |
|          | 16h38 - 118 mL/min   |                    |                    | E2LO13  | 00h02                |           |        |         | 19h41 - 116,7 mL/min |           |
|          | 16h40 - 199 mL/min   |                    |                    | E2LOT4  | 00h08                |           |        | E3PULS1 |                      |           |
|          | 16h43 - 116 mL/min   | 16h43 - 1,5 mL/min |                    | E2PAL1  | 00h54                |           |        | E3PULS2 |                      |           |
|          | 16h46 - 177,5 mL/min |                    |                    |         | 01h00 - 254,5 mL/min |           |        | E3PULS3 |                      |           |
|          | 16h48 - 199 mL/min   |                    |                    |         | 01h05 - 295,5 mL/min |           |        | E3PULS4 |                      |           |
|          | 16h50 - 110 mL/min   |                    |                    |         | 01h07 - 290 mL/min   |           |        | E3PULS5 |                      |           |
|          | 16h52 - 103,5 mL/min |                    |                    |         | 01h15 - 211 mL/min   |           |        | E3PULS6 |                      |           |
|          | 16h54 - 104,5 mL/min |                    |                    |         | 01h19 - 192 mL/min   |           |        | E3PULS7 |                      |           |
|          | 16h55 - 103 mL/min   |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 16h59 - 99 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h02 - 99,5 mL/min  |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h05 - 97,5 mL/min  |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h07 - 94 mL/min    |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h09 - 94,5 mL/min  |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h22 - 85,09 mL/min |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h37 - 351 mL/min   | 17h29 - 30 mL/min  |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h41 - 351 mL/min   |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
|          | 17h44 - 343,5 mL/min |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
| E4EDP1   |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |
| E4PAT3   |                      |                    |                    |         |                      |           |        |         |                      |           |

|                         | <table> <tr><th></th><th>valeur de débit:</th></tr> <tr><td><b>pas de fuite</b></td><td><b>0 mL/min</b></td></tr> <tr><td><b>fuite légère</b></td><td><b>&lt; 50 mL/min</b></td></tr> <tr><td><b>fuite moyenne</b></td><td><b>50-100 mL/min</b></td></tr> <tr><td><b>fuite forte</b></td><td><b>100-200 mL/min</b></td></tr> <tr><td><b>fuite très forte</b></td><td><b>&gt; 200 mL/min</b></td></tr> </table> |  | valeur de débit: | <b>pas de fuite</b> | <b>0 mL/min</b> | <b>fuite légère</b> | <b>&lt; 50 mL/min</b> | <b>fuite moyenne</b> | <b>50-100 mL/min</b> | <b>fuite forte</b> | <b>100-200 mL/min</b> | <b>fuite très forte</b> | <b>&gt; 200 mL/min</b> |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
|                         | valeur de débit:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |
| <b>pas de fuite</b>     | <b>0 mL/min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |
| <b>fuite légère</b>     | <b>&lt; 50 mL/min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |
| <b>fuite moyenne</b>    | <b>50-100 mL/min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |
| <b>fuite forte</b>      | <b>100-200 mL/min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |
| <b>fuite très forte</b> | <b>&gt; 200 mL/min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                  |                     |                 |                     |                       |                      |                      |                    |                       |                         |                        |

**Figure 62 :** Heure et valeur de débit associées aux différentes têtes de forage lors des quatre essais de la phase 1. En blanc, bleu clair, bleu, bleu foncé et bleu nuit, les valeurs de débit calculées de 0ml/min, <50ml/min, 50-100ml/min, 100-200ml/min et >200ml/min

Pendant la phase 2, en termes de volume affecté par les fluides et donc du nombre de forages soumis aux fuites, l'essai 5 (12/06/2014-16/06/2014) est le plus impressionnant (Fig. 63). Les forages R, S2, INJ et ISF14 présentent des fuites ainsi que la paroi du tunnel, principalement au Sud du site d'injection (Fig. 61). De la même manière que pour l'essai 1 de la phase 1, c'est l'essai 5 dans le hanging wall qui est le plus impressionnant en termes de volume de fuites.

| ESSAI 5 | Forage R           | Forage S2           | ISF 14 | Paroi tunnel Nord | Forage INJ                    |
|---------|--------------------|---------------------|--------|-------------------|-------------------------------|
| E5PAL1  |                    |                     |        |                   |                               |
| E5PAL2  | 23h46              |                     |        |                   |                               |
|         | 00h00 - 708 mL/min | 00h30               |        |                   |                               |
|         | 01h03 - 404 mL/min | 01h03 - 63 mL/min   |        |                   |                               |
|         | 01h29 - 326 mL/min | 01h29 - 768 mL/min  | 01h29  |                   |                               |
|         |                    |                     |        | 4h - 5h30         |                               |
| E5PAL3  |                    |                     |        |                   | 14h20                         |
| E5PAL4  |                    |                     |        |                   | ~14h - 4L/min                 |
|         |                    |                     |        |                   | ~14h - 6L/min                 |
|         |                    |                     |        |                   | ~14h - 12L/min                |
| ESSAI 6 | Forage R           | Forage S2           | RN 33  |                   |                               |
| E6PAL1  |                    | 16h44               |        |                   |                               |
|         | 23h05              | 18h27 - 0,75 mL/min | 20h30  |                   | valeur de débit:              |
|         |                    | 10h17               |        |                   | pas de fuite 0 mL/min         |
|         |                    | 11h50 - 160 mL/min  |        |                   | fuite légère < 50 mL/min      |
|         |                    | 12h22 - 86 mL/min   |        |                   | fuite moyenne 50-100 mL/min   |
|         |                    | 12h53 - 136 mL/min  |        |                   | fuite forte 100-200 mL/min    |
|         |                    | 16h12 - 160 mL/min  |        |                   | fuite très forte > 200 mL/min |
|         |                    | 17h32 - 317 mL/min  |        |                   |                               |
|         |                    | ~19h - 253 mL/min   |        |                   |                               |

**Figure 63 :** Heure et valeur de débit associées aux différentes têtes de forage lors des deux essais de la phase 2. En blanc, bleu clair, bleu, bleu foncé et bleu nuit, les valeurs de débit calculées de 0ml/min, <50ml/min, 50-100ml/min, 100-200ml/min et >200ml/min.

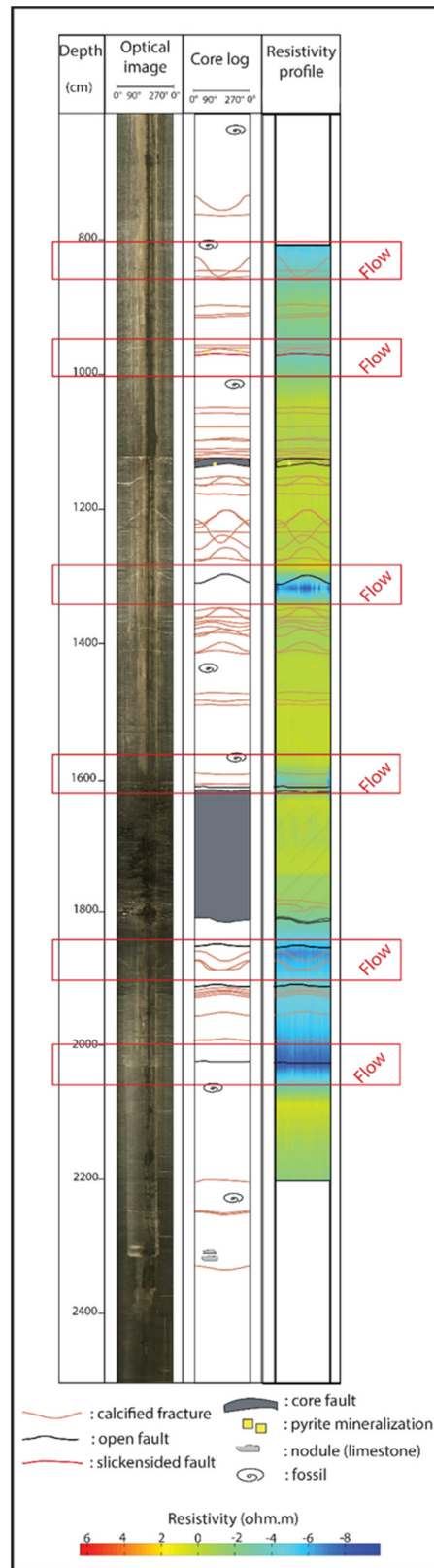
#### 5.1.4 Comparaison des variations de résistivité avec la géologie.

En utilisant la diagraphie optique, les carottes et le CT-scan des carottes, nous avons pu reconstituer finement un log structural du forage contenant le dispositif de résistivité (forage R, Fig. 64). Dans cette partie, nous avons défini (i) les fractures calcifiées fermées (en rose, Fig. 64), (ii) les failles/failles secondaires ouvertes (en noir, Fig. 64) et (iii) les failles/failles secondaires ouvertes lustrées/polies (en rouge, Fig. 64) et la position du cœur de faille (zone grise, Fig. 64).

Nous avons ensuite soustrait la diagraphie de résistivité avant l'injection à la diagraphie de résistivité après injection (de la phase 1), afin de regarder où se localisaient les variations de résistivité au cours de l'injection sur le log structural du forage R.

Nous remarquons que les diminutions de résistivité, interprétées ici comme l'influence de la circulation de fluides, sont localisées à six endroits bien précis dans le forage R (Fig. 64). Ces endroits correspondent à l'interface entre la zone endommagée et le cœur de faille (le plan principal de faille) et au niveau des failles/failles secondaires ouvertes ou/et lustrées. Les fractures calcifiées et le cœur de faille ne semblent pas affectés par la circulation de fluides.



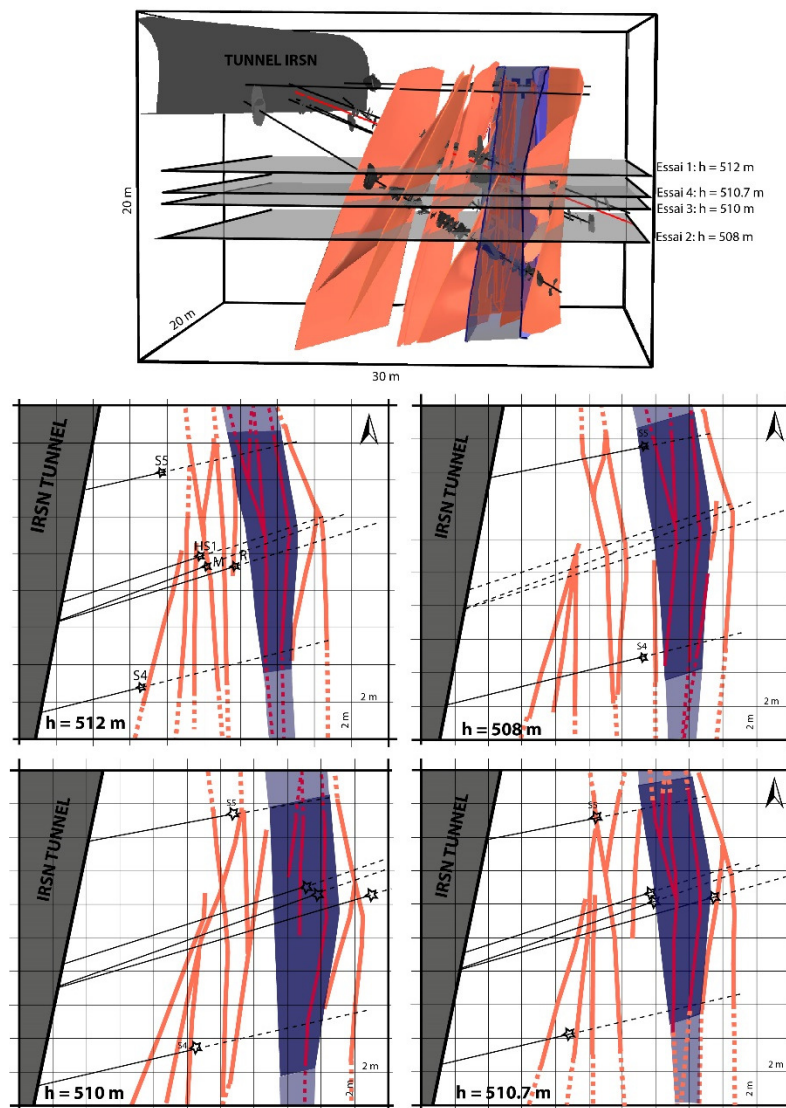


**Figure 64 :** Diagraphie optique de la paroi du forage R, log structural du forage R avec les fractures calcifiées fermées, les failles ouvertes, les failles lustrées/polies ouvertes et le cœur de faille représentés ne rose, noir, rose et gris, respectivement et log de différence de résistivité entre, avant et après les tests d'injection.

### 5.1.4.1 Chemins préférentiels d'écoulement

En utilisant les données de fuites (tête de forage et parois, Fig. 61, 62 et 63) au cours de chaque essai (phases 1 et 2), il est possible d'établir différents chemins d'écoulement préférentiels.

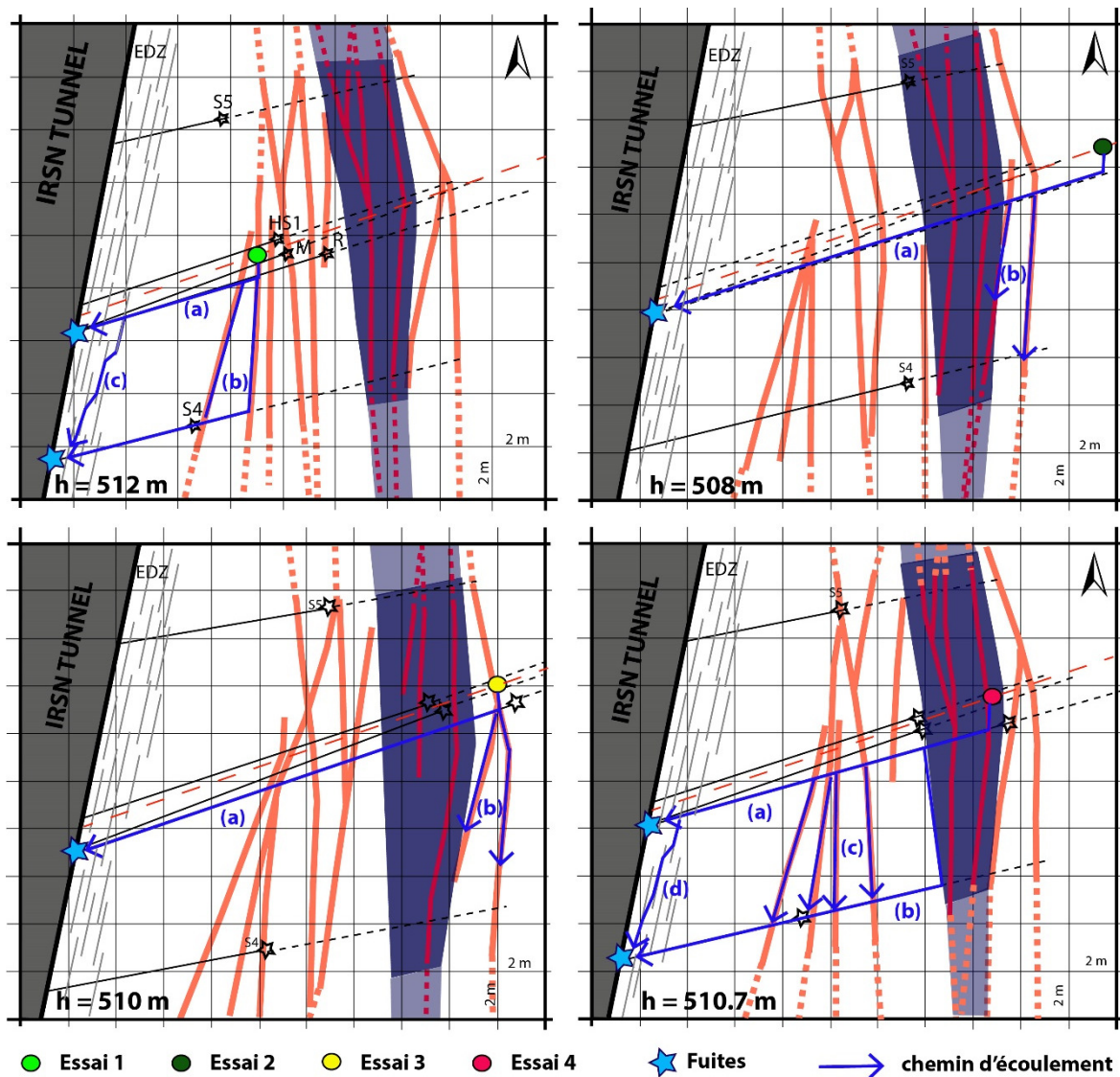
Pour cela nous avons exporté des coupes horizontales provenant du modèle géologique gOcad de la zone de failles. La profondeur des coupes correspondant à la localisation moyenne des différents essais. Ainsi les coupes à  $h=512$ ,  $510.7$ ,  $510$  et  $508$ m correspondent aux profondeurs de l'essai 1, 4, 3 et 2 (Fig. 65).



**Figure 65 :** Les différentes coupes horizontales du modèle structural gOcad correspondant aux profondeurs moyennes des différents essais. Les coupes à  $h = 512$ ,  $508$ ,  $510$  et  $510.7$ m correspondent aux essais 1, 2, 3 et 4 de la phase 1. Les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre le l'axe du forage et le plan de coupe.

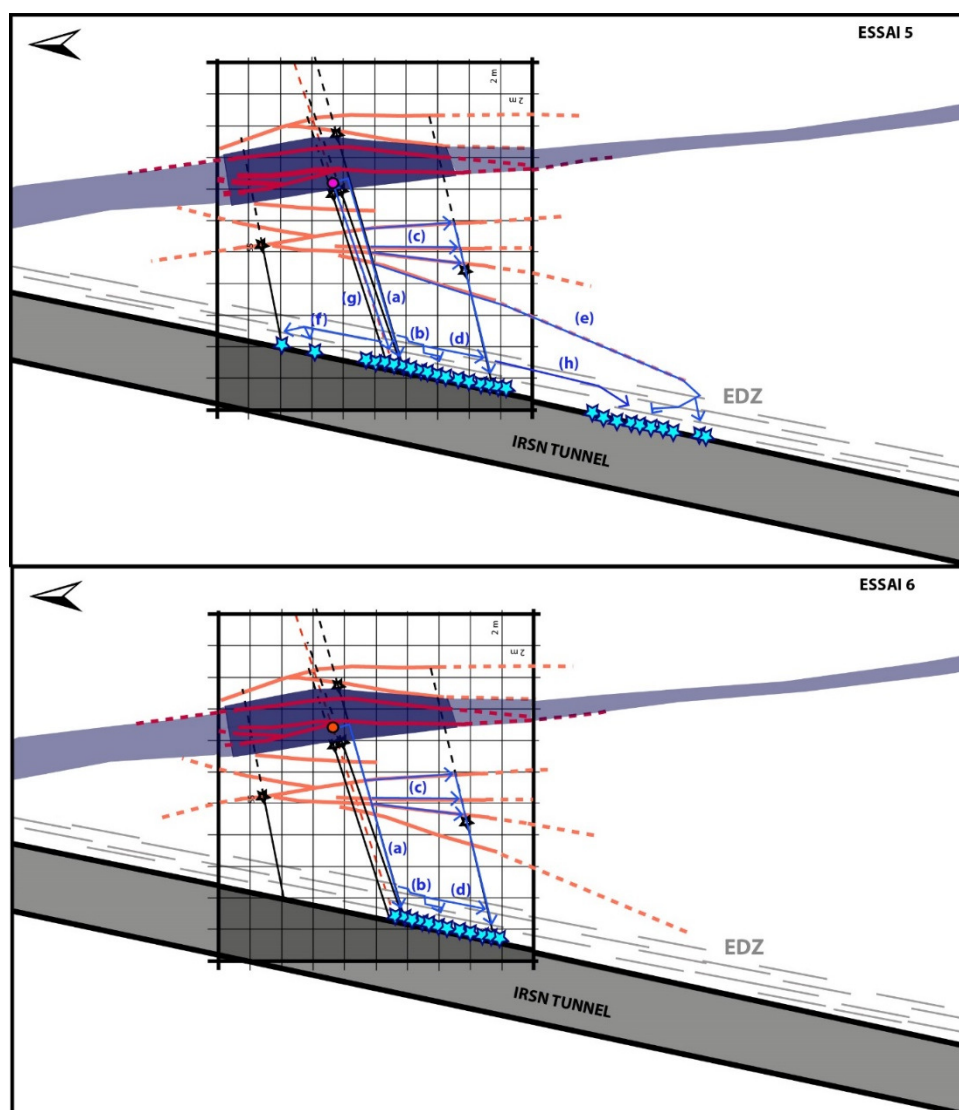


Concernant la phase 1 (Fig. 66); dans l'essai 1, trois chemins ont été identifiés. Dans un premier temps (a) les fluides s'infiltrent dans le forage R pas le biais de la faille secondaire sf1 (faille testée, qui traverse les forages R, M, INJ) et remontent jusqu'à la tête du forage R. Ensuite les fluides sont retrouvés au niveau de la tête du forage S2. Il y a deux possibilités, soit (b) le fluide suit les zones fracturées N000° à N010° (en rose, Fig. 66) jusqu'au forage S2 et remonte jusqu'à sa tête ou/et (c) le fluide s'infiltré dans l'EDZ (zone endommagée du tunnel) jusqu'au forage S2 (en gris, Fig. 66).



**Figure 66 :** Les différents chemins préférentiels des fluides réalisés en utilisant les fuites aux têtes des forages, pour les différents tests de la phase 1. Les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre l'axe du forage et le plan de coupe.

Dans l'essai 2, les fuites sont observées uniquement dans le forage R. (a) Les fluides ont surement atteint le forage R dans le footwall et remontent jusqu'à la tête du forage. (b) Il est possible qu'une partie des fluides soit restée dans le compartiment Est de la zone de failles (Fig. 67). Dans l'essai 3, c'est le même scénario que pour l'essai 2 (Fig. 67). Dans l'essai 4, (a) le fluide atteint le forage R dans la zone de failles principale (domaine bleu, Fig. 67). Puis les fluides atteignent le forage S2, soit (b) le long de la zone de failles principale, soit (c) par l'intermédiaire des zones fracturées N000° à N020° présentes dans le hanging wall et/ou (d) par l'intermédiaire de l'EDZ (Fig. 67).



**Figure 67 :** Différents chemins préférentiels d'écoulement des fluides déduits de l'analyse des fuites aux têtes des forages et des surfaces de parois humides, pour les différents tests (essais 5 et 6) de la phase 2. Les étoiles bleues indiquent les fuites et les étoiles noires correspondent aux points d'intersection entre l'axe du forage et le plan de coupe.

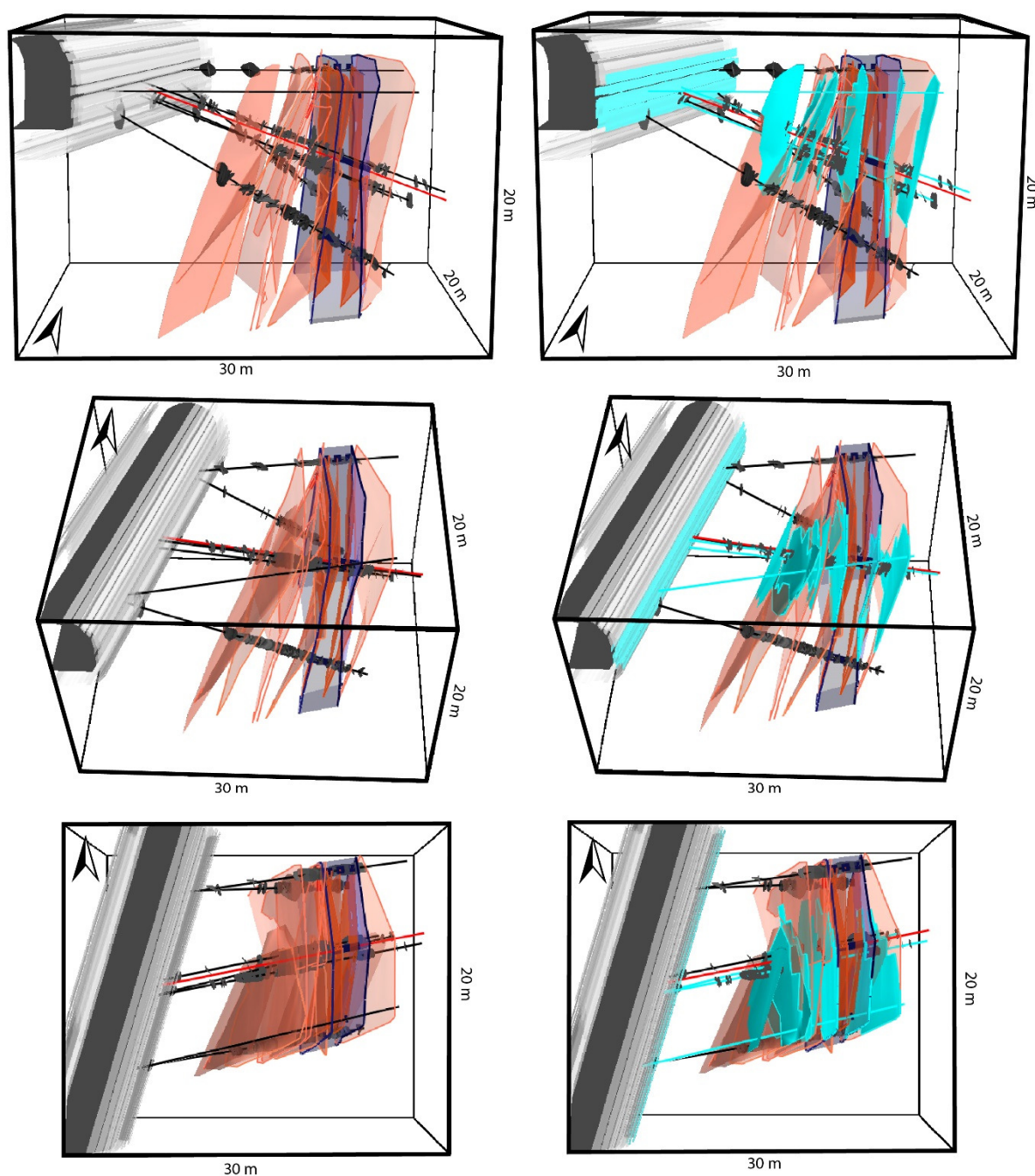
Pour la phase 2 (Fig. 67), dans l'essai 5, les fluides passent par le biais de zones fracturées dans le compartiment ouest de la zone de failles et atteignent le forage R, puis atteignent le forage S2, soit par l'intermédiaire de zones fracturées, soit par l'EDZ. Cependant, la présence d'humidité le long de la paroi entre R et S2, laisse supposer que l'EDZ est un chemin d'écoulement préférentiel. D'autres zones humides sont identifiées sur la paroi du tunnel, des petites parcelles au nord qui sont sûrement dues à l'infiltration des fluides dans l'EDZ. Un autre domaine est affecté par les fluides au Sud du forage S2; soit les fluides passent par l'EDZ, soit les fluides sont guidés par la zone fracturée N010°-N030° qui interceptent l'EDZ à proximité du parement du tunnel à 10m de S2. Pour finir, les fluides remontent le long du forage INJ (Fig. 67). Dans l'essai 6, les fluides atteignent le forage R par la zone de failles principale puis le forage S2, soit par des zones fracturées, ou/et par l'EDZ. La présence de fuites entre les forages R et S2, laisse suggérer que l'EDZ est effectivement un drain (Fig. 67).

## 5.2 Discussion

Avant les tests d'injection, la zone endommagée/fracturée et le cœur de faille sont caractérisés par des valeurs de résistivité comprises entre 50 et 75Ω.m et inférieures à 44Ω.m, respectivement. Le dispositif de diagraphie de résistivité semble être un bon moyen pour suivre l'écoulement de fluides dans la zone de failles lors des différents tests d'injection. En croisant les données de différence de résistivité (avant/après tests) avec les données géologiques, nous avons pu caractériser les structures qui jouent un rôle de drain principal dans la circulation des fluides.

Le cœur de faille composé principalement de brèche de failles avec des lentilles de roche intacte semble jouer le rôle de barrière vis-à-vis des fluides. En effet, on n'observe pas de variation de résistivité au cours des essais dans la zone de cœur. De plus, lorsque que le test se situe dans le compartiment Est de la zone de failles (essais 2 et 3, phase 1 et essai 6, phase 2), les fluides atteignent le compartiment Ouest seulement par le biais des forages. Ainsi, le réseau hydraulique du compartiment Est est isolé du compartiment Ouest par les brèches de faille. Il est fort possible que le processus de bréchification du cœur de faille en soit responsable. En effet, nous pouvons supposer que les zones bréchiques possèdent une plus grande capacité de déformation que la roche avoisinante et que la déformation des brèches est suffisamment importante pour diminuer la taille des pores et l'ouverture des micro-fractures. Les fluides sont

donc stoppés au niveau des brèches et doivent s'écouler dans la transition entre le cœur de faille et la zone endommagée.

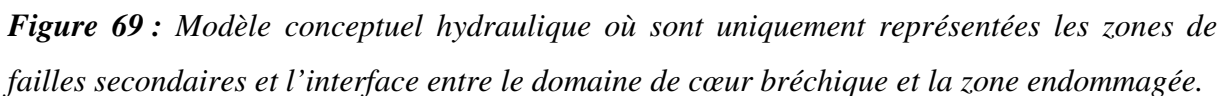


**Figure 68 :** Représentation des zones de failles secondaires, de l'EDZ (zone d'endommagement autour du tunnel) et des forages affectés par les fluides (en bleu). Les secteurs bleus ont été définis en interpolant le trajet point d'injection-fuites en tête de forage.

Dans la zone endommagée, les différents drains identifiés sont les zones de failles secondaires (Fig. 66 et 67). Majoritairement, les fuites observées sur les parois du tunnel sont provoquées par l'interaction entre les zones de failles secondaires, l'EDZ (la zone endommagée autour du



Le fait que les zones de failles secondaires semblent jouer le rôle de drain alors que la zone de failles principale joue le rôle de barrière, nous amène à une relation entre la maturité et l'échelle de la zone de failles et son rôle vis-à-vis des fluides. Ainsi, lorsque la zone de failles ne présente pas encore un cœur, elle peut être considérée comme un drain. Alors que les zones de failles matures présentant un cœur bréchique peut combiner les deux rôles de drain et de barrière vis-à-vis des fluides.



191

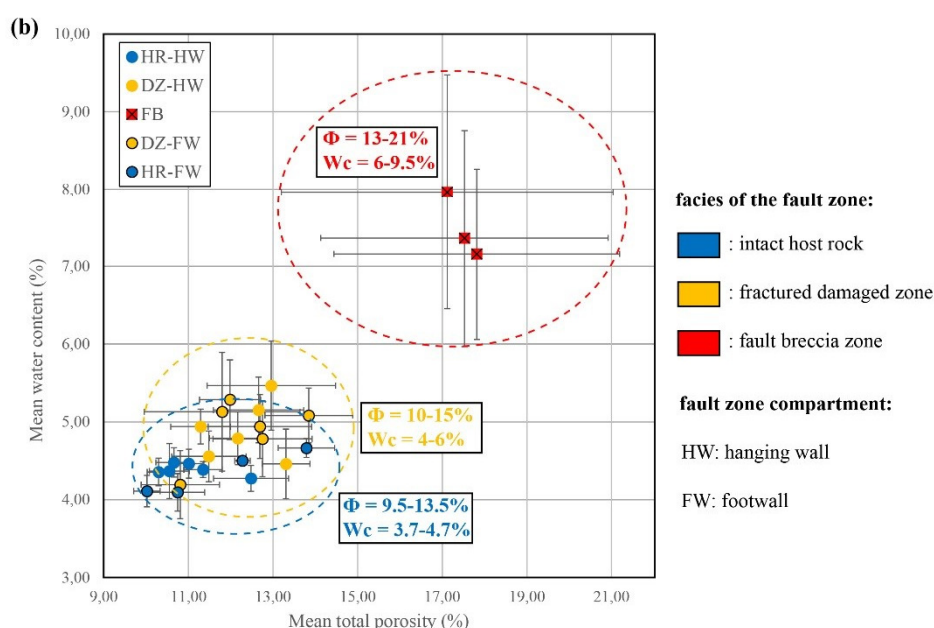
## 6 PROPRIETES PETROPHYSIQUES DE LA ZONE DE FAILLES

### 6.1 Présentation de l'article

Le but de ce travail est de caractériser les variations de propriétés pétrophysiques et plus particulièrement la porosité dans une zone de failles argileuse. Pour ce faire, nous avons effectué systématiquement des mesures de porosité et de teneur en eau sur échantillons de carottes dans différents types de faciès ; la zone intacte, dans la zone endommagée fracturée et la brèche de faille, provenant de 6 forages (HS1, R, M, S2, S4 et S5).

(a)

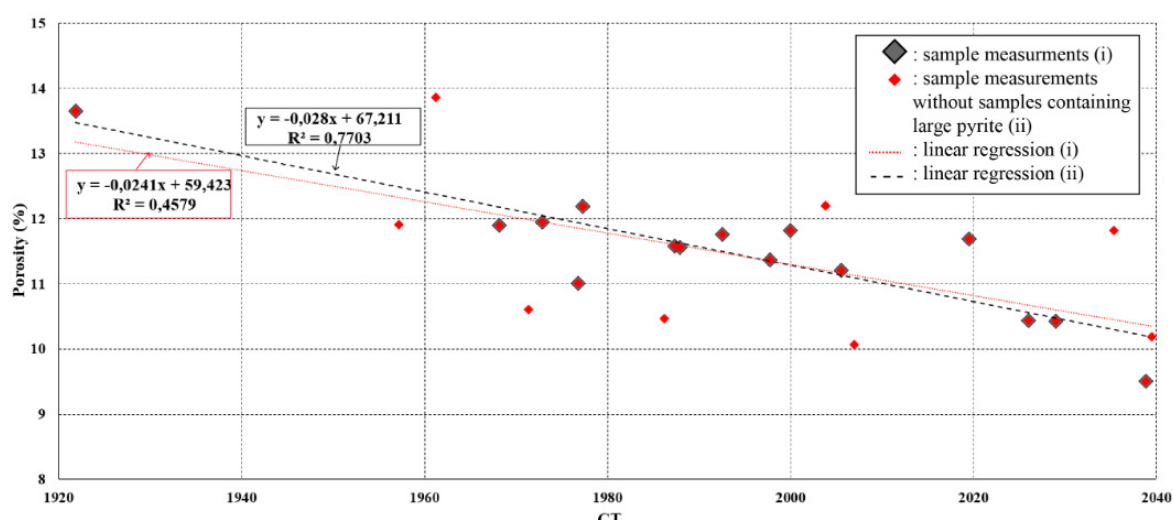
| borehole name | HR-HW             |                        | DZ-HW             |                        | FB                |                        | DZ-FW             |                        | HR-FW             |                        |
|---------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|------------------------|
|               | mean porosity (%) | mean water content (%) | mean porosity (%) | mean water content (%) | mean porosity (%) | mean water content (%) | mean porosity (%) | mean water content (%) | mean porosity (%) | mean water content (%) |
| HS1           | 10.66±0.43        | 4.48±0.19              | 12.66±1.07        | 5.15±0.42              | 17.81±3.37        | 7.16±1.10              | 11.98±0.72        | 5.29±0.51              | 10.02±0.31        | 4.11±0.20              |
| M             | 11.35±0.45        | 4.39±0.10              | 12.17±0.67        | 4.79±0.34              | 17.52±3.39        | 7.36±1.39              | 10.81±0.93        | 4.19±0.44              | no data           | no data                |
| R             | 11.01±0.35        | 4.46±0.19              | 11.48±0.88        | 4.56±0.33              | no data           | no data                | 12.75±1.17        | 4.78±0.49              | 10.74±0.64        | 4.10±0.24              |
| S2            | 12.48±0.89        | 4.27±0.17              | 13.31±0.56        | 4.46±0.45              | no data           | no data                | 12.69±1.22        | 4.94±0.41              | 12.28±0.18        | 4.50±0.02              |
| S4            | 10.30±0.27        | 4.36±0.18              | 12.96±1.52        | 5.47±0.57              | 17.12±3.92        | 7.96±1.51              | 13.84±1.04        | 5.08±0.35              | 13.79±0.67        | 4.67±0.12              |
| S5            | 10.55±0.47        | 4.37±0.35              | 11.29±0.70        | 4.94±0.22              | no data           | no data                | 11.80±1.84        | 5.13±0.76              | no data           | no data                |



**Figure 70 :** (a) Valeurs de porosité et de teneur en eau moyenne de chacun des forages dans le HR-HW (zone intacte compartiment Ouest), DZ-HW (zone endommagée fracturée compartiment Ouest), FB (brèche de faille), DZ-FW (zone endommagée fracturée compartiment Est) et HR-FW (roche intacte compartiment Est). (b) Graphique présentant les valeurs de teneur en eau en fonction de la porosité pour le HR (en bleu), le DZ (orange) et le FB (rouge).

Les mesures sur échantillons ont permis de déterminer les gammes de porosité et de water content de la zone intacte, de la zone endommagée fracturée et de la brèche de faille. La porosité de la zone intacte est comprise entre 9.5-13.5% avec une teneur en eau comprise entre 3.7-4.7%. La porosité de la zone endommagée fracturée est comprise entre 10-15% avec des teneurs en eau comprise entre 4-6%. La brèche de faille est caractérisée par des valeurs de porosité comprise entre 13-21% avec une teneur en eau de 6-9.5% (Fig. 70).

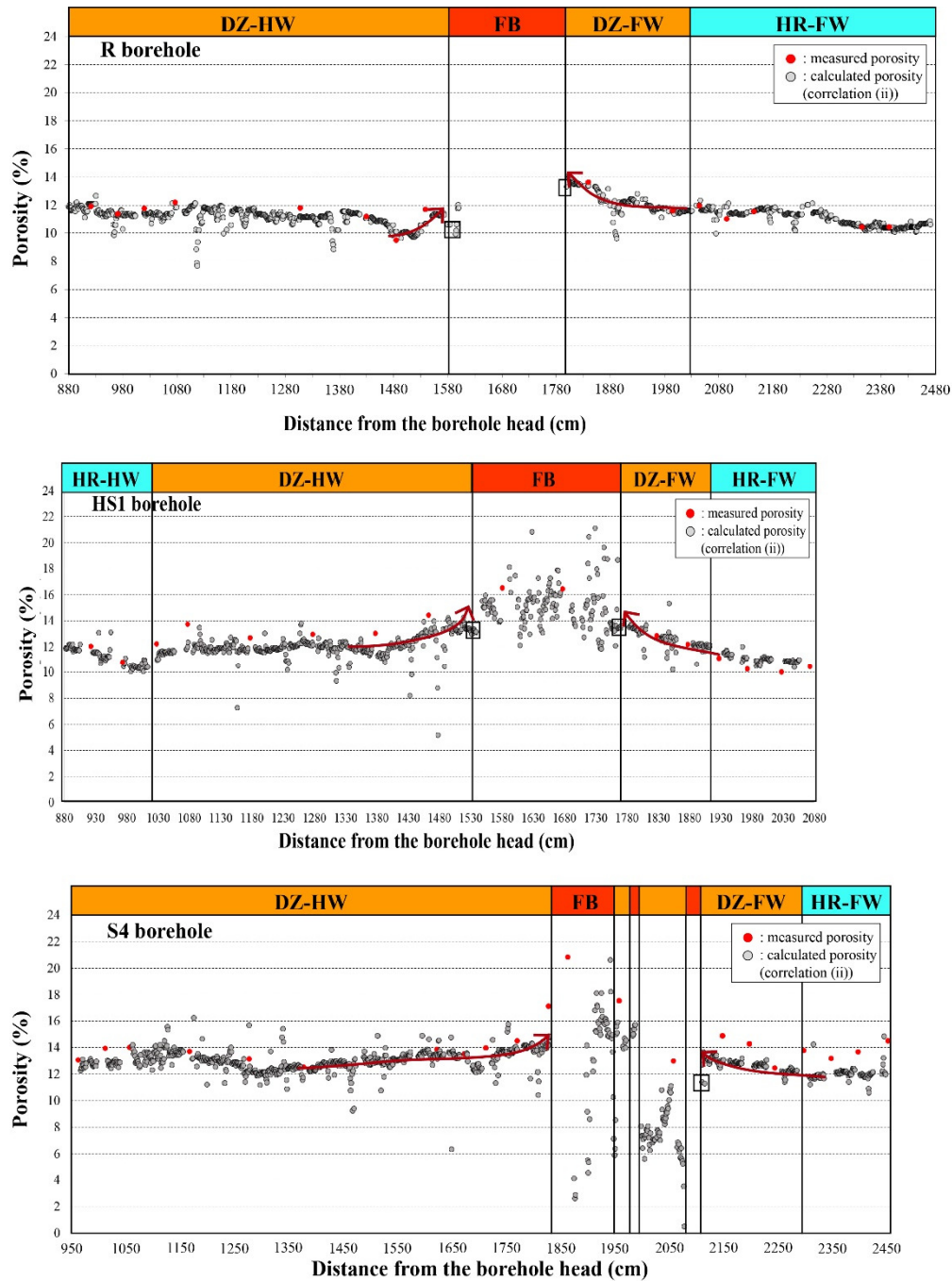
Après prélèvements, les carottes ont été CT-scannées permettant d'obtenir un profil de valeur de CT (tomography computed) dans la zone endommagée fracturée et dans la brèche de faille. Après traitement du CT-scan pour enlever les artéfacts lors de l'acquisition de mesure et l'influence des structures ouvertes ou minéralisées, nous avons récupéré la valeur du CT des tranches de carottes à proximité des échantillons mesurés. Nous avons ensuite corrélié ces valeurs de CT moyen avec les valeurs de porosité mesurées (dans le forage R). Nous obtenons cette première relation;  $\Phi = -0.0241 \times CT + 59.423$  ( $R^2 = 0.46$ ) avec  $\Phi$  étant la porosité. En enlevant les échantillons peu homogènes (présentant des grosses pyrites), nous obtenons une deuxième relation;  $\Phi = -0.028 \times CT + 67.211$  présente un  $R^2$  nettement supérieur à la première corrélation ( $R^2 = 0.77$ ), (Fig. 71).



**Figure 71 :** *Corrélation entre les valeurs de porosité mesurées et les valeurs de CT moyen à proximité des échantillons. En rouge, la totalité des mesures et en noir est exclu les mesures sur échantillons portant des pyrites de taille importante.*

Dans la suite de ce travail, nous avons donc utilisé cette deuxième corrélation pour obtenir un profil de porosité de haute résolution (1 valeur de porosité par centimètre) dans la zone endommagée fracturée et dans la brèche de faille. Les profils de porosité calculés mettent en

avant une tendance à l'augmentation de porosité type exponentielle à proximité du cœur de faille. Celle-ci est mieux exprimée dans le footwall et un peu plus chaotique dans le hanging wall (Fig. 72).

