

Université Pierre et Marie Curie
(UPMC-Paris VI)



Conservatoire National des Arts et
Métiers
(C.N.A.M)



M2 Pro, parcours Géologie-Géotechnique
(Année universitaire 2011-2012)

Rôle de l'anisotropie des argiles dans
la fracturation différentielle

Nicolas Lemonnier



| Maître de stage | | Tuteur enseignant |
|---|---|----------------------|
| Mme Catherine HOMBERG M. Vincent ROCHE Mme Anne Marie BOULIER | Mme Muriel ROCHER | M. Olivier FOUCHÉ |
| ISTEP 4 place Jussieu 75005 Paris | IRSN 31 avenue de la Division Leclerc 92262 Fontenay-aux-Roses | CNAM |

Sommaire

| | |
|--|----|
| Remerciements | 5 |
| Introduction | 6 |
| I Contexte général et synthèse des connaissances | 7 |
| I-1 Présentation de l'entreprise | 7 |
| I-2 Architecture et évolution des zones de fractures dans les formations argileuses | 8 |
| I-2-1 Fracturation dans les systèmes multicouches | 8 |
| I-2-2 Caractéristiques pétrophysiques des formations argileuses | 11 |
| I-2-3 Variabilité des contraintes dans les systèmes multicouches | 15 |
| I-2-4 Microstructures | 15 |
| I-3 Contexte d'étude | 17 |
| II Approche microstructurale | 21 |
| II-1 Les sites d'études et zones échantillonnées : | 21 |
| II -2 Méthodologie | 21 |
| II-3 Architecture des fractures –Observations | 22 |
| II-3-1 Les argiles encaissantes | 22 |
| II-3-2 Les failles subhorizontales (CHF) dans les argiles | 22 |
| II-3-3 Les zones plissées dans les argiles | 26 |
| II-3-4 Les failles normales à 45° dans les argiles et les calcaires | 27 |
| II -4 Synthèse et scénario évolutifs | 28 |
| III Initiation des failles au sein d'un système multicouche : quantification de l'anisotropie à l'aide d'une modélisation 3D. | 31 |
| III-1 Conception numérique | 32 |
| III-2 Approche de la modélisation | 33 |
| III-3 Les paramètres en sortie | 33 |
| III-4 Initiation des failles dans les systèmes multicouches et rôle de l'anisotropie | 34 |
| III-4-1 Distribution des contraintes au sein des multicouches isotropes | 34 |
| III-4-1 Distribution des contraintes au sein des multicouches anisotropes | 35 |
| III -4-3 Effet de la rigidité et de la résistance d'un système multicouche sur l'initiation de la nucléation d'une faille au sein d'un modèle anisotrope | 35 |
| III-4-4 Comparaison aux modèles isotropes | 38 |
| III-5 Effet d'un pendage sur la nucléation de faille. | 38 |
| III-5-1 Effet d'un pendage | 38 |
| III-5-2 Exploration du rôle de l'anisotropie frictionnelle | 41 |
| III-5-2 Effet sur la propagation | 42 |
| III-6 Application à des systèmes multicouches argilo-calcaire de sites naturels. | 42 |
| IV Discussion | 43 |
| Bibliographie | 46 |

Liste des figures :

| | |
|---|----|
| Figure 1: Implantations des sites de l'IRSN en France et dans les DOM TOM | 7 |
| Figure 2: Organigramme de l'iSTeP | 8 |
| Figure 3 : Systèmes de failles dans des systèmes multicouches | 9 |
| Figure 4 : Illustration d'un CHF présent sur le site de trescléoux | 10 |
| Figure 5. Classification de l'anisotropie d'une roche en fonction de sa résistance à la compression simple suivant différentes orientations | 14 |
| Figure 6. Angle de rupture par rapport à l'axe de compression en fonction de l'inclinaison (β) du plan de faiblesse d'une ardoise | 14 |
| Figure 7. Anisotropie de résistance à la rupture | 15 |
| Figure 8. Un système de couches est sous une contrainte initiale de compression | 15 |
| Figure 9: Illustration schématique et photo au microscope des ouvertures en domino | 16 |
| Figure 10 : Vue microscopique de structure de cracks-seals | 16 |
| Figure 11 : Illustration de microfissuration intragrain des cristaux de calcite | 17 |
| Figure 12: Carte du bassin du Sud Est représentant les lieux des sites étudiés | 17 |
| Figure 13: Vue générale du site des zones d'Espréaux | 18 |
| Figure 14: Vue générale de l'affleurement de Tréscléoux | 19 |
| Figure 15 : Vue générale de l'affleurement de Saint Didier | 19 |
| Figure 16: Illustration d'une zone de Riedel dans un contexte de cisaillement dextre | 21 |
| Figure 17. LMSD2 : Illustration des zones de dissolutions situées dans les argilites « saines » de Saint Didier | 25 |
| Figure 18: Illustration des deux scénarios possibles dans la création des CHFs au vue de l'observation microstructural sur les trois sites | 30 |
| Figure 19: Illustration de la géométrie du modèle | 32 |
| Figure 20 : Exemple de la variation de l'état de contrainte avec la stratification pour un modèle isotrope | 33 |
| Figure 21 Exemple de la variation de l'état de contrainte avec la stratification pour un modèle de rapport de module de Young de 1 | 34 |
| Figure 22. Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisée (CCN) | 35 |
| Figure 23 : Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCN) sur la localisation de nucléation de faille | 35 |
| Figure 24 : Illustration des pendages θ B : représentation schématique de l'angle | 38 |
| Figure 25: Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCN). | 39 |
| Figure 26: A: Illustration du modèle frictionnel d'anisotropie de type U | 40 |
| Figure 27 : Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCn). | 40 |
| Figure 28 : Illustration de la propagation des failles au sein d'un système multicouche, par rotation de contrainte | 41 |

Liste des tableaux:

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Composition minéralogique des roches argileuses | 11 |
| Tableau 2 : Propriétés mécaniques de trois roches sédimentaires représentatives | 11 |
| Tableau 3. Tableau récapitulatif des valeurs de module d'Young (E) et de coefficient de Poisson . | 12 |
| Tableau 4. Trois paramètres des enveloppes de rupture. Pour la cohésion (S) et la résistance en tension (T), | 12 |
| Tableau 5. Anisotropie du module d'Young (E_{par}/E_{per}) pour différentes roches argileuses et rapport de modules de Young entre les calcaires et l'argile (E_a/E_c). | 13 |
| Tableau 6. Classification des roches en fonction de leurs coefficients d'anisotropies | 13 |
| Tableaux 7: Caractéristiques mécaniques connu sur les sites d'Espréaux, de Trescléoux et de la formation de Meuse et haute Marne | 20 |
| Tableaux 8: Tableau retraçant le nombre total de structures observées et prélevées sur les 72 lames représentant les 3 sites | 20 |
| Tableau 9 : Tableau résumant la présence ou non des microstructures par sites pour les CHFs et pour « les failles à 45 ° » dans les argiles et dans les calcaires | 28 |
| Tableau 10 : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie et des 4 configurations de résistance | 36 |
| Tableau 11 : A : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie | 39 |

| | |
|---|----|
| Tableau 12 : A : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie pour le modèle carbonaté obtenu dans la partie III -3-1. | 41 |
| Tableau 13. Anisotropie de module d'Young (E_{par}/E_{per}) pour différentes roches argileuses et rapport de module de young entre les calcaires et l'argile | 42 |
| Tableau 14 : Résultats selon la modélisation de différentes caractéristiques des modèles et les caractéristiques des modules de Young et des anisotropies pour les sites naturels obtenus en laboratoire. | 42 |

Annexe :

Annexe 1 : Planches microstructurales des sites observés

Annexe 2 : Planches MEB et analyse chimique complète au MEB

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes tuteurs de stage C. Homberg, M. Rocher et O. Fouché pour leurs implications au sein du stage, leurs avis et leurs encouragements.

Je remercie A.M Boulier pour son aide précieuse, sa disponibilité tout au long de ce stage et de m'avoir accueilli à Grenoble, et V. Roche pour ses explications et son aide sur le terrain avec la carotteuse.

Un très grand merci aussi à M. De Rafelis, O. Boudouma, J. Schnyder pour leurs renseignements et leurs aides sur les différents outils utilisés.

Enfin, je remercie mes amis Nicolas, Sybille, Claire, Maelianna, Tiffany, Jordane, Léa pour ces pauses café et les thésards que j'ai été amené à côtoyer, pour m'avoir soutenu et supporté surtout durant la fin de ce stage.

Introduction

Ce stage Paris VI/IRSN s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche de l'IRSN relatif au stockage géologique de déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) envisagée actuellement en Meuse/Haute-Marne dans la formation argileuse du Callovo-Oxfordien (Cox). Cette dernière est encadrée de formations calcaires et l'ensemble constitue un système multicouche. Ce programme vise à comprendre et à modéliser les phénomènes importants pour la sûreté d'un stockage en couche géologique profonde des déchets HA-MAVL. La sûreté d'un stockage en profondeur repose à long terme sur le milieu géologique hôte et notamment sur sa capacité à limiter les flux d'eau et à retarder la migration des radionucléides vers la biosphère. Les propriétés hydrauliques et chimiques favorables des couches sédimentaires argileuses pour le confinement des radionucléides sont à l'origine du choix de ce type de formation pour l'implantation d'une installation de stockage HA-MAVL. Cette formation est inaccessible se trouvant à 500m de profondeur et étant constitué de « badlands », avec des couverts végétaux important là ou elle affleure à quelque dizaines de mètre plus à l'Est.

Cette étude fait suite à une thèse (Roche, 2011) qui visait à caractériser l'architecture et la croissance des failles normales dans les alternances argilo-calcaire. Il en a notamment résulté la mise en évidence de failles subhorizontales décimétriques à métriques au sein des niveaux argileux de ces alternances, qui ont joué un rôle majeur dans la formation des failles normales, en affectant ceux-ci par des arrêts de propagation, des segmentations associées à des échelons et/ou à des zones de relai et des variations du pendage des failles. Dans le cadre de la problématique de stockage, l'importance de cette étude relève de la compréhension des mécanismes de ces failles qui pourraient servir d'arrêt de propagation des fluides mais aussi de zones de relai entre différentes familles de failles, servant cette fois-ci de drains et pouvant affecter les différentes formations géologiques jusqu'à remonter à la surface. Ces failles nommées « Clay Horizontal Faults » (CHF) par Roche (2011) n'ont été que partiellement définies et contraintes, et notre étude vise à décrire, caractériser (microstructures, cinématique...) ces structures ainsi qu'à comprendre les processus (anisotropie, rotation des contraintes...) responsable de leur formation. Les sites étudiés ici sont des analogues à la formation argileuse du Callovo-Oxfordien, inaccessible en Meuse/Haute Marnes pour les raisons évoquées ci-dessus. Ils sont situés dans le Bassin du Sud Est de la France. Ce sont « *Saint Didier d'Aubenas* » d'âge Argovien situé sur la bordure ardéchoise, « *Trescléoux* » d'âge aussi Argovien et le site d'« *Espréaux* » d'âge hauterivien.

Le travail effectué est présenté en trois volets. La première partie concerne une synthèse des connaissances actuelles sur les caractéristiques mécaniques pour les formations argileuses, les types d'anisotropie (résistance, comportement, stratification), et les microstructures qui les affectent. Le deuxième volet présente les résultats d'une analyse microstructurale des failles qui traversent ces sites d'étude (faille normale et CHF) au sein des argiles, pour décrire et discuter le fonctionnement de ces structures. Enfin, une troisième partie décrit les résultats d'une modélisation avec le logiciel 3DEC, choisie pour étudier le rôle de divers paramètres mécaniques et géologiques dans l'initiation de la fracturation des multicouches argilo-calcaire sous un régime extensif. Une attention particulière est portée sur le rôle de l'anisotropie au sein de ces systèmes avec et sans pendage des couches.

I Contexte général et synthèse des connaissances

I-1 Présentation de l'entreprise

Mon stage s'est déroulé au laboratoire de l'ISTEP situé à l'Université Paris VI, en partenariat avec l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).

L'IRSN est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle conjointe de différents ministères.

Ses champs de compétences couvrent l'ensemble des risques liés aux rayonnements ionisants utilisés dans l'industrie ou la médecine, ou encore aux rayonnements naturels. Plus précisément, il exerce ses missions d'expertise et de recherche dans les domaines de :

- Surveillance radiologique de l'environnement et intervention en situation d'urgence radiologique,
- Radioprotection de l'homme,
- Prévention des accidents majeurs dans les installations nucléaires,
- Sûreté des réacteurs,
- Sûreté des usines, des laboratoires, des transports et des déchets,
- Expertise nucléaire de défense.

Mais l'IRSN apporte aussi :

- une contribution à la formation et à l'enseignement en radioprotection,
- une définition et une mise en œuvre de programmes de recherche nationaux et internationaux,
- une contribution à l'information du public,
- une réalisation d'expertises, de recherches et d'analyses, de mesures ou dosages pour des organismes publics ou privés.

Les activités de recherche, réalisées le plus souvent dans le cadre de programmes internationaux, permettent à l'IRSN de maintenir et de développer son expertise, ainsi que d'asseoir sa stature internationale de spécialiste des risques dans ses domaines de compétence.

L'IRSN est réparti sur 11 sites à travers la France et les DOM – TOM ; son siège social se trouve à Fontenay-aux-Roses, 31 avenue de la Division Leclerc.

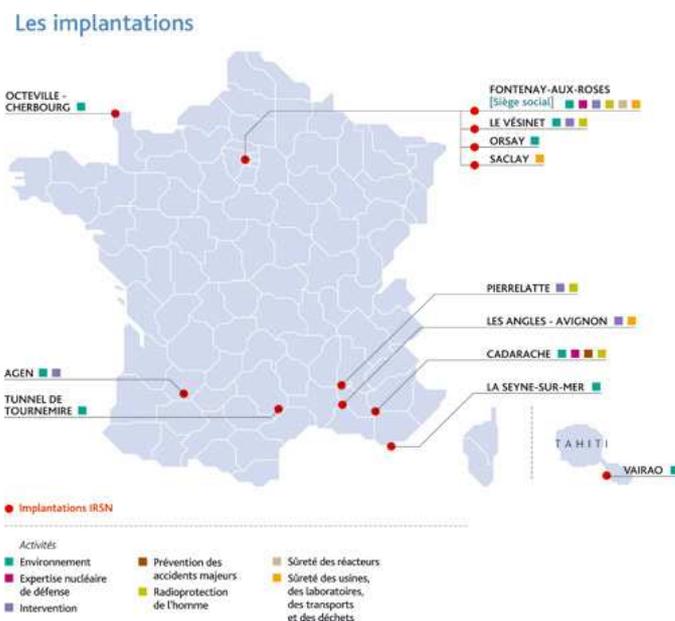


Figure 1: Implantations des sites de l'IRSN en France et dans les DOM TOM

Dans le cadre de ce stage j'ai travaillé plus particulièrement avec le BERIS, « Bureau d'Expertise et de Recherche pour la sûreté des Installations de Stockage de déchets radioactifs », dans le SEDRAN, « Service d'Expertise des Déchets RADIOactifs et de la radioactivité Naturelle ». L'IRSN étudie les propriétés des formations argileuses au moyen d'un laboratoire souterrain situé dans l'Aveyron à Tournemire, traversant la formation au Toarcien. L'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) étudie notamment la roche-hôte, le Callovo-Oxfordien au moyen d'un un laboratoire situé dans l'Est du Bassin de Paris dans les départements de Meuse et de Haute-Marne (Bure) pour une potentielle implantation d'un stockage de déchets HA-MAVL à proximité de ce laboratoire.

- **L'iSTeP**, L'Institut des Sciences de la Terre Paris est un laboratoire de recherche. C'est une Unité Mixte de Recherche (UMR) sous la double tutelle de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) et du CNRS.

Il rassemble plus de 130 chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens et administratifs et comprend plusieurs UMR (Tectonique, Pétrologie-Minéralogie, Biominéralisations).

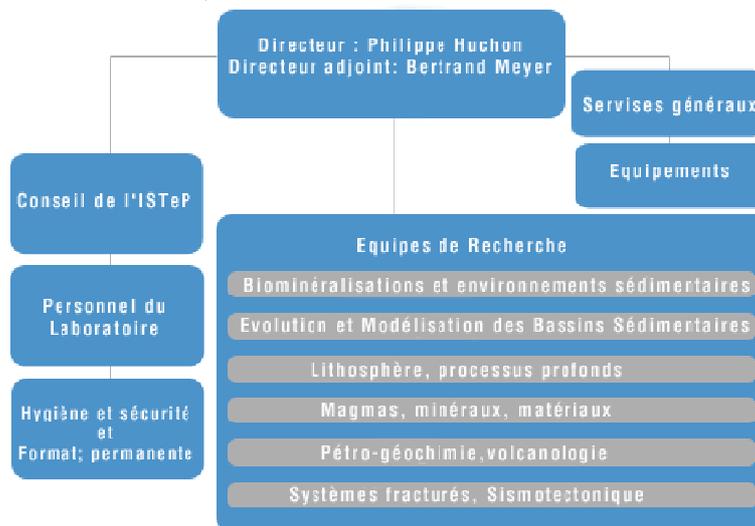


Figure 2: Organigramme de l'iSTeP

Ses principales thématiques de recherche concernent la rhéologie de la lithosphère, la dynamique des bassins sédimentaires, les biominéralisations comme traceurs de l'environnement et la dynamique planétaire vue par la pétro-géochimie. Il travaille en partenariat avec de nombreux organismes nationaux (ANDRA, IRSN, BRGM...), internationaux et industriels (Shell, GDF Suez, Total).

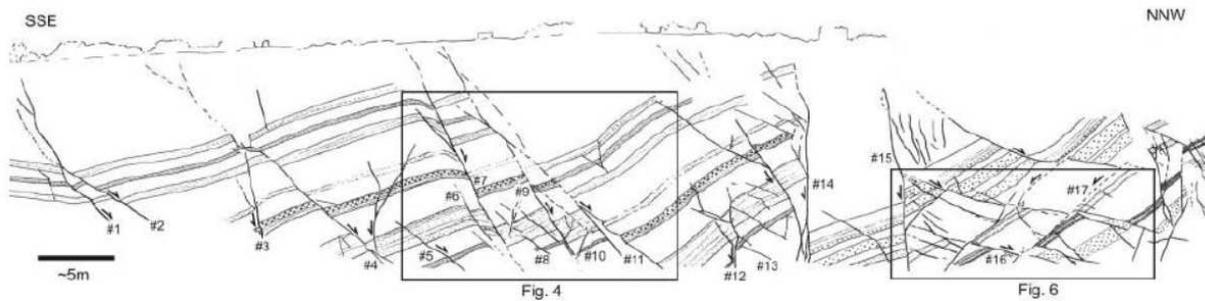
I-2 Architecture et évolution des zones de fractures dans les formations argileuses.

I-2-1 Fracturation dans les systèmes multicouches

A/ Notion de « fracturation différentielle »

La fracturation dans les milieux multicouches présente des caractéristiques étroitement liées à la géométrie de l'encaissant géologique sur le site (lithologie, déplacement...) ; lorsque

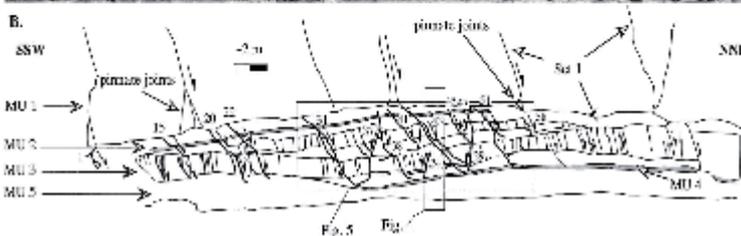
ces caractéristiques dépendent des lithologies, on parle de fracturation différentielle. Ainsi, la bibliographie montre des localisations particulières en étroite relation avec les formations multicouches, affectées par des systèmes de failles normales comme des segmentations associées à des échelons et/ou à des zones de relais, des variations du pendage des failles (Figure 3). Sur tous ces systèmes, certaines failles verticales se propagent et sont donc « non restreintes ». D'autres ne se propagent pas verticalement dans les unités qui l'encadrent et peuvent être stoppées, dans leurs unités sédimentaires, au niveau de leurs extrémités par des structures particulières nommées « restricteurs ». Ceux-ci peuvent être des interfaces sédimentaires et/ou des failles subparallèles à la stratification. Dans ce dernier cas, l'architecture de la faille est profondément perturbée. (Roche, 2011, Benedicto et al, 1996 ;



Seranne et al, 1995 ; Gross et al, 1997 ; Wibberley et al, 2007 ; Jackson et al, 2006 ; Smart et al, 2009). De telles structures ont aussi été décrites à des échelles métriques à pluri-hectométrique (Bradshaw, 1988 ; Jackson et al, 2006).



Figure 3 : Systèmes de failles dans des systèmes multicouches. A : Couches de grès éolien massif (MU 1, inter banc dans MU 2 et MU3) et de roches argileuses (shale et pélites) à Split Mountain, (Utah, U.S). Des joints sont confinés dans les couches gréseuses et des failles dans les couches argileuses. Les extrémités des failles sont majoritairement localisées sur les contacts argilo-gréseux même si plusieurs failles traversent l'ensemble des couches. D'après Wilkins et Gross (2002).



B : Alternances de couches incompetentes argileuses (pélites et shales) (en blanc) et de couches compétentes (des grès et des cinérites) (motifs mouchetés) dans la mine de Lanières de Tréviels, bassin de Lodève (France). Des failles sont confinées dans des unités incompetentes, d'autres failles et des joints sont confinés dans les couches compétentes. Des extrémités de failles sont localisées sur des failles subhorizontales. D'après Wibberley et al. (2007).

B/ Observation et descriptions des CHF

Au regard de la fracturation décrite dans les multicouches, il apparaît que les unités peu compétentes comme les argiles sont souvent affectées de plans de glissement subhorizontaux. Ces plans ont été observés aussi bien dans des systèmes multicouches argileux/gréseux (Wilkins et Gross, 2002) qu'argileux/calcaire. Ceux-ci se trouvent aussi bien à proximité que loin des failles normales et n'affectent jamais tous les bancs argileux d'un site. (Ferril et Morris, 2008 ; Wilkins et Gross, 2002, Wibberley et al, 2007). A l'échelle métrique, ces structures sont généralement interprétées comme formées durant ou après une phase compressive (Evans, 1994 ; Gross et al 1997), contrairement à certains auteurs qui décrivent des recoupements complexes entre les failles normales et ces structures indiquant des mouvements en lien avec un contexte extensif (Roche, 2011 et Wibberley et al, 2007).