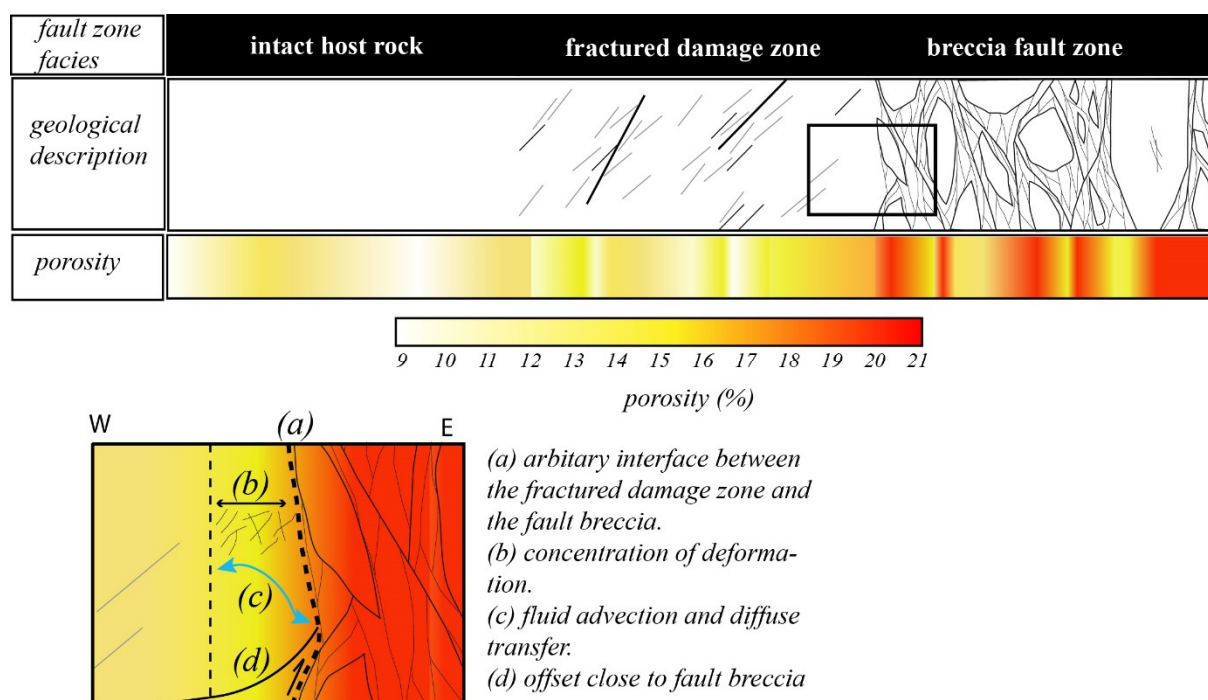


**Figure 72 :** Profils de porosité mesurée sur échantillons, en rouge, et porosité calculés, en gris le long des forages R, HS1, et S4. Avec DZ, FB, HW et FW pour la zone endommagée, la brèche de faille, le compartiment Ouest et le compartiment Est.



Cette observation est sûrement due à la présence de zones de failles secondaires dans le hanging wall qui viennent perturber le signal de porosité. Cette tendance est présente sur des épaisseurs de 2 à 5m et représente une augmentation de porosité d'environ 2% (Fig.72). On observe aussi une diminution très locale de porosité à 2-5cm de la brèche de faille (jusqu'à 2%, carré, Fig. 72).

La figure 73 résume les différentes observations; la roche intacte présente une porosité de 9.5-13.5%, la zone fracturée une porosité comprise entre 10-15% et une zone de brèches de faille avec une porosité entre 13-21%. Les variations de porosité sont plus importantes dans la brèche de faille, car celle-ci est très hétérogène (Fig. 73). Nous avons observé, un « halo » de forte porosité autour de la brèche de faille. Nous supposons (i) que la frontière macroscopique entre la brèche et la zone fracturée déterminée à l'échelle macroscopique n'est peut-être pas la frontière réelle (Fig. 73a), ou (ii) que cette zone a été affectée par une forte concentration de déformation qui engendre une modification des propriétés pétrophysique (Fig. 73b) et/ou encore (iii) que cette zone est affectée par la migration de fluides qui engendre aussi une modification des propriétés de la matrice argileuse (Fig. 73c).



**Figure 73 :** Schématisation des différentes hypothèses permettant d'expliquer la présence du « halo » autour de la brèche de faille.

Quant à la diminution de porosité dans les 2-5cm autour du FB, elle est sûrement à une cimentation locale de la matrice. En effet, l'étude des paléo-circulations dans cette même zone

(Lefèvre et al., 2016) ont mis en évidence une zone de 5cm d'épaisseur qui présentait une matrice remaniée avec une forte concentration de calcite ( $\times 6$ ). Il est aussi possible que les variations de propriétés soient dues au rejet sur le plan d'interface entre la zone endommagée et la brèche de faille.

Ainsi ces résultats permettent de définir les différents domaines de porosité et proposent un profil de haute résolution de la porosité dans une zone de failles en utilisant les données de CT-scan de carotte, permettant de visualiser et de quantifier les variations de porosité.

## **6.2 Article Lefèvre et al., 2016: Petro-physical characterization of a fault zone affecting Toarcian shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France).**

*(En préparation).*

## **Petro-physical characterization of a fault zone affecting Toarcian shale: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France).**

Mélody Lefèvre<sup>a,\*</sup>, Yves Guglielmi<sup>a</sup>, Pierre Henry<sup>a</sup>, Pierre Dick<sup>b</sup>, Claude Gout<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> CEREGE, Université de Aix-Marseille, CNRS, 3 place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3, France.

<sup>b</sup> IRSN, Avenue du Général Leclerc, BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France.

<sup>c</sup> TOTAL, CSTJF, Avenue Larribau, 64018 Pau, France.

[lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr); [guglielmi@cerege.fr](mailto:guglielmi@cerege.fr); [henry@cerege.fr](mailto:henry@cerege.fr); [pierre.dick@irsn.fr](mailto:pierre.dick@irsn.fr);  
[claud.gout@total.com](mailto:claud.gout@total.com)

### **Corresponding author:**

\* Mélody Lefèvre +33 (0)4 13 55 12 57; [lefevre@cerege.fr](mailto:lefevre@cerege.fr)

### **Keywords:**

Shales, facies fault zone, porosity, water content, CT-scan.

### **6.2.1 Abstract**

Understanding the variations of petrophysical properties of a fault zone in very low permeable rocks such as shales is of interest for both academic and applied geosciences, to predict and control fluid circulations such as hydrocarbons, waste waters and CO<sub>2</sub>. Through a correlation between porosity measurements performed on cores samples and CT values acquired with an

X-ray tomography of eight fully cored boreholes drilled across an entire fault zone affecting shales, we show porosity and water content properties profiles of the matrix across the fault zone. The studied fault is a strike slip fault zone affecting the Toarcian shale formation of Tournemire (South of France, Underground Research Laboratory of the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN). Results show that the intact host rock (HR), the fractured damage zone (DZ) and the fault breccia (FB) are defined by a porosity between 9.5-13.5%, 10-15% and 13-21% and a water content between 3.7-4.7%, 4-6% and 6-9.5%, respectively. A ~2% higher porosity zone is observed 2 to 5m around the FB and a 2% porosity decrease is observed 2-5cm close to the FB.

### **6.2.2 Introduction**

Shales are appropriate lithology for potential storage of gas and liquids due to low permeability and high retention capacities. Investigations conducted in underground research laboratories (Distinguin and Lavanchy, 2007; Samper et al., 2008; Wakim et al., 2009; Tremosa et al., 2012; Fernández et al., 2014) showed that intact shales may act as efficient low diffusivity natural barriers for the sequestration of radioactive waste, CO<sub>2</sub> and hydrocarbon reservoirs (Boisson et al., 2001; Busch et al., 2008).

Intact shale hydraulic properties may severely be disturbed by natural fractures and fault zones. Generally, a fault zone is composed of one to several cores surrounded by damage zones consisting in transitional zones between the fault core and the intact host rock (Caine et al., 1996; Chester et al., 1993; Faulkner et al., 2003; Wibberley et al., 2008; Faulkner et al., 2010). The fault core accommodates most of the deformation along a few shear layers. It is characterized by a complete reorganization of the intact rock's texture and is composed of slip planes, breccia, gouge, cataclasites, ultracataclasites, mylonites and ultra-mylonite (e.g., Kim et al., 2004; Clausen et al., 2003; Wibberley and Shimamoto, 2003). The DZ is characterized by an increased fracture density and the presence of subsidiary faults, veins, joints, folds and

cleavages (e.g., Berg and Skar, 2005; Jourde et al., 2002). The intact rock texture may still be observed between fractures. The composition of the faulted rock, the faulting stress conditions and the burial and temperature history conditions affect the hydraulic properties of the fault zone both in the damage zone and in the fault core. (Antonellini et al., 1994, Sibson 2000). Fault core and damage zone may act as conduits, barriers or combined conduit-barriers systems to fluid flow (Agosta et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010, Matonti et al., 2012).

The increased fracture density in the damage zone may leads to an increased permeability compared to intact rock (Faulkner, et al., 2010; Gudmundsson et al., 2010) when fractures are hydraulically connected. Between fractures, the matrix deformation may also influence the permeability. In contrast, fault cores contain breccia to ultra-mylonite structures of grain size reductions (Billi et al., 2003) which may lead to reduced permeability. The shale permeability is apparently more sensitive than the sandstone to changes in effective confining pressure, the irreversible decrease in permeability with increasing effective confining pressure being manifested by the appearance of voids (Dong et al., 2010). The sedimentary lithology permeability is a function of porosity and pore structure (David et al., 1994). Under effective confining pressure, the relationship between the permeability and the porosity depends on mechanical (such as the microcracks closure and the grain rearrangement) and chemical processes affecting the lithology (Scheidegger, 1974, David et al., 1994). Nevertheless, no real hydro-petrophysic properties profile across a fault zone affecting shales is yet available in the literature.

The purpose of this paper is to define properties (porosity and water content) across a fault zone in shales. We first characterize a fault zone architecture in shales, at the metric scale using high resolution 3D imaging of internal structures using borehole data. This includes macroscopic observations of core samples, optical images of borehole walls and cores CT-scans. Secondly we compare water content and porosity measurements on matrix zones of core samples in

different domains of deformation within the fault zone, in order to define the petrophysical matrix-scale properties of intact host rock, damage zone and fault core. Then, using a correlation between the CT (computed tomography) of the cores and the measured porosity, we reconstruct a high resolution porosity profile (one data every centimeter) across the fault zone to accurately localize zones of increases and decreases in porosity within the pluri-meter thick fault zone architecture.

### **6.2.3 Fault geology in the Tournemire URL**

The Tournemire Underground Research Laboratory (URL) located in the Mesozoic sedimentary basin of the French Causses (Massif Central, France, Fig. 1), is operated by the French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety (IRSN), to study the confining properties of an argillaceous formation (Cabrera et al., 1999; Boisson et al., 2001). The URL is nested in a monoclinical structure tilted 5° to 10° to the North (Constantin et al., 2004) in a 250m thick shale formation respectively composed of 50m thick Domerian and 200m thick Toarcian series intercalated between two 300 to 500m thick dolomitic limestone layers of Bathonien-Bajocian-Aalenian ages and Carixian-Sinemurian ages (Cabrera et al., 1999) (Fig. 1). The shale's mineral composition is relatively homogeneous within the upper Toarcian section, with more than 50 wt.% clay minerals, dominantly illite and illite/smectite, 10-20 wt.% calcite, and 10-20 wt.% quartz. Other components (less than 10 wt.%) include detrital micas, feldspars, pyrite and Fe-dolomite, and organic matter (Boisson et al., 2001; Tremosa et al., 2012). The shale has a porosity of 10 to 13 %, (Dick et al., 2015) a water content of 4 to 6 wt.% and a hydraulic permeability of  $10^{-14}$  to  $10^{-15}$  m/s ( $10^{-21}$ - $10^{-22}$  m<sup>2</sup>) in the laboratory and of  $10^{-11}$  to  $10^{-14}$  m/s ( $10^{-18}$ - $10^{-21}$  m<sup>2</sup>) in situ (Bonin, 1998; Boisson et al., 2001; Cabrera et al., 1999; Courbet et al., 2013).

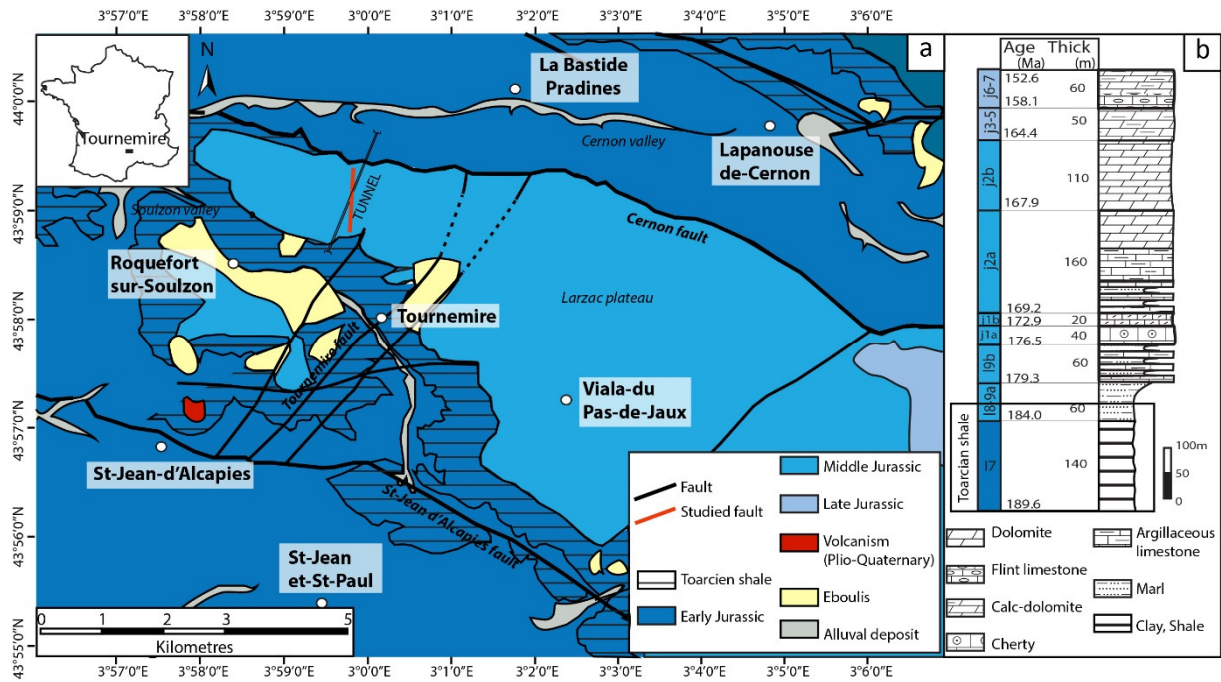


Figure 1: a, the Causse geological map. The studied fault is indicated in red. b, stratigraphic log (with 17, Early Toarcian, 18-9a, Late Toarcian-Early Aalenian, 19b, Late Aalenian, j1a, Early Bajocian, j1b, Late Bajocian, j2a, Early Bathonian, j2b, Late Bathonian, j3-5, Callovian-Early Oxfordian, j6-7 Late Oxfordian-Early Kimmerigian).

The URL is crossed by two main parallel fault zones (F1 and F2) separated by slightly deformed rock (Bretaudeau et al., 2014). The location and the geometry of the fault zones were reconstructed using boreholes previously drilled by IRSN and by mapping the intersections between the faults and the URL galleries' walls (Fig. 2). Both faults (F1 and F2) have a similar strike and dip respectively of N170° to N010° and 60° to 80°W (Fig. 2), characterized by left-lateral strike-slip with a reverse component (Peyaud et al., 2006). Some smaller (meter to decameter long) N130° to N150° trending faults connect F1 and F2 (Constantin, 2002; Bretaudeau et al., 2014).

Faults F1 and F2 are crossing a tectonic block bounded to the North by the N090° Cernon fault, to the South by the N090° St Jean d'Alcapies fault and the N040° Tournemire fault (Fig. 1) (Constantin et al., 2004). Two main tectonic stress regimes have affected the Causse basin. An



extension during the Upper Jurassic and the Lower Cretaceous (Blès et al., 1989; Constantin et al., 2002), characterized by  $\sigma_3$  oriented N-S was followed by a Mid-Cretaceous to Eocene Pyrenean compression during which  $\sigma_1$  varied from NE/SW to NW/SE, with two main pulses striking N020° to N030° and N160° to N170°. (Constantin et al., 2002; Constantin et al., 2004).

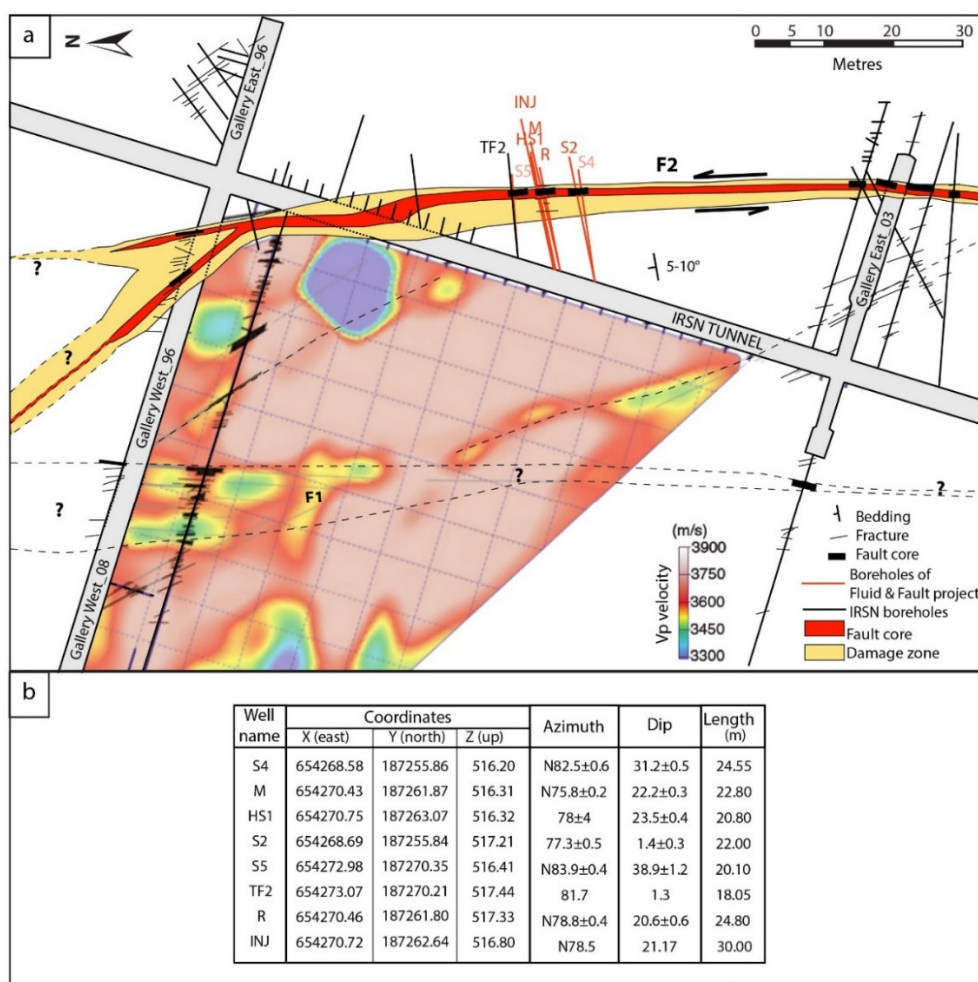
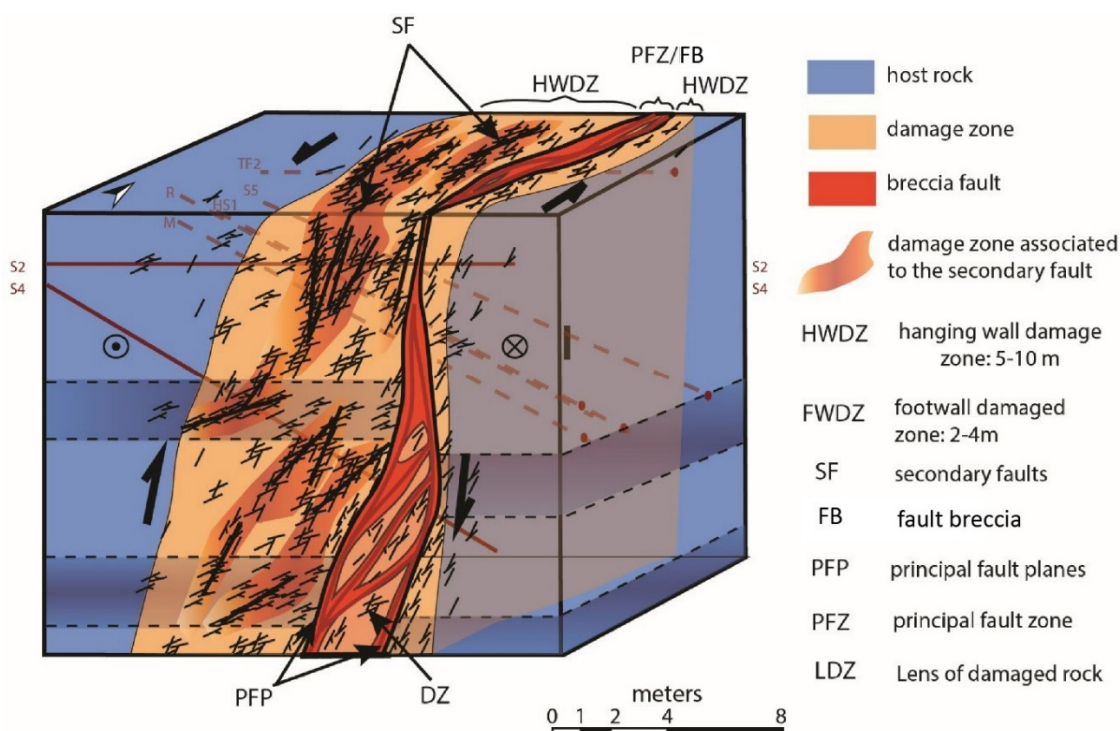


Figure 2: a, IRSN URL map showing faults (F1 and F2), P-wave velocity map (Breteau et al., 2014) and boreholes location. b, borehole specifications (X, Y, Z Azimuth, dipping and length).

The Cernon and the St Jean d'Alcapies faults were reactivated as normal faults during the Mesozoic extension and as reverse faults during the Pyrenean compression. These faults display a cumulative vertical inverse offset of 100 to 400m (Constantin et al., 2002). F1 and F2 faults presumably are associated to the compressive Pyrenean tectonic phase. Consequently, these

faults may have activated as a right lateral strike-slip during the first compressive pulse, and a left-lateral strike-slip during the second (or last) pulse. Left lateral strain features appear more developed in the fault zone (F2, Constantin, 2002).

The F2 fault zone conceptual model (Fig. 3) contains two type of deformed zones, a fractured damage zone (DZ in orange) and a fault breccia (FB in red). The damage zone is composed of 90% of fractures they mainly are distributed close to the 10% secondary faults (SF). The fractures length is < 1m and three types of fracture are observed; bed-parallel, slightly cemented and cemented-breccia-filling fracture. Secondary faults length are >1m and may be cemented, un-cemented or polished. Their aspect varies laterally from a main shear plane locally underlined by breccia and a meter thick damage zone to a sheared-fractured zone which could correspond to a fault tip. The peaks of fractures densities are often associated with the presence of secondary faults (red-orange degraded color domains). Fractures and faults have the same orientation and dip are predominantly oriented westwards. The fault breccia is very heterogeneous and composed of breccia partially cemented with intact clasts (LDZ).



**Figure 3:** 3D conceptual model of the F2 fault zone.

## **6.2.4 Methodology**

Optical image of borehole walls, core X-ray Computed Tomography and cores macroscopic observations were used to determine the location of structures along boreholes. These structures were classified into different fault rock types and correlated from one borehole to another. The water content and porosity measurement performed on core sample were correlated with the CT values of cores to obtain high resolution porosity profiles across the fault zone.

### **6.2.4.1 Structural analysis**

#### **Well logging and data acquisition**

Images of borehole walls obtained with the well logging system OPTV (borehole optical televiewer probe) were analyzed to identify and characterize the fault zone (Hubbard et al., 2012; Nie et al., 2013). The OPTV probe contains a 3 axes magnetometer and one optical head, composed of a camera and a conical mirror. The optical head is used to provide a continuous, high resolution (1140 pixels/360°) image of the borehole wall. The magnetometer allows orienting the optical imaging. This device allows the accurate location of the faults/fractures (Hubbard et al., 2012; Nie et al., 2013).

Cores (53mm of diameter) were acquired continuously and described on site, then analyzed by CT-scanning. The CT-scan is a non-destructive analysis method by computed tomography X-ray absorption. The CT-scan (Discovery CT750HD) allows 3D reconstruction of CT (computed tomography) image cutting with high resolution (187.5 x 187.5 x 625  $\mu\text{m}$  of voxel dimension) of core samples (1cm = 16 slices).

CT-scan images (slice) were analyzed to determine the mean CT of the shale matrix in order to establish a correlation between the mean CT values and the measured porosity samples. Two operations on CT-scan data were carried out: (i) the correction of beam hardening and (ii) the

“filtering” of macroscopic geological structures (fractures/veins/nodules...). A CT image (slice) includes a beam hardening artefact figured as an increase in the CT values at the image periphery. To correct from this beam hardening, the image periphery is excluded from the analyses. This allows analyzing an unbiased volume of CT-scan (new volume diameter of 42mm). To consider only the homogeneous shale matrix, the open geological structures (fracture/desaturation) and mineralization (veins/nodule/pyrite) are filtered from the CT signal using thresholding CT value ranging from 1750 to 2800. After filtering, the mean CT value of cores slices spaced of 1cm is determined and exported using the AVISO / RadiAnt DICOM viewer software.

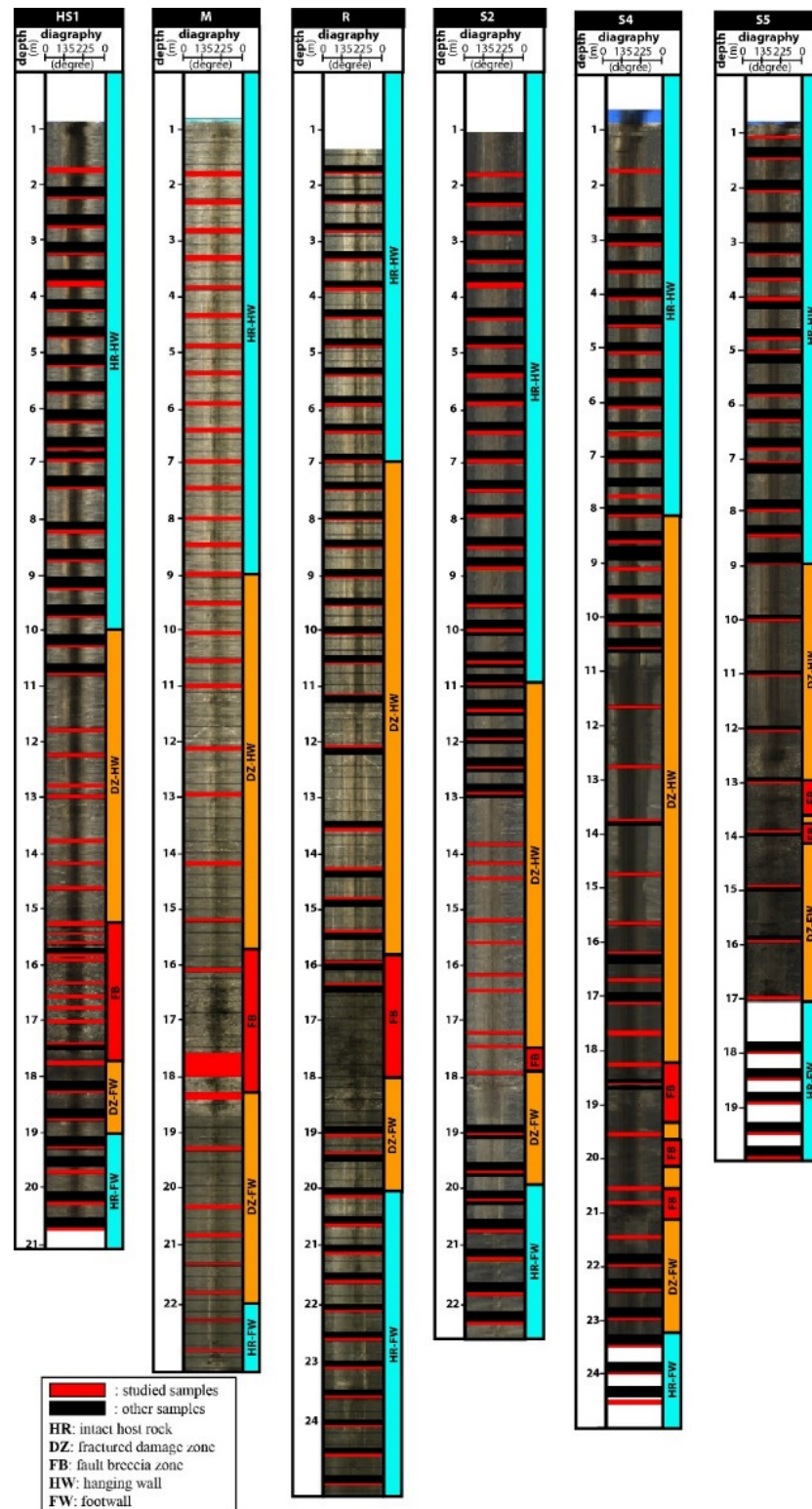
### **Fracture density**

A low angle between fracture orientation and borehole orientation will cause an underestimation of the number of crossing fractures. To avoid such sampling bias we conducted a geometric correction of fractures densities measured along the boreholes using Terzaghi (1965), Einstein and Baecher (1983) and in Gauthier (2000) methodology. First, the fractures are located and the distances between fractures are measured along boreholes. Second, the angle between borehole orientation and fracture orientation ( $\theta$ ) is calculated for each fracture. To avoid underestimations, each fracture is statistically weighted, depending on the inverse sine of angle  $\theta$ . This bias correction is described in appendix of Jorhi (2014). A cutoff on the minimum angle  $\theta$  was determined at  $10^\circ$ . If the angle  $\theta$  is close to zero, the corrector weight tends to infinity. However, in this study, very few fractures make an angle  $\theta$  lower than  $10^\circ$  with borehole axis.

### **6.2.4.2 Sampling and petrophysical measurements**

Samples 5cm thick were taken every 0.5 and 1.0m on cores, on average, in the intact host rock (HR, blue Fig. 3) and the fractured damage zone (DZ, orange Fig. 3), respectively. Some

samples in the breccia fault zone (FB, red Fig. 3) were also taken from HS1, M and S4 boreholes. All samples were sawed, and immediately dried. After description, each core section was divided into three sub-samples, comprised between 10-30g mass, taken from the center of the section to avoid disturbances linked to the rotation of the heavy drilling instrument during the borehole realization. Among 100-130 samples were taken at each borehole (Fig. 4). Thus, we observe the evolution of these petrophysical parameters along the fault zone in the eight boreholes. Samples don't show macroscopic structures (vein, fracture, nodule and fossil) and were chosen as relatively homogeneous in order to characterize the petrophysical properties of the matrix across the fault zone facies.



**Figure 4:** Sampling plane of porosity and water content measurements (in red) in different facies of the fault zone, with, HR, DZ, FB, FW and HW for the intact host rock, the fractured damage zone, the fault breccia zone, in the footwall and in the hanging wall, respectively.

For each sample, the gravimetric water content ( $WC_{dry,150^{\circ}C}$ ), volumetric moisture content ( $\theta$ ), the total porosity ( $n_{tot}$ ), and the degree of saturation ( $S$ ) were determined (Matray et al., 2007; Lavielle et al., 2012). To get these parameters the total mass of the moist sample ( $M_{tot}$ ), the sample mass after drying ( $M_{150^{\circ}C}$ ), the total volume of moist sample ( $V_{tot}$ ) and a number of additional parameters were measured. The method is described in Matray et al., (2007). It consists in determining the sample volumetric weight immediately after extraction (moist) and after drying at  $150^{\circ}C$  (dry). In details:

- $V_{tot}$  ( $cm^3$ ) is determined applying the technique described in Monnier et al., (1973), using the Archimede' principle in kerdane (petroleum derivative).
- $n_{tot}$  (dimensionless) represents the ratio of pore volume to total apparent volume of sample ( $n_{tot} = V_{pores} / V_{tot}$  with  $V_{pores} = V_{tot} - V_{solids} = V_{tot} - M_{150^{\circ}C} / \rho_{s150^{\circ}C}$  where  $\rho_{s150^{\circ}C}$  is the grain density calculated at  $150^{\circ}C$ ).
- $S$  (dimensionless) represents the proportion of empty space occupied by water ( $S = V_w / V_{pores}$  with  $V_w = (M_{tot} - M_{150^{\circ}C}) / \rho_w$  where  $\rho_{s150^{\circ}C}$  is the grain density calculated at  $150^{\circ}C$ ).
- $\theta$  (dimensionless) is function of the saturation degree and of total porosity ( $\theta = S \times n_{tot}$ ).
- $WC_{dry,150^{\circ}C}$  (dimensionless) represents the ratio of the mass of water ( $WC_{dry,150^{\circ}C} = 100 \times (M_w / M_{150^{\circ}C})$ ), where  $M_w = M_{tot} - M_{150^{\circ}C}$ , with  $M_{tot}$  is the total mass of no-dehydrated sample after extraction and  $M_{150^{\circ}C}$  is the oven-dry mass after passage of two-three days in a stove at  $T=150^{\circ}C$ , until mass stabilization).
- The masses were determined using an OHAUS balance (Adventurer AR3130). The total apparent volume was obtained using a Sartorius YDK 01 density measurement kit. The density grain was determined using a Micromeritics Accupyc II 1340 100 CC (He pycnometry). The water density is obtained using the chemical composition of water in

equilibrium with immediate host formation. In this study, only the porosity and the water content will be presented.

## **6.2.5 Results**

### **6.2.5.1 Structural facies in the fault zone**

The fault zone is divided into three type of deformed zones; the intact host rock (HR), the fractured damage zone (DZ) and the fault breccia facies (FB).

*The host-rock* is not or slightly fractured (blue, Fig. 5). Two host-rock are defined on either side of the fault zone; one in the fault zone western compartment (HR-HW) and the other in the fault zone eastern compartment (HR-FW).

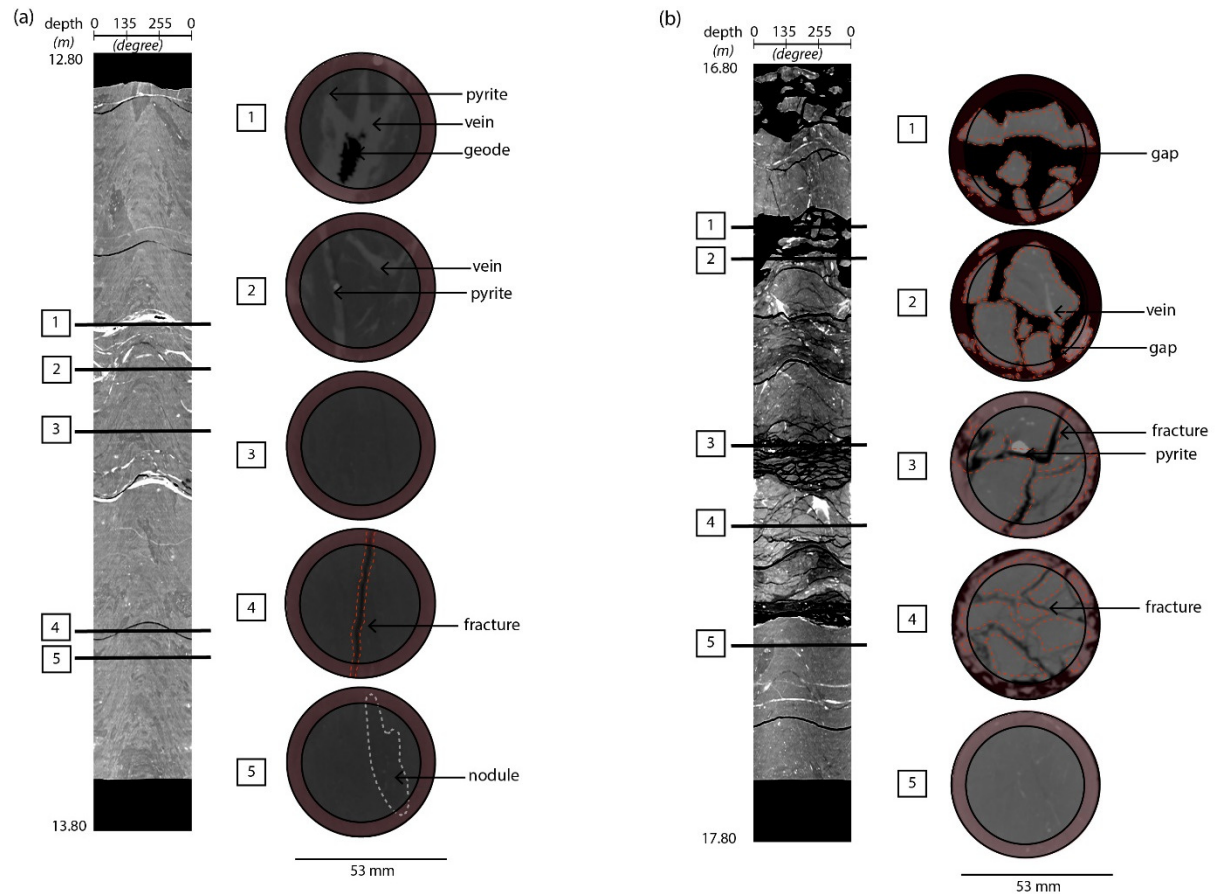
*Fractured damage zone* is defined by a fractured domain (orange, Fig. 5) that preserves the macroscopic texture of the intact host-rock (bedding). Two damage zones are observed on either side of the fault zone; the damage zone of the fault zone western compartment (DZ-HW) and the damage zone of the fault zone eastern compartment (DZ-FW).

*The fault breccia zones* is composed of the fault breccia and cemented breccia (red, Fig. 5). The fault breccia are characterized by un-cohesive material with centimeter clasts (<10cm) observed as dislocated blocks. The breccia contain centimeter to pluri-centimeter thick clasts in a small proportion (<10%) of calcific matrix with intense fractured clast and pluri-centimeter slightly fractured clasts. In all boreholes, the amount of cemented breccia is dominant, un-cohesive and un-cemented breccia only occurring as thin zones wrapping the cemented breccia.





a1). The CT fault breccia displays <20mm thick clasts with gaps (Fig. 7-b1 and 2) and >20mm thick clasts with micro-fractures (Fig. 7-b3 and 4). Calcite veins and pyrite are observed in clasts (Fig. 7-b2 and 3). In the fault breccia, macroscopic intact rock clasts are observed (Fig. 7-b5). Nodule (Fig. 7-a5) and pyrite are observed in the all facies (Fig. 7-a2 and b2). However, pyrites are often associated with calcite cementation.



**Figure 7:** a- CT fractured damage zone (between 12.80-13.80m, HS1 borehole) and b- CT fault breccia zone (between 16.80-17.80m, HS1 borehole).

## 6.2.5.2 Petrophysical characterization of the different fault zone facies

### 6.2.5.2.1 Water content and porosity profiles across the fault zone

Overall, the average porosity values range between 9.7-21.7, 9.9-19.9, 9.5-13.9, 10.6-14.5, 9.8-20.8 and 9.6-13.6% for the HS1, M, R, S2, S4 and S5 boreholes. The average water content value range between 4.0-8.9, 3.8-8.3, 3.8-5.4, 3.2-5.6, 4.1-8.8, 9.6-13.6 and 3.9-5.7% for the HS1, M, R, S2, S4 and S5 boreholes.

The water content and the porosity profiles are divided into five distinct domains corresponding to the different facies zones (HR-HW, DZ-HW, FB, DZ-FW and HR-FW) of the fault zone (Fig. 5).

#### **Host rock water content and porosity**

The water content ( $W_c$ ) and the porosity ( $\Phi$ ) values are relatively constant in the intact host rock of the fault zone western and eastern compartments (HR-HW, HR-FW, Fig. 5).

The mean  $W_c$  of the host-rock of the hanging wall is  $4.39 \pm 0.19\%$  with variation between 4.27-4.48% (S2 and HS1 boreholes) with a standard deviation between 0.10-0.35% (M and S5 boreholes, Fig. 6a). In the host-rock of the foot wall, the mean  $W_c$  is  $4.35 \pm 0.15\%$  with variation between 3.86-4.79% (M and S5 boreholes) with a standard deviation between 0.02-0.24% (S2 and M boreholes, Fig. 6a). The mean  $W_c$  of the host-rock (HR-HW+HR-FW) is  $4.37 \pm 0.17\%$ .

The mean  $\Phi$  of the host-rock of the hanging wall is  $11.06 \pm 0.48\%$  with variation between 10.03-13.37% (S4 and S2 boreholes) with a standard deviation of 0.27-0.89% (S4 and S2 boreholes, Fig. 6a). In the host-rock of the footwall, the mean  $\Phi$  is  $11.70 \pm 0.45\%$  with variation between 9.71-14.46% (HS1 and S4 boreholes) with a standard deviation between 0.18-0.67% (S2 and S4 boreholes, Fig. 6a). The mean  $\Phi$  of the host-rock (HR-HW+HR-FW) is  $11.38 \pm 0.47\%$ .

### **Damage zone water content and porosity**

The  $W_c$  and the  $\Phi$  profiles in the damage zones (hanging wall and footwall) are characterized by a slight gradual increasing of the  $W_c$  and  $\Phi$  from the intact host-rock to the fault breccia facies.

The mean  $W_c$  of the damage zone of the hanging wall, is  $4.89 \pm 0.39\%$  with variations of 4.01 to 6.04% between S2 and S4 boreholes and a standard deviation of 0.22-0.57% (S5 and S4 boreholes, Fig. 6). In the damage zone of the footwall, the mean  $W_c$  is  $4.90 \pm 0.49\%$  with variation between 3.75-5.86% (M and S5 boreholes) with a standard deviation between 0.35-0.76% (S4 and S5 boreholes, Fig. 6). The mean  $W_c$  of the damage zones (DZ-HW+DZ-FW) is  $4.90 \pm 0.44\%$ .

The mean  $\Phi$  of the damage zone of the hanging wall is  $12.31 \pm 0.90\%$  with variation between 11.59-14.48% (S5 and S4 boreholes) with standard deviation between 0.67-1.52% (M and S4 boreholes, Fig. 6a). And in the damage zone of the foot-wall, the mean  $\Phi$  is  $12.31 \pm 1.15\%$  with variation between 9.88-14.88% (M and S4 boreholes) with standard deviation of 0.72-1.84% (HS1 and S5 boreholes). The mean  $\Phi$  of the damage zones (DZ-HW+DZ-FW) is  $12.31 \pm 1.03\%$ .