L'étude effectuée par Roche (2011) apporte une documentation macrostructurale de ces plans, sur certains sites du bassin du Sud Est de la France, qui décrit au sein des argiles la présence de système de failles subparallèles à la stratification qu'il a nommé « CHF » (Clay horizontal Faults). L'observation de ces sites a montré que ceux-ci sont striés, surlignés par une fine couche de calcite (millimétrique) et que le pendage était généralement inférieur à 10° (faible) (Figure 4). Le relevé systématique effectué par Roche, 2011 des stries portées par les CHF a permis de conclure que ces structures se forment en complexe tabulaire, en extension et sous l'effet de la même phase tectonique que les failles normales. Ces plans ont par ailleurs été parfois réactivés par des phases tectoniques compressives tardives. De plus, ces structures peuvent ne pas intervenir dans la géométrie des failles mais la plupart du temps, elles affectent la fracturation différentielle en jouant le rôle d'un restricteur, par arrêt de la propagation des failles ou par un changement de pendage (Ferril et Morris, 2008 ; Roche, 2011).



On connaît peu d'indication sur le mécanisme et l'origine de la formation de ces plans, mais en comparant les sites on observe une tendance à la présence de ces CHF dans des systèmes multicouche comportant des épaisseurs de couches de calcaires plus importantes que d'argiles. De même, il semblerait que les sites présentant ces structures aient été enfouis à des profondeurs minimales de 1500 m.

Figure 4 : Illustration d'un CHF présent sur le site de trescléoux

C/ Failles restreintes par un CHF

Comme cité plus haut, les CHF induisent généralement des géométries particulières en affectant les failles normales en tant que restricteurs. Ainsi, ces failles restreintes verticalement présentent des profils de déplacement différents de ceux des failles non restreintes. Elles présentent des profils en « M » c'est-à-dire des gradients de déplacement faible au centre des failles et des valeurs de gradient fortes aux extrémités restreintes (Roche, 2011 ; Nicol et al, 1996b ; Wilkins et Gross, 2002). En conséquence, le rapport de déplacement maximal par rapport à la longueur des failles restreintes est modifié par la restriction, impliquant une caractérisation impossible. Ces valeurs de gradient des profils de déplacement des failles restreintes de type failles subhorizontales sont toujours caractérisées par des gradients supérieurs aux valeurs des gradients des failles non restreintes (Gross et al, 1997, Roche , 2011, Wilkins et Gross, 2002).

D'autre part, d'après Gross et al. (1997), Wibberley et al (2007) et Roche. (2011) certaines failles s'exprimant sur les sites étudiés, présentent de fortes singularités architecturales alors que d'autres ont à première vue une géométrie identique aux failles non restreintes en présence de restricteurs de type CHF. Ainsi, ce CHF est responsable d'un élément de la fracturation dans les unités sous-jacentes. Les failles restreintes par un CHFs présentent en effet des épaisseurs de zone de faille plus importantes, à titre d'exemple de l'ordre de 50 cm à 2 m lors d'interactions avec des CHFs, et moindre en l'absence d'interaction, de l'ordre de 0 à 50 cm (Roche, 2011). Ces fortes singularités architecturales sont en fait un étalement de la faille.

Comme cité plus haut, certaines failles ne sont pas du tout perturbées par les CHFs et au contraire, certaines se connectent à ces structures, permettant de former des zones de relais entre des systèmes de failles normales normalement indépendant les unes des autres. Ces zones de relais suivent une relation linéaire reliant l'espacement entre un système de faille dans une couche et l'épaisseur d'une couche (Soliva et al, 2006 et Ackerman et al, 2001).

Par ailleurs, il existe une autre restriction de type « interface lithologique », qui quant à elle affecte ces failles normales de la même façon que les CHFs, mais sans provoquer de zone de relai entre failles. Ces observations indiquent comment la restriction, l'architecture et la propagation des failles sont à la fois dépendantes de l'anisotropie sédimentaire et de la présence de failles subhorizontales dans les argiles. Ces caractéristiques géométriques dans les couches incompetentes semble dépendre du comportement rhéologique (paramètres mécaniques, cohésion, friction, comportement ductile ou cassant).

I-2-2 Caractéristiques pétrophysiques des formations argileuses

A/ Minéralogie

Les roches argileuses sont des roches sédimentaires à granulométrie très fine (taille des grains $\leq 1/256$ mm $\approx 4\mu\text{m}$ d'après Pincus (1981)) qui appartiennent donc aux « mudstones » (taille des grains $\leq 1/16$ mm (Olhoeft and Gordon, 1989)) et qui présentent une minéralogie à dominance argileuse. Cela comprend les argilites, les marnes et les « shales ».

Les marnes sont composées essentiellement de minéraux de calcite et d'argiles ; les argilites sont composées de calcite, d'argiles, d'une fraction silteuse essentiellement composée de quartz ou de feldspath et de minéraux accessoires comme la sidérite ou la pyrite ; les « shales » sont des roches à granulométrie fine, riches en argiles et avec une fabrique en couches. Ces roches représentent près de 4,2% du volume de la croûte terrestre (Meunier, 2003).

Ces argiles ont une structure feuilletée : ce sont des phyllosilicates. La plupart de ces minéraux ont une forme allongée et aplatie et sont de dimension très variable (Meunier, 2003). Il existe différents empilement de feuillet appartenant à des familles représentées par les kaolinites, les illites, les smectites (montmorillonite, vermiculite), les chlorites et les interstratifiés (Tableau 1).

| Formation | Catégorie | illite/smectite | mica | smectite | chlorite | kaolinite | illite | chlorite/ montmorillonite | % CaCO ₃ | SiO ₂ |
|---|-----------|-----------------|-------|----------|----------|-----------|--------|------------------------------|---------------------|------------------|
| Charce | Marnes | 18 | | | 5 | 16 | 13 | | 48,5 | |
| Espréaux | | 18 | | | 5 | 16 | 13 | | 48 | |
| Argile de Boom | | 5,5 | | 16,5 | | 5,5 | 27,5 | | 45 | 25 |
| Opalines | | 5\20 | 65 | | 4\20 | 15\33 | 16\40 | | 5\28 | 24 |
| Mas d'alary (Lodève) | | 0\7 | | | 0\13.5 | 2\13.5 | 17 | 2\3.5 | 34 | |
| Toarcien de Tournemire | Argilites | 10 | 5\15 | | 2\5 | 10\25 | | | 10\30 | 19 |
| Argilites meuse /haute Marne | | | 45\50 | | | | | | 25\30 | 20 |
| black shales dévonien (plateau Appalache) | Shales | 15 | | | 10 | 0,4 | 35 | | 40 | |

Tableau 1 : Composition minéralogique des roches argileuses : les argiles d'Espréaux et La Charce (Fesneau, 2008), les black shales des Appalaches (John B Roen, 1983), les argiles à Opalines du Mt-Terri (Pearson F, 2003), les argilites de Meuse/Haute-Marne du Callovo-oxfordien (Gunzberger and Cornet, 2007), les argilites de Tournemire (Constantin, 2002), les argiles de Lodève (Wibberley, 2007), l'argile de Boom (Coll,1992).Le \ marque la variabilité du pourcentage du type d'argile au sein d'une formation argileuse.

B/ Propriétés mécaniques des formations argileuses

Les formations argileuses constituent des couches incompetentes définies par des propriétés mécaniques telles qu'une faible résistance (un angle de friction faible, une cohésion faible) et un faible module de Young (Tableau 2).

| | Module de Young | Friction, tanφ | Cohésion, S (MPa) |
|----------|------------------|-----------------------|-------------------|
| calcaire | 44 (7-80) | 0.7 (0.34-1.1) | 45 (25-70) |
| Grès | 20 (2-73) | 0.7 (0.45-1) | 45 (30-70) |

| | | | |
|--------|------------------|-------------------------|-------------------|
| argile | 14 (1-68) | 0.45 (0.14-1.43) | 35 (25-60) |
|--------|------------------|-------------------------|-------------------|

Tableau 2 : Propriétés mécaniques de trois roches sédimentaires représentatives. Les données en gras représentent la moyenne des valeurs dans la parenthèse. Les valeurs du module de Young, friction et cohésion sont d'après Hatheway et Kiersch(1989, Einstein et Dowding(1981), et Lockner (1995).

Lois de comportement :

Un corps qui se déforme uniquement de manière parfaitement réversible a un comportement élastique. Si cette déformation est indépendante du temps, le corps a un comportement élastique parfait, sinon le corps est qualifié de viscoélastique. Pour un corps élastique linéaire, la déformation évolue linéairement avec la contrainte et pour un corps élastique non-linéaire, la pente de la courbe contrainte/déformation varie avec le niveau de contrainte. Le comportement élastique linéaire isotrope des roches est décrit par deux paramètres, le module Young (E) et le coefficient de Poisson. Pour les roches argileuses, E varie de 1 GPa à 68 GPa, avec une valeur moyenne de 14 GPa et le module d'Young des roches argileuses est deux à quatre fois plus petit que celui des roches carbonatées (Hatheway et Kiersch (1989), Gunzberger et Cornet, 2007). Les argilites de Meuse/Haute-Marne ont un module d'Young statique et dynamique qui varie respectivement de 2,5 GPa à 6,9 GPa (Gunzberger et Cornet, 2007) et de 12 GPa à 20 GPa (Sarout et Guéguen, 2008).

| Unité | Roches | E (GPa) | ν |
|-----------|------------|------------------|---------------------|
| Argileuse | marnes | 26 (7-48) | 0.2 (0-0.33) |
| | shales | 13 (1-68) | 0.1 (0-0.34) |
| | Espréaux | 24 | 0.15 |
| | Tréscléoux | 33 | 0.22 |
| | Flaviac | 5 | 0.1 |

Tableau 3. Tableau récapitulatif des valeurs de module d'Young (E) et de coefficient de Poisson (ν). Les valeurs en gras indiquent la valeur moyenne et les valeurs entre parenthèses indiquent les valeurs minimales et maximales. Ces synthèses sont obtenues à partir des données de Hatheway et Kiersch (1989) et de Roche, (2011)

Le coefficient de Poisson des roches argileuses est en moyenne légèrement plus faible que celui des roches carbonatées. Sa valeur varie peu selon le type de roche (Figure 5). Pour les argilites de Meuse/Haute-Marne, le coefficient de Poisson est insensible à la minéralogie et il augmente légèrement avec la saturation en eau de la roche et avec la pression de confinement (Chiarelli et al., 2003 ; Sarout et Guéguen, 2008).

Il existe trois paramètres pour définir l'enveloppe de rupture : la cohésion (S), l'angle de friction interne (φ) et la résistance en tension (T) (Tableau 4). Les roches argileuses et carbonatées présentent des variations de S similaires et les valeurs moyennes sont légèrement plus faibles pour les roches argileuses. En moyenne, T des roches argileuses est six fois plus petit que celui des roches carbonatées. En moyenne, φ des roches argileuses est légèrement plus faible que celui des roches carbonatées.

| Couche | S (MPa) | T (MPa) | Φ (°) |
|--------------------------------|------------|-----------|------------|
| carbonatée | 45 (25-70) | 12 (4-18) | 35 |
| argileuse | 30 (25-55) | 2(1-10) | 25 |
| Argilites de Meuse/Haute Marne | 19-49 | 1-5 | 22 |
| Toarcien | 13-32 | 3.6 | 20 |

Tableau 4. Trois paramètres des enveloppes de rupture. Pour la cohésion (S) et la résistance en tension (T), la valeur en gras représente la moyenne, les valeurs en gras et entre parenthèses représentent la gamme comprenant 50% des valeurs naturelles. D'après les données de Lockner (1995). Pour la friction (φ), seules la valeur moyenne et la gamme de variation sont représentées. D'après les données d'Einstein et Dowding (1981). Les valeurs des argilites de Meuse/Haute-Marne (COx) d'après Fabre (2005) et des argilites du Toarcien d'après Constantin (2002) sont aussi indiquées. Les deux valeurs de S pour ces deux roches ainsi que les deux valeurs de T pour les argilites de Meuse/Haute-

Marne correspondent aux valeurs de résistance mesurées respectivement parallèlement et perpendiculairement à la stratification (anisotropie).

L'Anisotropie

Bauschinger (1884), Föppl (1900), Prandtl et Rinne (1909), Muller (1930) ont observé l'influence de l'anisotropie sur le comportement élastique et la résistance à la rupture. Ils constatent, une variation de la résistance à la compression simple et du module d'Young en fonction de la direction de la contrainte par rapport aux plans d'isotropie ainsi qu'une augmentation de la résistance à la rupture et du module d'Young avec la pression de confinement (Fabre, 2005). Nous utiliserons ici les termes d'anisotropie d'élasticité et d'anisotropie de rupture, pour décrire les paramètres que l'on utilise en modélisation sur un système multicouche (Chap. III). Ces deux types d'anisotropie ne sont pas comparables car elles mettent en jeu des données et des ordres de grandeurs différents.

De par leur structuration en feuillet, certaines roches montre une anisotropie de comportement élastique (Tableau 5). Les études menées sur les argilites de Tournemire, de Meuse/Haute-Marne et les argiles à Opalines montrent que ces roches sont isotropes transverses (Constantin, 2002; Hommand et al., 2006; Corkum et Martin, 2007). La valeur du module d'Young est isotrope et maximale dans les directions parallèles au plan de stratification (E_{par}) et minimale dans la direction perpendiculaire à la stratification (E_{per}). Selon les roches, cette anisotropie peut être moyenne ($E_{par}/E_{per} \approx 3$) à faible (Roche, 2011).

| | COx | Toarcien | Argiles à Opalines | Espréaux (Hauterivien) | Tréscléoux (Argovien) | Vogué (Argovien) | Flaviac (Callovo-oxfordien) |
|-----------|------------------|----------|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|
| Epar/Eper | 1.2 (1 à 1.4) | 2.9 | 2.9 | 1.45 | 1.40 | 1.43 | 3.82 |
| Ec/Ea | 1.9 | | | 2.2 | 1.4 | 1.3 | |

Tableau 5. Anisotropie du module d'Young (E_{par}/E_{per}) pour différentes roches argileuses et rapport de modules de Young entre les calcaires et l'argile (Ea/Ec). COx : argilites de Meuse/Haute-Marne, Toarcien : argilites du Toarcien de Tournemire, Espréaux : marne ou argilite de l'Hauterivien, Tréscléoux et Vogué : argile de l'Argovien, Flaviac : argilite du Callovo-oxfordien. D'après les données de Niandou et al. (1997), Constantin (2002), Thury (2002) et Roche (2011).

Le coefficient de Poisson peut être aussi utilisé pour définir l'anisotropie mais celui-ci est peu utilisé car mal caractérisé (Y. Li, 1976). De même, la gamme du coefficient de Poisson est assez restreinte de l'ordre de 0-0,34 pour les argiles (Hatheway et Kiersch, 1989), pouvant ne pas donner de résultat explicite d'anisotropie pour une roche.

Les roches argileuses présentent une anisotropie de résistance à la rupture en relation avec la structure en feuillets des phyllosilicates qui constitue préférentiellement des **plans de faiblesse préférentiels**. Ainsi, pour des pressions de confinement variables de 7 MPa à 100 MPa, les valeurs minimales de résistance sont atteintes lorsque la contrainte et la stratification forment un angle proche de 30° et il existe une certaine gamme d'angles pour laquelle la résistance à la rupture est plus faible. La forme de ce « creux » de faiblesse à la rupture est plus ou moins concave ou triangulaire (Paterson et Wong, 2005). Ce résultat est sensiblement similaire pour les argilites de Tournemire et pour les argilites de Meuse/Haute-Marne (Fabre, 2005) (voir figure 7A et B). Ramurthy (1993) définit l'importance de cette anisotropie au niveau de l'évolution de la résistance à la compression simple (σ_c), en fonction de la direction du chargement par rapport à l'orientation des plans isotropes (Tableau 6). Le coefficient

d'anisotropie, R_c , est défini comme le rapport ; $R_c = \frac{\sigma_{c90^\circ}}{\sigma_{cmin}}$ où σ_{c90° est la

compression simple appliquée perpendiculaire à l'orientation des plans isotropes et σ_{\min} est la compression minimale obtenu pour la rupture pour des plans obliques.

| Coefficient d'anisotropie R_c | Anisotropie | Exemples de roches |
|---------------------------------|-------------|--------------------|
| 1,0 - 1,1 | Isotrope | Grès |
| 1,1 - 2,0 | Faible | |
| 2,0 - 4,0 | Moyenne | Schistes |
| 4,0 - 6,0 | Forte | Ardoises |
| > 6,0 | Très forte | |

Tableau 6. Classification des roches en fonction de leurs coefficients d'anisotropies, basées sur les données disponibles dans la littérature, d'après Ramurthy (1993)

Les roches argileuses se situent dans une gamme de coefficient d'anisotropie, de $R_c = 2,0$ à $4,0$ ayant donc une anisotropie moyenne.

Ramurthy (1993) définit par ailleurs trois formes d'anisotropie, l'anisotropie en U (« U type anisotropy »), l'anisotropie en épaule (« Shoulder type anisotropy ») et enfin l'anisotropie ondulée (« Undulatory type anisotropy »).

Dans l'anisotropie en U, σ_c est maximale pour $\beta = 90^\circ$ et minimale pour $\beta = 30^\circ$ ce qui est généralement mesuré sur des roches dont l'anisotropie a pour origine des plans de faiblesse comme les schistes ardoisiers ou les ardoises. Les roches possédant une anisotropie en épaule présentent un maximum de σ_c pour $\beta = 0^\circ$ et un minimum pour $\beta = 15^\circ$ à 30° . L'anisotropie « ondulée » a été observé sur des charbons ou des roches très litées comme la diatomite. Le

maximum de σ_c se situe à $\beta = 90^\circ$ et le minimum autour de $\beta = 30^\circ$. Ce type d'anisotropie est généralement du à la présence de plusieurs plans de faiblesse qui s'entrecroisent, l'anisotropie n'est donc dans ce cas pas de type orthotrope de révolution (Figure 5).

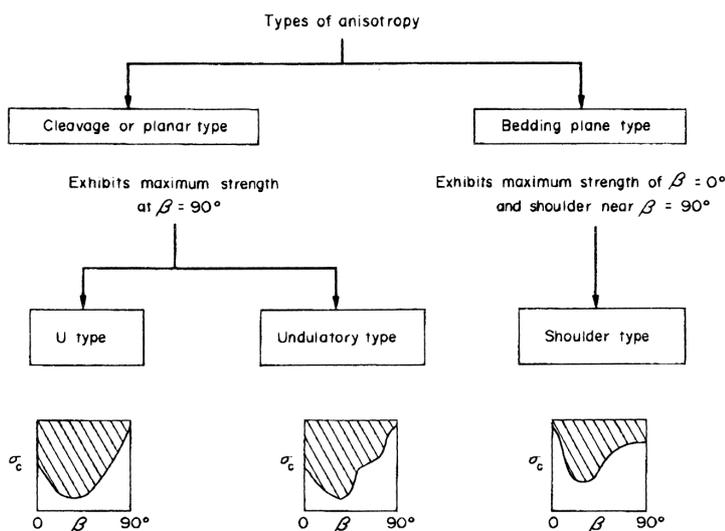
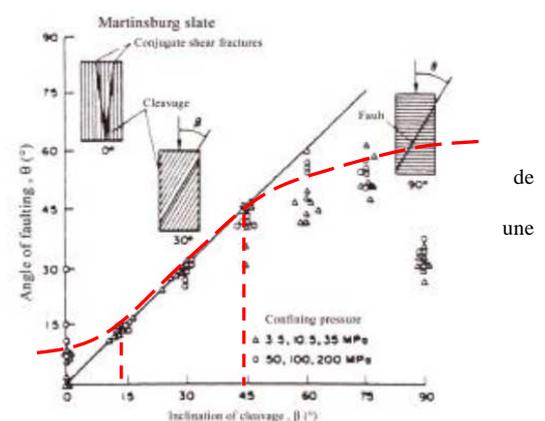


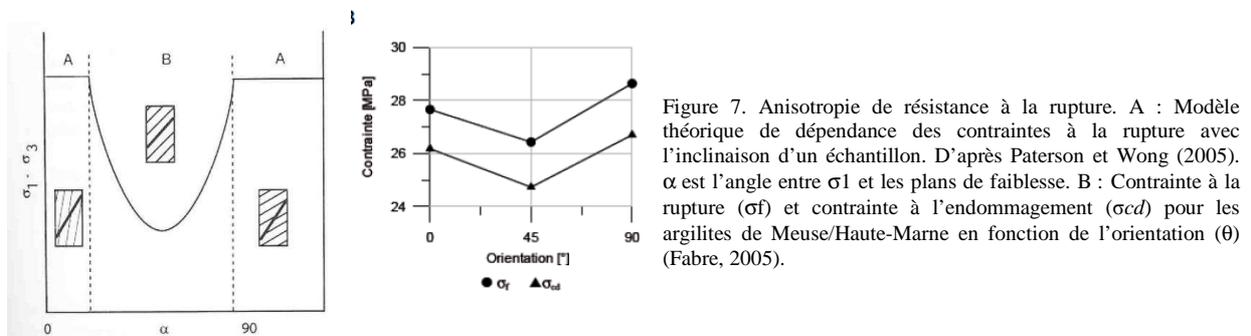
Figure 6. Angle de rupture par rapport à l'axe de compression en fonction l'inclinaison (β) du plan de faiblesse d'une ardoise. D'après Donath (1964). Chaque point représente une rupture. Lorsque le clivage présente inclinaison β comprise entre 15° et 45° par rapport à l'axe de compression, alors les points s'alignent le long de la droite ($y=x$) indiquant que l'angle de la fracture et l'angle du clivage par rapport à la compression sont identiques et donc que les failles utilisent les plans de faiblesse.

Figure 5. Classification de l'anisotropie d'une roche en fonction de sa résistance à la compression simple suivant différentes orientations, d'après Ramurthy (1993) (Fabre 2005).