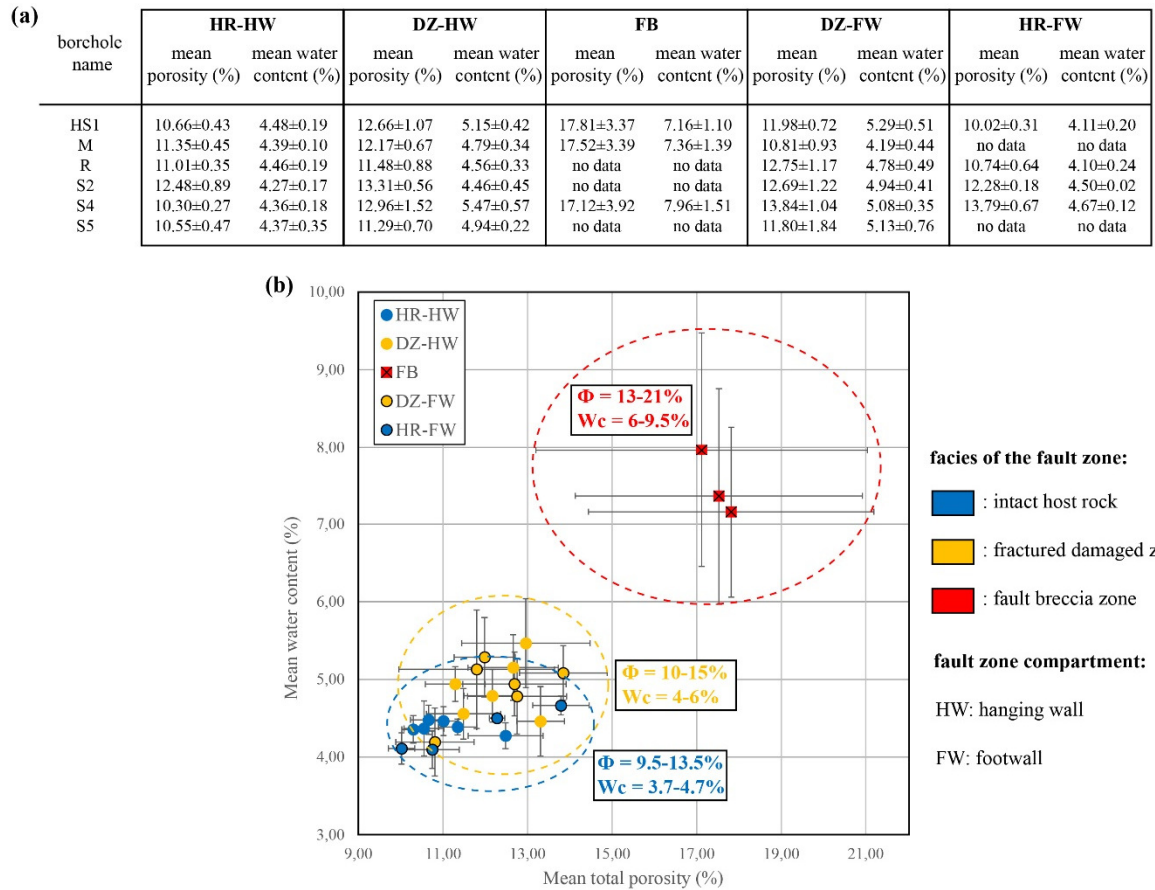
### **Fault breccia water content and porosity**

In the fault breccia, the mean  $W_c$  is  $7.49 \pm 1.33\%$  with variation between 5.97-9.47% (M and S4 boreholes) with a standard deviation between 1.10-1.51% (HS1 and S4 boreholes). In the fault breccia, the mean  $\Phi$  is  $17.48 \pm 3.56\%$  with variation from 13.20 to 21.18% (S4 and HS1 boreholes) with a standard deviation of 3.37-3.92% (HS1 and S4 boreholes).

### **Comparison of $\Phi$ and $W_c$ in the HR, DZ and FB in the HW and FW compartments:**

The mean  $\Phi$  and  $W_c$  between the different type of deformed zones (host-rock, damage zone and fault breccia) are similar on both sides of the fault zones (hanging wall and footwall).

Indeed, the  $\Phi$  of the fault breccia is an average  $\times 1.4$  of the  $\Phi$  damage zone and  $\times 1.6$  of the  $\Phi$  host-rock (Fig. 6b) and the  $W_c$  of the fault breccia is an average  $\times 1.5$  of the  $W_c$  damage zone and  $\times 1.7$  of the  $W_c$  host-rock.



**Figure 6:** (a) Table with mean porosity (%) and mean water content (%) in different compartments of the fault zone for each borehole (HS1, R, M, S2, S4 and S5). HR-HW host rock of hanging wall, DZ-HW the fractured damage zone of the hanging wall, FB the fault breccia, DZ-FW the fractured damaged zone of the footwall and HR-FW the host rock of footwall are represented by, DZ-HW, FB, DZ-FW and HR-FW, respectively. (b) Mean water content as a function of mean porosity. The host rock, the damage zone and the fault core is represented in blue, orange and red colors.

The variation amplitude (standard deviation) of  $\Phi$  and  $W_c$  in the fault breccia and in the damage zone are more important than in the host-rock. Indeed, the mean variation amplitude of  $\Phi$  ( $\Delta\Phi$ )

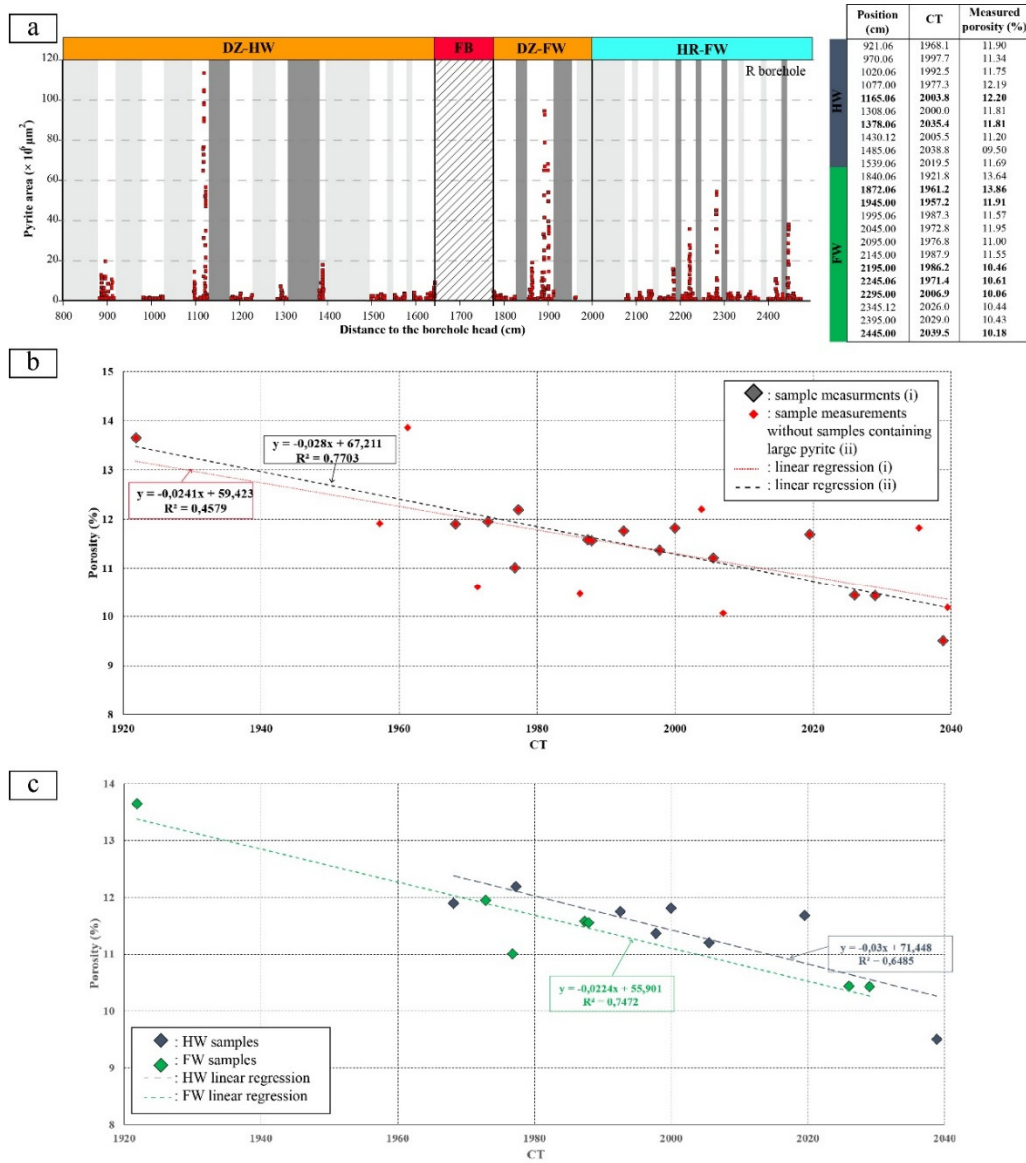
of the fault breccia is an average  $\times 3.5$  to  $\times 4.0$  (hanging wall and footwall) of the  $\Delta\Phi$  in the damage zones and  $\times 8.4$  to  $\times 9.9$  (footwall and hanging wall) of the  $\Delta\Phi$  in the host-rock. The  $\Delta W_c$  of the fault breccia is an average  $\times 3.1$  to  $\times 3.2$  (hanging wall and footwall) of the  $\Delta W_c$  in the damages zones and  $\times 8.1$  to  $\times 9.4$  (footwall and hanging wall) of the  $\Delta W_c$  in the host-rock. Thus, the fault breccia is characterized by a  $\Phi$  between 13-21% and a  $W_c$  between 6-9.5%, the damage zone is characterized by a  $\Phi$  between 10-15% and a  $W_c$  between 4-6% and the fault breccia is defined by a  $\Phi$  between 9.5-13.5% and a  $W_c$  between 3.4-4.7% (Fig. 6b).

### **6.2.5.3 CT and porosity ( $\Phi$ ) correlation**

To correct from the beam hardening around the core periphery (red zone, Fig. 7), the image periphery is excluded (11mm) to keep an unbiased volume of CT-scan. To consider the homogeneous intact matrix, the geological structures (fractures/veins/nodules...), the pyrite mineralization and the desaturation effects around open structures (fractures, clasts, altered zones) were extracted using CT threshold where only 1750 and 2800 CT values are considered.

#### **Correlation of CT values with porosity**

The thresholding of CT values enables to separate different minerals. By selecting the  $CT > 2800$ , the pyrite proportion and the pyrite area are restored on each CT-scan slice (Fig. 8a). Large patches of pyrites ( $> 20 \times 10^6 \mu m^2$ ) are present in the damages zones (hanging wall and footwall) and are localized (peak at 11.2, 14.0, 19.0, 22.0-23.0 and 24.5m). Peaks at 11.2, 14.0 and 19.0m correspond to the fracture damage zones.



**Figure 8:** a, Mean area of pyrites in function of the distance from the head of the R borehole. Light gray zones are sampled zones, dark gray zones are sampled zone including large size of pyrites. The fractured damage zone of the hanging wall, the fault breccia facies, the fractured damage zone of the footwall and the intact host rock of the footwall are DZ-HW, FB, DZ-FW and HR-FW. b, Two correlations, first (i, red) between the all porosity measurements (grey diamond) with the mean CT (computed tomography) of slice close to the measured sample and second (ii, black) between the measured porosity on sample without important size calcite with the mean CT. c, Correlation between the measured porosity with the mean CT close to the sample in the hanging wall and in the footwall, in blue and in green.



Three correlations were performed:

(i) If all measured porosity values were considered, it gives  $\Phi=0.0241 \times CT+59.423$  with  $R^2=0.46$ . The most remote measurements are close to the zone with large patches of pyrites. From an area greater than  $20 \times 10^6 \mu m^2$  (dark gray zones in Fig. 8a), the presence of some pyrites may affect the homogeneity of the shale matrix.

(ii) if only the measured porosity values on samples without large size of pyrite (Fig. 8b) it gives  $\Phi=-0.028 \times CT+67.211$  with  $R^2=0.77$ .

(iii) if porosity of HW and FW samples (Fig. 8c) is considered, it gives  $\Phi=-0.030 \times CT+71.448$  with  $R^2=0.65$  for the hanging wall and  $\Phi=-0.0224 \times CT+55.901$  with  $R^2=0.74$  for the footwall.

#### **6.2.5.4 High resolution porosity profile along a fault zone.**

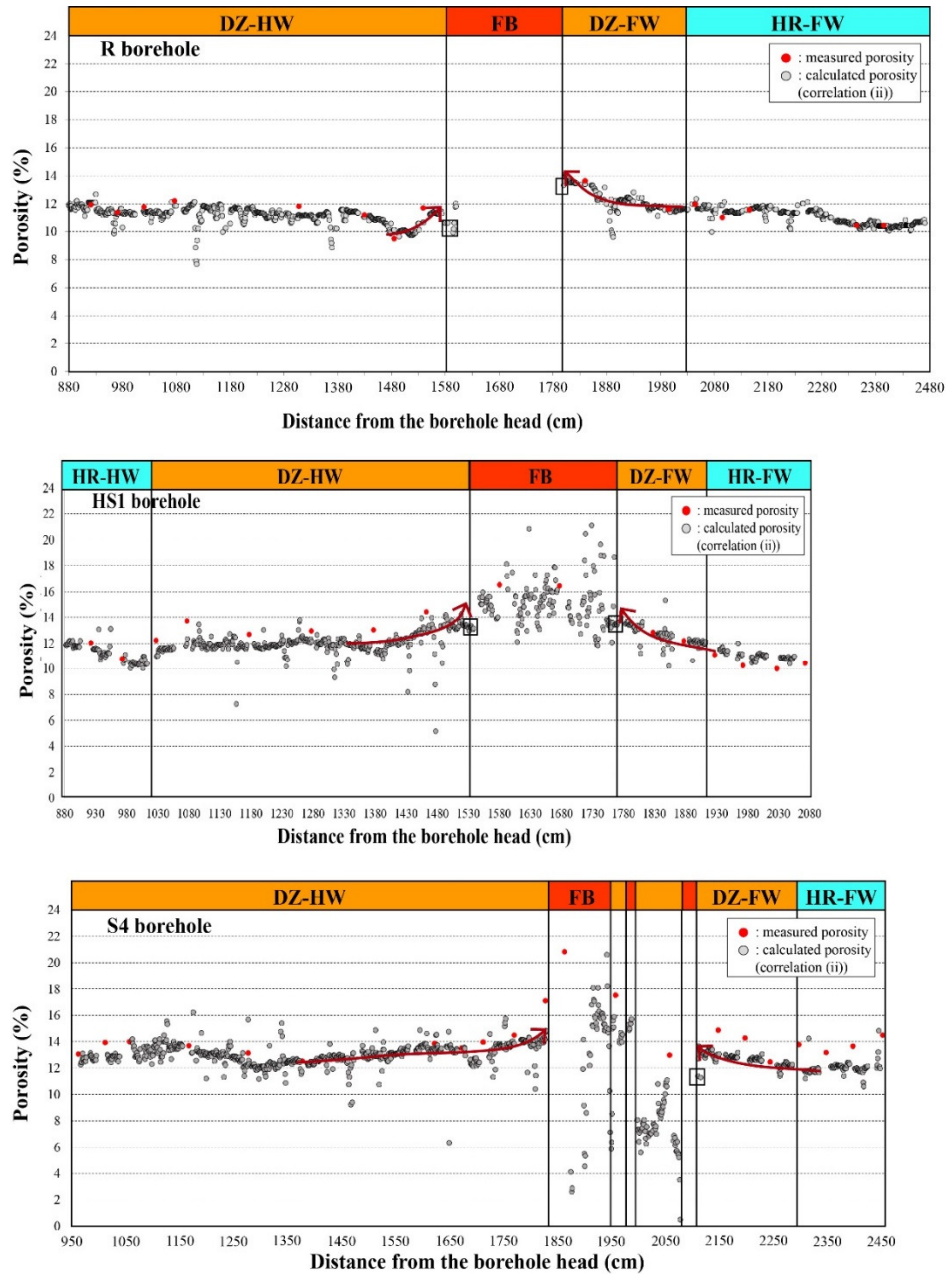
Porosity ( $\Phi$ ) profiles were calculated every centimeter from the CT data using the correlation on R, HS1 and S4 boreholes (figure 9).

Calculated  $\Phi$  profiles are consistent with the measured  $\Phi$  profiles. However, calculated  $\Phi$  are slightly less than the measured ones in the hanging wall (-0.61% and -0.07%, for HS1 and S4 boreholes, Fig. 9). In the footwall of HS1 borehole, the calculated  $\Phi$  are greater than the measured  $\Phi$  (+0.3%) while the calculated  $\Phi$  are lower than the measured  $\Phi$  in the footwall of S4 borehole (-1.51%, Fig. 9). The heterogeneities in the shale matrix as the presence of pyrites and calcites may introduce some bias the  $\Phi$  measurement being responsible for these differences.

The high resolution calculated  $\Phi$  profiles show an exponential of  $\Phi$  trend close to the fault breccia zone (hanging wall and foot wall). In the footwall, the exponential of  $\Phi$  trend is observed in the footwall damage zone and presents an average  $\Phi$  increase of 2% (Fig. 9). The trend correspond to a  $\Phi$  increase of 2.53, 2.00 and 1.87% of the footwall damage zones of the



R, HS1 and S4 boreholes. The exponential of porosity trend of the footwall is better expressed than in the hanging wall (Fig. 9). This observation can be explain by the presence of the secondary fault zones in the hanging wall. The trend correspond to a  $\Phi$  increase of 1.57, 2.67 and 2.98% of 0.56, 1.20 and 4.1m thick zones in the hanging wall of R, HS1 and S4 boreholes.



**Figure 9:** R, HS1 and S4 profiles of measured porosity, in red and calculated porosity, in grey in the fault zone, with DZ, FB, HW and FW for fractured damage zone, fault breccia facies, hanging wall and footwall.

The fault breccia boundary is represented by a local  $\Phi$  decrease of 3 to 5cm thick (black square, Fig .9). The fault breccia boundary of the hanging wall is represented by a  $\Phi$  decrease of 1.35% and 1.15% in the R and HS1 boreholes and is absent in the hanging wall of the S4 borehole. The fault breccia boundary of the footwall is represented by a  $\Phi$  decrease of 0.80, 0.47 and 2.33% in the R, HS1 and S4 boreholes (Fig .9). This local  $\Phi$  decrease is probably due to the presence of calcite, which cements the principal fault planes. Indeed, recent studies on this fault zone highlighted calcifications of the interface between the damage zone and the fault breccia (Lefèvre et al., 2016).

The  $\Phi$  calculated profile of S4 borehole highlights zones between different fault breccia with low  $\Phi$  (<10%). Indeed, zones between 1977-1993cm and 1993-2079cm present a  $\Phi$  under 10% (<  $\Phi$  of host-rock). These zones do not delimit fault breccia but are included in the fault breccia but are more indurated zones (less porous) and are less affected by the deformation. Low  $\Phi$  values were also observed in the fault breccia. So the fault breccia of S4 borehole seems to be very heterogeneous.

It is also possible that some sedimentary offsets (close to the secondary faults in the damage zones) affect the porosity profile and cause local porosity variations. To confirm the presence of these offsets, it is necessary to point out zones where the bedding is tilted. If pyrite are stratigraphic marker bench, an estimation of offsets would be possible. But for these tree boreholes (R, HS1 and S4), the secondary fault zones do not correspond to localized amplitudes and patches of pyrite are often associated with cemented fractures/faults. However, this hypothesis is not impossible for some local porosity variation. The study of the eight boreholes must be done.

## 6.2.6 Discussion

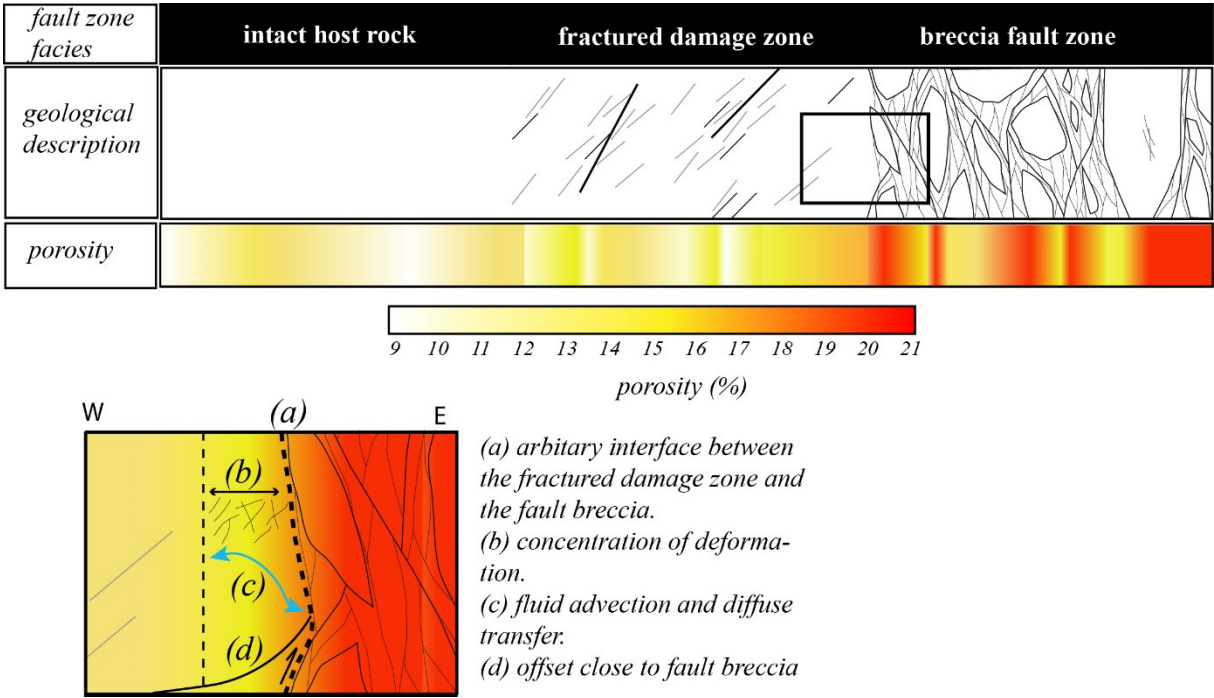
### Porosity and geology

The host-rock presents porosities between 9.5-13.5% with a water content between 3.7-4.7%. The damage zones presents porosities between 10-15% and a water content between 4-6%. The fault breccia presents porosities between 13-21% with a water content between 6-9.5%.

Measured and calculated porosity ( $\Phi$ ) profiles in the fault zone showed  $\Phi$  of damage zones (DZ-HW and DZ-FW) higher than the  $\Phi$  of host-rock. Indeed, average matrix  $\Phi$  of the damage zone is greater than 0.5 to 5.5% the  $\Phi$  of the host-rock. A gradual increase in the  $\Phi$  of about 2% at 2 to 5m to the fault breccia is also observed. Part of this  $\Phi$  increase may be related to the petrophysical properties of the sedimentary layer. However, the systematic presence of  $\Phi$  increase in three studied boreholes (R, HS1 and S4) with different inclinations (20.6, 23.5 and 31.2°, respectively) allows to affirm these observations on  $\Phi$  of the damage zone cannot only be related to the sedimentary facies signature.

The increasing  $\Phi$  of the damage zone 2 to 5m from the fault breccia means that the matrix has undergone modifications of petrophysical properties between fractures. This observation questions the damage zone definition based only on the macroscopic fractures density variations. Here we show that independently of macroscopic fracture distribution, the petrophysical properties of the host-rock matrix (if the distance at the fault breccia boundary is inferior to 5m) are also affected by the fault zone. Three hypotheses may explain this high  $\Phi$  variation close to the fault breccia. (i) The interface between the damage zone and the fault breccia is arbitrarily chosen and is not the principal fault plane but the principal fault plane is included in the fault breccia zone. Thus, this high  $\Phi$  zone would be included in the fault breccia (Fig. 10a). (ii) The deformation is concentrated close to the fault breccia boundary and modifies the petrophysical properties (Fig. 10b) and (iii) the modification of the petrophysical properties

are due to fluid advection and diffuse transfer between the fault breccia to the damage zone (Fig. 10c). It is also possible that (iv) some sedimentary offsets close to the fault breccia (Fig. 10d).



**Figure 10:** Schematization of three hypotheses to explain the presence of the « halo » around the fault breccia (FB).

The fault breccia boundary is defined by a zone of 2 to 5cm with lower  $\Phi$  values (up to 2%). Cathodoluminescence analysis of sample thin sections sampled in the fault zone (F2) of the gallery 2003 at the boundary between the damage zone and the fault breccia show a disturbed matrix with an increased presence of calcite on 2 to 4cm (damage zone compartment) from the interface between the damage zone and the fault breccia due to episodes of paleo-circulation (Lefèvre et al., 2016). These results are in agreement with a local  $\Phi$  reduction to a few centimeters of the principal fault plane by matrix cementing.

## **6.2.7 Conclusion**

Using the porosity and the water content measured on core samples from boreholes perpendicularly crossing the F2 fault zone, we identified porosity and water content signatures of the host-rock, the damage zone and the fault breccia of the fault zone. The correlation between the cores CT values (computed tomography) with the measured porosities enables to realize a high resolution porosity profile in the fault zone. The calculated porosity profiles highlight halos of several meters with displaying high porosity close to the fault breccia. Very local decrease porosity of 2-5cm of the fault breccia is also observed. The porosity reduction is interpreted as matrix cementation during paleo-circulations. This hypothesis is supported by the cathodoluminescence analyses of thin sections (Lefèvre et al., 2016). Some sedimentary offset effects on porosity profile are also be envisaged.

## **References**

- Agosta, F., Alessandroni, M., Antonellini, M., Tondi, E., Giorgioni, M., 2010. From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir. *Tectonophysics* 490, 197-213.
- Antonellini, M., Aydin, A., Pollard, D., 1994. Microstructure of deformation bands in porous sandstone at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology* 16, 941-959.
- Berg, S.S., Skar, T., 2005. Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses of a segment of the Moab fault, SU Utah. *Journal of Structural Geology* 27, 1803-1822.
- Billi, A., Salvini, F., Storti, F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25, 1779-1794.

- Blès, J.L., Bonijoly, D., Castaing, C., Gros, Y., 1989. Successive post-Variscan stress fields in the French Massif Central and its borders (Western European plate): comparison with geodynamic data. *Tectonophysics* 169, 79-111.
- Bretaudeau, F., Gélis, C., Leparoux, D., Brossier, R., Cabrera, J., Côte, P., 2014. High-resolution quantitative seismic imaging of a strike-slip fault with small vertical offset in clay rocks from underground galleries: Experimental platform of Tournemire, France. *Geophysics* 79, No1, B1-B18.
- Bonin, B., 1998. Deep geological disposal in argillaceous formations: Studies at the Tournemire Test Site. *Journal of Contaminant Hydrology* 35, 315-330.
- Boisson, J.Y., Bertrand, L., Heitz, J.F., Moreau-Le Golvan, Y., 2001. In situ laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. *Hydrogeology Journal* 9, 108-123.
- Busch, A., Alles, S., Gensterblum, Y., Prinz, D., Newhurst, D.N., Raven, M.D., Stanjek, H., Krooss, B.M., 2008. Carbon dioxide storage potential of shales. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2, 297-308.
- Cabrera, J., Volant, P., Baker, C., Pettitt, W., Young, R.P., 1999. Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media: The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site (France). 37th U.S Rock Mechanics Symposium, vail, Amadei & Kranz & Scott & Smeallie (eds), Balkema, 957-964.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture of permeability structure. *Geology* 24, 1025-1028.
- Chester, F.M., Evans, J.P., Biegel, R.L., 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research* 98, 771-786.

- Clausen, J.A., Gabrielsen, R.H., Johnsen, E., Korstgard, J.A., 2003. Fault architecture and clay smear distribution. Examples from field studies and drained ring-shear experiments. *Norwegian Journal of Geology* 83, 131-146.
- Constantin, J., Peyaud, J.B., Vergély, P., Pagel, M., Cabrera, J. 2004. Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 25-41.
- Constantin, J., Laurent, P., Vergély, P., Cabrera, J., 2007. Paleo-deviatoric stress magnitudes from calcite twins and related structural permeability evolution in minor fault: Example from the toarcian shale of the French Causses Basin, Aveyron, France. *Tectonophysics* 429, 79-97.
- Cornet, F.H., 2000. Détermination du champ de contrainte au voisinage du laboratoire souterrain de Tournemire. Rapport du Laboratoire de Mécanique des Roches, Département de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris.
- Courbet, C., Dick, P., Lefèvre, M., Witterbroodt, C., Matray, J., Barnichon, J., 2013. Estimating Hydraulic Conductivities in a Fractured Shale Formation from Pressure Pulse Testing and 3d Modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #MR11A-2202.
- David, C., Wong, T.F., Zhu, W., Zhang, J. 1994. Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: implication for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust. *Pure Applied Geophysics* 143, 425-456.
- Dick, P., Courbet, C., Wittebrood, C., Dauzere, A, Matray, J-M., 2015. Internal structures of fault zones in low permeability formation and their relationship with fluid flow: insights the Tournemire URL. *Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Bruxelles. Abstract 15-21.
- Distinguin, M., and Lavanchy, J.-M., 2007. Determination of hydraulic properties of the Callovo-Oxfordian argillite at the bure site: Synthesis of the results obtained in deep boreholes using several *in situ* investigation techniques. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 379-392.

- Dong, J-J., Hsu, J-Y., Wu, W-J., Shimamoto, T., Hing, J-H., Yeh, E-C., Wu, Y-H., Sone, Hiroki., 2010. Stress-dependence of the permeability and porosity of sandstone and shale from TCDP Hole-A. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 47.
- Einstein, H.H., Baecher, G.B., 1983. Probabilistic and statistical methods in engineering geology specific methods and examples, part1: Exploration, Rock Mechanics and Rock Engineering 16, n°1, 39-72.
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C., Lewis, Rutter, E.H., 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of a Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics* 367, 235-251.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zone. *Journal of Structural Geology* 32, 1557-1575.
- Gudmunson, A., Simmenes, T.H., Larsen, B., Philipp, S.L., 2010. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *Journal of Structural Geology* 32, 1643-1655.
- Jourde, H., Flodin, E.A., Aydin, A., Durlofski, L.J., Wen, X.H., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurement. *AAPG Bulletin* 86, 1187-1200.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of Structural Geology* 26, 503-517.
- Fernández, A.M., Sánchez-Ledesma, D.M., Tournassat, C., Melón, A., Gaucher, E.C., Astudillo, J., Vinsot, A., 2014. Applying the squeezing technique to highly consolidated clayrocks for pore water characterization: Lessons learned from experiments at the Mont Terri Rock Laboratory. *Applied Geochemistry* 49, 2-21.
- Lavielle, B., Matray, J-M., Thomas, B., Dauzère, A., Bensenouci, F., Gilabert, E., 2012. Stages of evolution of a Toarcian compacted claystone around galleries excavated between 1 and 124



years ago by the study of noble gases dissolved in pore water at the Tournemire Underground Research Laboratory (France). *Applied Geochemistry* 27, 1403-1416.

Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Martin, G., Lamarche, J., Dick, P., Castilla, R., 2015. Three-dimensional fault zones architecture in shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France), En préparation.

Lefèvre, M., Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P., Gout, C., 2016. Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shale (Tournemire tunnel, Southern France). *Journal of Structural Geology* 83, 73-84. DOI : 10.1016/j.jsg.2016.01.002.

Matonti, C., Lamarche, J., Guglielmi, Y., Marié, L., 2012. Structural and petrophysical characterization of mixed conduit/seal fault zones in carbonates: Example from the Castellans fault (SE France). *Journal of Structural Geology* 39, 103-121.

Matray, J-M., Savoye, S., Cabrera, J., 2007. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Engineering Geology* 90, 1-16.

Monnier, G., Stengel, P., Fies, J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de système de porosité du sol. *Ann. Agron* 24, 533-545.

Samper, J., Dewonck, S., Zheng, L., Yang, Q., Naves, A., 2008. Normalized sensitivities and parameter identifiability of *in situ* diffusion experiments on Callovo-Oxfordian clay at Bure site. *Physics and Chemistry of the Earth* 33, 1000-1008.

Scheidegger, AE. 1974. The physics of flow through porous media. 3<sup>rd</sup> edition. Toronto: University of Toronto Press.

Sibson, R.H., 2000. Fluid involvement in normal faulting. *Journal of Geodynamics* 29, 469-499.

- Terzaghi, R.D., 1965. Sources of error in joints surveys. *Geotechnique* 15, 287-304.
- Tremosa, J., Arcos, D., Matray, J.M., Bensenouci, F., Gaucher, E.C., Tournassat, C., Hadi, J., 2012. Geochemical characterization and modelling of the Toarcian/Domerian porewater at the Tournemire underground research laboratory. *Applied Geochemistry*, 27, 1417-1431.
- Wakim, J., Hadj-Hassen, F., De Windt, L., 2009. Effect of aqueous solution chemistry on the swelling and shrinkage of the Tournemire shale. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 1378-1382.
- Wibberley, C.A.J., Shimamoto, T., 2003. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Midian Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan. *Journal of Structural Geology* 25, 59-78.
- Wibberley, C.A.J., Yielding, G., Di Toro, G., 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *The Internal Structure of Fault Zones*, Geological Society London 299, 5-33.