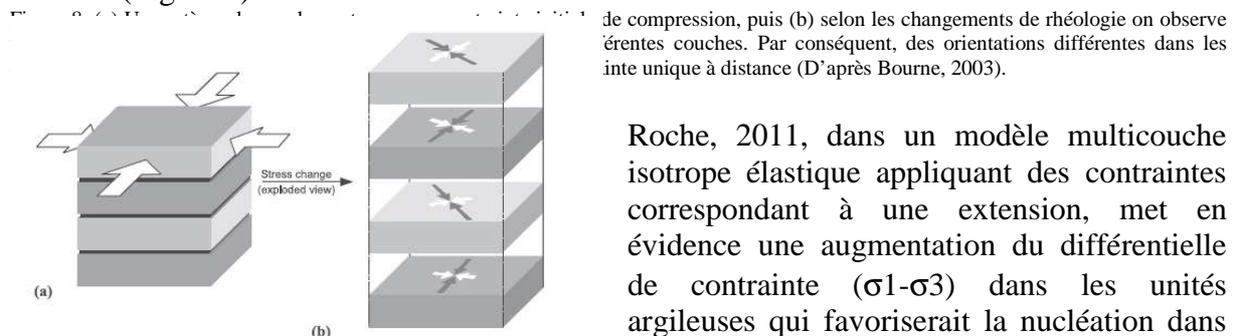
Dans le cas de la figure 7, ces coefficients d'anisotropie impliquent que pour des angles compris entre 15° à près de 45° - 60° (région B), les plans de faiblesse sont préférentiellement activés et la rupture se produit dans le plan de faiblesse quelle que soit l'inclinaison. Par contre, pour des angles non compris entre 15° et 45° , 60° (région A), la rupture se produit suivant le critère isotrope de Mohr-Coulomb (Figure 7A). Il en va de même pour Donath, 1964 (Figure 6). Un tel processus peut avoir des implications très importantes. Dans un

système multicouche tabulaire, les plans préférentiellement orientés qui pourraient être d'hypothétiques des plans de faiblesse peuvent être les litages horizontaux liés à la structure planaire des phyllosilicates présents dans les roches argileuses. Dans un système en extension, σ_1 est verticale et σ_3 est horizontale. L'angle entre σ_1 et le litage ou les interfaces argiles/calcaires est donc égal à 90° . **Une réactivation de ces plans nécessite donc une rotation de σ_1 et de σ_3 associée par exemple à des perturbations directionnelles des contraintes où à une inclinaison des couches.**



I-2-3 Variabilité des contraintes dans les systèmes multicouches.

Les modélisations numériques indiquent que les contraintes varient en regard de la lithologie (Gunzerberger et Cornet, 2007). Selon Bourne (2003), un modèle élastique soumis à des contraintes correspondant à une compression, montre que la direction des contraintes principales parfois ne reflète pas l'orientation des contraintes dans les couches, impliquant une rotation des contraintes différentes selon les couches. Ainsi, il se pourrait que dans un régime extensifs, des phénomènes comparables apparaissent au sein de ces multicouches. Ces états de contraintes dépendent des propriétés élastiques et de contraste dans l'épaisseur des couches (Figure 8).



un rôle important : les augmentations de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ sont plus importantes dans des couches plus fines qui sont donc le lieu de nucléation des fractures.

I-2-4 Microstructures

La lecture des fractures à l'œil nu n'a pas toujours été facile dans les argiles en raison de la qualité souvent médiocre des affleurements en raison de leurs altérations et de leurs fracturations ne montrant généralement pas de marqueurs cinématique. L'observation à l'échelle microstructurale a montré que les formations argileuses présentent des fractures semblables à celles connues dans d'autres roches sédimentaires comme les calcaires ou les grès. Les fractures présentant un remplissage sont les plus « évidentes » et les suivantes ont été reconnues dans les argiles.

De nombreuses microstructures on déjà été étudiées et décrites dans diverses formations et plus particulièrement dans le domaine de recherche concerné par cette étude sur les argiles et les failles (Constantin, 2002, Fabre, 2005, Cox, 1987). Ces « objets » peuvent

définir des séquences chronologiques et amener des confirmations, des corrélations ou des démentis à des relations cinématiques macrostructurales établies antérieurement.

Parmi ces microstructures on trouve :

- des remplissages « en bandes » composés de phénocristaux de calcite présents au centre des zones de faille. Ces bandes de calcite peuvent avoir plusieurs structures, plusieurs compositions chimiques ainsi que des figures de surcroissance.
- Des dominos. Les dominos sont des structures géométriques qui traduisent une zone d'ouverture ; ils se développent au niveau de relais extensifs entre deux surfaces de cisaillement, les épontes ayant une géométrie en escalier, sans connaître le mécanisme d'ouverture ou de cicatrisation. Le terme de lithon est utilisé pour définir la portion de roche comprise entre deux dominos. Le remplissage peut se faire en crack-seal, par des cristaux de petite dimension et isodiamétriques sans fabrique de forme, par des cristaux montrant une direction d'ouverture ou par des cristaux qui croissent vers le centre indiquant une croissance en cavité ouverte. Leur géométrie reste variable pouvant être en escalier, de forme losangique ou courbe (Labaume et al, 1991 ; Cox, 1987 ; Constantin, 2002).

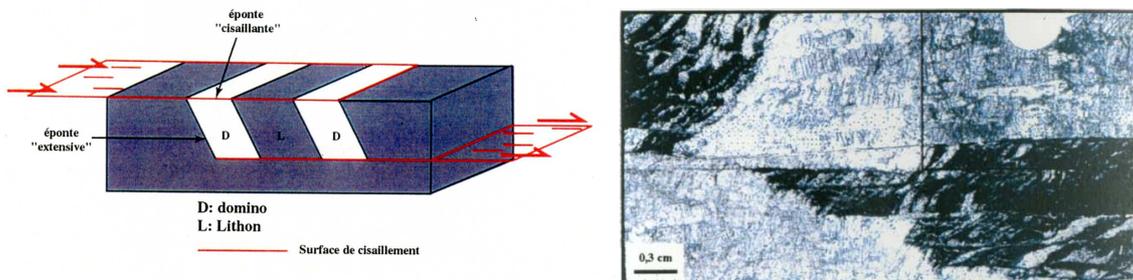


Figure 9: Illustration schématique et photo au microscope des ouvertures en domino (Constantin, 2002)

- Des cracks seals. Le processus de crack seal est la formation de veines par un mécanisme impliquant la croissance de celles-ci répétées par de petits incréments (Ramsay, 1980). Le schéma global est le résultat d'une séquence d'incrément de fissure (ouverture), suivie de périodes de précipitations dans les fissures (cicatrisation) (Renard F. et al. 2010). L'ordre est généralement de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres (Cox, 1987). L'événement du craquage (fissuration) correspond à l'ouverture d'une étroite fente remplie de fluide tandis qu'au cours de la période d'étanchéité, on précipite le fluide au sein de la fissure (Gaviglio 1986; Cox, 1987; Labaume et al. 1991). Les cristaux qui précipitent ont généralement un aspect fibreux, allongé ou en blocs de forme (Bons 2000). D'autre part, le taux de croissance des fibres doit être suffisamment rapide pour remplir l'espace ouvert avant la prochaine fissuration (Renard F. et al. 2010).

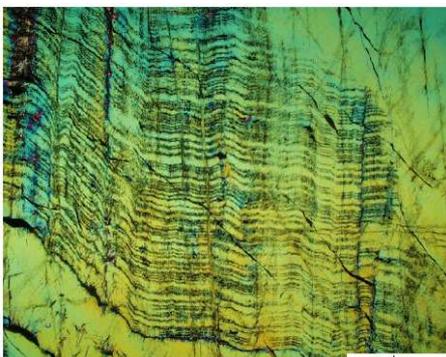


Figure 10 : Vue microscopique de structure de cracks-seals. Couches de quartz (lumière) alternant avec de la tourmaline (sombre), résultats des processus d'événements de craquage, suivie d'une précipitation de minéraux sur les parois de la fissure ouverte (Renard F. et al., 2010).

Les veines attribuées aux mécanismes des cracks seals sont généralement considérées comme la preuve de l'ouverture de fissure épisodique, due à des oscillations de pression de fluide orientée selon des ouvertures de type fente de tension (Ramsay, 1980; Cox 1991). Il est courant d'observer plusieurs centaines de crack seal successifs.

- Des zones bréchifiées qui regroupent des zones constituées de cristaux de calcite plus ou moins arrondis, fracturés, entourés dans une matrice constituée d'argile, de calcite et de

pyrite. Ces zones ne sont pas toujours présentes et ne sont jamais très étendus (Constantin, 2002).

- Des microfissures intragrain (figure 11) qui peuvent être présents d'une part dans les plages de cristaux de calcite et d'autre part dans les cristaux de remplissage des dominos et intergrain qui passe parfois à la limite des cristaux (Constantin, 2002). Celles-ci peuvent être subhorizontales et parallèles aux épontes, présentant une ouverture de l'ordre du centième de millimètre. Ainsi de nombreuses fissures ont aussi été décrits dans les argiles liées aux contraintes mais aussi à la tension exercée sur la roche (Fouché, 2004).

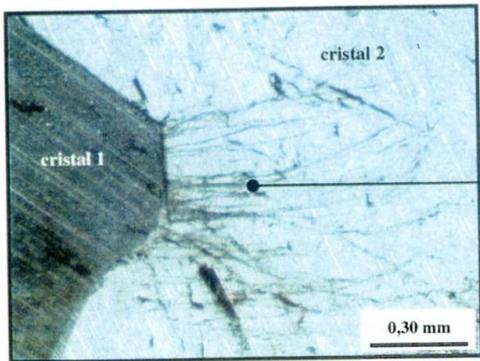


Figure 11 : Illustration de microfissuration intragrain des cristaux de calcite. (Constantin, 2002)

D'autres structures ont été aussi décrites comme les plans de stylolisation marquant une composante de fermeture voir cisailante quand on peut les contraindre par des marqueurs. L'orientation préférentielle des feuilletts d'argile a fait aussi l'objet d'étude en optique en optique (Constantin, 2002) mais aussi en minéralogie (Wenk H. 2010). D'autre part, des minéraux comme le quartz qui ne présente pas de clivage, la calcite, la pyrite qui se présente essentiellement sous forme de globules framboïdaux de quelques dizaines de μm de côté sont susceptibles d'être présent. Mais aussi de la muscovite se présentant généralement sous forme d'agrégats écailléux au clivage facile, de la biotite et de la glauconite (Fouché, 2004).

calcite, la pyrite qui se présente essentiellement sous forme de globules framboïdaux de quelques dizaines de μm de côté sont susceptibles d'être présent. Mais aussi de la muscovite se présentant généralement sous forme d'agrégats écailléux au clivage facile, de la biotite et de la glauconite (Fouché, 2004).

I-3 Contexte d'étude

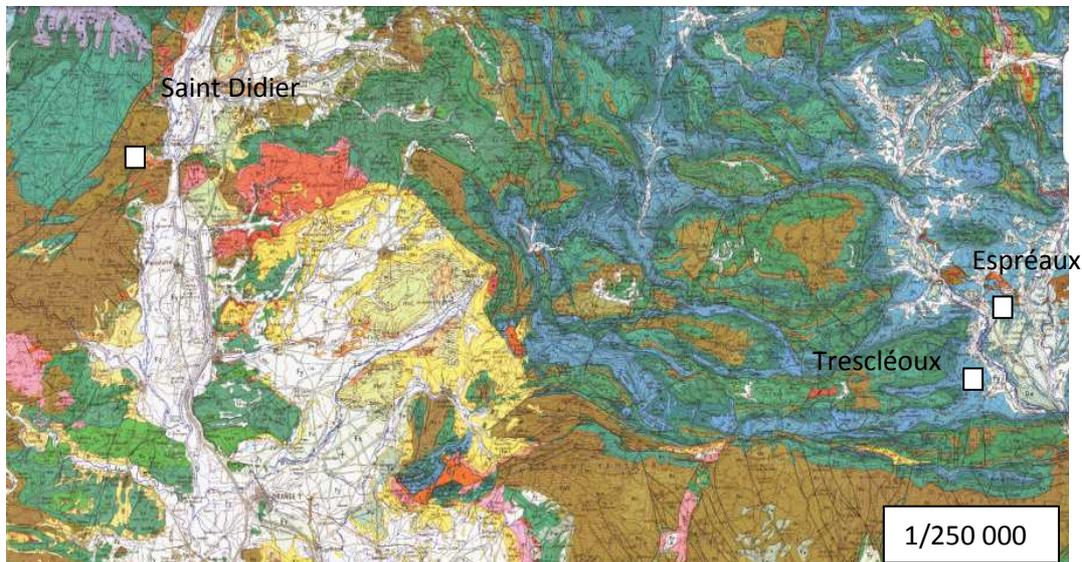


Figure12: Carte

du bassin du Sud Est représentant les lieux des sites étudiés.

Comme évoqué plus haut, trois sites ont été choisi dans le Bassin du Sud Est de la France, utilisé comme analogue à la formation argileuse du Callovo-Oxfordien en Meuse/Haute Marne, *Saint Didier d'Aubenas* d'âge argovien situé sur la bordure ardéchoise, *Trescléoux* d'âge également argovien et le site *Espréaux* d'âge hauterivien.

Lors de l'étude macrostructurale, Roche (2011) a observé des différences de pendage des failles normales au sein d'un système multicouche. Les structures étudiées sont des failles normales traversant des alternances argile/calcaire d'échelle métrique. On trouve, un fort

pendage (60°) au sein des calcaires, moindre dans le cas où elle traverse plusieurs couches d'alternance argilo-calcaire, et faible au sein des argiles. En effet, ces argiles contiennent deux types de failles l'une, normale, montrant un angle de 45° et l'autre de type CHF (15°). Tous ces sites présentent des CHFs et restreignent des failles à Saint Didier et à Trescléoux, alors qu'ils jouent le rôle de connecteurs à Espréaux et ainsi forment une zone de relais.

Le site d'Espréaux est constitué de séries mésozoïques présentant un pendage de 60° vers l'Est et recoupées obliquement par des failles, le tout étant affecté par plusieurs chevauchement de direction N-S, par des plis d'axe N-S et par des petits plis resserrés (Fig.13). Il possède des failles normales de direction N-S et des CHF's ayant un glissement « top vers l'Est », attribuable à un épisode extensif de direction E-W. Sur ces CHF's, deux directions de stries sont identifiées : compatible avec les failles normales et l'autre plutôt compatible avec les directions de compression (reprise ultérieure).

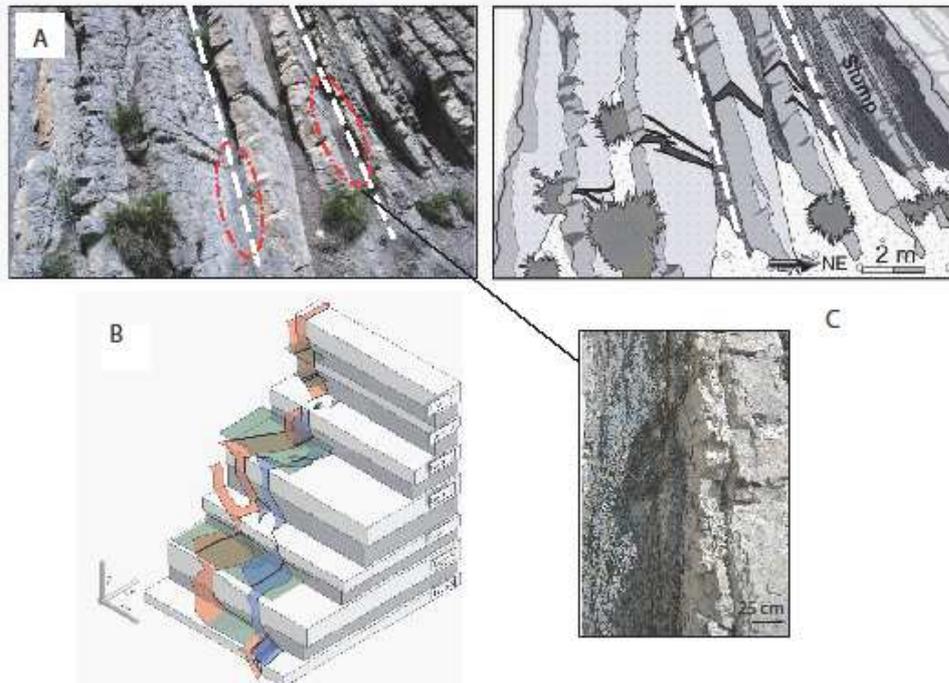
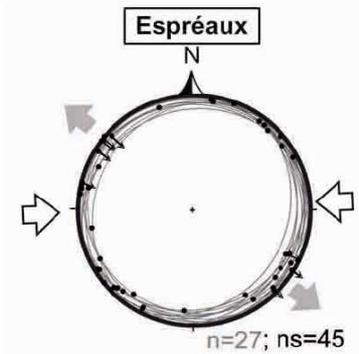
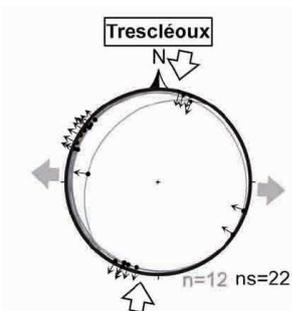


Figure 13: A :Vue générale du site des zones d'Espréaux. Photographies à gauche et photo-interprétations montrent l'alternance de bancs calcaires et argileux (Roche, 2011). Présence de plusieurs plans plats dans les argiles. Les tirets rouges représentent les zones où l'on a prélevée pour faire des lames minces. B : Zone de faille normale à Espreaux. Les couleurs orange et bleu sont utilisés pour aider à la visualisation des segments de faille. Les failles subhorizontales dans des couches d'argile sont en vert. Les lignes noires continue montrent des traces de la faille défaut de ligne commune). C : Photo du CHF vue sur le site d'Espréaux.

Le site de Trescléoux un escarpement rocheux haut de plusieurs dizaines de mètres et bordant le ruisseau sur une centaine de mètres. Les bancs présentent un pendage faible et appartient à un synclinal très large d'axe E-W. Il présente des failles normales de direction N20 et des CHF's ayant un glissement « top vers l'Ouest », associées à l'épisode extensif de direction E-W, Sur ces CHF's, il y a deux directions de stries, une compatible aux failles normales et l'autre plutôt compatibles avec les directions de compression.



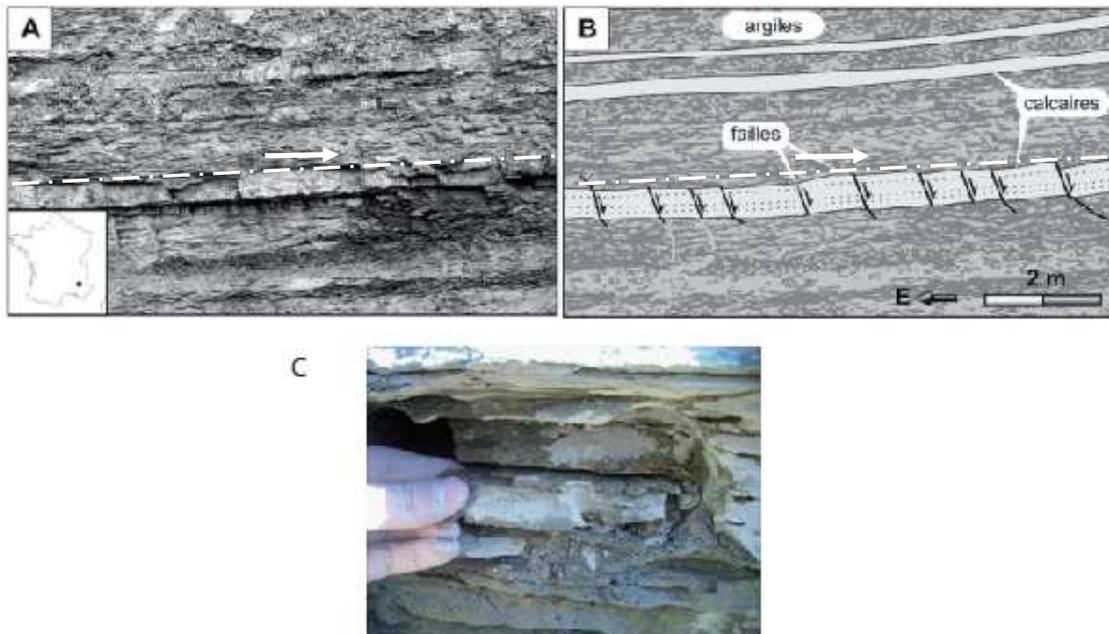


Figure 14: Vue générale de l’affleurement de Tréscléoux ; A : Photographies. B : interprétations montrent l’alternance de bancs calcaires et argileux (Roche, 2011) Les tirets rouges représentent les zones où l’on a prélevée pour faire des lames minces. Les tirets rouges représentent les zones où l’on a prélevée pour faire des lames minces. C : Photo du CHF situé sur Tréscléoux.

Le site de St-Didier se présente aussi comme un long escarpement rocheux haut d’une dizaine de mètres et bordant la route sur plusieurs centaines de mètres. Il appartient au grand monoclin des formations mésozoïques de la bordure ardéchoise et présente un pendage faible (Figure 15). On y trouve des failles normales de direction N10° et des CHF ayant un glissement « top vers l’Ouest », associées à l’épisode extensif de direction E-W.

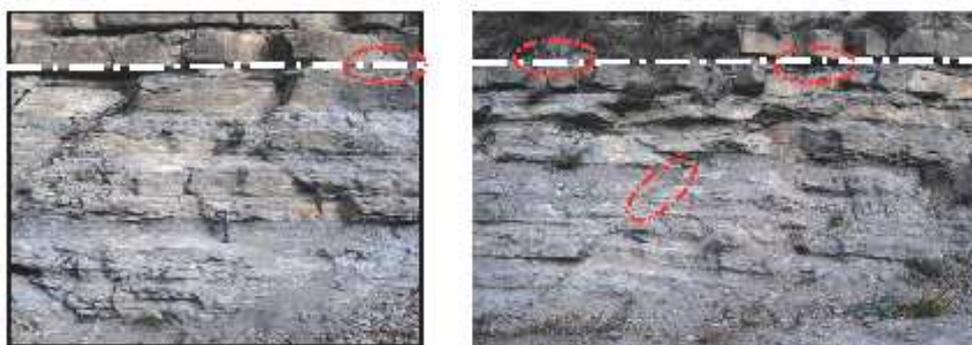
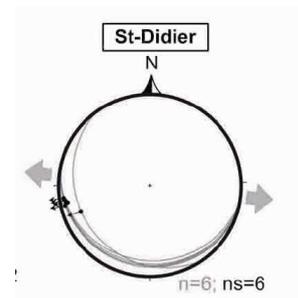


Figure 15 : Vue générale de l’affleurement de Saint Didier. Observation du CHF échantillonné ayant un glissement top Ouest et des failles normales dans les formations argileuse et calcaire échantillonnées, de direction moyenne N10. Les tirets rouges représentent les zones où l’on a prélevée pour faire des lames minces.

| Age, site et lithologie | | | Module de Young (E) (MPa) | Ratio module de Young (Ec/Ea) | coefficient de poisson | Anisotropie des argiles Epar/Eper |
|-------------------------|----------------------|----------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Hauterivien | Espréaux | calcaire | 80 | 2,22 | 0,33 | 1,40 |
| | | argile | 36 | | 0,23 | |
| Argovien | Trescléoux | calcaire | 64 | 1,42 | 0,31 | 1,30 |
| | | argile | 45 | | 0,27 | |
| Oxfordien | Meuse et haute Marne | calcaire | 34 | 1,90 | 0 | 1,2 (1 à 1,4) |
| | | argile | 18 | | 0,11 | |

Tableaux 7: Caractéristiques mécaniques connu sur les sites d'Espréaux, de Trescléoux et de la formation de Meuse et haute Marne (Roche, 2011).