**Additional material**

| HS1 borehole | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%) | Water content (%) | Compartment of FZ | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%) | Water content (%) | Compartment of FZ | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%) | Water content (%) | Compartment of FZ |
|--------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 173,5        | 14,23±1,6372                      | 4,62 ± 0,3162      | HR-HW             | 1927,5            | 10,362±1,0255                     | 4,33± 0,1246       | IIR-FW            | 874,5             | 13,184±2,0443                     | 10,1 ± 0,3890      | DZ-IHW            |                   |
| 173,5        | 11,61±1,2758                      | 4,72 ± 0,1942      | IIR-HW            | 1927,5            | 10,392±1,0492                     | 4,28± 0,1305       | HR-FW             | 874,5             | 13,533±1,8064                     | 4,85 ± 0,2927      | DZ-HW             |                   |
| 173,5        | 9,75±0,9752                       | 4,61 ± 0,1122      | HR-HW             | 1927,5            | 8,855 ± 1,0099                    | 4,50± 0,1201       | IIR-FW            | 925,5             | 12,492±2,1399                     | 4,91 ± 0,4158      | DZ-IHW            |                   |
| 222,5        | 11,03±1,0450                      | 4,44 ± 0,1298      | HR-HW             | 1972,5            | 9,713 ± 1,1841                    | 4,06± 0,1652       | HR-FW             | 925,5             | 12,372±1,6023                     | 4,94 ± 0,2252      | DZ-IHW            |                   |
| 222,5        | 11,33±1,4765                      | 4,41 ± 0,2565      | IIR-IHW           | 1972,5            | 10,635±1,2822                     | 3,91± 0,1946       | HR-FW             | 925,5             | 12,311±1,5422                     | 4,86 ± 0,2064      | DZ-HW             |                   |
| 222,5        | 9,16±1,5112                       | 4,37 ± 0,2665      | HR-HW             | 1972,5            | 11,864±1,3987                     | 4,42± 0,2301       | IIR-FW            | 977,5             | 11,523±1,3542                     | 4,45 ± 0,1512      | DZ-IHW            |                   |
| 272,5        | 10,00±1,3907                      | 4,56 ± 0,2279      | HR-HW             | 2027,5            | 9,725 ± 1,0521                    | 3,86± 0,1306       | HR-FW             | 977,5             | 11,692±1,7846                     | 4,26 ± 0,2823      | DZ-HW             |                   |
| 272,5        | 10,05±1,4009                      | 4,48 ± 0,2315      | IIR-IHW           | 2027,5            | 10,029±1,1377                     | 3,83± 0,1532       | HR-FW             | 977,5             | 11,647±1,5844                     | 4,49 ± 0,2180      | DZ-IHW            |                   |
| 272,5        | 10,20±1,1287                      | 4,39 ± 0,1518      | HR-HW             | 2027,5            | 9,252 ± 1,5614                    | 3,95± 0,2826       | HR-FW             | 1025,5            | 10,678±1,8141                     | 4,09 ± 0,2910      | DZ-IHW            |                   |
| 322,5        | 10,51±1,3686                      | 4,29 ± 0,2220      | IIR-IHW           | 2072,5            | 10,872±1,4246                     | 4,04± 0,2388       | HR-FW             | 1025,5            | 11,011 ± 1,6720                   | 4,29 ± 0,2417      | DZ-IHW            |                   |
| 322,5        | 11,28±1,3576                      | 4,44 ± 0,2184      | HR-HW             | 2072,5            | 10,805±0,9712                     | 4,09± 0,1110       | IIR-FW            | 1025,5            | 10,958±1,8836                     | 4,30 ± 0,3160      | DZ-IHW            |                   |
| 322,5        | 10,45±0,9169                      | 4,32 ± 0,0985      | HR-HW             | 2072,5            | 9,422 ± 1,3645                    | 4,06± 0,2182       | HR-FW             | 1069,5            | 12,525±1,5853                     | 5,06 ± 0,2204      | DZ-HW             |                   |
| 375          | 9,64±0,9898                       | 4,39 ± 0,1155      | IIR-IHW           | 1223,5            | 15,593±0,6973                     | 4,78 ± 0,0590      | DZ-HW             | 1069,5            | 12,282±1,3813                     | 4,99 ± 0,1602      | DZ-HW             |                   |
| 375          | 9,20±1,6755                       | 4,27 ± 0,3230      | HR-HW             | 1223,5            | 12,730 ± 0,8004                   | 4,81 ± 0,0778      | DZ-IHW            | 1069,5            | 12,285±1,5230                     | 4,94 ± 0,2009      | DZ-IHW            |                   |
| 375          | 10,72±1,3025                      | 4,48 ± 0,2016      | HR-HW             | 1223,5            | 13,307 ± 0,8127                   | 4,94± 0,0823       | DZ-HW             | 1177,5            | 12,822±1,7976                     | 5,42 ± 0,2912      | DZ-IHW            |                   |
| 422,5        | 9,70±1,6729                       | 4,10 ± 0,3214      | IIR-IHW           | 1297              | 13,024±1,2997                     | 5,00± 0,1913       | DZ-IHW            | 1177,5            | 12,659±1,3656                     | 5,24 ± 0,1565      | DZ-IHW            |                   |
| 422,5        | 10,14±1,5303                      | 4,02 ± 0,2727      | HR-HW             | 1297              | 12,893 ± 1,1324                   | 4,90± 0,1439       | DZ-IHW            | 1177,5            | 12,050±1,5340                     | 4,91 ± 0,2039      | DZ-IHW            |                   |
| 422,5        | 9,79±1,0144                       | 3,98 ± 0,1212      | IIR-IHW           | 1297              | 12,805 ± 1,2066                   | 4,71 ± 0,1652      | DZ-HW             | 1257,5            | 12,039±1,2534                     | 4,80 ± 0,1259      | DZ-HW             |                   |
| 472,5        | 10,39±1,3537                      | 4,43 ± 0,2169      | HR-HW             | 1418,5            | 12,653 ± 0,7047                   | 4,82± 0,0646       | DZ-IHW            | 1257,5            | 11,778±1,6178                     | 4,72 ± 0,2290      | DZ-IHW            |                   |
| 472,5        | 8,17±1,4975                       | 4,66 ± 0,2645      | HR-HW             | 1418,5            | 12,412 ± 0,9268                   | 4,68± 0,1098       | DZ-HW             | 1257,5            | 11,980±1,3938                     | 4,75 ± 0,1629      | DZ-HW             |                   |
| 472,5        | 11,20±1,5623                      | 4,56 ± 0,2843      | IIR-IHW           | 1418,5            | 12,413 ± 0,9249                   | 4,59± 0,1094       | DZ-HW             | 1378,5            | 11,976±1,8110                     | 4,65 ± 0,2929      | DZ-HW             |                   |
| 522,5        | 10,29±1,1024                      | 4,43 ± 0,1445      | HR-HW             | 1527              | 15,450±0,9071                     | 6,21 ± 0,0965      | DZ-IHW            | 1378,5            | 11,674±1,5198                     | 4,54 ± 0,1986      | DZ-IHW            |                   |
| 522,5        | 10,62±1,0456                      | 4,55 ± 0,1299      | HR-HW             | 1527              | 14,070±0,9226                     | 5,61 ± 0,0980      | DZ-HW             | 1378,5            | 12,006±1,6737                     | 4,62 ± 0,2468      | DZ-HW             |                   |
| 522,5        | 10,98±1,4996                      | 4,47 ± 0,2638      | HR-IHW            | 1527              | 14,934 ± 0,8428                   | 5,85± 0,0811       | DZ-IHW            | 1478,5            | 12,561±1,4707                     | 5,15 ± 0,1860      | DZ-HW             |                   |
| 572,5        | 11,42±1,0076                      | 4,78 ± 0,1205      | HR-HW             | 1543              | 13,296 ± 0,6412                   | 5,75± 0,0545       | FC                | 1478,5            | 12,848±1,9270                     | 5,25 ± 0,3366      | DZ-HW             |                   |
| 572,5        | 10,67±1,5229                      | 4,56 ± 0,1583      | IIR-IHW           | 1562              | 20,028 ± 0,8847                   | 8,39± 0,0875       | FC                | 1478,5            | 12,963±2,1296                     | 5,32 ± 0,4137      | DZ-HW             |                   |
| 572,5        | 10,43±1,0920                      | 4,50 ± 0,1416      | HR-HW             | 1573              | 19,009 ± 1,1406                   | 6,83 ± 0,1532      | I-C               | 1565,5            | 13,618 ± 1,6377                   | 5,81 ± 0,2395      | I-C               |                   |
| 622,5        | 11,30±0,9563                      | 4,44 ± 0,1088      | HR-HW             | 1591,5            | 21,725 ± 0,8327                   | 8,79± 0,0851       | FC                | 1565,5            | 13,366±1,5047                     | 5,62 ± 0,1977      | FC                |                   |
| 622,5        | 9,97±1,0987                       | 4,35 ± 0,1434      | IIR-IHW           | 1591,5            | 22,438 ± 1,0795                   | 8,99± 0,1439       | FC                | 1565,5            | 13,914±1,8361                     | 5,87 ± 0,3069      | FC                |                   |
| 622,5        | 10,74±1,3734                      | 4,64 ± 0,2238      | HR-HW             | 1632,5            | 22,933 ± 1,0304                   | 7,70± 0,1320       | FC                | 1630              | 17,816±1,4936                     | 7,34 ± 0,2005      | FC                |                   |
| 672,5        | 11,21±1,2707                      | 4,52 ± 0,1928      | HR-IHW            | 1632,5            | 20,164 ± 0,8089                   | 7,64± 0,0821       | FC                | 1630              | 19,158±1,7980                     | 8,21 ± 0,3034      | FC                |                   |
| 672,5        | 11,24±1,0836                      | 4,51 ± 0,1398      | HR-IHW            | 1657,5            | 19,525 ± 0,7727                   | 6,96± 0,0788       | FC                | 1630              | 20,207±1,4574                     | 8,37 ± 0,1929      | FC                |                   |
| 672,5        | 10,28±1,0867                      | 4,50 ± 0,1406      | HR-HW             | 1657,5            | 20,820 ± 0,7434                   | 8,16± 0,0739       | FC                | 1730              | 19,670±1,2924                     | 8,37 ± 0,1458      | FC                |                   |
| 692,5        | 11,41±1,6491                      | 4,42 ± 0,3138      | IIR-IHW           | 1657,5            | 23,268 ± 0,7728                   | 9,06± 0,0801       | FC                | 1730              | 20,169±1,7541                     | 8,32 ± 0,2883      | FC                |                   |
| 692,5        | 11,21±1,2139                      | 4,57 ± 0,1761      | HR-HW             | 1702              | 16,522 ± 0,7515                   | 6,41 ± 0,0735      | FC                | 1730              | 19,791 ± 1,5829                   | 8,35 ± 0,2311      | DZ-FW             |                   |
| 692,5        | 10,80±1,0056                      | 13,2 ± 0,1261      | HR-HW             | 1702              | 16,959 ± 0,8592                   | 6,63 ± 0,0952      | FC                | 1877,5            | 12,750 ± 1,4260                   | 3,06 ± 0,1682      | DZ-FW             |                   |
| 742,5        | 10,91±0,9711                      | 4,50 ± 0,1115      | IIR-IHW           | 1702              | 16,334 ± 0,7078                   | 6,39± 0,0654       | FC                | 1877,5            | 12,953 ± 1,6421                   | 5,18 ± 0,2388      | DZ-FW             |                   |
| 742,5        | 10,79±1,1092                      | 4,32 ± 0,1461      | HR-HW             | 1742,5            | 17,582 ± 0,9810                   | 6,32 ± 0,1219      | FC                | 1877,5            | 12,943 ± 2,0805                   | 5,16 ± 0,3939      | DZ-I-W            |                   |
| 742,5        | 10,88±1,2190                      | 4,29 ± 0,1769      | IIR-IHW           | 1742,5            | 15,652 ± 1,0881                   | 5,08 ± 0,1462      | FC                | 1978              | 11,198 ± 1,5966                   | 4,50 ± 0,2215      | DZ-FW             |                   |
| 822,5        | 11,02±1,7736                      | 4,42 ± 0,3585      | HR-HW             | 1742,5            | 14,970 ± 0,9844                   | 5,17± 0,1217       | FC                | 1978              | 11,148 ± 1,5650                   | 4,43 ± 0,2116      | DZ-FW             |                   |
| 822,5        | 25,59±1,5293                      | 4,79 ± 0,2636      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   | 1978              | 11,146 ± 1,4414                   | 4,36 ± 0,1751      | DZ-I-W            |                   |
| 822,5        | 12,06±1,7469                      | 4,48 ± 0,3531      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   | 2027,5            | 10,353 ± 1,3167                   | 4,07 ± 0,1400      | DZ-FW             |                   |
| 872,5        | 11,63±1,7635                      | 4,69 ± 0,3563      | HR-HW             | 175,5             | 11,485 ± 1,7630                   | 4,41 ± 0,2752      | IIR-IHW           | 2027,5            | 10,429 ± 1,4030                   | 4,15 ± 0,1635      | DZ-I-W            |                   |
| 872,5        | 10,03±1,5757                      | 4,94 ± 0,2907      | IIR-IHW           | 175,5             | 11,767 ± 0,20737                  | 4,50± 0,3875       | HR-HW             | 2027,5            | 10,368 ± 1,6925                   | 4,01 ± 0,2501      | DZ-FW             |                   |
| 872,5        | 10,43±1,3571                      | 4,80 ± 0,2176      | HR-IHW            | 225,5             | 10,725 ± 2,2814                   | 4,38± 0,4676       | HR-HW             | 2077,5            | 10,024 ± 1,4228                   | 3,80 ± 0,1680      | DZ-FW             |                   |
| 922,5        | 12,45 ± 1,3100                    | 4,91 ± 0,2053      | HR-HW             | 225,5             | 11,107 ± 2,1834                   | 4,25 ± 0,4286      | IIR-IHW           | 2077,5            | 9,983 ± 1,3811                    | 3,84 ± 0,1565      | DZ-I-W            |                   |
| 922,5        | 11,21±1,2467                      | 4,87 ± 0,1854      | IIR-IHW           | 225,5             | 13,264 ± 1,9954                   | 4,61 ± 0,3587      | HR-HW             | 2077,5            | 9,783 ± 1,6749                    | 3,67 ± 0,2431      | DZ-FW             |                   |
| 922,5        | 9,20±1,6448                       | 4,56 ± 0,3091      | HR-HW             | 225,5             | 11,631 ± 1,9973                   | 4,47 ± 0,3586      | HR-HW             | 2127,5            | 10,252 ± 1,4846                   | 4,00 ± 0,1861      | DZ-FW             |                   |
| 972,5        | 10,08±1,1082                      | 4,20 ± 0,1455      | HR-HW             | 275,5             | 15,047 ± 2,4113                   | 8,40± 0,5528       | HR-IHW            | 2127,5            | 10,269 ± 1,4357                   | 3,97 ± 0,1721      | DZ-I-W            |                   |
| 972,5        | 10,78±1,0549                      | 4,20 ± 0,1322      | IIR-IHW           | 275,5             | 11,613 ± 1,9236                   | 4,43 ± 0,3316      | HR-HW             | 2127,5            | 10,074 ± 1,5670                   | 3,92 ± 0,2103      | DZ-FW             |                   |
| 972,5        | 10,36±1,3629                      | 4,27 ± 0,2186      | HR-HW             | 275,5             | 11,258 ± 1,4499                   | 4,36± 0,1775       | IIR-IHW           | 2175,5            | 10,852 ± 1,5974                   | 4,07 ± 0,2205      | DZ-I-W            |                   |
| 1027,5       | 11,15 ± 1,0886                    | 4,85 ± 0,1417      | DZ-HW             | 325,5             | 10,837 ± 1,7455                   | 4,48± 0,2692       | HR-HW             | 2175,5            | 11,425 ± 1,7074                   | 3,70 ± 0,2551      | DZ-FW             |                   |
| 1027,5       | 7,90±1,1228                       | 4,67 ± 0,1507      | DZ-HW             | 325,5             | 7,196 ± 1,4811                    | 0,18± 0,1735       | HR-HW             | 2175,5            | 10,575 ± 2,0791                   | 4,09 ± 0,3871      | DZ-FW             |                   |
| 1027,5       | 11,62 ± 1,3706                    | 4,90 ± 0,2231      | DZ-HW             | 325,5             | 11,020 ± 1,5869                   | 4,37 ± 0,2182      | IIR-IHW           | 2227,5            | 10,263 ± 1,5666                   | 4,04 ± 0,2106      | DZ-I-W            |                   |
| 1077,5       | 12,38 ± 1,0640                    | 5,17 ± 0,1353      | DZ-IHW            | 375,5             | 10,665 ± 1,8849                   | 4,26± 0,3164       | HR-HW             | 2227,5            | 10,466 ± 1,8700                   | 3,99 ± 0,3102      | DZ-FW             |                   |
| 1077,5       | 12,38 ± 1,2943                    | 6,56 ± 0,2013      | DZ-HW             | 375,5             | 11,053 ± 1,5874                   | 4,44 ± 0,2185      | HR-HW             | 2227,5            | 10,502 ± 1,8448                   | 4,05 ± 0,3015      | DZ-FW             |                   |
| 1077,5       | 12,82 ± 1,0915                    | 4,89 ± 0,1427      | DZ-HW             | 375,5             | 10,734 ± 1,6082                   | 4,20 ± 0,2242      | HR-IHW            | 2279,5            | 10,425 ± 1,3431                   | 4,16 ± 0,1471      | DZ-FW             |                   |
| 1177,5       | 10,47 ± 1,1225                    | 4,95 ± 0,1501      | DZ-IHW            | 425,5             | 10,718 ± 1,3594                   | 4,28 ± 0,1519      | HR-HW             | 2279,5            | 38,728 ± 1,5017                   | 4,18 ± 0,2116      | DZ-FW             |                   |
| 1177,5       | 12,38 ± 1,0910                    | 5,21 ± 0,1425      | DZ-HW             | 425,5             | 10,696 ± 1,6917                   | 4,16 ± 0,2505      | IIR-IHW           | 2279,5            | 10,670 ± 1,3850                   | 4,18 ± 0,1586      | DZ-I-W            |                   |
| 1177,5       | 11,44 ± 1,0168                    | 5,10 ± 0,1233      | DZ-IHW            | 425,5             | 10,320 ± 1,8506                   | 4,10 ± 0,3034      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1277,5       | 12,75 ± 2,0663                    | 5,10 ± 0,4733      | DZ-IHW            | 476               | 10,764 ± 2,0883                   | 4,17 ± 0,3911      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1277,5       | 12,43 ± 1,2401                    | 5,14 ± 0,1841      | DZ-HW             | 476               | 10,947 ± 1,3842                   | 4,35 ± 0,1590      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1277,5       | 12,35 ± 1,3271                    | 5,31 ± 0,2101      | DZ-IHW            | 476               | 11,111 ± 2,6168                   | 4,37 ± 0,6131      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1377,5       | 11,46 ± 1,1856                    | 4,94 ± 0,1680      | DZ-HW             | 525,5             | 11,609 ± 1,2914                   | 4,49 ± 0,1348      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1377,5       | 11,98 ± 1,3103                    | 5,85 ± 0,2033      | DZ-HW             | 525,5             | 11,559 ± 1,3497                   | 4,50 ± 0,1502      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1377,5       | 11,67 ± 1,5900                    | 4,96 ± 0,2956      | DZ-IHW            | 525,5             | 11,363 ± 1,4420                   | 4,42 ± 0,1754      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1462,5       | 13,32 ± 1,5382                    | 5,86 ± 0,2803      | DZ-HW             | 577,5             | 11,685 ± 1,5077                   | 4,42 ± 0,1946      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1462,5       | 14,41 ± 1,4566                    | 5,93 ± 0,2540      | DZ-IHW            | 577,5             | 12,114 ± 1,8799                   | 4,57 ± 0,3165      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1462,5       | 13,66 ± 0,9828                    | 5,86 ± 0,1158      | DZ-HW             | 577,5             | 11,986 ± 1,4343                   | 4,52 ± 0,1739      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1581         | 12,12 ± 1,1320                    | 7,37 ± 0,1514      | FC                | 625,5             | 11,957 ± 1,5338                   | 4,67 ± 0,2032      | HR-IHW            |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1581         | 14,36 ± 1,3283                    | 6,64 ± 0,2128      | FC                | 625,5             | 11,632 ± 1,4923                   | 4,50 ± 0,1903      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1581         | 14,21 ± 1,3570                    | 6,71 ± 0,2222      | FC                | 625,5             | 11,284 ± 2,0434                   | 4,32 ± 0,3749      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1677,5       | 14,73 ± 1,2974                    | 6,89 ± 0,2043      | FC                | 678,5             | 11,070 ± 1,3995                   | 4,29 ± 0,1631      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1677,5       | 3,42 ± 1,2823                     | 6,66 ± 0,1866      | FC                | 678,5             | 11,149 ± 1,3579                   | 4,38 ± 0,1519      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1677,5       | 48,22 ± 1,9311                    | 7,71 ± 0,2082      | FC                | 678,5             | 11,023 ± 1,3918                   | 4,26 ± 0,1608      | IIR-IHW           |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1777,5       | 12,45 ± 1,2048                    | 5,99 ± 0,1747      | DZ-I-W            | 725,5             | 11,454 ± 2,0636                   | 4,29 ± 0,3824      | HR-HW             |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1777,5       | 15,19 ± 1,2738                    | 5,80 ± 0,1428      | DZ-I-W            | 725,5             | 11,786 ± 1,6138                   | 4,37 ± 0,2267      | HR-IHW            |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 1            |                                   |                    |                   |                   |                                   |                    |                   |                   |                                   |                    |                   |                   |

| Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%)     | Water content (%)    | Compartment of FZ | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%)     | Water content (%)    | Compartment of FZ | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%)     | Water content (%)    | Compartment of FZ |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| 572,5                             | 11,129 ± 0,9531        | 4,48 ± 0,1088        | HR-HW             | 2396,5                            | 10,320 ± 0,8320        | 3,80 ± 0,0784        | IIR-FW            | 1672,5                            | 12,856 ± 1,2849        | 4,54 ± 0,1978        | DZ-IHW            |
| 621,5                             | 11,052 ± 0,7688        | 4,36 ± 0,0679        | HR-HW             | 2446,5                            | 10,219 ± 0,6792        | 3,87 ± 0,0494        | HR-FW             | 1742,5                            | 15,002 ± 0,9776        | 4,56 ± 0,1151        | DZ-HW             |
| 621,5                             | 10,697 ± 0,7624        | 4,33 ± 0,0665        | IIR-IHW           | 2446,5                            | 10,132 ± 0,9197        | 3,87 ± 0,0971        | HR-FW             | 1742,5                            | 13,226 ± 1,0520        | 4,56 ± 0,1331        | DZ-HW             |
| 621,5                             | 10,995 ± 0,7349        | 4,45 ± 0,0612        | HR-HW             | 2446,5                            | 10,197 ± 1,0151        | 3,95 ± 0,1190        | HR-FW             | 1742,5                            | 13,452 ± 0,9939        | 4,56 ± 0,1185        | DZ-HW             |
| 672                               | 11,597 ± 0,7794        | 4,14 ± 0,0698        | IIR-IHW           | <b>S2 borehole</b>                |                        |                      |                   | 1852,5                            | 14,651 ± 0,8931        | 4,75 ± 0,0951        | DZ-FW             |
| 672                               | 10,934 ± 1,0878        | 4,22 ± 0,1425        | HR-HW             | 177,5                             | 10,975 ± 0,8451        | 3,80 ± 0,0800        | HR-HW             | 1852,5                            | 13,956 ± 1,2161        | 5,86 ± 0,1791        | DZ-IHW            |
| 672                               | 11,103 ± 0,9158        | 4,36 ± 0,0998        | HR-HW             | 177,5                             | 10,664 ± 0,8770        | 3,90 ± 0,0866        | IIR-IHW           | 1852,5                            | 14,850 ± 1,4995        | 6,07 ± 0,2684        | DZ-FW             |
| 721,5                             | 10,148 ± 0,8313        | 4,01 ± 0,0804        | DZ-IHW            | 177,5                             | 11,134 ± 0,9901        | 4,02 ± 0,1114        | HR-HW             | 1917,5                            | 11,235 ± 0,8837        | 4,75 ± 0,0917        | DZ-FW             |
| 721,5                             | 10,562 ± 0,7329        | 4,36 ± 0,0607        | DZ-HW             | 227,5                             | 12,245 ± 1,2260        | 4,92 ± 0,1717        | IIR-IHW           | 1917,5                            | 13,636 ± 0,8745        | 4,75 ± 0,0907        | DZ-FW             |
| 721,5                             | 10,488 ± 0,6759        | 4,19 ± 0,0488        | DZ-IHW            | 227,5                             | 12,370 ± 1,2422        | 4,73 ± 0,1755        | HR-HW             | 1917,5                            | 11,775 ± 0,9472        | 4,75 ± 0,1062        | DZ-FW             |
| 772                               | 10,582 ± 0,7856        | 4,44 ± 0,0692        | DZ-HW             | 227,5                             | 11,095 ± 1,1283        | 3,86 ± 0,1441        | HR-HW             | 1967,5                            | 11,489 ± 0,9459        | 4,73 ± 0,1060        | DZ-IHW            |
| 772                               | 10,347 ± 0,6732        | 4,31 ± 0,0484        | DZ-IHW            | 227,5                             | 11,766 ± 1,2110        | 4,12 ± 0,1659        | HR-HW             | 1967,5                            | 13,785 ± 0,8793        | 4,73 ± 0,0921        | DZ-FW             |
| 772                               | 10,663 ± 0,6427        | <b>5,73 ± 0,0437</b> | DZ-HW             | 277,5                             | 11,968 ± 1,0556        | 4,00 ± 0,1283        | HR-HW             | 1967,5                            | 11,659 ± 1,0777        | 4,73 ± 0,1390        | DZ-IHW            |
| 821,5                             | 11,035 ± 0,7408        | 4,55 ± 0,0608        | DZ-HW             | 277,5                             | 12,522 ± 1,0578        | 4,57 ± 0,1302        | IIR-IHW           | 2017,5                            | 11,571 ± 1,0099        | 4,73 ± 0,1216        | DZ-FW             |
| 821,5                             | 10,867 ± 0,6950        | 4,49 ± 0,0528        | DZ-IHW            | 327,5                             | 12,717 ± 1,0578        | 4,65 ± 0,1304        | HR-HW             | 2017,5                            | 12,640 ± 0,9111        | 4,73 ± 0,0988        | DZ-FW             |
| 821,5                             | 11,270 ± 0,9099        | 4,37 ± 0,0958        | DZ-HW             | 327,5                             | <b>22,109 ± 1,1717</b> | 4,06 ± 0,1584        | IIR-IHW           | 2017,5                            | 11,044 ± 0,9583        | 4,73 ± 0,1087        | DZ-FW             |
| 871,5                             | 11,558 ± 0,7402        | 4,76 ± 0,0613        | DZ-IHW            | 327,5                             | 11,614 ± 0,9318        | 3,71 ± 0,0985        | HR-HW             | 2067,5                            | 12,542 ± 0,8763        | 4,53 ± 0,0907        | HR-FW             |
| 871,5                             | 11,576 ± 0,6649        | 4,76 ± 0,0478        | DZ-HW             | 370                               | 12,003 ± 1,0322        | 4,16 ± 0,1219        | HR-HW             | 2067,5                            | 11,574 ± 1,0091        | 4,53 ± 0,1214        | HR-IHW            |
| 871,5                             | 11,817 ± 0,8379        | 4,20 ± 0,0806        | DZ-IHW            | 370                               | 11,183 ± 1,0198        | 3,90 ± 0,1181        | HR-HW             | 2067,5                            | 12,355 ± 0,9637        | 4,53 ± 0,1103        | HR-FW             |
| 921,5                             | 11,874 ± 0,6941        | 4,77 ± 0,0530        | DZ-IHW            | 370                               | 11,586 ± 1,0392        | 4,05 ± 0,1232        | HR-HW             | 2127,5                            | 11,724 ± 0,8947        | 4,50 ± 0,0940        | IIR-FW            |
| 921,5                             | 11,915 ± 1,1144        | 4,82 ± 0,1449        | DZ-HW             | 427,5                             | 11,626 ± 1,0703        | 4,28 ± 0,1308        | IIR-IHW           | 2127,5                            | 12,935 ± 0,8102        | 4,50 ± 0,0765        | HR-FW             |
| 971,5                             | 10,992 ± 0,6963        | 4,42 ± 0,0530        | DZ-IHW            | 427,5                             | 11,004 ± 1,2224        | 4,02 ± 0,1683        | HR-HW             | 2127,5                            | 11,910 ± 0,8614        | 4,50 ± 0,0867        | IIR-FW            |
| 971,5                             | 11,604 ± 0,8029        | 4,70 ± 0,0735        | DZ-HW             | 427,5                             | 10,840 ± 0,8405        | 3,76 ± 0,0792        | IIR-IHW           | 2177,5                            | 11,801 ± 0,9478        | 4,48 ± 0,1064        | HR-FW             |
| 971,5                             | 11,497 ± 0,8323        | 4,64 ± 0,0795        | DZ-IHW            | 477,5                             | <b>32,112 ± 1,0338</b> | 4,41 ± 0,1262        | HR-HW             | 2177,5                            | 13,915 ± 0,8228        | 4,48 ± 0,0794        | HR-FW             |
| 1021,5                            | 12,204 ± 1,0743        | 4,65 ± 0,1348        | DZ-HW             | 477,5                             | 12,270 ± 1,0905        | 4,37 ± 0,1362        | HR-HW             | 2177,5                            | 11,752 ± 0,8582        | 4,48 ± 0,0862        | HR-FW             |
| 1021,5                            | 11,437 ± 0,6846        | 4,64 ± 0,0511        | DZ-IHW            | 477,5                             | 11,792 ± 0,9413        | 4,08 ± 0,1009        | HR-IHW            | 1344,5                            | 13,258 ± 0,7369        | 4,76 ± 0,0684        | DZ-HW             |
| 1071,5                            | 11,617 ± 0,7426        | 4,75 ± 0,0618        | DZ-HW             | 527,5                             | 11,537 ± 1,0059        | 4,48 ± 0,1159        | HR-HW             | 1344,5                            | 13,477 ± 0,8919        | 4,74 ± 0,0978        | DZ-IHW            |
| 1078,5                            | 11,920 ± 1,1417        | 4,80 ± 0,1519        | DZ-HW             | 527,5                             | 11,696 ± 0,8609        | 4,11 ± 0,0838        | IIR-IHW           | 1344,5                            | 13,434 ± 0,8508        | 4,86 ± 0,0924        | DZ-HW             |
| 1078,5                            | 12,206 ± 0,7216        | 5,07 ± 0,0582        | DZ-IHW            | 527,5                             | <b>47,308 ± 1,0914</b> | 4,13 ± 0,1409        | HR-HW             | 1403,5                            | 13,161 ± 0,6865        | 4,50 ± 0,0606        | DZ-IHW            |
| 1078,5                            | 12,444 ± 0,9966        | 5,13 ± 0,1166        | DZ-HW             | 577,5                             | 12,025 ± 1,0729        | 4,36 ± 0,1333        | IIR-IHW           | 1403,5                            | 13,618 ± 0,7669        | 4,55 ± 0,0772        | DZ-HW             |
| 1167,5                            | 11,971 ± 0,9470        | 4,70 ± 0,1044        | DZ-IHW            | 577,5                             | 12,126 ± 0,8771        | 4,41 ± 0,0884        | HR-HW             | 1403,5                            | 12,898 ± 1,1342        | 4,51 ± 0,1554        | DZ-HW             |
| 1167,5                            | 12,371 ± 0,7793        | 5,06 ± 0,0692        | DZ-HW             | 577,5                             | 13,838 ± 0,8645        | <b>18,6 ± 0,0934</b> | HR-HW             | 1516,5                            | 13,325 ± 0,8080        | 4,82 ± 0,0759        | DZ-IHW            |
| 1167,5                            | 12,246 ± 0,7888        | 4,90 ± 0,0710        | DZ-IHW            | 627,5                             | 11,325 ± 0,8091        | 4,16 ± 0,0739        | HR-IHW            | 1516,5                            | 13,193 ± 0,7439        | 4,70 ± 0,0628        | DZ-HW             |
| 1310,5                            | 11,498 ± 0,7632        | 4,56 ± 0,0656        | DZ-HW             | 627,5                             | 11,772 ± 1,0407        | 4,43 ± 0,1240        | HR-HW             | 1516,5                            | 12,050 ± 0,9960        | 4,07 ± 0,1142        | DZ-IHW            |
| 1310,5                            | 11,208 ± 0,6559        | 4,55 ± 0,0460        | DZ-HW             | 627,5                             | 11,764 ± 1,3606        | 4,26 ± 0,2070        | IIR-IHW           | 1599,5                            | 13,446 ± 1,0077        | 4,95 ± 0,1153        | DZ-HW             |
| 1310,5                            | 12,736 ± 0,7420        | 4,51 ± 0,0615        | DZ-IHW            | 677,5                             | 12,425 ± 1,1186        | 4,33 ± 0,1445        | HR-HW             | 1599,5                            | 13,059 ± 0,9113        | 4,68 ± 0,0906        | DZ-IHW            |
| 1380,5                            | 11,871 ± 0,8964        | 4,79 ± 0,0932        | DZ-HW             | 677,5                             | 11,765 ± 0,8416        | 4,03 ± 0,0797        | IIR-IHW           | 1599,5                            | 13,541 ± 0,7682        | 4,98 ± 0,0626        | DZ-HW             |
| 1380,5                            | 11,672 ± 0,7276        | 4,71 ± 0,0590        | DZ-IHW            | 677,5                             | 13,825 ± 1,1158        | 4,36 ± 0,1420        | HR-HW             | 1697                              | 12,480 ± 0,8887        | 2,99 ± 0,0896        | DZ-HW             |
| 1380,5                            | 11,903 ± 0,8632        | 4,80 ± 0,0852        | DZ-HW             | 727,5                             | 12,051 ± 0,7831        | 4,19 ± 0,0690        | HR-HW             | 1697                              | 12,501 ± 0,8037        | 3,25 ± 0,0750        | DZ-IHW            |
| 1431,5                            | 10,955 ± 0,8367        | 4,45 ± 0,0793        | DZ-IHW            | 727,5                             | 12,435 ± 0,8671        | 4,55 ± 0,0856        | IIR-IHW           | 1697                              | <b>12,366 ± 0,7079</b> | <b>3,39 ± 0,0569</b> | DZ-HW             |
| 1431,5                            | 11,156 ± 1,1998        | 4,35 ± 0,1637        | DZ-HW             | 727,5                             | 12,037 ± 0,8468        | 4,24 ± 0,0811        | HR-HW             | <b>S4 borehole</b>                |                        |                      |                   |
| 1431,5                            | 11,508 ± 1,6014        | 4,31 ± 0,2840        | DZ-HW             | 772,5                             | 12,831 ± 1,0277        | 4,65 ± 0,1215        | IIR-IHW           | 177,5                             | 10,370 ± 0,9242        | 4,03 ± 0,0996        | HR-HW             |
| 1487                              | 9,788 ± 0,8252         | 3,86 ± 0,0763        | DZ-IHW            | 772,5                             | 12,664 ± 0,9779        | 4,20 ± 0,1093        | HR-HW             | 177,5                             | 9,712 ± 0,9282         | 4,14 ± 0,1003        | IIR-IHW           |
| 1487                              | 10,001 ± 0,7972        | 3,95 ± 0,0708        | DZ-HW             | 772,5                             | <b>24,734 ± 1,2376</b> | <b>20,4 ± 0,2162</b> | HR-HW             | 177,5                             | 10,161 ± 1,1317        | 4,16 ± 0,1514        | HR-HW             |
| 1487                              | 8,721 ± 0,9355         | 3,34 ± 0,0985        | DZ-IHW            | 827,5                             | 13,075 ± 1,1446        | 4,56 ± 0,1517        | HR-HW             | 262,5                             | 10,288 ± 1,1114        | 4,32 ± 0,1459        | HR-IHW            |
| 1541,5                            | 11,689 ± 0,8289        | 4,46 ± 0,0779        | DZ-HW             | 827,5                             | 13,346 ± 1,1631        | 4,46 ± 0,1542        | HR-HW             | 262,5                             | 9,922 ± 0,8976         | 4,30 ± 0,0935        | HR-HW             |
| 1541,5                            | 11,517 ± 0,7350        | 4,46 ± 0,0597        | DZ-HW             | 827,5                             | 13,317 ± 0,9883        | 4,39 ± 0,1121        | HR-IHW            | 262,5                             | 10,969 ± 1,2000        | 4,19 ± 0,1708        | HR-HW             |
| 1541,5                            | 11,856 ± 0,7592        | 4,50 ± 0,0643        | DZ-IHW            | 862,5                             | 14,083 ± 1,2835        | 4,62 ± 0,1892        | HR-HW             | 312,5                             | 10,465 ± 0,8987        | 4,59 ± 0,0941        | HR-HW             |
| 1581                              | 12,979 ± 1,0636        | 4,97 ± 0,1306        | DZ-HW             | 862,5                             | <b>16,221 ± 1,4212</b> | 4,86 ± 0,2306        | IIR-IHW           | 312,5                             | 10,093 ± 0,8729        | 4,74 ± 0,0882        | HR-HW             |
| 1581                              | 13,565 ± 0,8672        | 5,01 ± 0,0865        | DZ-IHW            | 862,5                             | 13,070 ± 0,9470        | 4,15 ± 0,1034        | HR-HW             | 312,5                             | 10,528 ± 1,0244        | 4,70 ± 0,1241        | IIR-IHW           |
| 1581                              | 13,082 ± 0,9253        | 4,84 ± 0,0988        | DZ-HW             | 927,5                             | 12,119 ± 0,9245        | 4,03 ± 0,0982        | IIR-IHW           | 362,5                             | 10,184 ± 1,1491        | 4,25 ± 0,1563        | HR-HW             |
| 1841,5                            | 13,954 ± 1,0962        | 5,37 ± 0,1396        | DZ-FW             | 927,5                             | 14,242 ± 1,0349        | 4,37 ± 0,1246        | HR-HW             | 362,5                             | 10,089 ± 0,9518        | 4,33 ± 0,1060        | HR-IHW            |
| 1841,5                            | 13,427 ± 1,0174        | 5,14 ± 0,1205        | DZ-FW             | 927,5                             | 12,301 ± 1,0169        | 4,18 ± 0,1196        | HR-HW             | 362,5                             | <b>14,368 ± 1,1493</b> | 4,29 ± 0,1569        | HR-HW             |
| 1841,5                            | 13,562 ± 1,2466        | 5,44 ± 0,1786        | DZ-FW             | 972,5                             | 13,031 ± 1,2485        | 4,22 ± 0,1758        | HR-IHW            | 412,5                             | 10,198 ± 1,2858        | 4,20 ± 0,1948        | HR-HW             |
| 1873,5                            | 14,984 ± 0,7696        | 5,14 ± 0,0671        | DZ-IHW            | 972,5                             | 13,504 ± 1,0034        | 4,33 ± 0,1154        | HR-HW             | 412,5                             | 9,678 ± 0,8787         | 4,43 ± 0,0893        | HR-IHW            |
| 1873,5                            | 12,823 ± 1,0525        | 4,91 ± 0,1280        | DZ-FW             | 972,5                             | 13,373 ± 0,9621        | 4,06 ± 0,1056        | IIR-IHW           | 412,5                             | 10,990 ± 1,2797        | 4,11 ± 0,1944        | HR-HW             |
| 1873,5                            | 13,781 ± 0,9614        | 4,90 ± 0,1081        | DZ-FW             | 1027,5                            | 13,496 ± 1,0560        | 4,28 ± 0,1277        | IIR-IHW           | 462,5                             | 9,534 ± 1,0009         | 4,42 ± 0,1179        | IIR-IHW           |
| 1946,5                            | 12,130 ± 0,9400        | 4,49 ± 0,1027        | DZ-FW             | 1027,5                            | 14,506 ± 1,0517        | 4,04 ± 0,1259        | IIR-IHW           | 462,5                             | 10,646 ± 1,1455        | 4,32 ± 0,1556        | HR-HW             |
| 1946,5                            | 11,800 ± 0,7513        | 4,48 ± 0,0633        | DZ-FW             | 1027,5                            | 13,619 ± 1,2413        | 4,70 ± 0,1752        | HR-HW             | 462,5                             | 10,111 ± 1,3594        | 4,27 ± 0,2177        | IIR-IHW           |
| 1946,5                            | 11,802 ± 0,9046        | 4,47 ± 0,0946        | DZ-FW             | 1067,5                            | 12,662 ± 1,1464        | 4,36 ± 0,1497        | HR-HW             | 512,5                             | 9,897 ± 1,0269         | 4,26 ± 0,1241        | HR-IHW            |
| 1996,5                            | 11,348 ± 0,7450        | 4,34 ± 0,0619        | DZ-FW             | 1067,5                            | 14,467 ± 1,2254        | 4,46 ± 0,1707        | IIR-IHW           | 512,5                             | 9,794 ± 0,9994         | 4,10 ± 0,1174        | HR-HW             |
| 1996,5                            | 11,790 ± 0,6614        | 4,28 ± 0,0469        | DZ-FW             | 1067,5                            | 13,591 ± 0,9247        | 4,00 ± 0,0975        | HR-HW             | 512,5                             | 9,794 ± 1,1599         | 4,19 ± 0,1592        | HR-IHW            |
| 1996,5                            | 11,593 ± 1,1874        | 4,28 ± 0,1628        | DZ-FW             | 1112,5                            | 13,524 ± 1,0181        | 4,44 ± 0,1187        | IIR-IHW           | 562,5                             | 10,417 ± 1,5203        | <b>19,1 ± 0,2906</b> | HR-HW             |
| 2046,5                            | <b>33,328 ± 0,7700</b> | 4,34 ± 0,0710        | IIR-FW            | 1112,5                            | 14,320 ± 1,0064        | 4,76 ± 0,1222        | HR-HW             | 562,5                             | 10,729 ± 1,0918        | 4,63 ± 0,1414        | IIR-IHW           |
| 2046,5                            | 11,432 ± 0,9720        | 4,35 ± 0,1094        | HR-FW             | 1112,5                            | 13,471 ± 0,9429        | 4,15 ± 0,1057        | HR-HW             | 562,5                             | 10,525 ± 1,0440        | 4,28 ± 0,1284        | HR-HW             |
| 2046,5                            | 12,470 ± 0,8832        | 4,44 ± 0,0898        | IIR-FW            | 1162,5                            | <b>9,075 ± 0,9076</b>  | 3,94 ± 0,0971        | DZ-IHW            | 612,5                             | 10,086 ± 0,9588        | 4,14 ± 0,1077        | HR-IHW            |
| 2096,5                            | 11,135 ± 1,0728        | 4,25 ± 0,1334        | HR-FW             | 1162,5                            | 12,916 ± 0,9717        | 4,03 ± 0,1126        | DZ-HW             | 612,5                             | 10,104 ± 1,2074        | 4,27 ± 0,1729        | HR-HW             |
| 2096,5                            | 10,795 ± 0,7496        | 4,52 ± 0,0628        | IIR-FW            | 1162,5                            | 11,472 ± 1,1039        | 4,08 ± 0,1462        | DZ-IHW            | 612,5                             | 10,097 ± 0,9410        | 4,36 ± 0,1036        | HR-HW             |
| 2096,5                            | 11,082 ± 1,1848        | 4,25 ± 0,1619        | HR-FW             | 1212,5                            | 13,235 ± 1,0443        | 4,12 ± 0,1307        | DZ-HW             | 662,5                             | 10,279 ± 1,2853        | 4,06 ± 0,1951        | HR-IHW            |
| 2146,5                            | 11,577 ± 0,6827        | 4,38 ± 0,0506        | HR-FW             | 1212,5                            | 13,191 ± 0,9521        | 4,05 ± 0,1077        | DZ-IHW            | 662,5                             | <b>54,758 ± 1,2391</b> | 3,67 ± 0,2798        | HR-HW             |
| 2146,5                            | 11,524 ± 1,1225        | 4,29 ± 0,1438        | IIR-FW            | 1212,5                            | 14,818 ± 0,9897        | 4,29 ± 0,1175        | DZ-HW             | 662,5                             | <b>3,157 ± 1,5557</b>  | 5,18 ± 0,2650        | IIR-IHW           |
| 2146,5                            | 11,569 ± 0,8566        | 4,38 ± 0,0842        | HR-FW             | 1257,5                            | 13,929 ± 1,2298        | 4,71 ± 0,1821        | DZ-IHW            | 712,5                             | 10,666 ± 0,9018        | 4,63 ± 0,0948        | HR-HW             |
| 2196,5                            | 10,586 ± 1,0105        | 4,10 ± 0,1167        | IIR-FW            | 1257,5                            | 13,949 ± 0,8473        | 4,35 ± 0             |                   |                                   |                        |                      |                   |

| Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%)     | Water content (%)    | Compartment of FZ | Dist. from the borehole head (cm) | Total porosity (%) | Water content (%) | Compartment of FZ |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 962,5                             | 12,171±1,1975          | 5,16±0,1712          | DZ-IHW            | 414,5                             | 11,727±0,8318      | 4,44±0,0789       | HR-IHW            |
| 962,5                             | 13,027±1,1591          | 5,30±0,1611          | DZ-IHW            | 487,5                             | 10,366±0,8475      | 4,16±0,0818       | HR-IHW            |
| 1012,5                            | 12,620±1,0337          | 5,72±0,1281          | DZ-IHW            | 487,5                             | 9,194 ± 0,9770     | 4,15±0,1105       | HR-IHW            |
| 1012,5                            | 13,028±1,2273          | 5,64±0,1810          | DZ-IHW            | 487,5                             | 10,593±1,1991      | 4,16±0,1681       | HR-IHW            |
| 1012,5                            | 12,227±1,4320          | 5,63±0,2430          | DZ-IHW            | 513,5                             | 10,014±1,2572      | 4,17±0,1849       | HR-IHW            |
| 1057,5                            | 11,518±1,1446          | 5,77±0,1573          | DZ-IHW            | 513,5                             | 10,990±1,2153      | 4,27±0,1733       | HR-IHW            |
| 1057,5                            | 12,038±1,0515          | 5,64±0,1323          | DZ-IHW            | 513,5                             | 10,728±1,1800      | 4,13±0,1635       | HR-IHW            |
| 1167,5                            | 12,343±1,0996          | 5,79±0,1453          | DZ-IHW            | 590,5                             | 9,079 ± 1,1348     | 3,95±0,1509       | HR-IHW            |
| 1167,5                            | 12,782±1,1172          | 5,36±0,1494          | DZ-IHW            | 590,5                             | 9,482 ± 1,2613     | 4,05±0,1840       | HR-IHW            |
| 1277,5                            | <b>1,438 ± 1,1888</b>  | 5,27±0,1517          | DZ-IHW            | 590,5                             | 10,286±0,9653      | 3,92±0,1079       | HR-IHW            |
| 1277,5                            | 11,944±1,2950          | 5,19±0,1996          | DZ-IHW            | 637,5                             | 10,368±1,7596      | 4,34±0,3478       | HR-IHW            |
| 1277,5                            | 11,850±0,8473          | 5,40±0,0836          | DZ-IHW            | 637,5                             | 11,713±1,4867      | 4,68±0,2567       | HR-IHW            |
| 1377,5                            | 11,804±1,1725          | 5,25±0,1644          | DZ-IHW            | 637,5                             | 10,641±0,9659      | 4,44±0,1087       | HR-IHW            |
| 1377,5                            | 11,249±1,1234          | 4,86±0,1503          | DZ-IHW            | 687,5                             | 9,821 ± 1,1108     | 3,90±0,1440       | HR-IHW            |
| 1377,5                            | 11,629±1,1946          | 4,99±0,1704          | DZ-IHW            | 687,5                             | 10,650±0,9121      | 4,00±0,0959       | HR-IHW            |
| 1475,5                            | <b>3,807 ± 1,0496</b>  | 4,04±0,1296          | DZ-IHW            | 687,5                             | 10,860±1,5034      | 3,85±0,2591       | HR-IHW            |
| 1475,5                            | <b>20,541 ± 1,0938</b> | <b>6,33 ± 0,1440</b> | DZ-IHW            | 717,5                             | 11,081±1,1498      | 4,14±0,1548       | HR-IHW            |
| 1475,5                            | <b>18,730 ± 0,9128</b> | 5,84±0,0980          | DZ-IHW            | 717,5                             | 9,830 ± 1,3643     | 4,21±0,2168       | HR-IHW            |
| 1567,5                            | 13,202±0,8175          | 5,25±0,0801          | DZ-IHW            | 717,5                             | 9,892 ± 1,3540     | 4,14±0,2133       | HR-IHW            |
| 1567,5                            | 13,148±1,1622          | 5,37±0,1673          | DZ-IHW            | 802,5                             | 10,220±1,2216      | 4,31±0,1750       | HR-IHW            |
| 1567,5                            | 13,286±1,1616          | 5,46±0,1673          | DZ-IHW            | 802,5                             | 10,375±0,9949      | 4,27±0,1153       | HR-IHW            |
| 1622,5                            | 14,187±0,9095          | 5,74±0,1017          | DZ-IHW            | 802,5                             | 10,448±1,1854      | 4,37±0,1649       | HR-IHW            |
| 1622,5                            | 13,498±1,0565          | 5,60±0,1385          | DZ-IHW            | 852,5                             | 11,154±1,4366      | 4,72±0,2413       | HR-IHW            |
| 1622,5                            | <b>11,420 ± 1,1118</b> | 5,59±0,1528          | DZ-IHW            | 852,5                             | 10,339±1,2548      | 4,75±0,1852       | HR-IHW            |
| 1672,5                            | 13,716±0,8849          | 5,52±0,0955          | DZ-IHW            | 852,5                             | 10,849±1,1913      | 4,66±0,1669       | HR-IHW            |
| 1672,5                            | 13,323±1,1074          | 4,99±0,1515          | DZ-IHW            | 902,5                             | 11,201±1,2357      | 5,60±0,1815       | HR-IHW            |
| 1672,5                            | <b>17,305 ± 0,9171</b> | 5,10±0,1037          | DZ-IHW            | 902,5                             | 11,630±1,2430      | 5,28±0,1833       | HR-IHW            |
| 1712,5                            | 13,642±1,0673          | 5,78±0,1418          | DZ-IHW            | 902,5                             | 11,561±1,0960      | 5,24±0,1425       | HR-IHW            |
| 1712,5                            | 14,043±1,0654          | 5,63±0,1412          | DZ-IHW            | 1007,5                            | 13,176±1,3843      | 5,12±0,2266       | DZ-IHW            |
| 1712,5                            | 14,208±1,0199          | 5,73±0,1291          | DZ-IHW            | 1007,5                            | 11,565±1,2195      | 5,17±0,1767       | DZ-IHW            |
| 1770                              | 14,651±1,0249          | 5,93±0,1262          | DZ-IHW            | 1007,5                            | 11,378±1,5776      | 5,19±0,2882       | DZ-IHW            |
| 1770                              | 13,606±1,0362          | 5,82±0,1288          | DZ-IHW            | 1108                              | 9,730 ± 1,1943     | 5,15±0,1668       | DZ-IHW            |
| 1770                              | 15,227±1,0069          | 5,94±0,1216          | DZ-IHW            | 1108                              | 11,904±1,1825      | 4,87±0,1659       | DZ-IHW            |
| 1828                              | 16,722±0,9931          | 7,02±0,1200          | DZ-IHW            | 1108                              | 10,289±1,2741      | 4,82±0,1913       | DZ-IHW            |
| 1828                              | 18,237±1,0948          | 7,00±0,1459          | DZ-IHW            | 1212,5                            | 11,308±1,4792      | 4,69±0,2549       | DZ-IHW            |
| 1828                              | 16,424±1,1620          | 7,34±0,1618          | DZ-IHW            | 1212,5                            | 11,194±1,1089      | 4,82±0,1455       | DZ-IHW            |
| 1862,5                            | 20,944±0,9462          | 8,72±0,1100          | FC                | 1212,5                            | 11,055±1,7351      | 4,63±0,3414       | DZ-IHW            |
| 1862,5                            | 20,748±0,9845          | 8,91±0,1191          | FC                | 1308,5                            | 14,635±0,9927      | 5,94±0,1183       | DZ-FW             |
| 1862,5                            | 20,730±0,9156          | 8,76±0,1030          | FC                | 1308,5                            | 12,821±0,9356      | 5,54±0,1029       | DZ-FW             |
| 1957,5                            | 17,273±1,0470          | 6,50±0,1328          | FC                | 1308,5                            | 13,358±1,1037      | 5,71±0,1457       | DZ-FW             |
| 1957,5                            | 18,135±0,9476          | 6,69±0,1092          | FC                | 1400,5                            | 12,763±1,0878      | 5,63±0,1410       | DZ-FW             |
| 1957,5                            | 17,215±0,9037          | 6,47±0,0987          | FC                | 1400,5                            | 12,874±1,4616      | 5,68±0,2511       | DZ-FW             |
| 2057,5                            | 12,332±0,8679          | 4,02±0,0874          | FC                | 1400,5                            | 12,512±1,1915      | 5,47±0,1690       | DZ-FW             |
| 2057,5                            | 13,474±0,8593          | 4,29±0,0862          | FC                | 1502,5                            | 12,791±0,9868      | 5,86±0,1154       | DZ-FW             |
| 2057,5                            | 13,195±1,0342          | 4,07±0,1259          | FC                | 1502,5                            | 13,036±1,1540      | 5,87±0,1585       | DZ-FW             |
| 2083,5                            | <b>32,505 ± 1,5533</b> | <b>10,4 ± 0,2898</b> | FC                | 1502,5                            | 13,708±1,0693      | 5,69±0,1364       | DZ-FW             |
| 2083,5                            | <b>24,718 ± 1,1885</b> | <b>7,36 ± 0,1720</b> | FC                | 1602,5                            | 14,062±0,9988      | 5,94±0,1191       | DZ-FW             |
| 2083,5                            | <b>42,944 ± 1,5500</b> | <b>19,2 ± 0,2887</b> | FC                | 1602,5                            | 13,563±1,0648      | 5,93±0,1358       | DZ-FW             |
| 2147,5                            | 14,730±0,9862          | 5,45±0,1163          | DZ-FW             | 1602,5                            | 13,286±1,0080      | 5,98±0,1212       | DZ-FW             |
| 2147,5                            | 14,752±1,0953          | 5,51±0,1412          | DZ-FW             | 1708                              | 12,311±1,1088      | 5,77±0,1452       | DZ-FW             |
| 2147,5                            | 15,161±1,0060          | 5,42±0,1196          | DZ-FW             | 1708                              | 14,139±1,0623      | 5,76±0,1353       | DZ-FW             |
| 2197,5                            | 14,879±1,2628          | 5,29±0,1850          | DZ-FW             | 1708                              | 14,477±1,3178      | 5,75±0,2075       | DZ-FW             |
| 2197,5                            | 14,051±0,9137          | 5,32±0,0980          | DZ-FW             | 1807,5                            | 11,942±0,9687      | 5,14±0,1106       | DZ-FW             |
| 2197,5                            | 13,884±0,9743          | 5,30±0,1117          | DZ-FW             | 1807,5                            | 11,973±1,0544      | 5,29±0,1317       | DZ-FW             |
| 2244                              | 12,281±1,0367          | 4,86±0,1258          | DZ-FW             | 1807,5                            | 12,220±1,3777      | 5,58±0,2242       | DZ-FW             |
| 2244                              | 12,551±1,0951          | 4,78±0,1399          | DZ-FW             | 1857,5                            | 10,864±1,0826      | 4,49±0,1381       | DZ-FW             |
| 2244                              | 12,500±1,0809          | 4,79±0,1363          | DZ-FW             | 1857,5                            | 10,088±1,2139      | 4,71±0,1724       | DZ-FW             |
| 2297,5                            | 13,992±1,0903          | <b>6,73 ± 0,1369</b> | DZ-FW             | 1857,5                            | 11,049±1,1923      | 4,65±0,1672       | DZ-FW             |
| 2297,5                            | 13,572±0,8254          | 4,76±0,0766          | DZ-FW             | 1902,5                            | 10,061±1,3263      | 4,39±0,2058       | DZ-FW             |
| 2347,5                            | 12,210±0,9525          | 4,60±0,1031          | HR-FW             | 1902,5                            | 10,102±1,0020      | 4,33±0,1173       | DZ-FW             |
| 2347,5                            | 14,151±1,1269          | 4,71±0,1444          | HR-FW             | 1902,5                            | 9,719 ± 1,0259     | 4,36±0,1232       | DZ-FW             |
| 2347,5                            | <b>-2,246 ± 1,0787</b> | 4,50±0,1268          | HR-FW             | 1957,5                            | 8,478 ± 0,9054     | 4,31±0,0942       | DZ-FW             |
| 2397,5                            | 13,576±0,9378          | 4,60±0,1011          | HR-FW             | 1957,5                            | 10,152±1,6416      | 4,31±0,3084       | DZ-FW             |
| 2397,5                            | 14,042±1,0069          | 4,73±0,1171          | HR-FW             | 1957,5                            | 9,110 ± 1,0037     | 3,79±0,1166       | DZ-FW             |
| 2397,5                            | 13,431±1,2050          | 4,42±0,1658          | HR-FW             | 2002,5                            | 7,668 ± 0,9399     | 4,03±0,1002       | DZ-FW             |
| 2452,5                            | 14,499±1,2147          | 4,80±0,1693          | HR-FW             | 2002,5                            | 9,683 ± 1,0117     | 3,96±0,1193       | DZ-FW             |
| 2452,5                            | 14,458±1,1642          | 4,85±0,1562          | HR-FW             | 2002,5                            | 10,423±1,1963      | 4,07±0,1677       | DZ-FW             |
| 2452,5                            | 14,544±1,1413          | 4,77±0,1504          | HR-FW             |                                   |                    |                   |                   |
| <b>S5 borehole</b>                |                        |                      |                   |                                   |                    |                   |                   |
| 113,5                             | <b>3,318 ± 0,8599</b>  | 4,61±0,0837          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 152,5                             | 11,067±0,8981          | 4,59±0,0934          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 152,5                             | 10,358±0,8438          | 4,63±0,0812          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 152,5                             | <b>5,552 ± 0,9392</b>  | 4,51±0,1019          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 212,5                             | 10,942±1,0250          | 4,38±0,1232          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 212,5                             | 11,200±0,8546          | 4,86±0,0843          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 212,5                             | 10,515±1,3031          | 4,19±0,1977          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 271,5                             | 9,854 ± 1,0149         | 4,05±0,1200          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 327,5                             | 11,186±1,0028          | 4,09±0,1177          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 327,5                             | 9,534 ± 0,7153         | 4,28±0,0552          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 327,5                             | 11,033±1,0438          | 4,30±0,1275          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 377,5                             | 12,463±1,0719          | 4,35±0,1349          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 377,5                             | 9,932 ± 0,9655         | 4,14±0,1081          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 377,5                             | 10,034±1,0238          | 4,23±0,1222          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 414,5                             | 10,793±0,8240          | 4,37±0,0774          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |
| 414,5                             | 10,275±1,1347          | 4,49±0,1512          | HR-IHW            |                                   |                    |                   |                   |

**Figure S1:** Table of petro-physical data with mean distance from the borehole head, cm (column 1), total porosity, % (column 2), water content, % (column 3) and sample location in the fault zone (column 4), for each borehole (HS1, M, R, S2, S4 and S5). FZ, DZ, FC, HW and FW represent the fault zone, the damage zone, the fault core, the hanging wall and the footwall, respectively.

## 7 CONCLUSION

### 7.1 Principaux résultats

Le but de cette étude était de mieux caractériser l'influence d'une zone de failles sur la circulation de fluides dans les argiles peu perméables. Tout d'abord, il nous a fallu décrire, comprendre et reconstituer l'architecture 3D de la zone de failles à différentes échelles. Puis, dans un second temps, nous nous sommes demandés si, lors de son activité passée, des circulations de fluides s'étaient manifestées dans la zone de failles, et quelles analogies pouvaient être faites entre les structures passées et celles qui favorisent actuellement la circulation de fluides lors des tests d'injection. Outre l'influence des discontinuités d'échelle macroscopique sur la circulation de fluides, nous nous sommes intéressés à la modification et à la caractérisation des propriétés pétrophysiques de la matrice au sein de la zone de failles.

#### **Caractérisation structurale d'une zone de failles argileuse:**

La zone de failles de Tournemire peut être interprétée comme un système de failles composé d'une zone de failles principale (abusivement appelé cœur de faille) et de zones de failles secondaires principalement présentes dans le compartiment Ouest (appelées zones endommagées fracturées). La zone de failles principale est hétérogène en termes de faciès, essentiellement composée de brèches de faille, de brèches cimentées, de zones fracturées et intactes. Dans certaines zones, la transition entre la zone de failles principale et la zone endommagée est observée sous la forme de plans de cisaillement principaux. La zone de failles principale a une direction moyenne N170°-N180° avec un pendage moyen de 60°W. Elle a une extension latérale supérieure à 100m et présente les indices d'un dernier jeu décrochant senestre avec un rejet vertical estimé entre 4-5m (Dick et al., 2015). Les zones de failles secondaires ont une direction moyenne DE N000°-N020° avec un pendage supérieur à 80°W.

Le domaine fracturé est composé à 90% de fractures et à 10% de failles non cimentées (Lefèvre et al., 2016 – En préparation), dont la dimension (fractures et failles) n'excède pas le mètre. Les fractures sont à 85% cimentées (calcite) et à 15% brêchifiées et cimentées. Quelques failles, dites secondaires présentent une dimension supérieure à 1m souvent lustrées/polies, leurs aspects varient latéralement avec par endroit des cimentations et se terminent en réseaux de fractures. Une intensification de la fracturation est observée à proximité des failles secondaires qui se manifeste par des petites zones endommagées (zone de failles secondaires) qui leur sont associées, ainsi la fracturation est très hétérogène et ne peut pas être décrite par une loi

statistique classique. Il est possible de rencontrer des zones non fracturées de 2-3m d'épaisseur, entre les zones de failles secondaires. L'ensemble des structures (fractures/failles/failles-secondaires) ont toutes la même direction (N160°-N020°) et un pendage très variable (5°-90°) qui prédomine vers l'ouest (> à 78%). 20% de ces structures sont parallèles aux plans de stratification (bed-parallel fracture/fault). Dans leur composition, les domaines endommagés de part et d'autre de la zone de failles principale diffèrent, en effet, les failles secondaires sont concentrées dans le compartiment Ouest et le compartiment Est présente peu de bed-parallel fractures/faults.

Les zones de brèches de faille sont caractérisées par des brèches non-cohésives parfois sous forme de scaly clay et de zones de gouge ainsi que des zones de brèches cimentées dont certains clastes contiennent des réseaux de fractures centimétriques ainsi que des minéralisations de calcite/pyrite alors que d'autres clastes semblent conserver leur fabrique sédimentaire intacte.

#### **Paléo-circulation de fluides:**

La limite entre la zone fracturée (compartiment ouest) et la zone de brèches, ici appelée zone de cœur de faille contient deux phases de calcite. En réalité, il ne s'agit pas d'un plan mais d'une zone de 5cm d'épaisseur qui représente un domaine de transition de la zone fracturée vers le cœur de faille, caractérisé par des structures fragiles/ductiles et des blocs résiduels très fracturés. Plus précisément, ce domaine de transition présente des plans de stratification parallèles à la surface de la faille principale, des plans de cisaillement de Riedel associés à des concentrations de calcite ainsi que des déplacements de l'ordre du centimètre avec localement, de la gouge et des textures dilatantes comme l'ouverture le long des plans de stratification ou encore les zones de brèches. Ce domaine de transition contient une concentration plus importante de calcite, de sulfure de fer et de zinc (Ca×6 et Fe×2) que dans la zone fracturée. Dans ce domaine, deux phases de précipitation de calcite associées à différents processus de déformation de la zone de failles ont été identifiées. La première phase coïncide avec une circulation de fluides le long d'une zone dilatante d'une épaisseur centimétrique associée à la première phase dextre et au début de la phase senestre. La seconde est associée au re-cisaillement le long de plans de faille correspondant exclusivement à la dernière phase senestre, de l'ordre du millimètre, et beaucoup plus localisée. Ainsi, dans les argiles, les fluides peuvent migrer dans un volume dilatant d'échelle centimétrique selon ou autour d'une surface de glissement. Cette migration est contrôlée premièrement par l'anisotropie de l'argile intacte comme les plans de stratification puis favorisée par la bréchification, la réorientation des structures et les processus induits par les effets de colmatage de la calcite.



### **Hydrogéologie de la zone de failles:**

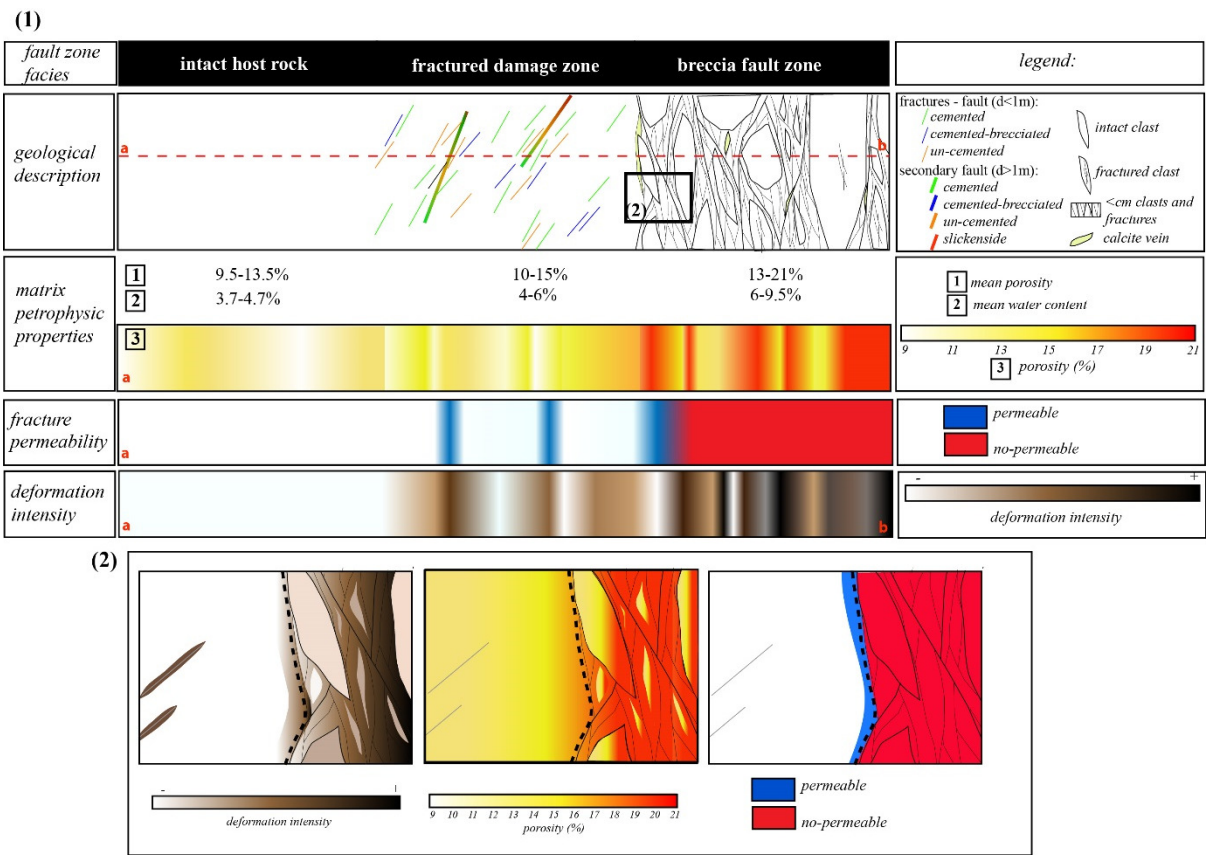
La zone de brèches de faille joue le rôle de barrière vis-à-vis des fluides et isole hydrauliquement le domaine fracturé Ouest du domaine fracturé Est. Les drains préférentiels sont les zones de failles secondaires et les interfaces entre la brèche de faille et le domaine fracturé. Dans notre site d'étude, la présence des forages et d'une zone d'endommagement autour du tunnel principal permet de transmettre les fluides à des zones larges autour des parois du tunnel. Dans les argiles, une zone de failles peu mature est par conséquent hydrauliquement plus active qu'une zone de failles mature, présentant une zone de cœur bréchique. Cette conclusion n'est pas valide pour toutes les formations. En effet, dans les carbonates, diverses études montrent au contraire que le bréchification d'une zone de failles peut être synonyme d'écoulement de fluides.

### **Caractérisation pétrophysique des différents facies de la zone de failles:**

Les mesures sur échantillon, mettent en avant un host-rock intact, un domaine fracturé et une brèche de faille qui sont caractérisés par valeurs de porosité comprises entre 9.5-13.5, 10-15 et 13-21% et des valeurs de teneur en eau comprises entre 3.7-4.7, 4-6 et 6-9.5% (Fig. 74). Le grand éventail de valeurs de porosité/teneur en eau de la brèche de failles est directement lié à son hétérogénéité structurale.

Par le biais d'une corrélation entre les valeurs de CT (Computed Tomography) des carottes et les mesures de porosité sur échantillon, il a été possible d'obtenir un profil de porosité calculé de haute résolution au travers de la zone de failles. Ces profils ont permis d'observer un halo de fortes valeurs de porosité autour de la brèche de faille. Cette augmentation de porosité est présente sur 2-5m autour du cœur et représente une augmentation moyenne de porosité de 2%. Celle-ci est un peu plus chaotique dans le hanging wall due à la présence de zones de failles secondaires qui viennent perturber le profil de porosité. De plus, une diminution brutale de porosité (jusqu'à 2%) est observée entre 2-5cm autour de la brèche de faille. La présence de ce halo autour de la brèche de faille, peut avoir plusieurs interprétations; il est probable qu'il marque réellement la transition entre la zone brèche et la zone fracturée dont la frontière macroscopique n'est pas déterminée géologiquement. C'est-à-dire que cette frontière ne se limite pas forcément à un contact de type discontinuité. Il est aussi possible d'évoquer des processus affectant les propriétés autour de la brèche de faille comme l'accumulation de la déformation et/ou la circulation de fluides dans cette zone. La diminution de porosité dans les 2-5cm autour de la brèche de faille est interprétée par une cimentation de la matrice (calcite)

associée à différents processus de déformation lors de l’activité de la zone de failles, observée sur échantillon de la galerie\_2003.



**Figure 74 :** Figure de synthèse récapitulant les principales conclusions sur les caractéristiques de la zone de failles étudiée selon différents aspects ; structure, déformation, perméabilité de fractures et les propriétés pétrophysiques.

### 7.1.1 Recommandations pour caractériser une zone de failles affectant des roches argileuses

#### 7.1.1.1 En termes d’architecture et de propriétés pétrophysiques

##### Comment caractériser une zone de failles intersectée par forages (application pétrole) ou rencontrée dans un tunnel (exemple de Bure) ?

Il est important de mettre en avant les petites dimensions des structures, les variations latérales des caractéristiques et la difficulté à corrélér les structures entre elles. Raisonner en termes de structure dans ce type de formation amène une complexité et n’est pas approprié à la compréhension du rôle des fluides dans la zone de failles. La caractérisation développée dans ce travail est une caractérisation par type de faciès de déformation. On ne parle plus d’objet

mais de faciès de déformation (zone intacte, zone endommagée fracturée, brèche de faille...). Ces domaines de déformation sont alors corrélables entre forages à une échelle raisonnable et caractérisables en gamme de valeurs de propriétés pétrophysiques (porosité, teneur en eau...)

#### **7.1.1.2 En termes de perméabilité**

Ce travail a permis de mettre en évidence que dans les argiles, les zones de failles immatures laissent circuler les fluides et à l'inverse les domaines de brèches de faille présentent dans les zones de failles matures forment une barrière, isolant hydrauliquement les deux compartiments de la zone de failles. Dans le cas étudié, il apparaît que le drainage de la zone de failles d'architecture très complexe est concentré dans 5 à 6 endroits, correspondant à des failles secondaires sans remplissage brêchique ou le long des bordures de la zone de failles principale. Il semble que la faible perméabilité des zones brêchiques puisse s'expliquer par leur grande déformabilité sous pression qui tend à fermer les pores et micro-fractures plus qu'à les ouvrir. Ces zones sont visibles en diagraphie acoustique, optique, de résistivité électrique etc... et il serait à priori possible de simplifier la zone de failles à un réseau de quelques drains et barrières...

Le couplage des approches 7.1.1.1 et 7.1.1.2 pourrait permettre de reconstituer une image simplifiée d'une zone de failles argileuse, caractérisée par un ou plusieurs cœurs où se concentre le glissement qui sont entourés d'un réseau restreint de failles secondaires perméables où se concentre l'écoulement. Dans ce modèle, la rupture selon le cœur peut entraîner des variations de contraintes suffisantes sur les failles secondaires pour faciliter l'expulsion de fluides. Inversement, la pressurisation des fluides dans les failles secondaires peut amener des variations de contraintes dans des volumes suffisamment importants pour autoriser des glissements localisés dans le cœur. Tout repose donc sur le fait que les fluides circulent essentiellement en dehors des zones de glissement. Les recommandations précédentes pourraient permettre d'évaluer l'importance de ce découplage pour estimer ainsi le potentiel de fuite ou d'instabilité de la zone de failles.

## 7.3 Perspectives de recherche

Différentes perspectives seront exposées pour mieux contraindre; (i) l'histoire géologique et la structure de la zone de failles, (ii) les circulations de paléo-fluides et (iii) les propriétés de la zone de failles.

### *Histoire géologique et structure de la zone de failles*

En raison de l'absence de trace des dépôts post-Portlandiens dans le bassin des Causses (hormis quelques patches de Turonien-Crétacé supérieur), l'histoire géodynamique post-Jurassique du bassin est mal comprise. Si la courbe de subsidence des argiles Toarciennes (Séranne et al., 2014) indique un enfouissement maximum de 2300m, des études sur la chimie des eaux porales semblent révéler une couverture maximum de 1400m. Pour apporter des éléments de réponse, il serait intéressant de faire des études thermobarométriques afin de déterminer les conditions Pression-Température-temps de la formation argileuse intacte et au niveau de la zone de failles. En utilisant des grilles pétrogénétiques (pour systèmes argileux) il est possible de reconstituer des domaines d'association entre minéraux à l'équilibre en fonction des conditions Pression-Température. Pour contraindre les conditions P-T-t de la zone de failles, il serait aussi nécessaire de dater les zones de gouge en utilisant la méthode  $\text{Ar}^{40}$ - $\text{Ar}^{39}$  (projet IRSN en cours, en collaboration avec Ben A. Van der Pluijm).

Afin de caractériser les relations entre les déformations de type fragile et ductile présentes dans le cœur de faille ainsi que les relations entre les microstructures et la chimie, il serait intéressant de cartographier et d'analyser les microstructures du cœur de faille et notamment au niveau des gouges par le biais de  $\mu$ -CT-scans, lames minces, MEB, autoradiographie, DRX et FIB (projet IRSN en cours, en collaboration avec l'université de Helsinki).

### *Paléo-fluides & Tests d'injection*

Lors des analyses  $\mu$ XRF des veines de calcite au niveau du plan principal de faille (Lefèvre et al., 2016), nous avons observé la présence de sulfure de zinc. Plusieurs circulations de fluides de différentes sources ont été identifiées mais l'origine des fluides est encore mal comprise, la présence de zinc peut-elle suggérer la participation d'une circulation de fluides profonds? Une méthode qui permettrait d'identifier les sources serait de réaliser des études isotopiques dans les inclusions fluides au niveau des différentes phases de calcite. De la même manière, il serait intéressant de connaître la température des fluides et de caractériser l'influence de la circulation de fluides et de la température du fluide sur la texture de l'encaissant (changement

minéralogique, processus de propagation du fluides, cimentation). Il serait aussi très intéressant de voir comment dans le temps la cimentation joue sur la circulation de fluides et sur les propriétés pétrophysiques de la matrice.

### **Propriétés pétro-physiques de la zone de failles**

La corrélation entre les valeurs de CT des carottes et les valeurs de propriétés pétrophysiques est une bonne méthode qui permet d'obtenir des profils de haute définition (dans nos cas, de porosité) à travers une zone de failles. Il serait intéressant de voir si d'autres paramètres sont corrélables. Nous avons montré une augmentation progressive de porosité de part et d'autre du cœur de faille. Deux grandes hypothèses ont été mises en avant, l'influence des fluides et/ou l'influence de la déformation. Pour amener des éléments de réponse, l'étude de la texture/pore de la matrice sur lames minces suivant un profil dans les 5m à partir du cœur de faille pourrait donner des indices sur les processus qui permettent cette augmentation de porosité. On pourrait aussi se demander si ce phénomène est observé sur d'autres zones de failles où la lithologie et/ou la structure interne sont différentes. De la même manière, cet échantillonnage pourrait permettre de compléter les informations sur les relations entre les microstructures et la chimie.

## REFERENCES

- Barbarand, J.**, Lucazeau, F., Pagel, M., Séranne, M., 2001. Burial and exhumation history of the south-eastern Massif Central (France) constrained by apatite fission-track thermochronology. *Tectonophysics* 335, 275-290.
- Ben Ouanas, A.**, 2010. Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope : retour d'expérience de l'utilisation de cellule CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron). Thèse de l'université de Nancy, Institut national polytechnique de Lorraine.
- Bense, V.F.**, Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 127, 171-192.
- Billi, A.**, Salvini, F., Storti, F., 2003. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implication for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology* 25, 1779-1794.
- Brace, W. F.**, Silver, E., Hadley, K., Goetze, C., 1972. A closer look at cracks and pores. *Science* 178, 162-163.
- Bretonneau, F.**, Gélis, C., Leparoux, D., Brossier, R., Cabrera, J., Côte, P., 2014. High-resolution quantitative seismic imaging of a strike-slip fault with small vertical offset in clay rocks from underground galleries: Experimental platform of Tournemire, France. *Geophysics* 79, B1-B18, doi:10.1190/GEO2013-0082.1.
- Boisson, J.Y.**, Bertrand, L., Heitz, J.F., Moreau-Le Golvan, Y., 2001. In situ laboratory investigations of fluid flow through an argillaceous formation at different scales of space and time, Tournemire tunnel, southern France. *Hydrogeology Journal* 9, 108-123.
- Bonijoly, D.**, Delpont, G., 1982. Etude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par la télédétection et la géologie structurale. BRGM, Orléans, 46, 64.
- Boutareaud, S.**, Wibberley, C.A.J., Fabbri, O., Shimamoto, T., 2008. Permeability structure and co-seismic thermal pressurization on fault branches: insights from the Usukidani fault, Japan. In: Wibberley, C.A.J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R.E., Collettini, C., (eds) *The Internal Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-Flow Properties*. 299, 341-361. DOI: 10.1144/SP299.20, The Geological Society of London.
- Cabrera, J.**, Volant, P., Baker, C., Pettitt, W., Young, R.P., 1999. Structural and geophysical investigations of the EDZ (Excavation Disturbed Zone) in indurated argillaceous media: The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site (France). 37th U.S Rock Mechanics Symposium, vail, Amadei & Kranz & Scott & Smeallie (eds), Balkema, 957-964.
- Cabrera, J.**, Beaucaire, C., Bruno, G., De Windt, L., Genty, A., Ramanbasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S., Volant, P., 2001. Projet Tournemire : Synthèse des programmes de recherche 1995/1999. Rapport IPSN, 202.

- Caine, J.S.**, Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture of permeability structure. *Geology* 24, 1025-1028.
- Caron, J.M.**, Gauthier, A., Lardeaux, J.M., Schaaf, A., Ulysse, J., Wozniak, J. 2003. Comprendre et enseigner la planète Terre, Ophrys. p 190.
- Chester, F.M.**, Logan, J.M., 1986. Implications for mechanical properties of brittle faults from observations of the Punchbowl fault zone, California. *Pure and Applied Geophysics* 124, 79-106.
- Chester, F.M.**, Evans, J.P., Biegel, R.L., 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research* 98, 771-786.
- Childs, C.**, Manzocchi, T., Walsh, J. J., Bonson, G., Nicol, A., Schöpfer, M. P.J., 2003. A geometric model of fault zone and fault rock thickness variations. *Journal of Structural Geology* 31, 177-127.
- Choi, J-H.**, Yang, S-J., Han, S-R., Kim, Y-S., 2015. Fault zone evolution during Cenozoic inversion in SE Korean. *Journal of Asian Earth Sciences* 98, 197-177.
- Chu, C.L.**, Wang, C.Y., Lin, W., 1981. Permeability and frictional properties of San Andreas fault gouges. *Geophysical Research Letters* 8, 565-568.
- Conenza, P.**, Ghorbani, A., Florsch, N., Revil, A., 2007. Effets of Drilling on the Low-Frequency Electrical Properties of Tournemire Argilites. *Pure and Applied Geophysics*, 164, 2043-2066.
- Constantin, J.**, Vergély, P., Cabrera, J., 2002. Tectonique et fracturation associée dans le bassin des Causses (Aveyron, France): le cas du secteur de Tournemire. *Bulletin Société géologique de France* 173, 229-243.
- Constantin, J.**, 2002. Fracturation et paléocirculation de fluides dans les formations géologiques de faible perméabilité matricielle: le cas des argilites de Tournemire (Aveyron, France). Thèse, Université d'Orsay, France.
- Constantin, J.**, Peyaud, J.B., Vergély, P., Pagel, M., Cabrera, J. 2004. Evolution of the structural fault permeability in argillaceous rocks in a polyphased tectonic context. *Physics and Chemistry of the Earth* 29, 25-41.
- Constantin, J.**, Laurent, P., Vergély, P., Cabrera, J., 2007. Paleo-deviatoric stress magnitudes from calcite twins and related structural permeability evolution in minor fault: Example from the toarcian shale of the French Causses Basin, Aveyron, France. *Tectonophysics* 429, 79-97.
- Cornet, F.H.**, 2000. Détermination du champ de contrainte au voisinage du laboratoire souterrain de Tournemire. Rapport du Laboratoire de Mécanique des Roches, Département de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris.



- Cosenza, P.**, Ghorbani, A., Florsch, N., Revil, A., 2007. Effects of Drying on the Low-Frequency Electrical Properties of Tournemire Argillites. *Pure and Applied Geosciences*, 164, 2043-2066.
- Costin, L. S.** 1983. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock. *J. Geophys. Res.*, 88, 9485-9492.
- Costin, L. S.** 1987. Time-dependent deformation and failure, In: *Fracture Mechanics of Rock*, (ed: B.K. Atkinson), Academic Press, London, 167-215.
- Davy, A.D.**, Skoczylas, F., Barnichon, J.-D., Lebon, P., 2007. Permeability of macro-cracked argillite under confinement: Gas and water testing. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 667-680.
- De Charpal, O.**, Trémolière, P., Jean, Masse, P., 1974. Un exemple de tectonique de plate-forme : les Causses majeurs (sud du Massif central). *Rev IFP* (5) XXIX, 641-659.
- Dewhurst, D.N.**, Brown, K.M., Clennell, M.B., Westbrook, G.K., 1996. A comparison of the fabric and permeability anisotropy of consolidated and shared silty clay. *Engineering Geology* 42, 253-267.
- Dick, P.**, Courbet, C., Wittebrood, C., Dauzere, A, Matray, J-M., 2015. Internal structures of fault zones in low permeability formation and their relationship with fluid flow: insights the Tournemire URL. *Clay in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, Bruxelles. Abstract 15-21.
- Evans, J.P.**, Forster, C.B., Goddard, J.V., 1997. Permeability of fault-related rocks, and implications for implications for hydraulic structure of fault zones. *Journal of Structural Geology* 19, 1393-1404.
- Faulkner, D.R.**, Rutter, E.H., 1998. The gas permeability of clay-bearing fault gouge at 20°C, in *Faults, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs*, edited by G. Jones, Q. Fisher, R. Knipe, *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 147, 147-156.
- Faulkner, D.R.**, 2004. A model for the variation in permeability of clay-bearing fault gouge with depth in the brittle crust. *Geophysical Research Letters* 31, doi:10.1029/2004GL020736, 2004.
- Faulkner, D.R.**, Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., Withjack, M.O., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology* 32, 1557-1575.

- Gamo, T.,** Sakai, H., Ishibashi, J., Shitashima, K., Boulegue, J., 1992. Methane, ethane and total inorganic carbon in fluid samples taken during the 1989 Kaiko-Nankai project. *Earth and Planetary Science Letters*, 109(3-4), 383-390.
- Giot, D.,** Roure, F., Elmi, S., Lajat, D., Steinberg, M., 1991. Decouverte d'accidents distensifs majeurs d'âge jurassique sur la marge continentale du bassin du sud-est, Ardèche, France, (programme GPF) *C. R. Acad. Sci. Paris* 312, 747-754.
- Gudmunson, A.,** Simmenes, T.H., Larsen, B., Philipp, S.L., 2010. Effects of internal structure and local stresses on fracture propagation, deflection, and arrest in fault zones. *Journal of Structural Geology* 32, 1643-1655.
- Henry, P.,** Lallemant, S., Nakamura, K., Tsunogai, U., Mazzotti, S., Kobayashi, K., 2002. Surface expression of fluid venting at the toe of the Nankai wedge and implications for flow paths. *Marine Geology*, 187(1-2), 119-143.
- Hesthammer, J.,** Johansen, T.E.S., Watts, L., 2000. Spatial relationships within fault damage zones in sandstone. *Marine and Petroleum Geology* 17, 873-893.
- Horseman, S.,** 2001. Self-healing of Fractures in Argillaceous Media from the Geomechanical Point of View. *NEA/RWM/CLAYCLUB(2001)5*.
- Jourde, H.,** Flodin, E.A., Aydin, A., Durlofski, L.J., Wen, X.H., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurement. *AAPG Bulletin* 86, 1187-1200.
- Kobayashi, K.,** 2002. Tectonic significance of the cold seepage zones in the eastern Nankai accretionary wedge – an outcome of the 15 years' KAIKO projects. *Marine Geology*, 187(1-2), 3-30.
- Lavielle, B.,** Matray, J-M., Thomas, B., Dauzère, A., Bensenouci, F., Gilabert, E., 2012. Stages of evolution of a Toarcian compacted claystone around galleries excavated between 1 and 124 years ago by the study of noble gases dissolved in pore water at the Tournemire Underground Research Laboratory (France). *Applied Geochemistry* 27, 1403-1416.
- Lefèvre, M.,** Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P., Gout, C. 2016. Calcite veins as an indicator of fracture dilatancy and connectivity during strike-slip faulting in Toarcian shales (Tournemire tunnel, Southern France). *Journal of Structural Geology* 83, 73-84, DOI: 10.1016/j.jsg.2016.01.002.
- Lefèvre, M.,** Guglielmi, Y., Henry, P., Martin, G., Lamarche, J., Dick, P., Castilla, R. 2016. Three-dimensional fault zones architecture in shales: example from the Tournemire tunnel fault (Southern, France). En préparation ; §3.2 (thèse Lefèvre, M., 2016).

- Lefèvre, M.,** Guglielmi, Y., Henry, P., Dick, P., Castilla, R. 2016. Petro-physical characterization of fault zone affecting Toarcian shale: example from the Tournemire tunnel fault (Southern France). En préparation ; §6.2 (thèse Lefèvre, M., 2016).
- Lockner, D.,** Naka, H., Tanaka, H., Ito, H., Ikeda, R., 1999. Permeability and strength of the Nojima core samples from the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake. In: Ito, H., Fujimoto, K., Tanaka, H., Lockner, D., (eds) Proceedings of the International Workshop on the Nojima Fault Core and Borehole Data Analysis. Preliminary Report, 147-152.
- Mandl, G.,** Jong, L.N.J., Maltha, A., 1977. Shear Zones in Granular Material, An Experimental Study of Their Structure and Mechanical Genesis. *Rock Mechanics* 9, 95-144.
- Manzocchi, T.,** Walsh, J.J., Nell, P., Yielding, G., 1999. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience* 5, 53-63.
- Matray, J-M.,** Savoye, S., Cabrera, J., 2007. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Engineering Geology* 90, 1-16.
- Martin, G.,** 2015. Analyse structural du secteur de Tournemire (Aveyron, France). Rapport interne CEREGE.
- Mercier, J.,** Vergély, P., 1992. *Tectonique*. Geoscience, Dunod, p 215.
- Mizoguchi, K.,** Hirose, T., Shimamoto, T., 2000. Permeability structure of the Nojima fault at Funaki, Hokudan-Cho, Japan. *The Earth Monthly*, 31, 58-65.
- Monnier, G.,** Stengel, P., Fies, J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de système de porosité du sol. *Ann. Agron* 24, 533-545.
- Morrow, C.A.,** Shi, L.Q., Byerlee, J.D., 1984. Permeability of Fault Gouge Under Confining Pressure and Shear Stress. *Journal of Geophysical Research*, 84, B5, 3193-3200.
- Nouzé, H.,** Henry, P., Noble, M., Martin, V., Pascal, G., 2004. Large gas hydrate accumulations on the eastern Nankai Trough inferred from new high-resolution 2-D seismic data. *Geophysical Research Letter*, 31(13), 10.1029/2004gl019848.
- Nussbaum, C.** and Bossart, P., 2004. Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory. Technical Note 2005-10, Mont-Terri Project, Geotechnical Institute Ltd, Switzerland.
- Nussbaum, C.,** Bossart, P., Amann, F., Aubourg, C., 2011. Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in Opalinus Clay, Mont Terri underground rock laboratory (Switzerland). *Swiss Journal of Geoscience* 104, 187-210. doi: 10.1007/s00015-011-0070-4.

- Peyaud, J.B.**, Barbarand, J., Carter, A., Pagel, M., 2005. Mid-Cretaceous uplift and erosion on the northern margin of the Ligurian Tethys deduced from thermal history reconstruction. *International Journal of Earth Sciences*, 94, 462-474.
- Rejeb, A.**, Tijani, M., 2003. Champ de contraintes dans les argilites de Tournemire. Mesures in situ et interprétation. *Revue Française de Géotechnique*, N°103.
- Rejeb, A.**, Cabrera, J., 2006. Time-dependent evolution of the excavation damage zone in the argillaceous Tournemire site. *Eurosafe*.
- Rice, J. R.**, and Rudnicki, J. W., 1979. Earthquake precursory effects due to pore fluid stabilization of a weakening fault zone. *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2177-2193.
- Roche, V.** 2011. Architecture et croissance des failles dans les alternances argilo-calcaires. Exemple dans les alternances du Bassin du Sud-Est (France) et modélisation numérique. Thèse, Fontenay-aux-Roses.
- Rutter, E.H.**, Maddock, R.H., Hall, S.H., White, S.H., 1986. Comparative microstructures of natural and experimentally produced clay-bearing fault gouges. *Pure and Applied Geophysics*, 124, 3-30.
- Séranne, M.**, Camus, H., Lucazeau, F., Barbarand, J., Quinif, Y., 2002. Surrection et érosion polyphasées de la bordure cévenole – Un exemple de morphogenèse lente. *Bulletin de la Société Géologique de France* 173(2), 97-112.
- Séranne, M.**, Y a-t-il du gaz de schiste en Languedoc? 2014. *Annales de la Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault* 154, 80-95.
- Seront, B.**, Wong, T.F., Caine, J.S., Forster, C.B., Bruhn, R.L., Fredrich, J.T., 1998. Laboratory characterization of hydrodynamical properties of a seismogenic normal fault system. *Journal of Structural Geology*, 20, 865-881.
- Shea, W.T.**, Kronenberg, A. K., 1993. Strength and anisotropy of foliated rocks with varied mica content. *Journal of Structural Geology*, 15, 9/10, 1097-1121.
- Sibson, R.H.**, 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geology Society* 133, 191-213.
- Sibson, R.H.**, 1900b. Chapter 4. Faulting and fluid flow, in *MAC Short Course on Fluids in Tectonically Active Regimes of the Continental Crust*, Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, vol. 18, edited by B.E. Nesbitt, Vancouver, Canada, p 93-132.
- Tapponier P.**, Brace, W.F., 1976. Development of Stress-Induced Microcracks in Westerly Granite. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech*, 13, 103-112.

- Tremosa, J.**, Arcos, D., Matray, J.M., Bensenouci, F., Gaucher, E.C., Tournassat, C., Hadi, J., 2012. Geochemical characterization and modelling of the Toarcian/Domerian porewater at the Tournemire underground research laboratory. *Applied Geochemistry* 27, 1417-1431.
- Tsunogai, U.**, Ishibashi, J., Wakita, H., Gamo, T., 1998. Methane-rich plumes in the Suruga Trough (Japan) and their carbon isotopic characterization. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(1-2), 97-105.
- Tsutsumi, A.**, Nishino, S., Mizoguchi, K., Hirose, T., Uehara, S., Sato, K., Tanikawa, W., Shimamoto, T., 2004. Principal fault zone width and permeability of the active Neodani, Nobi fault system, Southern Japan. *Tectonophysics* 379, 93-108.
- Wibberley, C.A.J.**, Shimamoto, T., 2003. Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Midian Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan. *Journal of Structural Geology* 25, 59-78.
- Wibberley, C.A.J.**, Yielding, G., Di Toro, G., 2008. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *The Internal Structure of Fault Zones*, Geological Society London 299, 5-33.
- Yielding, G.**, Øverland, J.A., Byeberg, G., 1999. Characterization of fault zones for reservoir modeling: an example from Gullfaks Field, Northern North Sea. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 83, 925-951.
- Zhang, S.**, Cox, S.F., 2000. Enhancement of fluid permeability during shear deformation of a synthetic mud. *Journal of Structural Geology* 22, 1385-1393.

# ANNEXE

## Annexe 1 : Fiche technique sonde OPTV



# FICHE TECHNIQUE

## IMAGERIE

## OPTIQUE

## OPTV

### Généralités

#### Principe

La sonde OPTV est un outil qui, grâce à une caméra CCD associée à un miroir conique (réfléchissant la paroi du forage), permet l'acquisition d'images vidéo haute résolution.

#### Résultat

Les images vidéo (couplées à des mesures d'inclinaison), permettent d'obtenir une image déroulée (360°) et orientée de la paroi du forage, en vraies couleurs.

#### Intérêt

Support pour interprétation structurale, calcul de RQD in situ, étude lithologique et granulométrique, état de fracturation du milieu...

Utilisation en trou sec ou en eau claire. En cas de turbidité, passage d'un outil d'imagerie ultra sonique – type BHTV.

#### Options

Détecteur gamma naturel, trajectométrie.