II Approche microstructurale

II-1 Les sites d'études et zones échantillonnées :

Afin de progresser dans la compréhension de la fracturation des argiles, on a adopté une approche microstructurale car ces sites possédaient déjà des caractéristiques macrostructurales bien connues. Notre étude a porté sur des failles traversant des multicouches argiles/carbonates. Ces failles créés dans l'encaissant ont fait l'objet d'une étude détaillé. Après avoir résumé la méthodologie et les principales caractéristiques de ces objets, les observations effectuées dans cette étude, il sera présenté une conclusion pour chaque site.

Les échantillons des fractures proviennent des trois sites évoqués dans le chapitre I-3 (Tab.8). Les lames minces ont été réalisées sur les trois sites perpendiculairement au mouvement des failles et au total, 72 lames minces ont été confectionnées et analysées. La grande majorité des lames ont pu être exploitées et peuvent être représentative de chaque site. Ces 72 lames ont été réalisées dans des CHFs, de l'argile « saine », des failles normales dans les calcaires et les argiles et des zones plissée (Tab.8).

| Sites | Niveaux de CHFs | Niveaux d'argiles saines | Faille normale dans les argiles | Failles normales dans les calcaires | Zone de plissement | Total de lames minces |
|--------------|-----------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Espréaux | 4 | 4 | 1 | 2 | | 33 |
| Trescléoux | 1 | | 2 | 1 | 1 | 20 |
| Saint Didier | 1 | 1 | 2 | 2 | | 19 |

Tableaux 8: Tableau retraçant le nombre total de structures observées et prélevées sur les 72 lames représentant les 3 sites.

II -2 Méthodologie

Ce travail a été effectué a l'aide des outils classiques de la microscopie optique ainsi que de la cathodoluminescence et du MEB.

La cathodoluminescence à aussi été utilisé comme aide à la reconnaissance des différentes phases minérales, à la lecture des relations de recoupement pour établir la cinématique. Le principe de la cathodoluminescence repose sur le principe suivant un cristal soumis à une irradiation électronique émet une lumière dont la couleur et l'intensité sont fonction de la présence d'éléments dits inhibiteur ou activateur de la luminescence. L'activateur principal de la calcite est l'élément Mn²⁺ et l'inhibiteur principal Fe³⁺. Trois

paramètres définissent la fabrication de cathodoluminescence: la structure, la couleur et l'intensité. La structure correspond à l'arrangement des plages de couleurs au sein d'un cristal ou d'un groupe de cristaux. On distingue les structures « homogènes » et des structures « zonées ». La couleur dépend de la nature et de la localisation des éléments inhibiteurs et activateurs dans la maille cristalline. Enfin, l'intensité de luminescence est fonction du rapport des teneurs en cation Fe/Mn qui reflète les conditions d'oxydo - réduction du milieu au moment de la cristallisation. Les variations de ces paramètres apportent des indications sur des changements potentiels physico-chimiques de la solution de précipitation.

Le Microscope Electronique à Balayage (MEB) produit des images tridimensionnelles de la surface des échantillons avec une résolution pouvant atteindre quelques nm et une très grande profondeur de champ. Il permet également une microanalyse chimique élémentaire de la surface de l'objet par la méthode EDX (Energy Dispersive X-ray) et ainsi donner une composition minéralogique de la roche encaissante et de certains minéraux.

La lame est tout d'abord nettoyée et rendue conductrice par un dépôt de graphite ou d'une mince couche d'or afin d'éviter l'accumulation de charges. Ensuite, au sein du MEB, un faisceau électronique très fin balaie point par point et ligne après ligne la surface de l'objet. Diverses interactions entre les électrons incidents et la matière génèrent différents signaux dont certains sont utilisés pour construire des images et d'autres (RX) pour la microanalyse chimique.

Chaque zone de CHF échantillonnée a été examinée en détail au microscope optique, en lumière naturelle et en lumière polarisée. Nous avons aussi examinés les structures qui composent les CHFs et documentés dans la mesure du possible leurs géométries et leurs connections avec les failles normales. Un effort particulier a été porté pour établir des relations de chronologie entre les différentes structures. Les caractéristiques obtenues sur les différentes zones d'un même CHF ont été synthétisées afin d'obtenir un scénario évolutif du développement et du fonctionnement des CHFs.

II-3 Architecture des fractures –Observations

II-3-1 Les argiles encaissantes

Les observations effectuées grâce au MEB (Annexe 2 : planche MEB1 et planche MEB2), on pu donner une idée des compositions des argiles au sein des sites de Trescléoux et d'Espréaux. Avec le MEB, nous n'avons qu'une composition partielle et sans représentation de pourcentage des éléments au sein des argiles. Ainsi, on trouve sur Espréaux que les argiles sont composées de nombreux carbonates, de silice, de pyrite en quantité importante et d'argile de type muscovite et chlorite. Pour Trescléoux, on trouve de nombreux feldspaths, des oxydes, des sulfures, de la silice et de l'argile de type kaolinite.

II-3-2 Les failles subhorizontales (CHF) dans les argiles

II-3-2-1 Remplissage en « bande de calcite »

Sur le site d'Espréaux et de Saint Didier, on note la présence de phénocristaux disposés en « bande de calcite ». Ces cristaux peuvent avoir une taille pluri micrométrique à plurimillimétrique, allongée, orthogonalement aux épontes des failles, maclés ou non, et pouvant renfermer de nombreuses « inclusions solides » qui leur donnent un aspect sale (Annexe 1.1 : LME1a et Annexe 1.3: LMSD1a). En cathodoluminescence (CL), ils montrent une teinte orange sombre avec un remplissage de teinte homogène (Annexe 1.1 :LME1c et Annexe 1.3 : LMSD1c) en équilibre avec l'encaissant.

Les traces d'inclusions solides (roche encaissante) dans les cristaux de calcite ont aussi une couleur orange en CL. Ces inclusions sont formées de matériel arraché de la roche encaissante, au moment de l'ouverture.

Le site de Trescléoux présente un agencement de cristaux plus complexe (Annexe 1.2 : LMT1c). En plus des caractéristiques décrites plus haut, les cristaux présentent des zonations oranges en cathodoluminescence ce qui suggèrent des variations de chimie des fluides (Annexe 1.2: LMT1d). Autour de ces cristaux, on observe aussi un comblement d'oxyde de fer (de couleur jaune au microscope optique) et des cristaux fibreux (postérieurs à ces cristaux).

Les zonations sont de teinte d'alternance orange clair et orange foncé en cathodoluminescence ; elles sont interprétées comme des figures de surcroissance et observées en optique comme des cristaux de calcite non maclés « propres ». Ces alternances de phases orangées plus ou moins sombres avec la présence de cristaux édentés, érodés liées certainement à des phases d'érosions montrent un arrêt de la circulation du fluide. La position de cette zonation implique une origine plus tardive et la différence de teinte, probablement des conditions de minéralisations différentes et ainsi une génération de calcite distincte. Le remplissage en cristaux fibreux marque des conditions de minéralisation totalement différentes et possiblement contemporain à notre thème de recherche (formant possiblement des géodes).

Par contre, ces différences de chimie de calcite ne sont pas observées au MEB, malgré les résultats en optique et en cathodoluminescence. Il existe donc probablement des variations différentes chimiques mais invisible pour la résolution du MEB (Annexe 2 Planche MEB2), qui n'est que de 0.1% alors que la cathodoluminescence à une résolution en ppm.

Dans les trois sites, ces bandes de calcite forment des plages allongées qui correspondraient à la partie visible à l'œil nu sur le terrain du CHF. Ces plages sont limitées par des plans rectilignes le long desquels des glissements ont eu lieu. Il existe, de plus, des « petites bandes de calcite » plus étroites mais toujours parallèles aux bandes décrites plus haut. Celles-ci, sont parfois fibreuses à petits ou à gros cristaux généralement limpides et non maclés, ils possèdent une signature chimique en cathodoluminescence proche de la « bande de calcite », on les nommera des « plans plats satellites ou CHFs satellites » (Annexe 1.1 : LME1b).

Sur tous les sites, on observe que ces grandes plages de calcite sont formées par de l'ouverture pure et simple sans phénomène de cisaillement visible, à l'exception de Saint Didier où l'on peut observer parfois des zones cisailées que l'on décrira plus tard (chap II-3-2-2B).

II-3-2-2 Crack Seal et dominos de calcite.

II-3-2-2A Les cracks seals.

Des cracks seals (définie Chap. I-2-4) de très petites dimensions, infra millimétriques, ont été observés dans tous les sites toujours dans la zone des CHFs, parfois au mur mais le plus souvent au toit, entre les plages de phénocristaux et l'éponte de la fracture et la plupart du temps tout le long des bandes de calcite (Annexe 1.4 :LME2, LME3 et Annexe 1.5 : LMT2). On peut aussi les observer au niveau de raccordement entre deux zones de domino. Dans tous les cas, ils forment un angle de 45° par rapport au plan de la fracture et sont disposés en échelon. Leur orientation ainsi que l'absence de cisaillement nous a conduit à interpréter ces cracks seals comme des fentes de tension au sein d'une zone cisailante. Ces microstructures possèdent une allure en escalier, pouvant laisser penser à la création de plan de cisaillement de second ordre formant des zones de relais (Annexe 1.4 : LME3a).

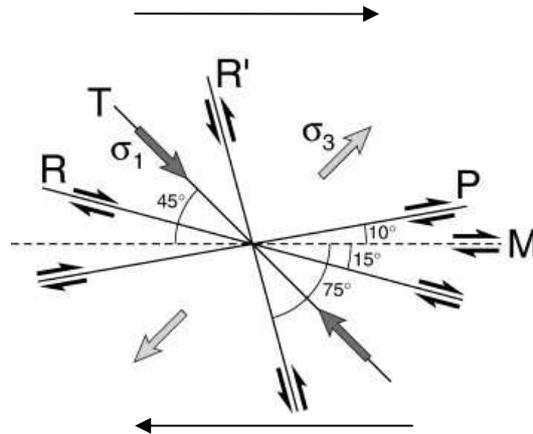


Figure 16: Illustration d'une zone de Riedel dans un contexte de cisaillement dextre.

Pour Tréscléoux, les observations montrent que la direction des cracks seals formant un angle de 45° et une ouverture E-W est compatible avec le mouvement des failles normales (Annexe 1.5: LMT2a). Ainsi, les cracks seals montrent des directions en fente de tension selon l'illustration d'une zone de Riedel (Figure 16) compatibles avec les directions cinématiques des failles normales (c'est-à-dire une direction top vers l'Ouest). Par contre, il présente des recouvrements par des failles non compatibles certainement liées à la reprise en compression ultérieure. En cathodoluminescence, ces cracks seals présentent des remplissages de teinte orange à marron proche de l'encaissant (Annexe 1.2 : LMT1b et Annexe 1.5 : LMT2b) et peuvent correspondre à la première génération de cristaux dans les bandes de calcite (Annexe 1.5 : LMT2b) décrite en partie II-3-1-1. Ceci est en accord avec le fait que les plages de calcite seraient associées à un contexte extensif. L'observation au MEB confirme cette conclusion en montrant qu'il n'y a pas de différence notable de chimie (Annexe 2 : planche MEB2).