### Contraintes / trou de forage

|                |                                               |                                                |                                         |
|----------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| remplissage    | : <input checked="" type="checkbox"/> en eau  | <input type="checkbox"/> en boue               | <input checked="" type="checkbox"/> sec |
| tubage         | : <input checked="" type="checkbox"/> PVC     | <input checked="" type="checkbox"/> acier      | <input checked="" type="checkbox"/> nu  |
| forage         | : <input checked="" type="checkbox"/> carotté | <input checked="" type="checkbox"/> destructif |                                         |
| profondeur max | : 1000 m                                      |                                                |                                         |
| diamètre utile | : 70 mm – 300 mm                              |                                                |                                         |
| température    | : 0 °C – 70 °C                                |                                                |                                         |
| pression max   | : 100 bars (possible 200 bars)                |                                                |                                         |

### Caractéristiques de la sonde

#### Dimensions

|            |           |
|------------|-----------|
| • longueur | : 1620 mm |
| • diamètre | : 52 mm   |
| • poids    | : 5 kg    |

#### Eléments

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| • 1 tête optique (caméra + cône) | : IMG |
| • 1 magnétomètre 3 axes (x,y,z)  | : MAG |
| • 1 accéléromètre 2 axes (x,y)   | : ACC |
| • 1 détecteur gamma naturel      | : GR  |

### Enregistrements / Mesures

#### Enregistrement

|                    |                                                                           |                                              |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| • Sonde            | : <input checked="" type="checkbox"/> centrée                             | <input type="checkbox"/> excentrée           |
| • Mesure           | : <input checked="" type="checkbox"/> descente                            | <input checked="" type="checkbox"/> remontée |
| • Vitesse d'enreg. | : 2.5 m / mn (avec résol. vert. de 1mm et résol. horiz. de 720 pt / 360°) |                                              |

#### Mesures

|                     |                              |
|---------------------|------------------------------|
| • Résolution horiz. | : jusqu'à 1440 pixels / 360° |
| • Résolution vert.  | : jusqu'à 0.2 mm             |
| • Azimut            | : ± 1°                       |
| • Inclinaison       | : ± 0.5 °                    |

## Annexe 2 : Fiche technique sonde DIL38

| FICHE TECHNIQUE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |           |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------|
| ELECTROMAG                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | INDUCTION | DIL38 |
| <p><b>Généralités</b></p> <p><b>Principe</b><br/>Emission d'un champ EM (primaire) dans le milieu, grâce à une bobine parcourue par un courant alternatif. Création d'un champ EM secondaire proportionnel à la conductivité du milieu traversé. Mesure du champ EM total grâce à deux bobines réceptrices. Déduction du champ secondaire et calcul de la conductivité électrique du milieu du milieu. L'espacement émetteur-récepteur détermine la profondeur d'investigation de la mesure.</p> <p><b>Résultats</b><br/>La sonde double induction fournit deux mesures simultanées de la conductivité des formations : une proche (rayon d'investigation court) et une lointaine (rayon d'investigation plus important).</p> <p><b>Intérêt</b><br/>Mesure de la conductivité électrique des formations traversées à travers un tubage PVC, dans des forages noyés/dénoués, localisation des zones perméables, indicateur de porosité, d'hydrocarbures etc...</p> <p><b>Option</b><br/>Détecteur gamma naturel.</p> |           |       |
| <p><b>Contraintes / trou de forage</b></p> <p>remplissage : <input checked="" type="checkbox"/> en eau <input checked="" type="checkbox"/> en boue <input checked="" type="checkbox"/> sec<br/> tubage : <input checked="" type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> acier <input checked="" type="checkbox"/> nu<br/> forage : <input checked="" type="checkbox"/> carotté <input checked="" type="checkbox"/> destructif</p> <p>profondeur max. : 2000 m<br/> diamètre effectif : 60 mm – 450 mm<br/> température : 0°C – 70°C<br/> pression max. : 200 bars</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |       |
| <p><b>Caractéristiques de la sonde</b></p> <p><b>Dimensions</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>longueur : 2300 mm</li> <li>diamètre : 38 mm</li> <li>poids : 8 kg</li> </ul> <p><b>Elements</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 bobine émettrice (39.062 kHz) : EM</li> <li>2 bobines réceptrices : EM<sub>1</sub> - EM<sub>2</sub></li> <li>1 détecteur gamma naturel : GR</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |           |       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |           |       |
| <p><b>Enregistrements / Mesures</b></p> <p><b>Records</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sonde : <input checked="" type="checkbox"/> centrée <input type="checkbox"/> excentrée</li> <li>Mesure : <input checked="" type="checkbox"/> descente <input checked="" type="checkbox"/> montée</li> <li>Vitesse enreg. : 6 m/min</li> </ul> <p><b>Mesures</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gamme : 0.25 Ω.m - 100 Ω.m (mesure absolue)<br/>100 Ω.m - 200 Ω.m (mesure relative)</li> <li>Résolution horiz. : 1 % de l'échelle totale</li> <li>Résolution vert. : 50 cm (résistivité proche),<br/>80 cm (résistivité longue)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |           |       |

## Annexe 3 : Fiche technique sonde GRS

| FICHE TECHNIQUE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                |                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NUCLEAIRE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | GAMMA SPECTRAL | GRS                                                                                                                                                          |
| <b>Généralités</b> <p><b>Grandeur mesurée</b><br/>Spectrométrie du rayonnement gamma naturel.</p> <p><b>Principe</b><br/>Examen et décomposition du spectre d'énergie du rayonnement gamma.</p> <p><b>Résultat</b><br/>Calculs des teneurs en U (Uranium), Th (Thorium) et K (potassium).</p> <p><b>Intérêt</b><br/>Lithologie, Environnement évaporitique, Sédimentologie, Potentiel d'hydrocarbure, Corrélation de puits, Détection de changement de faciès, Potentiel d'uranium.</p>                                                                     |                |                                                                                                                                                              |
| <b>Contraintes / trou de forage</b> <p>remplissage : <input checked="" type="checkbox"/> en eau <input checked="" type="checkbox"/> en boue <input checked="" type="checkbox"/> sec<br/> tubage : <input checked="" type="checkbox"/> PVC <input type="checkbox"/> acier <input checked="" type="checkbox"/> nu<br/> forage : <input checked="" type="checkbox"/> carotté <input checked="" type="checkbox"/> destructif</p> <p>profondeur max : 2000 m<br/> diamètre utile : 75 mm – 300 mm<br/> température : 0°C – 70°C<br/> pression max : 200 bars</p> |                |                                                                                                                                                              |
| <b>Caractéristiques de la sonde</b> <p><b>Dimensions</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>longueur : 1560 mm</li> <li>diamètre : 60 mm</li> <li>poids : 7 kg</li> </ul> <p><b>Eléments</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1 détecteur gamma naturel : GRS<br/>50 mm x 25 mm NaI(Tl) scintillateur + Photo-multiplicateur</li> </ul>                                                                                                                                                                                                   |                |                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                |                                                                                                                                                              |
| Enregistrements / Mesures                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                |                                                                                                                                                              |
| <b>Enregistrement</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sonde : <input checked="" type="checkbox"/> centrée <input type="checkbox"/> excentrée</li> <li>Mesure : <input checked="" type="checkbox"/> descente <input checked="" type="checkbox"/> remontée</li> <li>Vitesse d'enreg. : 1 à 1.5 m/min</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                        |                | <b>Mesures</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gamme énergie : 60 à 3 060 keV</li> <li>Temps mort : 4 µs</li> <li>Résolution vert. : 10 cm</li> </ul> |



## Annexe 4 : Fiche de puits – HS1 – aspect pétrophysique

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole HS1

Spud date 03/06/13

drilled length (m) 20.8  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78  
mean dip (°) 23.49

Coordonnées en Lambert III

X (m) 654270.75  
Y (m) 187263.07  
Z (m) 516.32

elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

GN : Gamma naturel

CONDS : Conductivité court espacement

CONDL : Conductivité long espacement

ILS : Résistivité par induction court espacement

ILD : Résistivité par induction long espacement

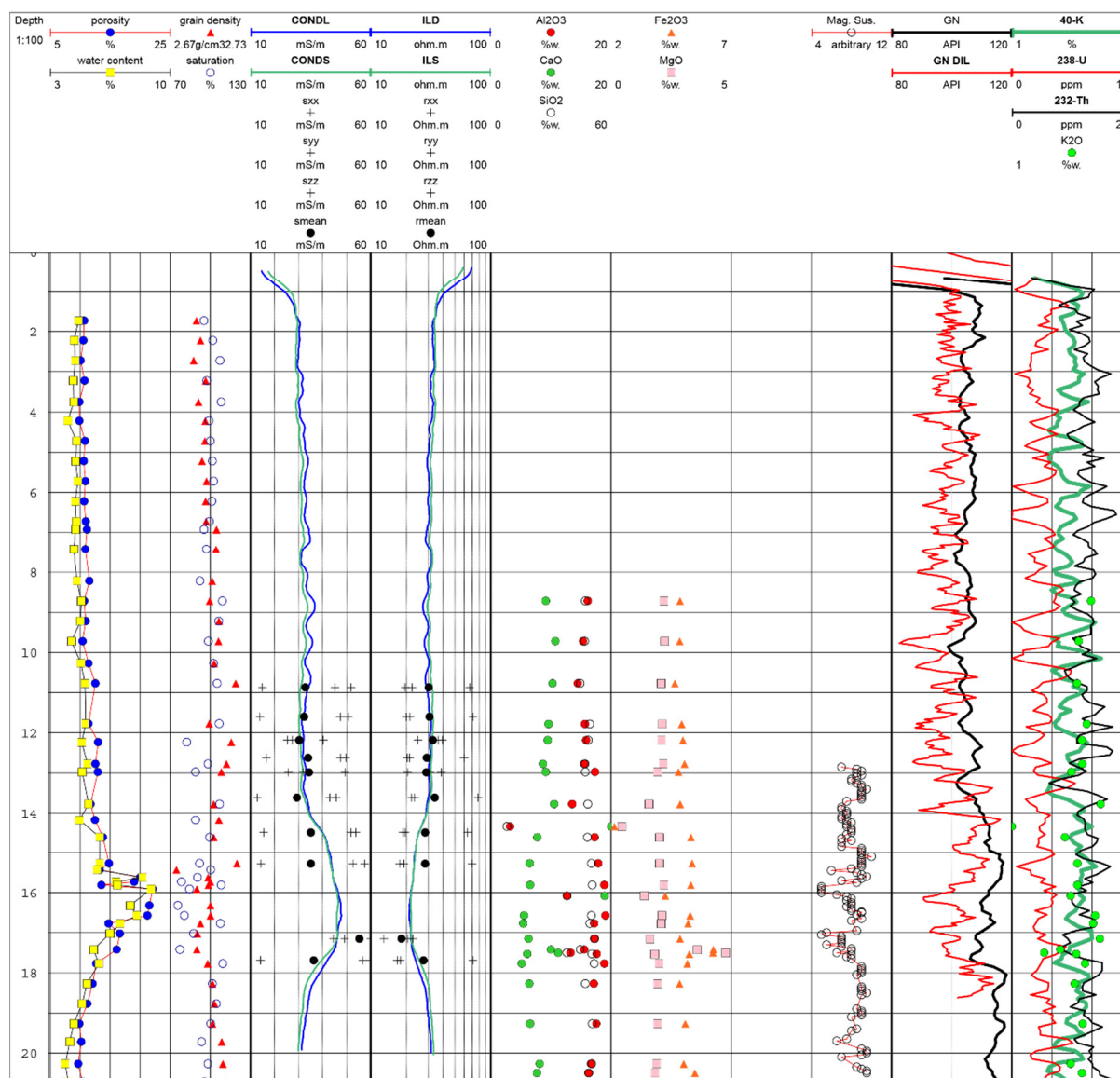
Oxyde percent weights from whole rock analysis (Optical ICP)

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.

La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.

Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



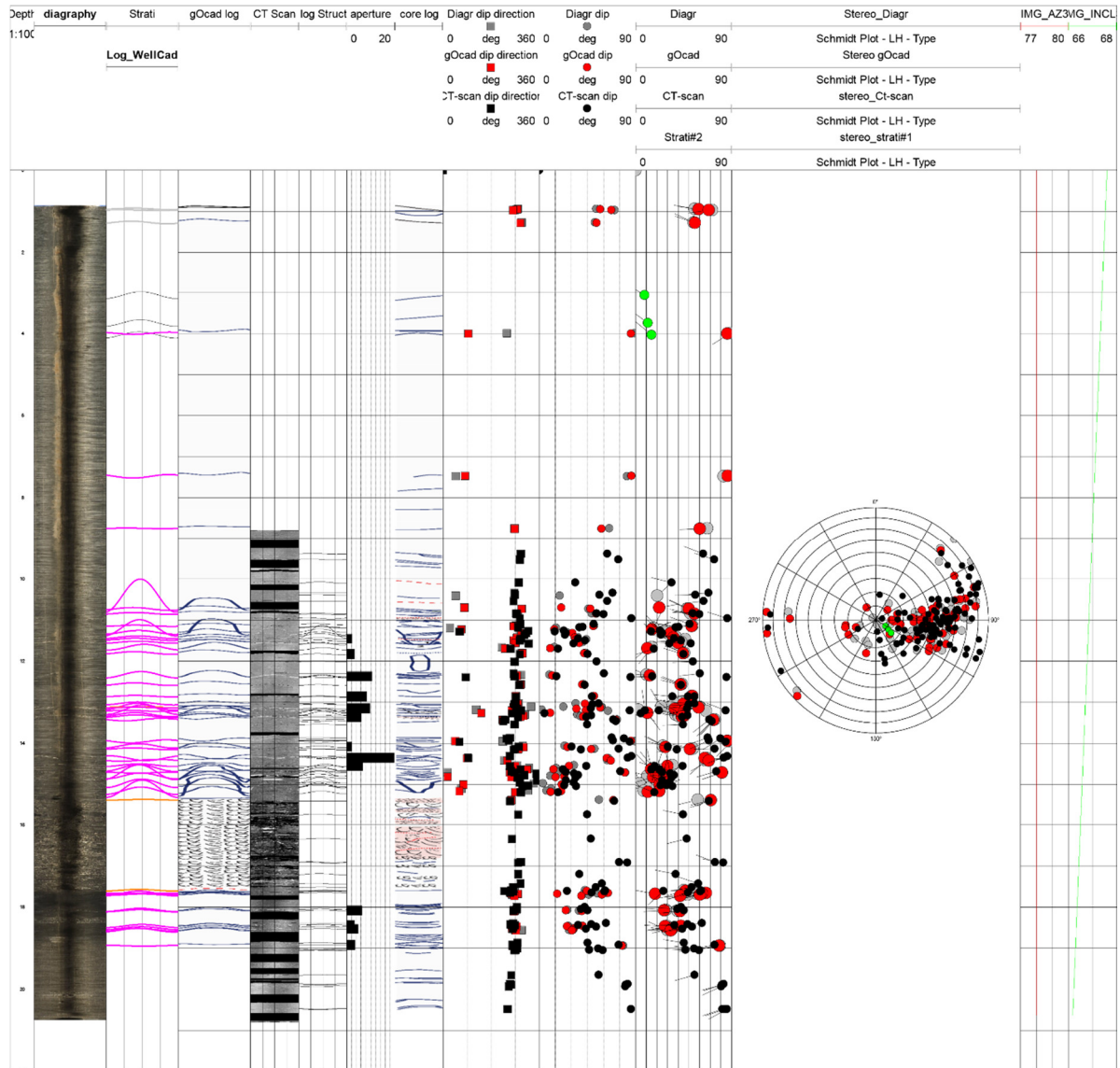
## Annexe 5 : Fiche de puits – HS1 – aspect structural

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole HS1  
Spud date 03/06/13

drilled length (m) 20.8  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78  
mean dip (°) 23.49

Coordonnées en Lambert III  
X (m) 654270.75  
Y (m) 187263.07  
Z (m) 516.32  
elevation above tunnel floor (m) 0.46



## Annexe 6: Fiche de puits – HS1 - résumé

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole HS1  
Spud date 03/06/13

drilled length (m) 20.8  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78  
mean dip (°) 23.49

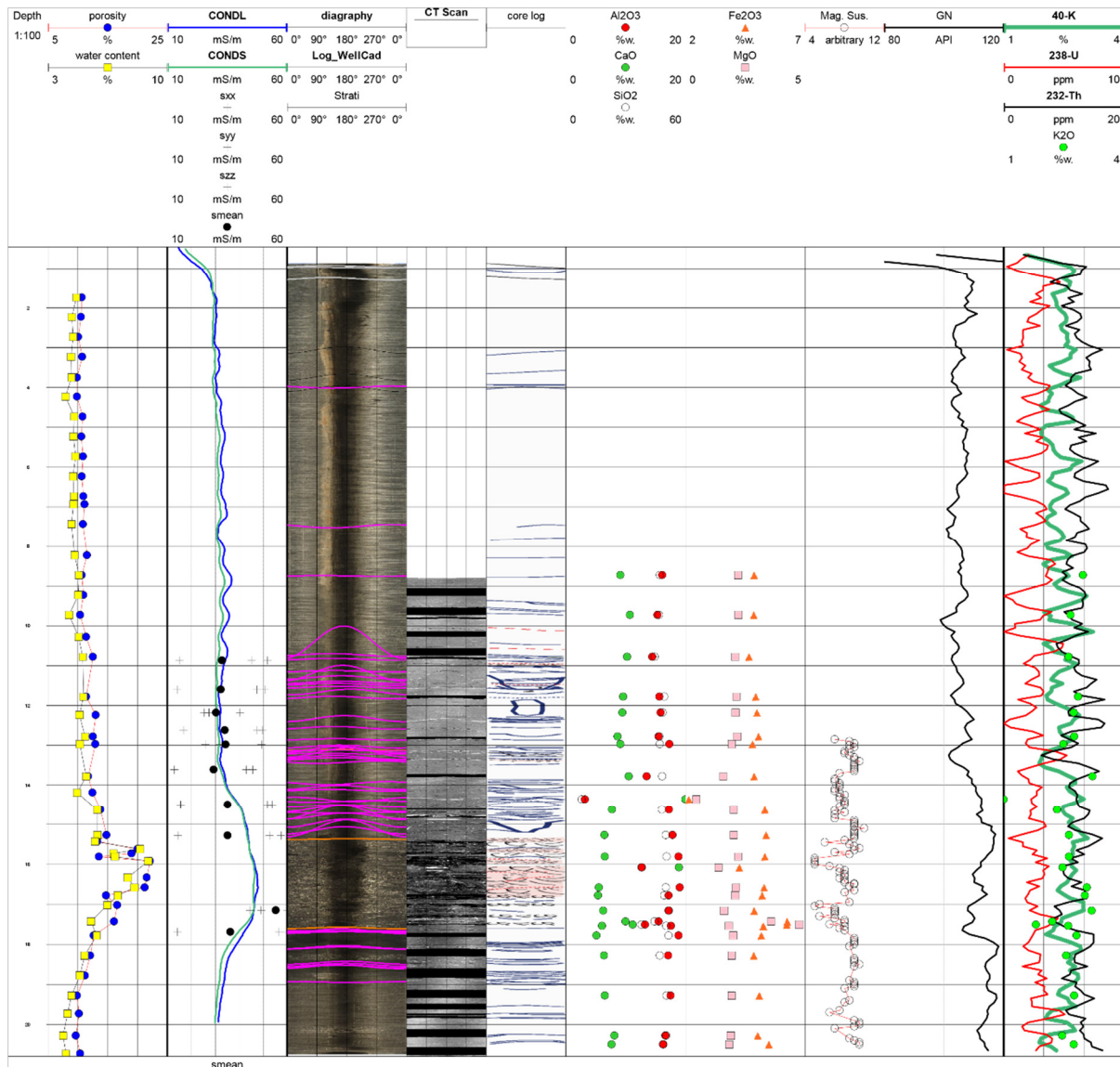
Coordonnées en Lambert III  
X (m) 654270.75  
Y (m) 187263.07  
Z (m) 516.32  
elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.  
Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 7 : Fiche de puits – S5 – aspect pétrophysique

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole S5

Spud date 29/05/13

drilled length (m) 20.1  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 83.96  
mean dip (°) 38.91

Coordonnées en Lambert III

X (m) 654272.98

Y (m) 187270.35

Z (m) 516.41

elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

GN : Gamma naturel

CONDS : Conductivité court espacement

CONDL : Conductivité long espacement

ILS : Résistivité par induction court espacement

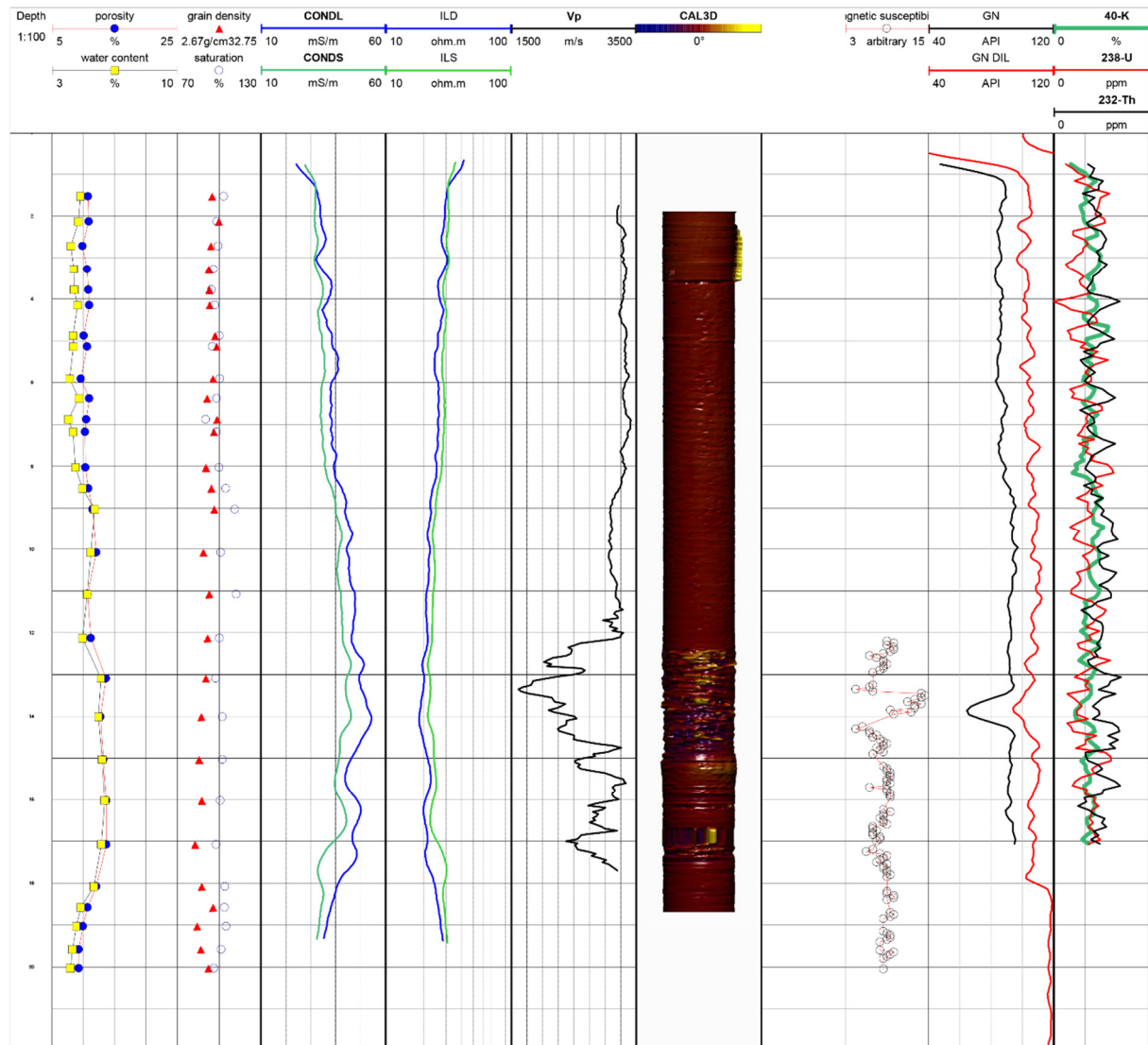
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.

La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.

Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.





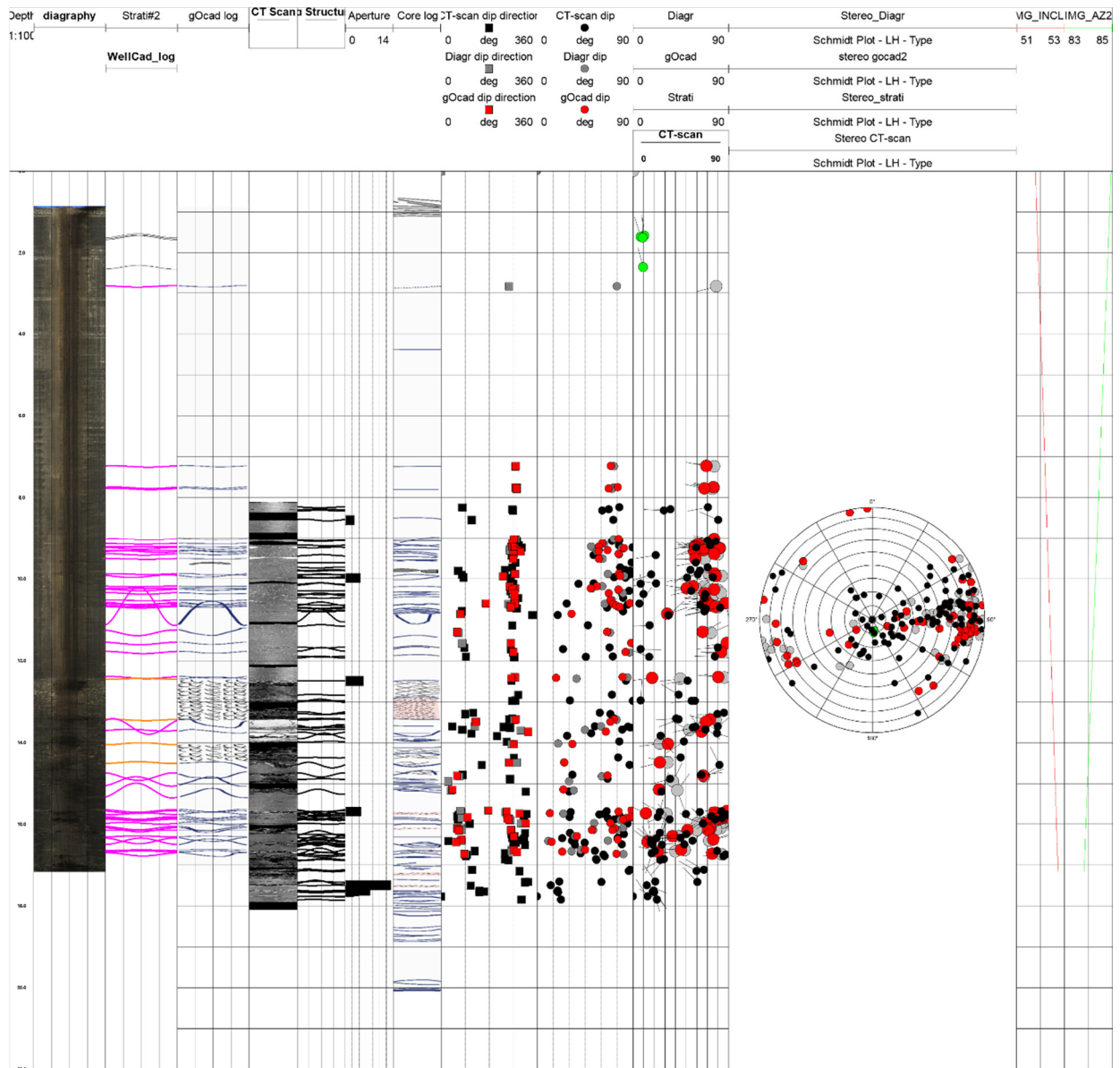
## Annexe 8 : Fiche de puits – S5 – aspect structural

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

Hole S5  
Spud date 29/05/13

drilled length (m) 20.1  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 83.96  
mean dip (°) 38.91

Coordonnées en Lambert III  
X (m) 654272.98  
Y (m) 187270.35  
Z (m) 516.41  
elevation above tunnel floor (m) 0.46



## Annexe 9 : Fiche de puits – S5 - résumé

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

Hole S5

Spud date 29/05/13

drilled length (m) 20.1  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 83.96  
mean dip (°) 38.91

#### Coordonnées en Lambert III

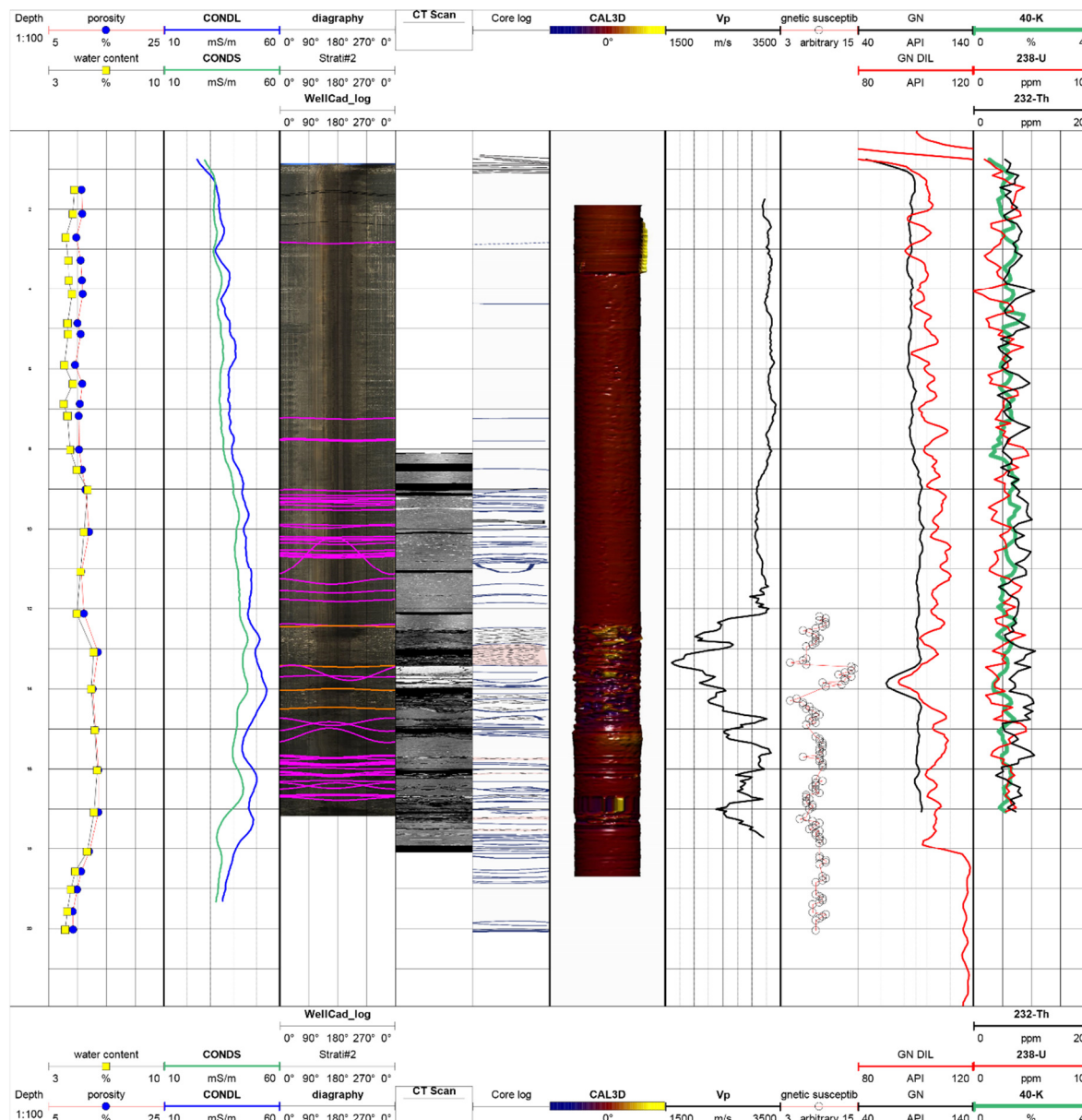
X (m) 654272.98  
Y (m) 187270.35  
Z (m) 516.41  
elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.  
Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 10 : Fiche de puits – S4 – aspect pétrophysique

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

Hole S4

Spud date 06/06/13

drilled length (m) 31.16  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 82.54  
mean dip (°) 31.16

#### Coordonnées en Lambert III

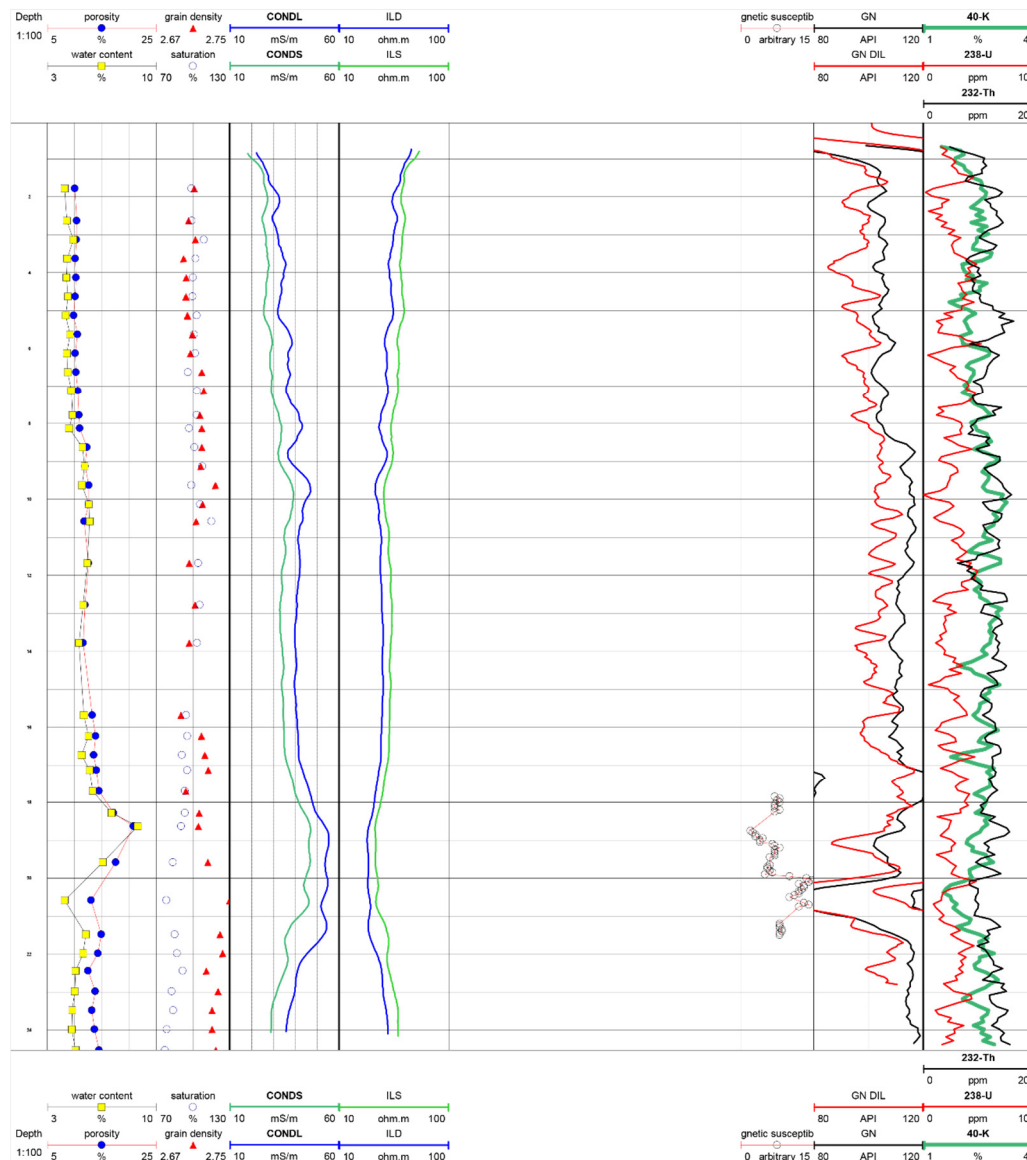
X (m) 654268.58  
Y (m) 187255.86  
Z (m) 516.2  
elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.  
Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 11 : Fiche de puits – S4 – aspect structural

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

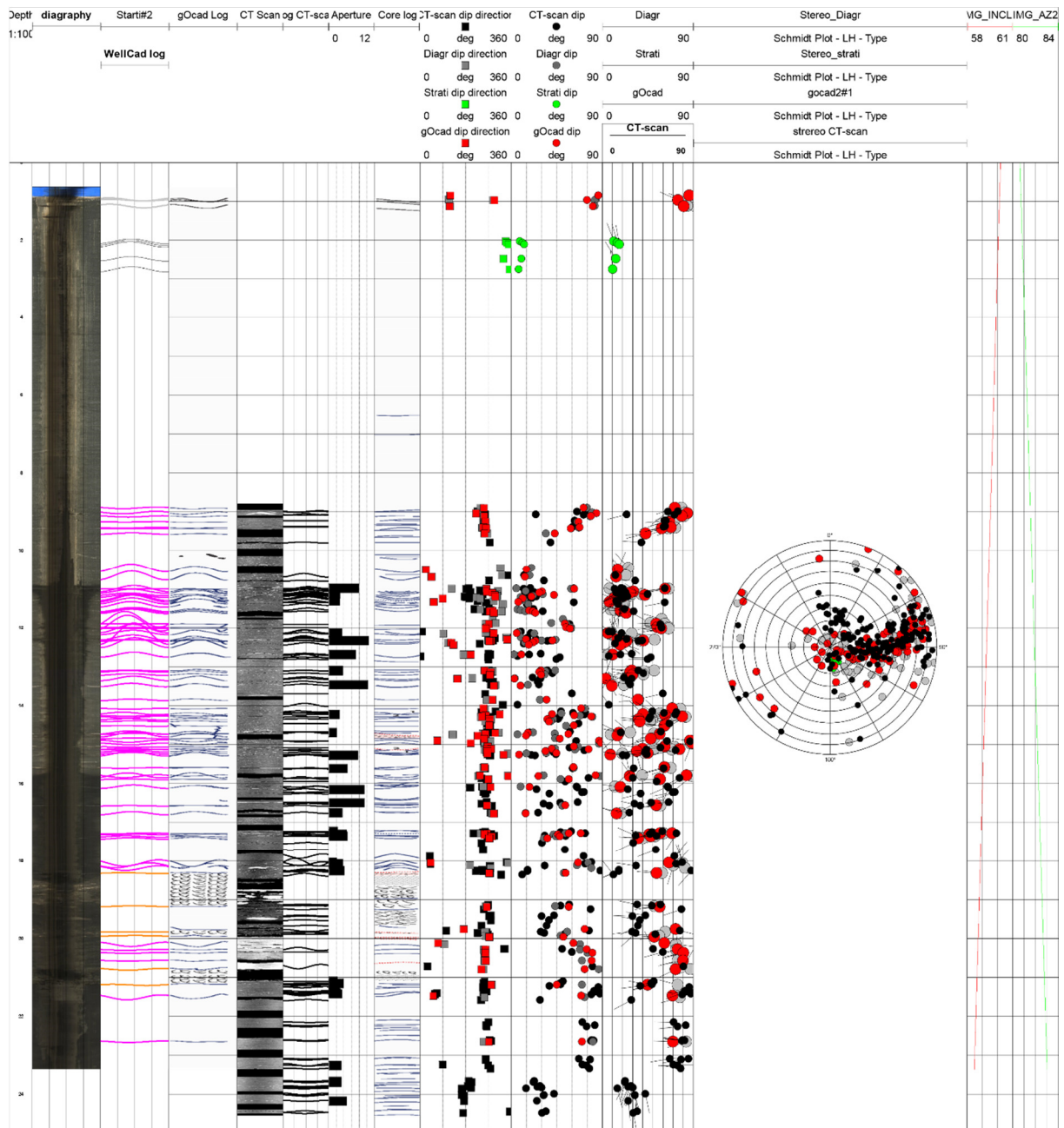
Hole S4

Spud date 06/06/13

drilled length (m) 31.16  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 82.54  
mean dip (°) 31.16

#### Coordonnées en Lambert III

X (m) 654268.58  
Y (m) 187255.86  
Z (m) 516.2  
elevation above tunnel floor (m) 0.46





## Annexe 12 : Fiche de puits – S4 - résumé

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

Hole S4

Spud date 06/06/13

drilled length (m) 31.16  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 82.54  
mean dip (°) 31.16

#### Coordonnées en Lambert III

X (m) 654268.58  
Y (m) 187255.86  
Z (m) 516.2  
elevation above tunnel floor (m) 0.46

### LEGENDE

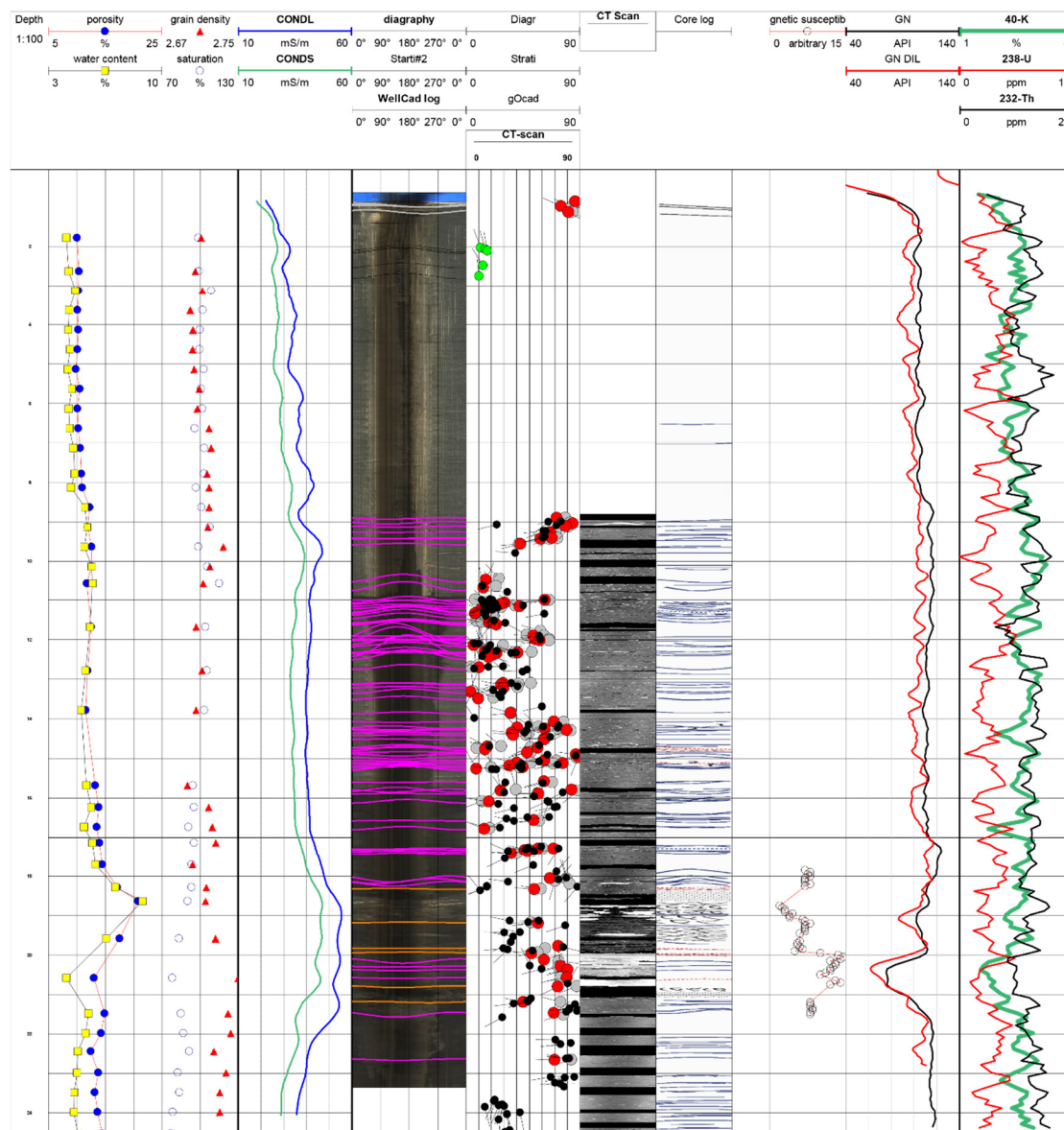
GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.

La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.

Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



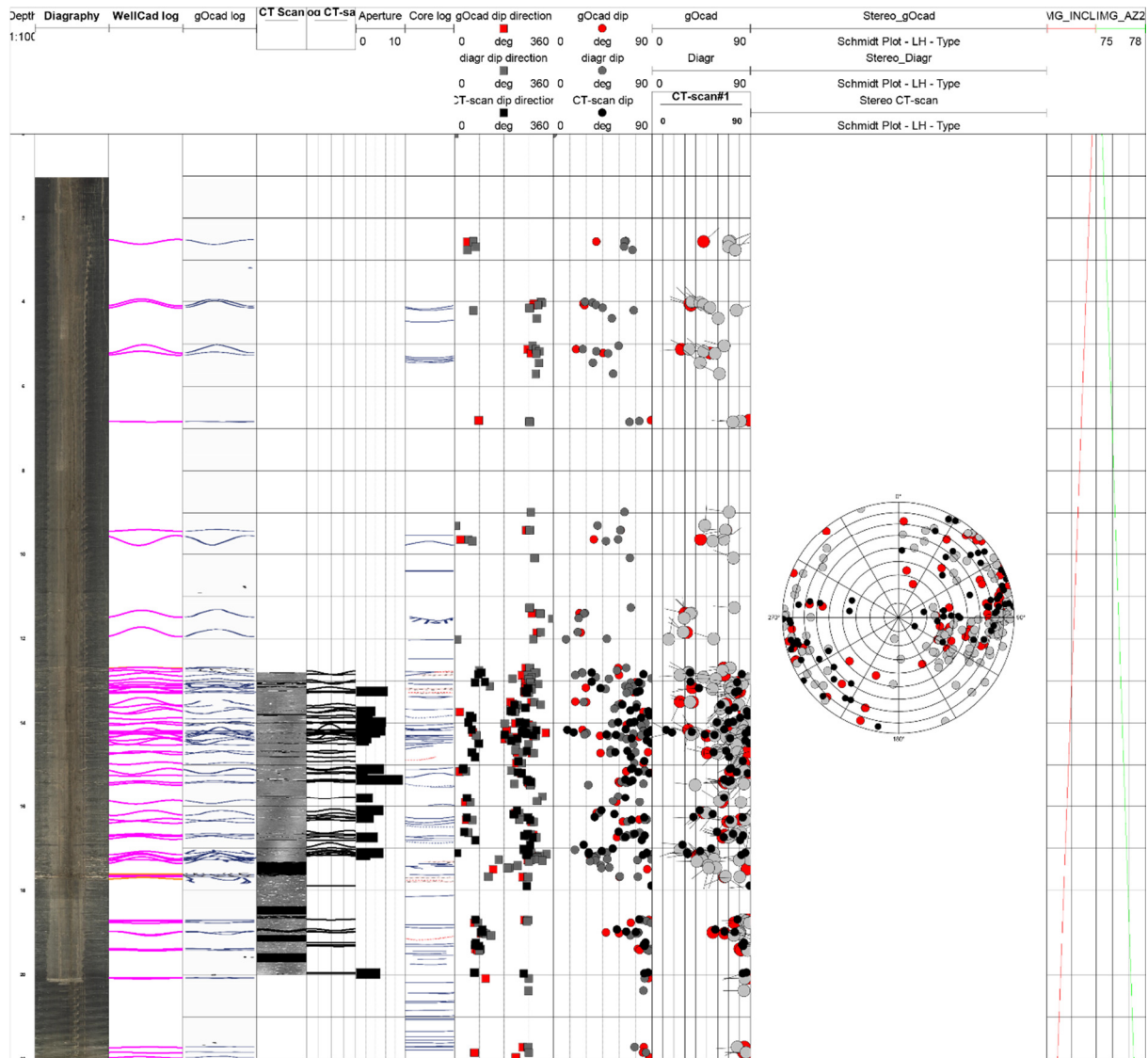
## Annexe 13 : Fiche de puits – S2 – aspect structural

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole S2  
Spud date 13/06/13

drilled length (m) 22.06  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 77.3  
mean dip (°) 1.4

Coordonnées en Lambert III  
X (m) 654268.69  
Y (m) 187255.84  
Z (m) 517.21  
elevation above tunnel floor (m) 1.47



## Annexe 14 : Fiche de puits – S2 – aspect pétrophysique

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole S2  
Spud date 13/06/13

drilled length (m) 22.06  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 77.3  
mean dip (°) 1.4

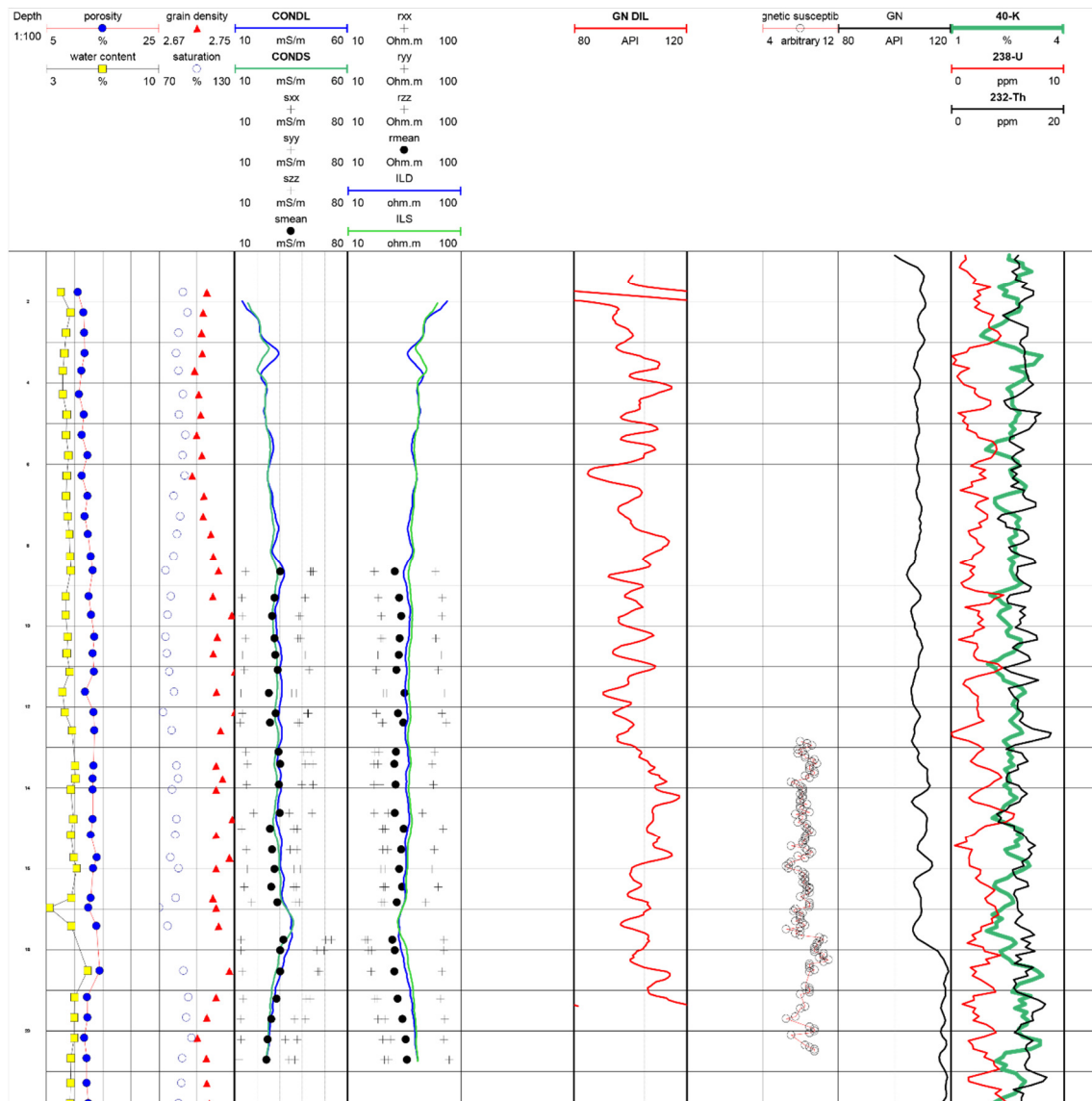
Coordonnées en Lambert III  
X (m) 654268.69  
Y (m) 187255.84  
Z (m) 517.21  
elevation above tunnel floor (m) 1.47

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.  
Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 15 : Fiche de puits – R – aspect pétrophysique

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole R

Spud date 04/09/13

drilled length (m) 24.8  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78.85  
mean dip (°) 20.6

Coordonnées en Lambert III

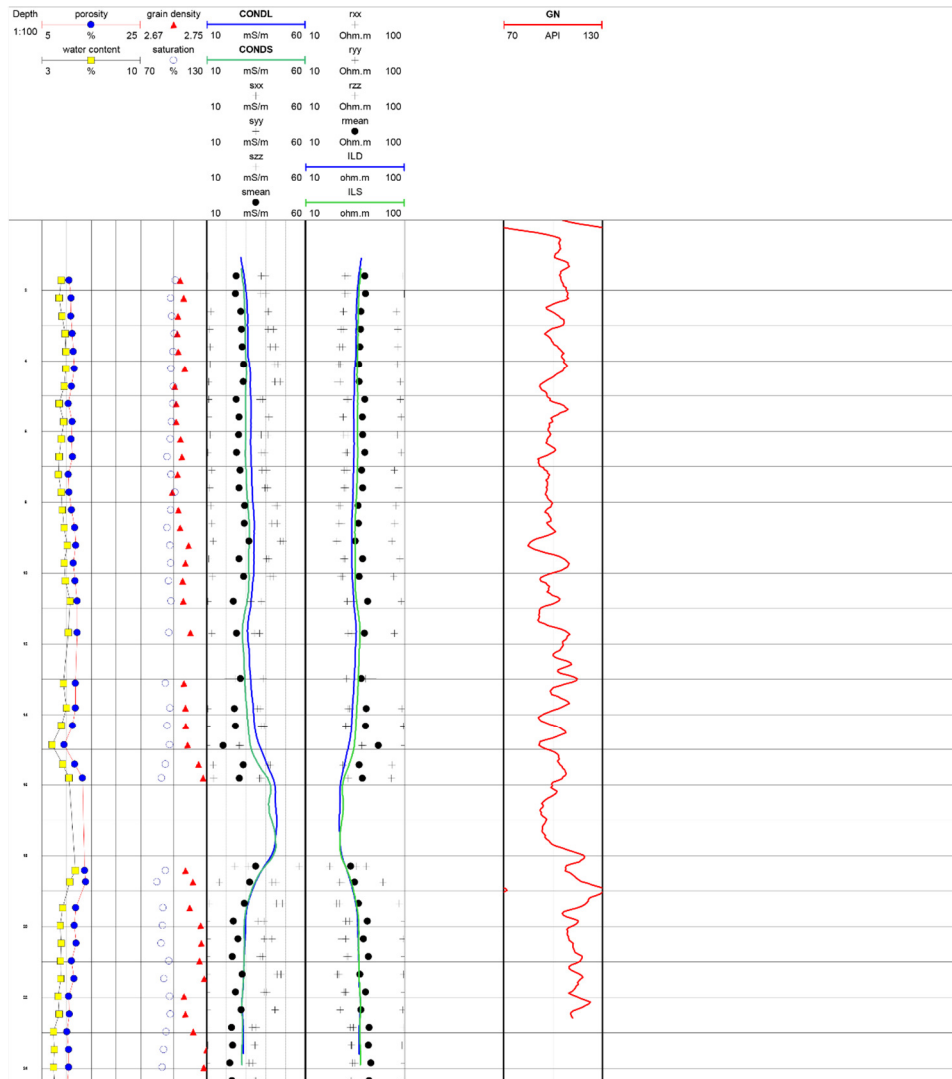
X (m) 654270.46  
Y (m) 187261.8  
Z (m) 517.33  
elevation above tunnel floor (m) 1.42

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.  
Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 16 : Fiche de puits – R – aspect structural

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

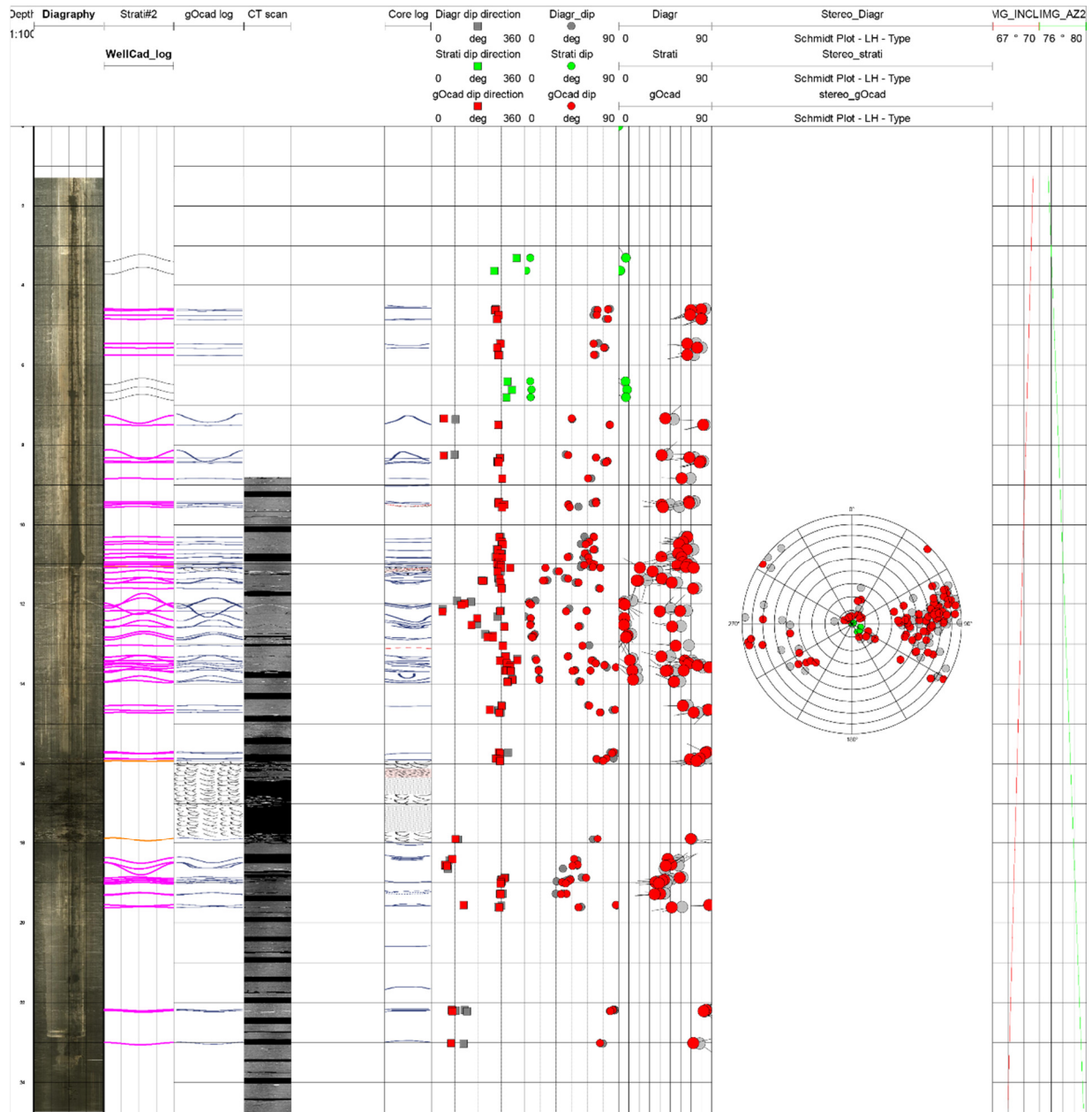
Hole R

Spud date 04/09/13

drilled length (m) 24.8  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78.85  
mean dip (°) 20.6

#### Coordonnées en Lambert III

X (m) 654270.46  
Y (m) 187261.8  
Z (m) 517.33  
elevation above tunnel floor (m) 1.42





## Annexe 17 : Fiche de puits – R - résumé

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

Hole R

Spud date 04/09/13

drilled length (m) 24.8  
borehole diameter (mm) 76  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 78.85  
mean dip (°) 20.6

#### Coordonnées en Lambert III

X (m) 654270.46  
Y (m) 187261.8  
Z (m) 517.33  
elevation above tunnel floor (m) 1.42

### LEGENDE

GN : Gamma naturel

CONDS : Conductivité court espacement

CONDL : Conductivité long espacement

ILS : Résistivité par induction court espacement

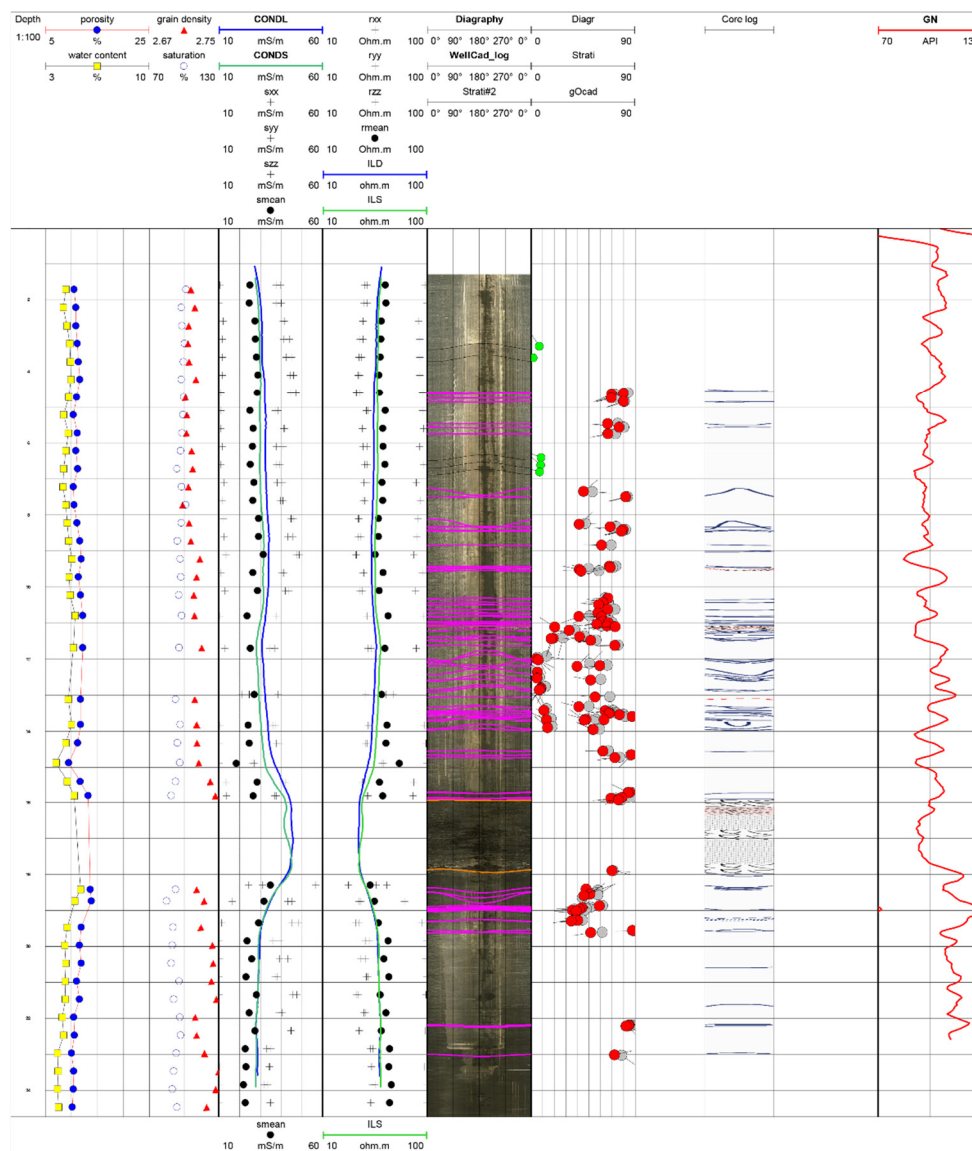
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.

La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.

Les logs "short space" ont été shiftés de -0.15 cm, tandis que les "long space" ont été shiftés de +0.15 cm pour compenser le shift entre les deux mesures, possiblement lié au pendage relatif entre le forage et la géologie.



## Annexe 18 : Fiche de puits – M – aspect géophysique

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole M

Spud date 09/09/13

drilled length (m) 22.82  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 75.86  
mean dip (°) 22.21

Coordonnées en Lambert III

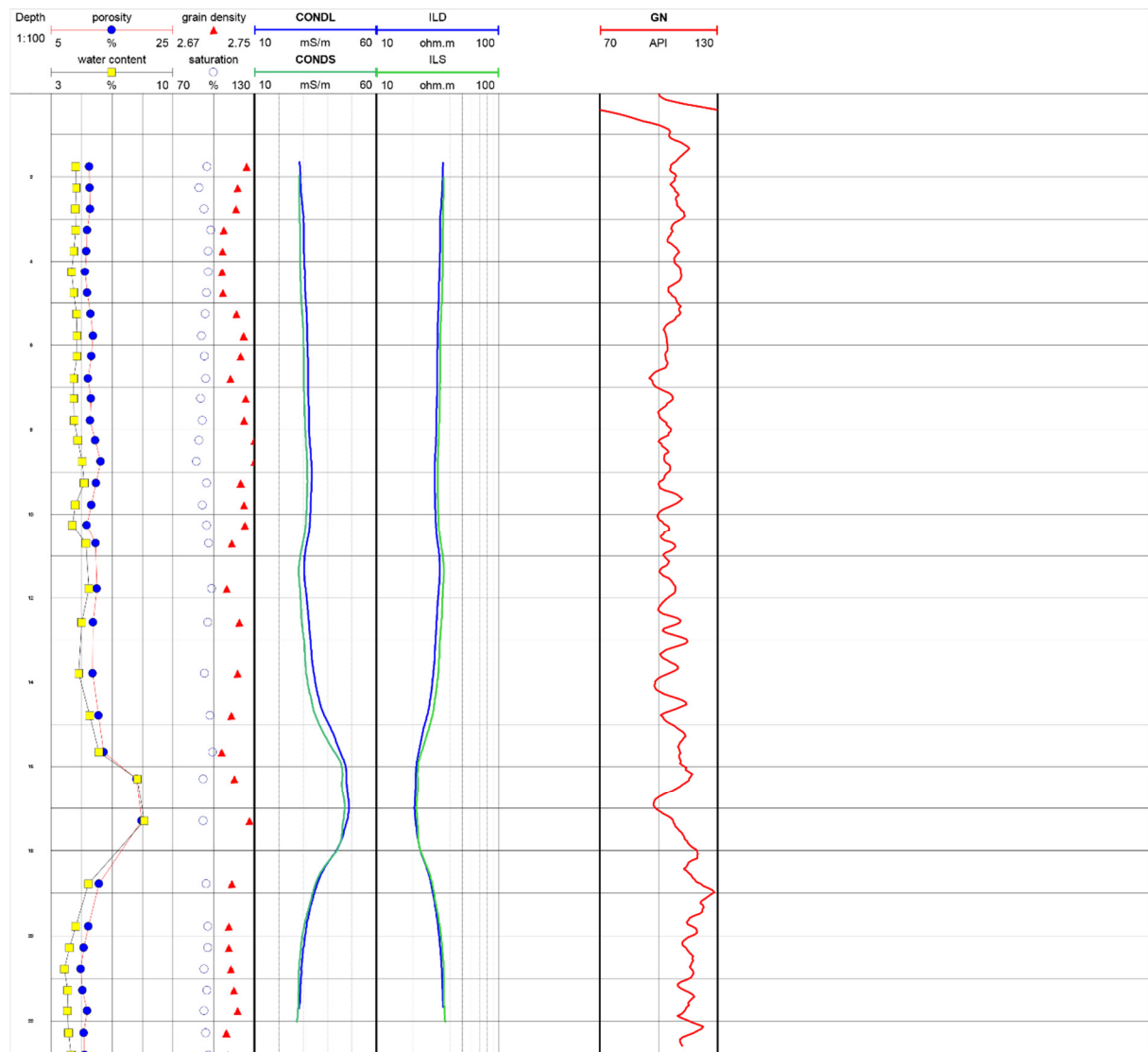
X (m) 654270.43  
Y (m) 187261.87  
Z (m)  
elevation above tunnel floor (m) 0.42

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.



## Annexe 19 : Fiche de puits – M – aspect structural

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

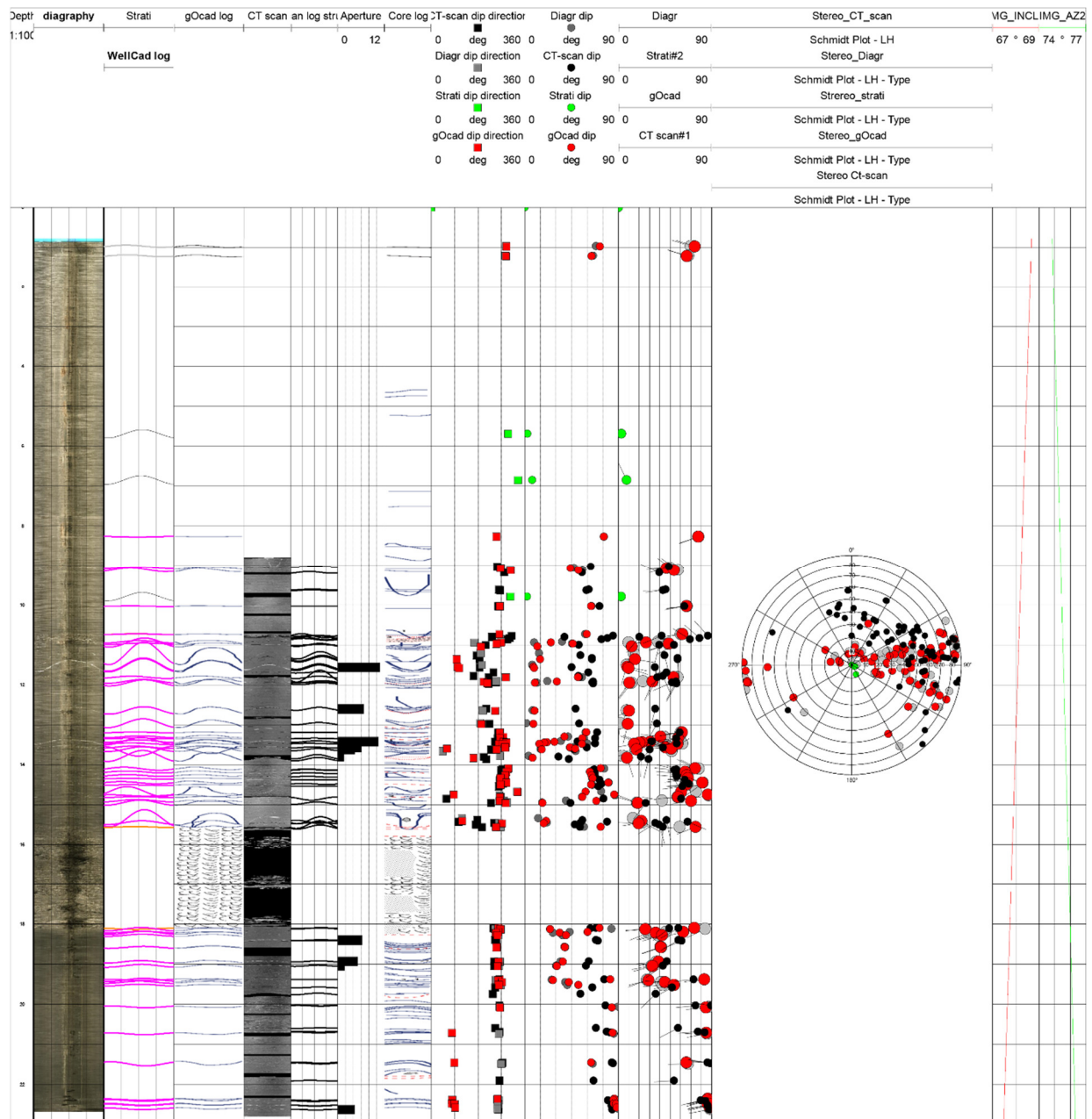
Hole M

Spud date 09/09/13

drilled length (m) 22.82  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (\*) 75.86  
mean dip (\*) 22.21

#### Coordonnées en Lambert III

X (m) 654270.43  
Y (m) 187261.87  
Z (m )  
elevation above tunnel floor (m) 0.42





## Annexe 20 : Fiche de puits – M - résumé

Tournemire IRSN Underground Laboratory  
Fluids and Faults Project

Hole M

Spud date 09/09/13

drilled length (m) 22.82  
borehole diameter (mm) 92  
core diameter (mm) 53  
mean azimuth (°) 75.86  
mean dip (°) 22.21

Coordonnées en Lambert III

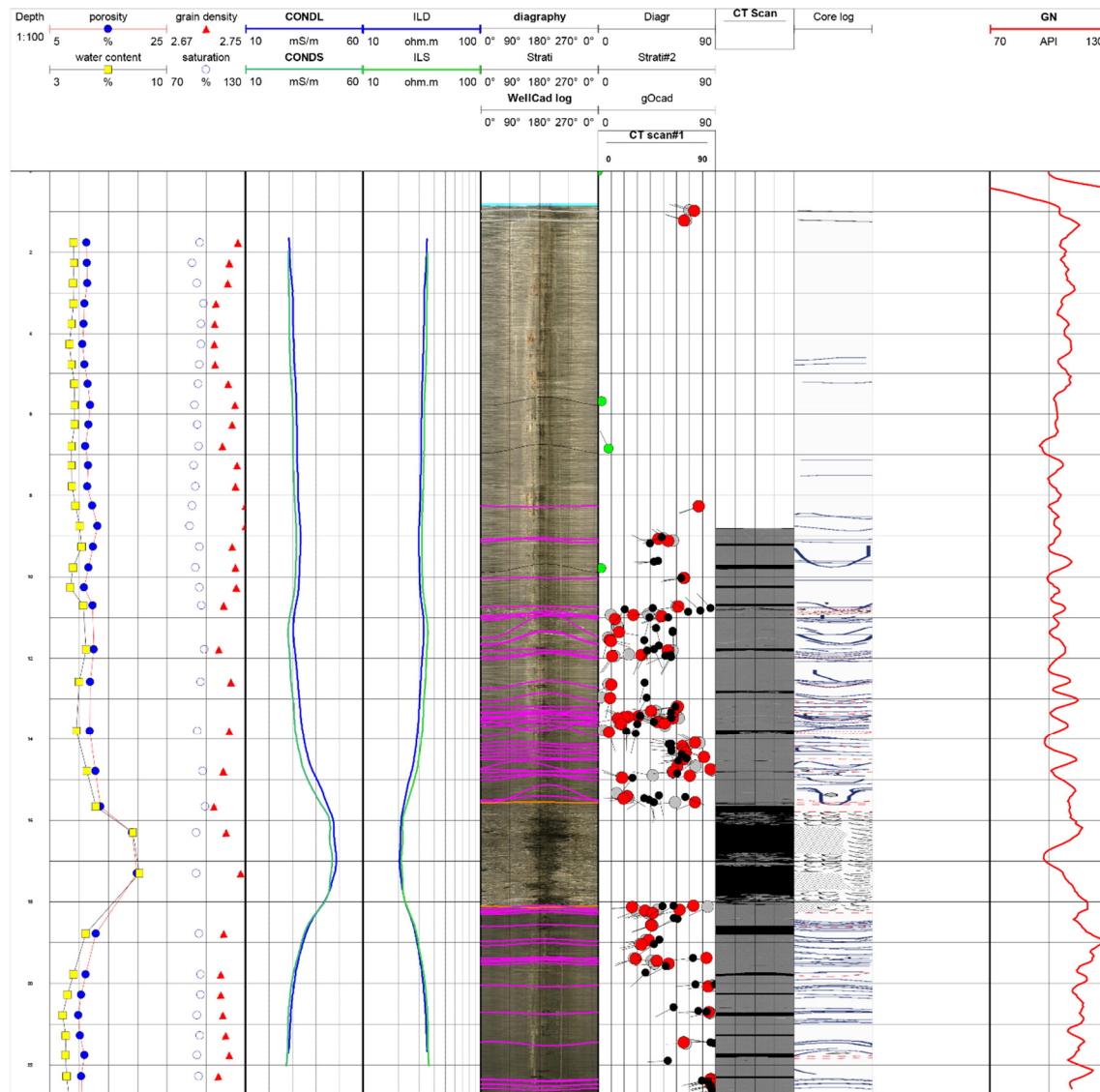
X (m) 654270.43  
Y (m) 187261.87  
Z (m)  
elevation above tunnel floor (m) 0.42

### LEGENDE

GN : Gamma naturel  
CONDS : Conductivité court espacement  
CONDL : Conductivité long espacement  
ILS : Résistivité par induction court espacement  
ILD : Résistivité par induction long espacement

### COMMENTAIRES

La gamme de mesure va de 0.2 à 100 ohm.m en mesures absolues, et de 100 à 200 ohm.m en mesures relatives.  
La résolution verticale de l'outil est de 50 cm pour l'espacement court, et de 80 cm pour l'espacement long.



## Annexe 21 : Fiche de puits – INJ – aspect structural

### Tournemire IRSN Underground Laboratory Fluids and Faults Project

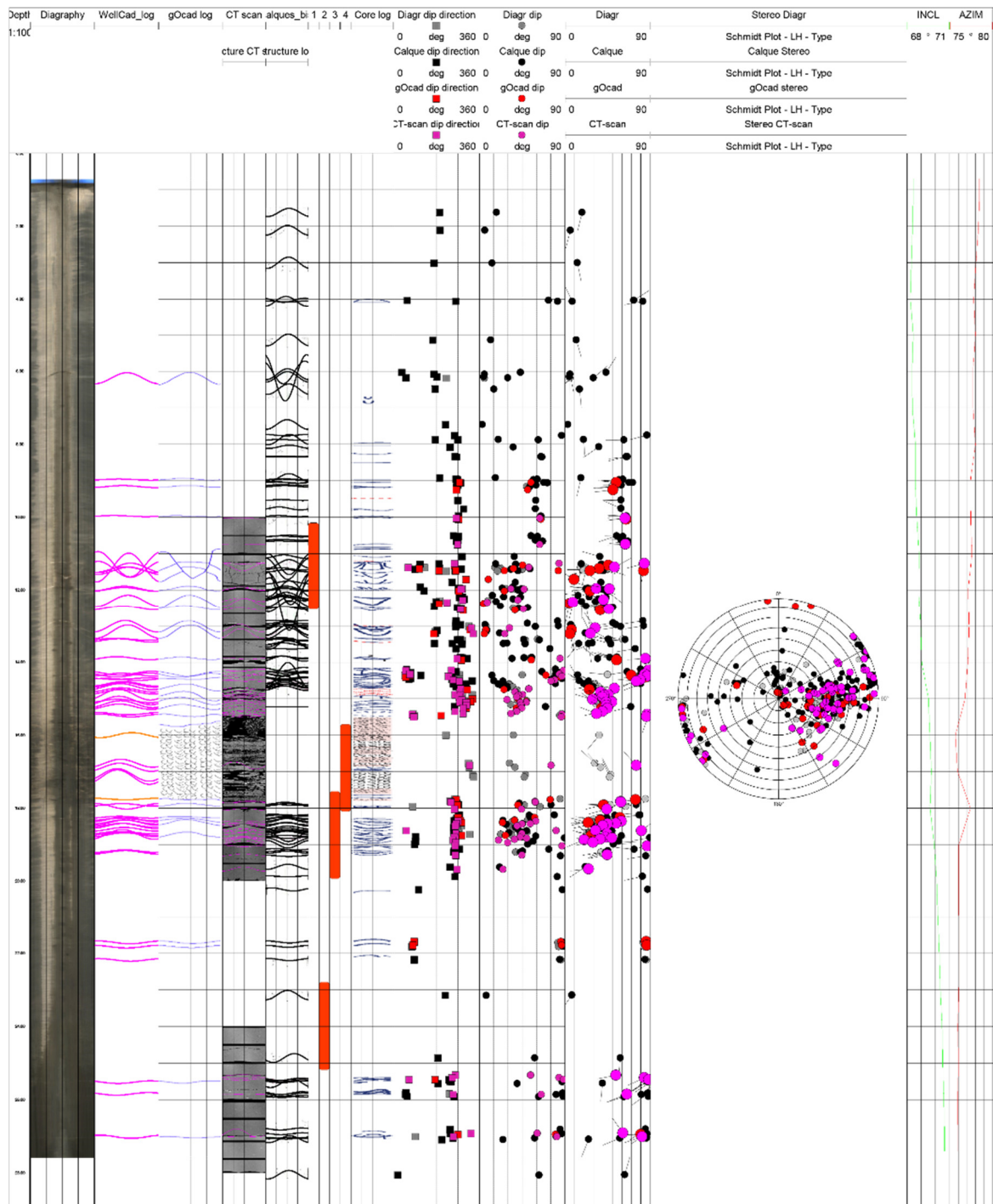
Hole INJ

Spud date 18/02/14

drilled length (m) 30  
borehole diameter (mm) 146  
core diameter (mm) 119  
mean azimuth (°) 78.5  
mean dip (°) 21.17

#### Coordonnées en Lambert III

X (m)  
Y (m)  
Z (m)  
elevation above tunnel floor (m) 0.9



## Annexe 22 : Planning Essai 1 – 1/5

| Jour       | Objet testé    | Orientation par rapport à l'axe du forage (N80°) | Distance à la tête de forage/trajecto (m) | Type de débit | Type d'essai          | Numéro essai | Heure début (UTC) | Heure fin (UTC) |
|------------|----------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>P= 10-12 Bar | E1PULS1      | 15h44             | 16h03           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>P= 10-12 Bar | E1PULS2      | 16h06             | 16h15           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>P= 10-12 Bar | E1PULS3      | 16h17             | 16h25           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>P= 10-12 Bar | E1PULS4      | 16h30             | 16h37           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>P= 10-12 Bar | E1PULS5      | 16h38             | 16h45           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>HP (17 Bar)  | E1PULS6      | 16h48             | 16h57           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>HP (20 Bar)  | E1PULS7      | 17h02             | 17h07           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>HP (20 Bar)  | E1PULS8      | 17h09             | 17h12           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100°                                            | 11,35                                     | petit débit   | pulse<br>HP (20 Bar)  | E1PULS9      | 17h17             | 17h21           |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |
|            |                |                                                  |                                           |               |                       |              |                   |                 |

## Annexe 23 : Planning Essai 1 – 2/5

| Commentaires |                                                                                            | coup de<br>masse | d'échantillonnage<br>(Hertz) |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Horaire      | Détails/Protocole                                                                          |                  |                              |
| 15h29        | P-T-2-P (pression dans la chambre d'injection)=1,668 Bar                                   |                  | 500                          |
| 15h29        | P vanne de fond de trou (pression de la formation+ colonne d'eau jusqu'à la pompe)=1,6 Bar |                  |                              |
| 15h40        | Gonflage des packers=45 Bar P-T-2-P=1,708 Bar                                              |                  |                              |
| 15h41-15h42  | Encrage des vérins                                                                         |                  |                              |
| 15h44        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  |                              |
| 15h46        | Off set sur les capteurs de déformation P-T-2-P=1,716 Bar                                  |                  |                              |
| 15h59        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h00        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                      |                  |                              |
| 16h00        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=10-11 Bar                                    |                  |                              |
| 16h00-16h03  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 16h03        | Ré-Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=2,553 Bar                                 |                  |                              |
| 16h06        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 16h10        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h10        | Ouverture de la vanne de fond de trou (7 L/min)                                            |                  |                              |
| 16h12        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  |                              |
| 16h12-16h15  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 16h15        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=2,556 Bar                                 |                  |                              |
| 16h17        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 16h20        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h22        | Ouverture de la vanne de fond de trou (1,3 L/min)                                          |                  |                              |
| 16h23        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=11,651 Bar                                   |                  |                              |
| 16h23-16h25  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 16h25        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=2,503 Bar                                 |                  |                              |
| 16h30        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 16h30        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h31        | Ouverture de la vanne de fond de trou (1,3 L/min)                                          |                  |                              |
| 16h31        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=10,111 Bar                                   |                  |                              |
| 16h31-16h37  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 16h37        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=2,495 Bar                                 |                  |                              |
| 16h38        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 16h40        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h41        | Ouverture de la vanne de fond de trou (7 L/min)                                            |                  |                              |
| 16h42        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=10,875 Bar                                   |                  |                              |
| 16h42-16h45  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 16h45        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=2,812 Bar                                 |                  |                              |
| 16h48        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 16h49        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 16h50        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                      |                  |                              |
| 16h50        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=16-17 Bar                                    |                  |                              |
| 16h50-16h57  | Stabilisation de la pression dans la chambre pb visualisation P-T-2-P                      |                  |                              |
| 16h57        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                  |                              |
| 17h02        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=2,24 Bar                                     |                  | 500                          |
| 17h04        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 17h04        | Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-Pmax=24 Bar                                    |                  |                              |
| 17h05        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=13,024 Bar                                   |                  |                              |
| 17h05-17h07  | Stabilisation de la pression dans la chambre pb visualisation P-T-2-P                      |                  |                              |
| 17h07        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                  |                              |
| 17h09        | Fermeture de la vanne du fond de trou                                                      |                  | 500                          |
| 17h09        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 17h10        | Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-Pmax=21-22 Bar                                 |                  |                              |
| 17h10        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=13,024 Bar                                   |                  |                              |
| 17h10-17h12  | Stabilisation de la pression dans la chambre pb visualisation P-T-2-P                      |                  |                              |
| 17h12        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                  |                              |
| 17h17        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=2,510 Bar                                    |                  | 500                          |
| 17h18        | Allumage de la pompe                                                                       |                  |                              |
| 17h18        | Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-Pmax=22 Bar                                    |                  |                              |
| 17h19        | Fermeture de la vanne du fond de trou P-T-2-P=11,608 Bar                                   |                  |                              |
| 17h19-17h21  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                               |                  |                              |
| 17h21        | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                  |                              |

## Annexe 24 : Planning Essai 1 – 3/5

|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|------------|----------------|-------|-------|-------------|----------------------------------------|----------|-------|-------|
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | pulse<br>BP (5 Bar)                    | E1PULS10 | 17h25 | 17h28 |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | pulse<br>BP (5 Bar)                    | E1PULS11 | 17h30 | 17h33 |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | pulse<br>BP (5 Bar)                    | E1PULS12 | 17h36 | 17h40 |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | palier<br>Ascendant                    | E1PAL1   | 17h41 | 17h54 |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
| 07/04/2014 | Faïlle lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | Pression cte<br>longue durée<br>10 Bar | E1P-CTE1 | 18h26 | 21h45 |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                        |          |       |       |

## Annexe 25 : Planning Essai 1 – 4/5

|             |                                              |                   |            |     |
|-------------|----------------------------------------------|-------------------|------------|-----|
| 17h25       | Fermeture de la vanne du fond de trou        | P-T-2-P=2,511 Bar |            | 500 |
| 17h26       | Allumage de la pompe                         |                   |            |     |
| 17h26       | Ouverture de la vanne de fond de trou        | P-T-2-Pmax=6 Bar  |            |     |
| 17h26       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            |     |
| 17h26-17h28 | Stabilisation de la pression dans la chambre |                   |            |     |
| 17h28       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou     |                   |            |     |
| 17h30       | Fermeture de la vanne du fond de trou        | P-T-2-P=2,375 Bar |            | 500 |
| 17h31       | Allumage de la pompe                         |                   |            |     |
| 17h31       | Ouverture de la vanne de fond de trou        | P-T-2-Pmax=6 Bar  |            |     |
| 17h32       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            |     |
| 17h32-17h33 | Stabilisation de la pression dans la chambre |                   |            |     |
| 17h33       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou     | P-T-2-P=2,338 Bar |            |     |
| 17h36       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            | 500 |
| 17h36       | Allumage de la pompe                         |                   |            |     |
| 17h36       | Ouverture de la vanne de fond de trou        | P-T-2-Pmax=6 Bar  |            |     |
| 17h37       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            |     |
| 17h37-17h40 | Stabilisation de la pression dans la chambre |                   |            |     |
| 17h40       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou     |                   |            |     |
| 17h41       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            | 500 |
| 17h41       | Allumage de la pompe                         |                   |            |     |
| 17h42       | Ouverture de la vanne de fond de trou        |                   |            |     |
| 17h42       | P-T-2-Pmax=3 Bar                             |                   |            |     |
| 17h43       | P-T-2-Pmax=6 Bar                             |                   |            |     |
| 17h44       | P-T-2-Pmax=10 Bar                            |                   |            |     |
| 17h45       | P-T-2-Pmax=12 Bar                            |                   |            |     |
| 17h47       | P-T-2-Pmax=14 Bar                            |                   |            |     |
| 17h48       | P-T-2-Pmax=16 Bar (9,38 L/min)               |                   |            |     |
| 17h50       | P-T-2-Pmax=17 Bar                            |                   |            |     |
| 17h52       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            |     |
| 17h52-17h54 | Stabilisation de la pression dans la chambre |                   |            |     |
| 17h54       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou     | P-T-2-P=3 Bar     |            |     |
| 18h26       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            | 500 |
| 18h28       | Allumage de la pompe                         |                   |            |     |
| 18h28       | Ouverture de la vanne de fond de trou        |                   |            |     |
| 18h28-18h43 | Pb de visualisation P/t                      |                   |            |     |
| 18h44       | P-T-2-P=12,355 Bar                           |                   |            |     |
| 18h49       | P-T-2-P=12,551 Bar                           |                   |            |     |
| 18h54       | P-T-2-P=12,840 Bar                           |                   | 18h53 (FP) |     |
| 18h59       | P-T-2-P=13,036 Bar                           |                   |            |     |
| 19h04       | P-T-2-P=13,240 Bar                           |                   |            |     |
| 19h09       | P-T-2-P=13,572 Bar                           |                   |            |     |
| 19h19       | P-T-2-P=13,433 Bar                           |                   |            |     |
| 19h24       | P-T-2-P=13,421 Bar                           |                   |            |     |
| 19h29       | P-T-2-P=13,406 Bar                           |                   |            |     |
| 19h34       | P-T-2-P=13,363 Bar                           |                   |            |     |
| 19h39       | P-T-2-P=13,566 Bar                           |                   |            |     |
| 19h44       | P-T-2-P=13,390 Bar                           |                   |            |     |
| 19h49       | P-T-2-P=13,559 Bar                           |                   |            |     |
| 19h54       | P-T-2-P=13,339 Bar                           |                   | 19h55 (FP) |     |
| 21h02       | P-T-2-P=13,670 Bar                           |                   |            |     |
| 21h04       | P-T-2-P=13,640 Bar                           |                   |            |     |
| 21h10       | P-T-2-P=13,777 Bar                           |                   |            |     |
| 21h17       | P-T-2-P=13,688 Bar                           |                   |            |     |
| 21h20       | P-T-2-P=13,713 Bar                           |                   |            |     |
| 21h24       | P-T-2-P=13,603 Bar                           |                   |            |     |
| 21h29       | P-T-2-P=13,779 Bar                           |                   |            |     |
| 21h29       | Fermeture de la vanne du fond de trou        |                   |            |     |
| 21h29-21h45 | Stabilisation de la pression dans la chambre |                   |            |     |
| 21h34       | P-T-2-P=9,780 Bar                            |                   | 21h37 (FP) |     |
| 21h39       | P-T-2-P=7,694 Bar                            |                   |            |     |
| 21h44       | P-T-2-P=6,261 Bar                            |                   |            |     |
| 21h45       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou     |                   |            |     |



## Annexe 26 : Planning Essai 1 – 5/5

|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|------------|----------------|-------|-------|-------------|----------------------------------------------------|----------|-------|-------|
| 07/04/2014 | Faille lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | Pression cte<br>longue durée<br>14-15 Bar          | E1P-CTE2 | 21h51 | 22h27 |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
| 07/04/2014 | Faille lustrée | N100° | 11,35 | petit débit | Palier 1-2 min<br>jusqu'à 20 Bar<br>Ascendant/Desc | E1PAL2   | 22h28 | 23h13 |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |
|            |                |       |       |             |                                                    |          |       |       |

|             |                                                 |                   |            |     |
|-------------|-------------------------------------------------|-------------------|------------|-----|
| 21h51       | Fermeture de la vanne du fond de trou           | P-T-2-T=2,173 bar |            | 500 |
| 21h53       | Allumage de la pompe                            |                   |            |     |
| 21h53       | Ouverture de la vanne de fond de trou (2 L/min) |                   |            |     |
| 21h55       | P-T-2-P=15,347 Bar                              |                   |            |     |
| 22h00       | P-T-2-P=14,997 Bar (1,8-1,9 L/min)              |                   |            |     |
| 22h05       | P-T-2-P=15,049 Bar (1,8 L/min)                  |                   |            |     |
| 22h10       | P-T-2-P=15,068 Bar                              |                   |            |     |
| 22h15       | P-T-2-P= 15,102 Bar                             |                   |            |     |
| 22h20       | P-T-2-P=15,176 Bar                              |                   |            |     |
| 22h25       | P-T-2-P=15,224 Bar                              |                   | 22h22 (FP) |     |
| 22h25       | Fermeture de la vanne du fond de trou           |                   |            |     |
| 22h25-22h27 | Stabilisation de la pression dans la chambre    |                   |            |     |
| 22h27       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou        | P-T-2-P=3 Bar     |            |     |
| 22h28       | Fermeture de la vanne du fond de trou           |                   |            | 500 |
| 22h36       | Allumage de la pompe                            |                   |            |     |
| 21h37       | Ouverture de la vanne de fond de trou           | P-T-2-P=7,851 Bar |            |     |
| 22h39       | P-T-2-P=6,484 Bar                               |                   |            |     |
| 22h45       | P-T-2-P=17,228 Bar (5 L/min)                    |                   |            |     |
| 22h50       | P-T-2-P=6,701 Bar (14-14,5 L/min)               |                   |            |     |
| 22h55       | P-T-2-P=13,651 Bar                              |                   |            |     |
| 22h59       | P-T-2-P= 13,456 Bar                             |                   |            |     |
| 22h59       | Fermeture de la vanne du fond de trou           |                   |            |     |
| 22h59-23h04 | Stabilisation de la pression dans la chambre    |                   |            |     |
| 23h04       | Ré-ouverture de la vanne de fond de trou        | P-T-2-P=2,207 Bar | 23h03 (FP) |     |
| 23h09       | Désancrage des vérins                           |                   |            |     |
| 23h13       | Léger dégonflage des packers                    |                   |            |     |

## Annexe 27 : Planning Essai 2 – 1/4

| Jour       | Objet testé                                              | Orientation par rapport à l'axe du forage (N80°) | Distance à la tête de forage/trajecto (m) | Type de débit | Type d'essai                                           | Numéro essai     | Heure début (UTC) | Heure fin (UTC) |
|------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|
| 08/04/2014 | Dégonflement des packers et repositionnement de la sonde |                                                  |                                           |               |                                                        |                  | matin-après midi  |                 |
| 08/04/2014 | Zone saine                                               |                                                  | 24                                        | Grand débit   | saturation de la chambre                               |                  | 21h54             | 22h03           |
| 08/04/2014 | Zone saine                                               |                                                  | 24                                        | Grand débit   | pulse elastique 5 Bar                                  | E2PULS1          | 22h03             | 22h07           |
| 08/04/2014 | Zone saine                                               |                                                  | 24                                        | Grand débit   | pulse elastique 5 Bar                                  | E2PULS2<br>Echec | 22h11             | 22h45           |
| 08/04/2014 | Zone saine                                               |                                                  | 24                                        | Grand débit   | pulse elastique 5 Bar<br>Pompe à main                  | E2PULS3          | 22h54             | 22h58           |
| 08/04/2014 | Zone saine                                               |                                                  | 24                                        | Grand débit   | L.O.T<br>Pompe à main<br>on pompe 1 min<br>repos 1 min | E2LOT1           | 23h03             | 23h47           |



## Annexe 28 : Planning Essai 2 – 2/4

| Commentaires |                                                                                                 | coup de masse | d'échantillonnage (Hertz) |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------------|
| Horaire      | Détails/Protocole                                                                               |               |                           |
| 8h28         | Dégonflage packers (P=15 Bar) P-T-2-P=1,9 Bar                                                   |               |                           |
| 8h35         | Bruits d'évacuation d'eau dans la chambre                                                       | 8h13 (FVx2)   |                           |
| 21h14        | Début du gonflage des packers P-T-2-P=1,533 Bar                                                 |               | 500                       |
| 21h27        | Packers gonflés à 49 Bar                                                                        |               |                           |
| 21h30        | P-T-2-P=1,531 Bar                                                                               |               |                           |
| 21h31-21h33  | Encrage des vérins                                                                              |               |                           |
| 21h33-21h38  | Problème de visualisation des données                                                           |               |                           |
| 21h39        | Augmentation de la pression des packers à 71 Bar P-T-2-P=1,537 Bar                              |               |                           |
| 21h41        | La pression des packers diminue (68 Bar)                                                        | 21h41 (FVx2)  |                           |
| 21h48        | Off set sur les capteurs de déformation                                                         |               |                           |
| 21h52        | La pression des packers varie entre (68-70 Bar)= variation de contrainte                        |               |                           |
| 21h53        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 21h54        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 21h54        | Allumage de la pompe (20 L/min, augmentation de la pression d'injection jusqu'à 15 Bar)         |               |                           |
| 21h56        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 21h58        | Fermeture de la vanne de fond de trou (débit revient à 0: saturation de la chambre d'injection) |               |                           |
| 21h58-22h03  | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection                                        |               |                           |
| 22h03        | Allumage de la pompe (pression d'injection à 5 Bar)                                             |               | 500                       |
| 22h06        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h06        | Fermeture de la vanne de fond de trou P-T-2-Pmax=1,4 Bar                                        |               |                           |
| 22h06-22h07  | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection                                        |               |                           |
| 22h07        | Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=1,163                                             |               |                           |
| 22h11        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               | 500                       |
| 22h11        | Allumage de la pompe (pression d'injection à 5 Bar)                                             |               |                           |
| 22h11        | Problème de bulles d'air coincé dans le tuyau de la pompe d'injection (1)                       |               |                           |
| 22h15        | Pression des packers à 68 Bar                                                                   |               |                           |
| 22h22-22h28  | On chasse l'air dans les tuyaux en les remplissant d'eau                                        |               |                           |
| 22h24        | P-T-2-P=1,141 Bar                                                                               |               |                           |
| 22h29        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h29        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h30        | Allumage de la pompe (pression d'injection à 8 Bar)                                             |               |                           |
| 22h32        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h32        | Fermeture de la vanne de fond de trou P-T-2-Pmax=4 Bar                                          |               |                           |
| 22h32-22h33  | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection                                        |               |                           |
| 22h33        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h36        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h36        | Problème de bulles d'air coincé dans le tuyau de la pompe d'injection (2)                       |               |                           |
| 22h36        | Ouverture de la pompe d'injection                                                               |               |                           |
| 22h37        | Fermeture de la pompe d'injection                                                               |               |                           |
| 22h39        | Purge du tuyau en tête de sonde                                                                 |               |                           |
| 22h45        | P-T-2-P=1,152 Bar                                                                               |               |                           |
| 22h54        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               | 500                       |
| 22h54        | Ouverture de la pompe (pression d'injection à 5 Bar)                                            |               |                           |
| 22h55        | Ouverture de la vanne de fond de trou P-T-2-P=8 Bar                                             |               |                           |
| 22h57        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 22h57-22h58  | Stabilisation de la pression dans la chambre                                                    |               |                           |
| 22h58        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |               |                           |
| 23h03        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |               | 500                       |
| 23h07        | La pression des packers est de 68 Bar                                                           |               |                           |
| 23h20        | On tare la balance                                                                              |               |                           |
| 23h22        | poide de la pompe= -422,5g (P-T-2-Pmax=2 Bar)                                                   |               |                           |
| 23h24        | poide de la pompe= -1030g (P-T-2-Pmax=2,8 Bar)                                                  |               |                           |
| 23h26        | poide de la pompe= -1625g (P-T-2-Pmax=3,5 Bar)                                                  |               |                           |
| 23h28        | poide de la pompe= -2199,5g (P-T-2-Pmax=4-4,5 Bar)                                              |               |                           |
| 23h30        | poide de la pompe= -2789g (P-T-2-Pmax=9,5 Bar)                                                  |               |                           |
| 23h32        | poide de la pompe= -3282g (P-T-2-Pmax=18 Bar) fracturation (1) pour P=15,9 Bar                  |               |                           |
| 23h34        | poide de la pompe= -3731g (P-T-2-Pmax=24 Bar) fracturation (2) pour P=24 Bar                    |               |                           |
| 23h36        | poide de la pompe= -4214g (P-T-2-Pmax=15-16 Bar), P n'augmente plus; propagation de la fracture |               |                           |
| 23h38        | poide de la pompe= -4842g (P-T-2-Pmax=24 Bar)                                                   |               |                           |
| 23h40        | poide de la pompe= -5373g (P-T-2-Pmax=15-16 Bar), La P diminue lentement                        |               |                           |
| 23h40        | La pression des packers est de 85 Bar                                                           | 23h46:FVx1    |                           |
| 23h47        | Ouverture de la vanne de fond de trou (Pression des packers: 70 Bars)                           |               |                           |

## Annexe 29 : Planning Essai 2 – 3/4

|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|------------|------------|--|----|-------------|----------------|--------|-------|-------|
| 08/04/2014 | Zone saine |  | 24 | Grand débit | L.O.T          | E2LOT2 | 23h49 | 00h01 |
|            |            |  |    |             | Pompe à main   |        |       |       |
|            |            |  |    |             | on pompe 1 min |        |       |       |
|            |            |  |    |             | repos 1 min    |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
| 09/04/2014 | Zone saine |  | 24 | Grand débit | T, pompe à m   | E2LOT3 | 00h03 | 00h06 |
|            |            |  |    |             | on pompe 1 min |        |       |       |
| 09/04/2014 | Zone saine |  | 24 | Grand débit | T, pompe à m   | E2LOT4 | 00h08 | 00h10 |
|            |            |  |    |             | on pompe 1 min |        |       |       |
| 09/04/2014 | Zone saine |  | 24 | Grand débit | ssion cte/ pal | E2PAL1 | 00h17 | 01h20 |
|            |            |  |    |             | 20-40 Bar      |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |
|            |            |  |    |             |                |        |       |       |

## Annexe 30 : Planning Essai 2 – 4/4

|             |                                                                                                          |             |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|
| 23h49       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                    |             | 500 |
| 23h49       | On tare la balance                                                                                       |             |     |
| 23h50       | poid de la pompe= -732,5g (P-T-2-Pmax=6 Bar), pression des packers à 70 Bar                              |             |     |
| 23h52       | poid de la pompe= -1313,5g (P-T-2-Pmax=32 Bar), pression des packers à 79 Bar                            |             |     |
| 23h54       | poid de la pompe= -1765g (P-T-2-Pmax=40 Bar), pression des packers à 80,5 Bar                            |             |     |
| 23h56       | poid de la pompe= -2380g (P-T-2-Pmax=40 Bar), pression des packers à 80 Bar                              |             |     |
| 23h58       | poid de la pompe= -2950g (P-T-2-Pmax=40 Bar)                                                             |             |     |
| 00h01       | Ouverture de la vanne de fond de trou, pression des packers à 70 Bar                                     |             |     |
| 00h01       | Fermeture de la vanne de fond de trou, pression des packers à 70 Bar                                     |             |     |
| 00h03       | poid de la pompe= -3991g (P-T-2-Pmax=40 Bar), pression des packers à 80 Bar                              |             | 500 |
| 00h06       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h06       | Fermeture de la vanne de fond de trou, pression des packers à 70 Bar                                     |             |     |
| 00h08       | poid de la pompe= -1044g (P-T-2-Pmax=41 Bar), pression des packers à 80 Bar                              |             | 500 |
| 00h10       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h10       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h17       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                    |             | 500 |
| 00h20       | Allumage de la pompe (Pression d'injection: 40 Bar)                                                      |             |     |
| 00h21       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h23       | La pression des packers est de 72 Bar                                                                    |             |     |
| 00h24       | Augmentation de la pression dans la chambre à 32 Bar (Pression des packers de 76 Bar)                    |             |     |
| 00h25       | Augmentation de la pression dans la chambre à 37 Bar (Pression des packers de 78 Bar)                    |             |     |
| 00h28       | Augmentation de la pression à 38-39 Bar (La pompe ne permet pas aller au-delà de 38 Bar)                 |             |     |
| 00h32       | Baisse de la pression dans la chambre d'injection                                                        |             |     |
| 00h35       | La pression est de 30 Bar dans la chambre d'injection (Pression des packers de 75 Bar)                   |             |     |
| 00h40       | P-T-2-P=29,776 Bar                                                                                       |             |     |
| 00h50       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h50       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h51       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 00h54       | Reprise de la pompe à main (paliers)                                                                     |             |     |
| 00h54       | La pression est de 20 Bar                                                                                |             |     |
| 00h55-01h20 | La pression est de 40 Bar (ajout de 14 bouteilles de 1,5 L dans la pompe, poids balance init: 26917,5 g) |             |     |
| 01h20       | Poid de la pompe à injection= 2979 g                                                                     | 01h32: FVx2 |     |
| 01h31       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                    |             |     |
| 01h33       | On rentre les vérin                                                                                      |             |     |
| 01h34       | Dégonflage des packers                                                                                   |             |     |

## Annexe 31 : Planning Essai 3 – 1/6

| Jour       | Objet testé                  | Orientation par rapport à l'axe du forage (N80°) | Distance à la tête de forage/trajecto (m) | Type de débit | Type d'essai             | Numéro essai | Heure début (UTC) | Heure fin (UTC) |
|------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------|-------------------|-----------------|
| 09/04/2014 | repositionnement de la sonde |                                                  |                                           |               |                          |              | matin-14h         |                 |
| 09/04/2014 | Zone fracturée               | ries de fractures calcifiées                     | 18,75                                     | Grand débit   | saturation de la chambre |              | 14h29             | 15h46           |
|            |                              | (Bloc Est de la zone de faille)                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | Orientation des fractures                        |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | Lecture graphique, tétards corrigés (diagraphie) |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°; 60°W                                        | N50°; 20°W                                |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N170°; 30°W                                      | N0°; 30°w                                 |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°; 55°W                                        | N170°; 50°W                               |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°, 30°W                                        | N170°; 40°W                               |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°, 25°W                                        |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N170°, 40°W                                      |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N170°, 30°W                                      |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°, 40°W                                        |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°, 50°W                                        |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              | N0°, 45°W                                        |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
| 09/04/2014 | Zone fracturée               | ries de fractures calcifiées                     | 18,75                                     | Grand débit   | ssion cte/ pal           | E3PAL1       | 15h47             | 21h14           |
|            |                              |                                                  |                                           |               | Pompe à main             |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               | On pompe 1 min           |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               | Stabilisation 1 min      |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |
|            |                              |                                                  |                                           |               |                          |              |                   |                 |

## Annexe 32 : Planning Essai 3 – 2/6

| Commentaires |                                                                                                         | coup de<br>masse   | d'échantillonnage (Hertz) |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------|
| Horaire      | Détails/Protocole                                                                                       |                    |                           |
| 14h29        | On purge les packers (Pression à 20 Bar)                                                                |                    |                           |
| 14h35-14h46  | On gonfle les packers (la pression des packers diminue un peu mais reste stable: pas de fuite)          |                    |                           |
| 14h47-14h49  | On continue de gonfler les packers jusqu'à une pression de 29 Bar                                       |                    |                           |
| 14h53        | La pression des packers diminue un peu puis se stabilise à une pression de 25 Bar                       | 14h59: FPx2        |                           |
| 15h08        | On continue de gonfler les packers jusqu'à une pression de 36 Bar                                       |                    |                           |
| 15h12        | La pression des packers est de 39 Bar                                                                   |                    |                           |
| 15h13-15h14  | Encrage des vérins                                                                                      |                    |                           |
| 15h15-15h21  | Off set des capteurs de déformation                                                                     |                    |                           |
| 15h24        | Allumage de la pompe                                                                                    |                    |                           |
| 15h24-15h32  | Purge du tuyau d'eau pompe-tête de sonde                                                                |                    |                           |
| 15h27        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    |                           |
| 15h32        | Arrêt de la pompe                                                                                       |                    |                           |
| 15h33        | Allumage de la pompe                                                                                    |                    |                           |
| 15h34-15h42  | Problème de visualisation des données                                                                   |                    |                           |
| 15h46        | Fermeture des packers                                                                                   |                    |                           |
| 15h46        | Balance tarée                                                                                           |                    |                           |
| 15h47        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    | 500                       |
| 15h47-15h49  | Pompage à main (P-T-2-P=0,443 Bar)                                                                      |                    |                           |
| 15h49        | Pression dans la chambre de 0,8 Bar (poids balance: -1489 g)                                            |                    |                           |
| 15h50-15h51  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 15h51        | Pression dans la chambre de 0,95 Bar (poids balance: -2327 g)                                           |                    |                           |
| 15h52-15h53  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 15h53        | Pression dans la chambre de 1,2 Bar (poids balance: -3198 g)                                            |                    |                           |
| 15h54-15h55  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 15h55        | Pression dans la chambre de 1,8 Bar (poids balance: -4134 g)                                            |                    |                           |
| 15h56-15h57  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 15h57        | Pression dans la chambre de 2,5 Bar (poids balance: -5030 g)                                            |                    |                           |
| 15h58-15h59  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 15h59        | Pression dans la chambre de 4,0 Bar (poids balance: -5948 g)                                            |                    |                           |
| 16h00-16h01  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 16h01        | Pression dans la chambre de 7,0 Bar (poids balance: -6830 g, on ajoute 4 bouteilles new poids: -1240 g) |                    |                           |
| 16h02-16h03  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 16h03        | Pression dans la chambre de 17 Bar (poids balance: -2228 g), fracturation (1) à Pression=16-17 Bar      |                    |                           |
| 16h05-16h06  | Problème de visualisation des données                                                                   |                    |                           |
| 16h06-16h07  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 16h07        | Pression dans la chambre de 30 Bar (poids balance: -2698 g), la pression diminue légèrement             |                    |                           |
| 16h08-16h10  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 16h10        | La pression des packers est de 42 Bar                                                                   |                    |                           |
| 16h10        | Pression dans la chambre de 32 Bar (poids balance: -3963 g), on plafone à 32 Bar                        |                    |                           |
| 16h12-16h13  | Pompage à main                                                                                          |                    |                           |
| 16h13        | Pression dans la chambre de 32 Bar (poids balance: -5350 g)                                             |                    |                           |
| 16h14        | La pression des packers est de 42 Bar                                                                   |                    |                           |
| 16h16        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    |                           |
| 16h16        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    |                           |
| 16h16-16h22  | Pompage à la main jusqu'à ce que la pression dans la chambre n'augmente plus(16h17:3Bar, 16h20:32Bar)   |                    |                           |
| 16h20        | La pression des packers est de 40 Bar                                                                   |                    |                           |
| 16h22        | P-T-2-P=33,450 Bar                                                                                      |                    |                           |
| 16h23        | La pression dans la chambre diminue à 26 Bar                                                            |                    |                           |
| 16h26        | Poids de la balance: -9750 g                                                                            |                    |                           |
| 16h26        | Ouverture de la vanne de trou                                                                           | P-T-2-P=1,512 Bar  |                           |
| 16h30        | On regonfle les packers jusqu'à 50 Bar                                                                  |                    |                           |
| 16h31        | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    |                           |
| 16h31        | Allumage de la pompe                                                                                    |                    |                           |
| 16h34        | La pression d'injection est de 32 Bar                                                                   |                    |                           |
| 16h34        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                                   |                    |                           |
| 16h36        | La pression des packers est de 50 Bar                                                                   |                    |                           |
| 16h37        | Augmentation de la pression d'injection à 35 Bar                                                        |                    |                           |
| 16h37        | La pression des packers est toujours de 50 Bar                                                          |                    |                           |
| 16h38        | Augmentation de la pression d'injection à 36 Bar (1,5 L/min)                                            | P-T-2-P=35,095 Bar |                           |
| 16h39        | Succession de petites chutes de débit                                                                   |                    |                           |
| 16h43        | Débit de 1,7 L/min                                                                                      | P-T-2-P=35,624 Bar |                           |

## Annexe 33 : Planning Essai 3 – 3/6

[illegible]

## Annexe 34 : Planning Essai 3 – 4/6

|             |                                                                                                 |                                   |  |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 16h43       | La pression des packers est toujours à 50 Bar                                                   |                                   |  |
| 16h44       | Toujours la présence des petites chutes de débits/pression (petites ouvertures ? Ou pb pompe ?) |                                   |  |
| 16h47       | P-T-2-P=35,396 Bar                                                                              |                                   |  |
| 16h50       | La pression des packers est e 49 Bar                                                            |                                   |  |
| 16h52       | P-T-2-P=36,108 Bar                                                                              |                                   |  |
| 16h53       | Diminution de la pression par la pompe                                                          |                                   |  |
| 16h54       | Augmentation de la pression par la pompe (3 L/min)                                              |                                   |  |
| 16h54       | La pression des packers est e 49 Bar                                                            |                                   |  |
| 16h57       | P-T-2-P=37,212 Bar                                                                              |                                   |  |
| 16h58       | Le débit à tendance à augmenter                                                                 |                                   |  |
| 17h00       | La pression des packers est e 49 Bar                                                            | vitesse de rotattion pompe :16,30 |  |
| 17h02       | P-T-2-P=37,142 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h07       | P-T-2-P=37,092 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h11       | P-T-2-P=37,096 Bar                                                                              | 17h12: FPx1                       |  |
| 17h17       | P-T-2-P=37,104 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h24       | P-T-2-P=37,082 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h28       | P-T-2-P=37,078 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h38       | P-T-2-P=37,054 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h43       | P-T-2-P=37,189 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h47       | Chute de pression                                                                               |                                   |  |
| 17h47       | La pression des packers est de 48 Bar                                                           |                                   |  |
| 17h48       | P-T-2-P=37,271 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h52       | P-T-2-P=37,174 Bar                                                                              |                                   |  |
| 17h55       | Pression plus stable à la pompe (vitesse de rotation: 16,8)                                     |                                   |  |
| 17h57       | P-T-2-P=37,511 Bar (débit à 2,8 L/min)                                                          |                                   |  |
| 17h59       | La pression des packers est de 48 Bar                                                           |                                   |  |
| 18h02       | P-T-2-P=37,641 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h06       | Augmentation du débit avec la pompe (Vitesse de rotation de 17,5)                               |                                   |  |
| 18h06       | Augmentation de la pression dans la chambre (38 Bar)                                            |                                   |  |
| 18h07       | P-T-2-P=38,151 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h08       | Augmentation du débit avec la pompe (38,4 Bar),(débit: 3,2 L/min)                               | 18h11: FPx1                       |  |
| 18h12       | P-T-2-P=38,399 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h15       | Le débit diminue un peu                                                                         |                                   |  |
| 18h17       | P-T-2-P=38,404 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h22       | Voiture                                                                                         |                                   |  |
| 18h26-18h39 | Problème de visualisation des données                                                           |                                   |  |
| 18h39       | P-T-2-P=38,560 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h40       | La pression des packers est de 48 Bar                                                           |                                   |  |
| 18h42       | P-T-2-P=38,550 Bar                                                                              |                                   |  |
| 18h42-19h00 | Problème de visualisation des données                                                           |                                   |  |
| 19h00       | Augmentation du débit (2,6 L/min)                                                               |                                   |  |
| 19h01       | Augmentation du débit (2,7 L/min)                                                               |                                   |  |
| 19h01       | P-T-2-P=38,345 Bar, Pression maximale de 39 Bar                                                 |                                   |  |
| 19h03       | P-T-2-P=39,550 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h08       | P-T-2-P=39,991 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h13       | P-T-2-P=39,115 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h21       | Ouverture/fermeture de la vanne de fond de trou                                                 |                                   |  |
| 19h26       | Ouverture/fermeture de la vanne de fond de trou                                                 |                                   |  |
| 19h26       | P-T-2-P=38,959 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h28       | Débit de 1,8 L/min (la charge diminue)                                                          |                                   |  |
| 19h29       | P-T-2-P=38,992 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h35       | P-T-2-P=39,008 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h39       | P-T-2-P=39,014 Bar                                                                              |                                   |  |
| 19h41       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                           |                                   |  |
| 19h42       | La pompe est éteinte, la pression des packers est de 46 Bar                                     |                                   |  |
| 19h43       | Stabilisation à 26 Bar                                                                          |                                   |  |
| 19h52       | P-T-2-P=25,913 Bar                                                                              |                                   |  |
| 21h05       | Passage                                                                                         | 21h09: FPx1                       |  |
| 21h10       | P-T-2-P=25,942 Bar                                                                              |                                   |  |
| 21h12       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                           |                                   |  |
| 21h14       | Pression des packers à 37 Bar                                                                   |                                   |  |

## Annexe 35 : Planning Essai 3 – 5/6

|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|------------|----------------|------------------------------|-------|-------------|-----------------|---------|-------|-------|
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 20 Bar  | E3PULS1 | 21h17 | 21h21 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 20 Bar  | E3PULS2 | 21h22 | 21h26 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 15 Bar  | E3PULS3 | 21h27 | 21h28 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 15 Bar  | E3PULS4 | 21h29 | 21h31 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 7,5 Bar | E3PULS5 | 21h32 | 21h34 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 20 Bar  | E3PULS6 | 21h35 | 21h37 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
| 09/04/2014 | Zone fracturée | ries de fractures calcifiées | 18,75 | Grand débit | Pulse à 15 Bar  | E3PULS7 | 21h38 | 21h39 |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |
|            |                |                              |       |             |                 |         |       |       |



## Annexe 36 : Planning Essai 3 – 6/6

|             |                                                                                      |                   |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----|
| 21h17       | On augmente la pression des packers à 56 Bar                                         |                   | 500 |
| 21h18       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h18       | Allumage de la pompe (pression d'injection réglée à 28 Bar, V=15,5)                  |                   |     |
| 21h20       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h20       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                | P-T-2-P=28 Bar    |     |
| 21h21       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h22       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h22       | Allumage de la pompe (pression d'injection réglée à 30 Bar, V=15,5)                  |                   |     |
| 21h25       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h25       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                | P-T-2-Pmax=20 Bar |     |
| 21h25-21h26 | Stabilisation de la pression dans la chambre                                         |                   |     |
| 21h26       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h27       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h27       | Allumage de la pompe (pression d'injection: 15 Bar, V=15,5)                          |                   |     |
| 21h27       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h28       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h28       | Stabilisation de la pression dans la chambre - Ouverture de la vanne de fond de trou |                   |     |
| 21h29       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h29       | Allumage de la pompe (pression d'injection: 15 Bar, V=15,5)                          |                   |     |
| 21h30       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h30       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h30-21h31 | Stabilisation de la pression dans la chambre (P-T-2-Pmax=15 Bar)                     |                   |     |
| 21h31       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h32       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h32       | Allumage de la pompe (pression d'injection: 7,5 Bar, V=15,5)                         |                   |     |
| 21h32       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h33       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h33       | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection (P-T-2-Pmax=7,5 Bar)        |                   |     |
| 21h33       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h34       | La pression des packers est de 50 Bar                                                |                   |     |
| 21h35       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h35       | Allumage de la pompe (pression d'injection: 20 Bar, V=15,5)                          |                   |     |
| 21h36       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h36       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h36-21h37 | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection                             |                   |     |
| 21h37       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h38       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   | 500 |
| 21h38       | Allumage de la pompe (pression d'injection: 15 Bar, V=15,5)                          |                   |     |
| 21h38       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h38       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h38-21h39 | Stabilisation de la pression dans la chambre d'injection                             |                   |     |
| 21h39       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                |                   |     |
| 21h39       | Retrait des encrins                                                                  |                   |     |
| 21h41       | Alimentation coupée                                                                  |                   |     |
| 21h45       | Purge des packers                                                                    |                   |     |

## Annexe 37 : Planning Essai 4 – 1/5

[illegible]

## Annexe 38 : Planning Essai 4 – 2/5

| Commentaires |                                                                                                  | coup de<br>masse | d'échantillonnage<br>(Hertz) |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Horaire      | Détails/Protocole                                                                                |                  |                              |
| 8h40-9h10    | Gonflement des packers                                                                           | 9h19: FPx1       |                              |
| 9h10         | La pression des packers est de 38 bars (elle diminue légèrement mais reste stable: pas de fuite) |                  |                              |
| 9h11-9h12    | On gonfle les packers jusqu'à une pression de 54 Bar                                             |                  |                              |
| 9h32         | La pression des packers est de 48 Bar                                                            |                  |                              |
| 9h32-10h04   | calcul du volume de la chambre d'injection                                                       |                  |                              |
| 10h04        | La pression dans la chambre d'injection est de 0,8 Bar                                           |                  |                              |
| 10h09        | La pression dans la chambre d'injection est de 0,4 Bar                                           |                  |                              |
| 10h10        | Stabilisation de la pression à 0,4 Bar                                                           |                  |                              |
| 10h10        | Arrêt du remplissage de la chambre d'injection                                                   |                  |                              |
| 10h16        | Remplissage de la chambre                                                                        |                  |                              |
| 10h18        | Arrêt du remplissage de la chambre d'injection                                                   |                  |                              |
| 10h31        | La pression des packers est de 45 Bar                                                            |                  |                              |
| 10h45        | Arrêt du remplissage de la chambre d'injection                                                   |                  |                              |
| 10h47        | Remplissage de la chambre (P-T-2-P=0,547 Bar)                                                    |                  |                              |
| 10h48        | La pression des packers est de 44 Bar                                                            |                  |                              |
| 10h50        | P-T-2-P= 0,652 Bar                                                                               |                  |                              |
| 10h53        | P-T-2-P= 0,837 Bar                                                                               |                  |                              |
| 11h04        | P-T-2-P= 1,083 Bar                                                                               |                  |                              |
| 11h04-11h05  | Ancrage des vérins                                                                               |                  |                              |
| 11h10        | Off set des capteurs de déformation (problème)                                                   |                  |                              |
| 11h19-11h29  | Off set des capteurs de déformation                                                              |                  |                              |
| 11h31        | P-T-2-P=1,097 Bar                                                                                |                  |                              |
| 11h32-11h35  | Essai passif (évolution pression/déformation: point de calibration)                              |                  |                              |
| 11h35        | fermeture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 11h36        | Balance tarée                                                                                    |                  |                              |
| 11h37        | La pression de packers est de 45 Bar                                                             |                  |                              |
| 11h37-11h38  | Pompage à la main                                                                                |                  |                              |
| 11h38        | P-T-2-Pmax=1,6 Bar, Poids de la balance=-694 g                                                   |                  |                              |
| 11h39-11h40  | Pompage à la main                                                                                |                  |                              |
| 11h40        | P-T-2-Pmax=2,4 Bar, Poids de la balance=-1383 g                                                  |                  |                              |
| 11h41-11h42  | Pompage à la main                                                                                |                  |                              |
| 11h42        | P-T-2-Pmax=5,4 Bar, Poids de la balance=-2206 g                                                  |                  |                              |
| 11h43-11h44  | Pompage à la main                                                                                |                  |                              |
| 11h44        | P-T-2-Pmax=10 Bar, Poids de la balance=-2250 g, fuite dans la vanne de fond (pas sous pression)  |                  |                              |
| 11h47        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 11h47        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 11h48        | On tare la balance                                                                               |                  |                              |
| 11h48-11h49  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 11h49        | P-T-2-Pmax=4,6 Bar, Poids de la balance=-893,5 g                                                 |                  |                              |
| 11h50-11h51  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 11h51        | P-T-2-Pmax=17,1 Bar, Poids de la balance=-1780,5 g                                               |                  |                              |
| 11h51        | La pression des packers est à 46 Bar                                                             |                  |                              |
| 11h51        | Chute de pression (deux paliers)                                                                 |                  |                              |
| 11h52-11h53  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 11h53        | P-T-2-Pmax=33 Bar, Poids de la balance=-2550 g                                                   |                  |                              |
| 11h53        | La pression des packers est de 50 Bar                                                            |                  |                              |
| 11h54-11h55  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 11h55        | P-T-2-Pmax=38 Bar, Poids de la balance=-3262 g                                                   |                  |                              |
| 11h56-11h57  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 11h57        | P-T-2-Pmax=34 Bar, Poids de la balance=-4150 g                                                   |                  |                              |
| 11h59        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 12h00        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 12h01        | Balance tarée                                                                                    |                  |                              |
| 12h04        | variation du débit causé par le changement de pompeur                                            |                  |                              |
| 12h06        | Poids de la balance: -1981,5 g                                                                   |                  |                              |
| 12h07        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 12h07        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |
| 12h07-12h08  | Pompage à main                                                                                   |                  |                              |
| 12h10        | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                            |                  |                              |

## Annexe 39 : Planning Essai 4 – 3/5

[illegible]

## Annexe 40 : Planning Essai 4 – 4/5

|             |                                                                                         |                          |  |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--|
| 12h11       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 12h11-12h12 | Pompage à main                                                                          |                          |  |
| 12h12       | P-T-2-Pmax=34 Bar, Poids de la balance=-1285 g                                          |                          |  |
| 14h15       | P-T-2-P=16,506 Bar, Pression des packers à 34 Bar                                       | 14h19: FPx1              |  |
| 14h21       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 14h21       | La pression des packers est à 42 Bar                                                    |                          |  |
| 14h26       | on remonte la pression des packers jusqu'à 54 Bar                                       |                          |  |
| 14h28       | on dégonfle la pression des packers à 50 Bar/fermeture de la vanne de fond de trou      |                          |  |
| 14h30-14h31 | Purge du dispositif tuyau d'eau de la pompe à la tête de sonde                          |                          |  |
| 14h33       | Allumage de la pompe (pression d'injection à 5 Bar, Vitesse de rotation: 16,5)          |                          |  |
| 14h34       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 14h35       | P-T-2-P=6,889 Bar                                                                       |                          |  |
| 14h39       | On coupe la pompe                                                                       |                          |  |
| 14h39-14h51 | Problème de visualisation des données                                                   |                          |  |
| 14h51       | P-T-2-P=1,224 Bar/ Allumage de la pompe                                                 |                          |  |
| 14h52       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 14h53       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 14h53       | On coupe la pompe (on veut avoir le 0 en pression au départ)                            |                          |  |
| 14h54       | Allumage de la pompe                                                                    |                          |  |
| 14h55-14h59 | Injection (7 Bar), la pression des packers est de 50 Bar                                |                          |  |
| 14h59-15h03 | Injection (9,9 Bar)                                                                     |                          |  |
| 15h03-15h07 | Injection (14,9 Bar)                                                                    |                          |  |
| 15h07-15h11 | Injection (19 Bar), la pression des packers est de 52 Bar                               |                          |  |
| 15h11-15h13 | Injection (23,4 Bar)                                                                    |                          |  |
| 15h13       | Injection (31,3 Bar)                                                                    |                          |  |
| 15h13       | La pression des packers est de 56 Bar                                                   |                          |  |
| 15h17-15h22 | Injection (32,8 Bar)                                                                    |                          |  |
| 15h22-15h28 | Injection (36 Bar)                                                                      |                          |  |
| 15h23       | Le débit change, (1) fracturation entre vers 36 Bar                                     |                          |  |
| 15h28-15h32 | On diminue la pression d'injection à 31,4 Bar                                           |                          |  |
| 15h30       | voiture                                                                                 |                          |  |
| 15h32-15h36 | On diminue la pression d'injection à 27 Bar                                             |                          |  |
| 15h36-15h39 | On diminue la pression d'injection à 15,8 Bar                                           | 15h38:FPx1               |  |
| 15h39-15h41 | On diminue la pression d'injection à 6 Bar                                              | aque a été tapé 2X       |  |
| 15h41-15h43 | On diminue la pression d'injection à 0 Bar                                              |                          |  |
| 15h43       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 15h43-15h47 | Réglage d'injection de la pompe, vitesse de rotation; 17,5                              |                          |  |
| 15h47       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                                   |                          |  |
| 15h47-15h49 | Pression d'injection à 15 Bar                                                           |                          |  |
| 15h49       | Augmentation de la pression d'injection à 23,6 Bar                                      | 15h49min46s: beau signal |  |
| 15h52-15h53 | Augmentation de la pression d'injection à 30 Bar, La pression des packers est de 55 bar |                          |  |
| 15h56-15h57 | Augmentation de la pression d'injection à 33,7 Bar                                      |                          |  |
| 15h57-16h00 | Augmentation de la pression d'injection à 35 Bar                                        |                          |  |
| 15h59-16h06 | variation du débit (pompe ?)                                                            |                          |  |
| 16h10-16h19 | Augmentation de la pression d'injection à 37,5 Bar                                      |                          |  |
| 16h12       | chute de débit, puis variation de débit                                                 |                          |  |
| 16h19-16h20 | Augmentation de la pression d'injection                                                 |                          |  |
| 16h21       | Augmentation de la pression d'injection (38 Bar)                                        |                          |  |
| 16h23       | Augmentation de la pression d'injection (39,5 Bar)                                      |                          |  |
| 16h24       | Augmentation de la pression d'injection (39,8 Bar, vitesse de rotation de 19,5)         |                          |  |
| 16h55       | La pression des packers est de 48 Bar                                                   |                          |  |
| 16h56       | On veut faire un pulse dans le palier                                                   |                          |  |
| 17h11       | Balance tarée                                                                           |                          |  |
| 17h12       | Pompage à la main                                                                       |                          |  |
| 17h12       | Poids de la balance: -67 g, pression dans la chambre: 39,6 Bar, variation de 0,3 Bar    |                          |  |
| 17h14       | Pompage à la main                                                                       |                          |  |
| 17h14       | Poids de la balance: -232 g                                                             |                          |  |
| 17h15-17h16 | Pompage à la main                                                                       |                          |  |
| 17h16       | Poids de la balance: -457 g                                                             |                          |  |
| 17h22       | Augmentation de la pression d'injection                                                 |                          |  |
| 17h27       | Augmentation de la pression d'injection                                                 |                          |  |
| 17h32       | Augmentation de la pression d'injection                                                 |                          |  |
| 17h46       | Augmentation de la pression d'injection (débit 3L/min)                                  |                          |  |
| 17h47       | Arrêt de la pompe (non contrôlé)                                                        |                          |  |

## Annexe 41 : Planning Essai 4 – 5/5

[illegible]

|             |                                                                                  |             |  |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|--|
| 17h49       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                            |             |  |
| 17h59       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe                               |             |  |
| 18h01       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                            |             |  |
| 18h01       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 3 Bar                       |             |  |
| 18h02       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 3,3 Bar                     |             |  |
| 18h03-18h04 | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 3,7; 5; 6 et 8-9 Bar        |             |  |
| 18h04       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 11,7 Bar                    |             |  |
| 18h05       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 13,3 Bar                    |             |  |
| 18h07       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 15 Bar                      |             |  |
| 18h08       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe à 18 Bar, vitesse de tour: 28 |             |  |
| 18h12       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe                               |             |  |
| 18h17       | Arrêt de la pompe                                                                |             |  |
| 18h20       | Fermeture de la vanne de fond de trou                                            |             |  |
| 18h20       | La pression des packers est de 48 Bar                                            |             |  |
| 18h21       | Augmentation de la pression d'injection à la pompe (10 Bar)                      |             |  |
| 18h21       | Ouverture de la vanne de fond de trou                                            |             |  |
| 18h24       | Augmentation de la pression d'injection (30 Bar)                                 |             |  |
| 18h25       | Diminution de la pression d'injection (10 Bar)                                   |             |  |
| 18h26-18h39 | Augmentation de la pression d'injection                                          |             |  |
| 18h29       | Augmentation de la pression d'injection                                          |             |  |
| 18h30       | voiture                                                                          |             |  |
| 18h33       | Augmentation de la pression d'injection                                          |             |  |
| 18h37       | Diminution de la pression d'injection (15 Bar)                                   |             |  |
| 18h41       | Arrêt de la pompe                                                                |             |  |
| 18h44       | Retrait des encrins                                                              | 18h42: FPx1 |  |
| 18h46       | On dégonfle les packers                                                          |             |  |