Pour Espréaux, la direction des cracks seals est quant à elle incompatible avec la phase extensive (Annexe 1.4 : LMe3a et LME2b). Elle atteste la présence d'une autre cinématique certainement de type compressif comme observé en « macrostructural ». De plus, on observe que ces microstructures sont recoupées par des plans de glissement parallèles aux bandes de calcite, montrant une nouvelle cinématique affectant ces structures. Sur LME2B (Annexe 1.4), les cracks seals repris par cette nouvelle cinématique laissent un doute, à savoir si ces microstructures rentrent dans la catégorie crack seals ou domino.

Ainsi, ces microstructures observées sur tous les sites traduisent donc une cinématique de type cisailante.

II-3-2-2 B Les dominos.

Les dominos sont des structures géométriques résultant d'ouvertures situées dans les relais extensif entre deux fractures cisailantes. Ils traduisent donc une cinématique cisailante. (Chap. I-4-3).

On observe des dominos sur les trois sites. Quatre types d'ouvertures en domino ont pu être distingués en fonction de la texture de son remplissage.

- Des dominos dans lesquels le remplissage est constitué de nombreux cracks seals de petite dimension, perpendiculaires aux parois des cavités (type 1). Ces dominos traduisent de faibles mouvements cisailants non compatibles avec les failles normales et une ouverture en plusieurs incréments de glissement. Ils se présentent sous la forme losangique (Annexe 1.4 : LME2a2).

- Des dominos de grande dimension (supérieure au centimètre) et contenant des cristaux présentant une fabrique de forme (Type 2). Ils se présentent sous une forme losangique et en escalier. Les cristaux sont allongés dans la direction d'ouverture de la cavité. De fines bandes d'inclusions solides peuvent être présentes entre deux zones de dominos, arrachées à l'éponte à chaque création d'ouverture (Annexe 1.4 : LME2a1). Leurs cinématiques impliquent qu'ils ne sont pas compatibles avec les failles normales.
- Des dominos de petite dimension très étirés et à la structure floue (Annexe 1.4 : LME3a), certainement repris par d'autres cinématiques ultérieurement (Type 3). Ils se présentent sous forme d'escalier et leurs cinématiques impliquent qu'ils ne sont pas compatibles avec les failles normales (Annexe 1.4 : LME3a). Ils se situent généralement de parts et d'autres des cracks seals, eux aussi non compatibles aux failles normales. Ces dominos observés sur Espréaux, n'ont pas de changement significatif de chimie avec les cracks seals observées sur un même CHF, malgré les teintes légèrement différentes en cathodoluminescence (Annexe 2 Planche MEB1).
- Des dominos composés de cristaux de petite dimensions et isodiamétrique, sans fabrique de forme (type 4) (Annexe 1.3 : LMSD1d et Annexe 1.5 : LMT3a). La suture du remplissage se trouve au centre du domino et la vitesse d'ouverture est plus rapide que la vitesse de remplissage. Ces dominos traduisent de faibles mouvements cisailants et une ouverture en un seul incrément de glissement. Ils se présentent sous formes de courbe (Annexe 1.3 : LMSD1d et Annexe 1.5 : LMT3a) et sont compatibles avec les failles normales pour Saint Didier mais pas pour Trescléoux.

II-3-2-3 Autres structures cassantes

Les « bandes de calcite » composant les remplissages des fractures, sont découpées par des plans rectilignes qui contiennent des lambeaux de roche encaissante. Ces éléments peuvent être l'éponte du plan de faille lors de différents épisodes d'ouvertures. Ces plans sont stylolisés et marquent une composante de fermeture donc compressive, certainement liés à une composante cisailante mais non visible sur nos lames.

On y observe trois types de plans :

- Des plans recoupant « des plages de cristaux de calcite » déjà formés, stylolisés et pouvant en certains endroits provoquer de la dissolution. Ils marquent une phase tardive (Annexe 1.1 : LME1c).
- Des plans où l'on observe de la dissolution (Annexe 1.3 : LMSD1a) mais aussi des traces de croissance de plage de calcite (Annexe 1.3: LMSD1b), stylolisés, sans marqueur visible de cisaillement ou de déplacement. Ces plans pourraient être très bien les restant d'épentes lors des ouvertures successives ayant subi probablement une compression ultérieure (Annexe 1.1 : LME1a et Annexe 1.3 :LMSD1a).
- Des plans, à caractère cisailant, observés près des cracks seals et des dominos. Ils servent de plans de cisaillement pour les dominos et les cracks seals; et peuvent être compatibles avec les failles normales (Annexe 1.4 : LME2 et LME3, Annexe 1.5: LMT2 et LMT3).

D'autres types de plan existent mais sans marqueur de composante de fermeture. Ceux-ci sont des plans rectilignes non stylolisés, ayant déstabilisé des CHFs (Annexe 1.6 : LME4) et formé des « zones de liquéfaction » (voir II-3-1-4). Ces plans marquent une composante cisailante mais liée à un contexte extensif, observée par une rotation des bandes de calcite d'environ 10 à 20° dans la direction cinématique des failles normales.

II-3-2-4 Les zones de liquéfaction

Ce sont des zones pouvant être marquée par des injections de l'encaissant au sein de plage de calcite, dû à une importante quantité de fluide, et peuvent ainsi déstabiliser en son sein les plans plats. Ceux-ci ne sont observés que sur un site, celui d'Espréaux au sein d'un même plan plat (Annexe 1.6 : LME4a et LME4b). En cathodoluminescence, on n'observe pas de différence chimique de la calcite. Cette déstabilisation, bien que clairement postérieure aux fractures, est liée à un régime extensif et reste toujours compatible avec les failles normales (Annexe 1.6 : LME4c).

II-3-2-5 Les zones de dissolution

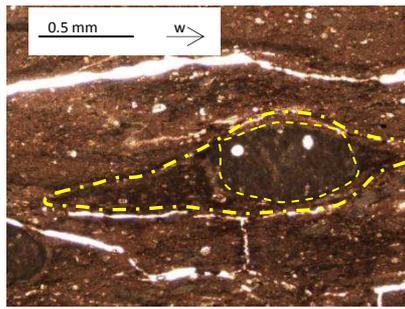
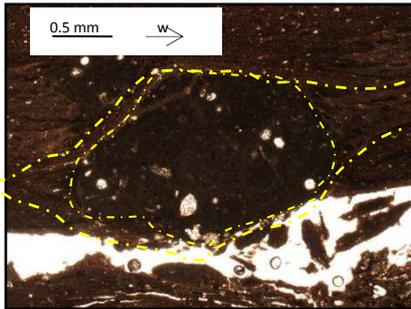


Figure 17. LMSD2 : Illustration des zones de dissolutions situées dans les argilites « saines » de Saint Didier, observé au microscope optique. On peut y observer des allongements de grains dus à la dissolution pouvant indiquer une direction de courant des fluides.

Des figures de dissolution ont été observées dans les argilites « saines » sur le site de St Didier. La dissolution se marque par des zones plus sombres formant des allongements autour de nodule compris dans la formation argileuse. Ces allongements marqués par une distribution identique pourraient montrer une direction de courant des fluides, mais on ne peut décrire réellement la raison et la cinématique liées à ces dissolutions (LMSD2).

II-3-2-6 Les brèches tectoniques

Certaines parties de remplissage des CHF's présentent des figures de bréchification (ou cataclase). Le terme de « zone bréchifiées » désigne les zones constituées de cristaux de calcite qui peuvent être plus ou moins arrondis, fracturés, entourés dans une matrice constitué d'argile, de calcite et de pyrite. Ces brèches tectoniques ont été observées dans le plan plat au sein de la formation argileuse située sur le site de St Didier. Ainsi, l'exemple LMSD3 (Annexe 1.7) montre une zone bréchifiée observée dans un plan plat. Ces brèches sont postérieures aux bandes de calcite et pouvaient être très tardives dans l'histoire de la formation. En cathodoluminescence (Annexe 1.7 : LMSD3c), on observe qu'il existe deux types de fluides :

- un fluide en équilibre avec l'encaissant marquant la calcite du plan plat originel
- et un fluide beaucoup plus orangé marquant la circulation d'un nouveau fluide lors de la création de la brèche tectonique et englobant de la calcite originelle.

Ainsi, la compression alpine (où en tout cas un événement plus tardif) a pu entraîner la cataclase de certaines parties de remplissages de calcite déjà mis en place. La formation de ces zones est à relier à une intensité plus forte du cisaillement, mais aussi au comportement plus fragile des plages de calcite, comparé aux argilites.

II-3-3 Les zones plissées dans les argiles

Déjà décrits pour les CHF's (chap II-3-1-2), on retrouve des « objets » similaires au sein de la zone plissée situé sur le site de Trescléoux en terminaison d'une faille de pendage de 45°. On y retrouve des cracks seals ainsi que des dominos qui ont été défini plus haut par des dominos de type 3, c'est à dire composés de crack seals et marquant le prolongement de

l'ouverture (Annexe 1.8 : LMT4b). Ces microstructures possèdent une allure en escalier, pouvant laisser penser à la création de plans de cisaillement de second ordre formant des zones de relais. La taille des dominos ainsi que le nombre de crack seals ont tendance à diminuer avec l'éloignement de la faille. De même, on peut observer de nombreuses fractures possédant deux directions dont l'une est parallèle à la faille et l'autre pouvant former son antithétique (environ 15°). Leur nombre augmente en ce rapprochant de la faille (Annexe 1.8 : LMT4c).

Les dominos et les cracks seals composant les zones plissées sont découpés par des plans rectilignes qui contiennent des lambeaux de roche encaissante (Annexe 1.8 : LMT4b). Ces éléments ont pu être arrachés de l'éponte du plan de cisaillement lors de différents épisodes de partitionnement pour amoindrir la faille. On observe, en son sein, la présence de sigmoïdes dextres (c'est-à-dire « top vers l'Ouest ») compatibles avec les failles normales. Cet élément confirme que le déplacement des dominos est en lien avec l'extension (Annexe 1.8 : LMT4a). Ainsi, une telle zone illustre comment une faille à 45° s'amortit dans une formation argileuse.

II-3-4 Les failles normales à 45° dans les argiles et les calcaires.

II-3-4-1 Remplissage en « bande de calcite »

➤ Au sein des argiles

Les failles normales, dans les argiles présentent un remplissage de cristaux de taille pluri micrométrique à pluri- millimétrique, orthogonalement aux épontes des failles et maclés ou non en bande de calcite sur les sites d'Espréaux et de Saint Didier (Annexe 1.9 : LMSD4a). Pour Trescléoux, un agencement de cristaux plus complexe est observé. On trouve une différence de cristaux, par des cristaux de calcite maclés « sales » de teinte noire à marron avec un liseré orange sombre en cathodoluminescence, à des cristaux de calcite non maclés « propres » de teinte d'alternance orange clair et orange foncé en cathodoluminescence. Autour de ces cristaux, on peut observer parfois un comblement d'oxyde de fer (de couleur jaune au microscope optique) et des cristaux fibreux (Annexe 1.9 : LMT5d et LMT6a). Leurs caractéristiques sont identiques à celle composant les CHF (Chap II-2-1-1)

➤ Au sein des calcaires

Sur Espréaux, Saint Didier et Trescléoux, on observe au microscope optique, des cristaux qui peuvent avoir une taille pluri micrométrique à pluri- millimétrique maclé, orthogonalement aux épontes des failles (Annexe 1.10 : LMT7a et LMSD5). En cathodoluminescence, on trouve à Saint Didier des cristaux de teinte orange sombre à marron possédant les mêmes caractéristiques que ceux présents dans les failles normales dans les argiles.

Par contre, pour Espréaux on observe deux teintes donc 2 chimies différentes de cristaux de calcite. Un premier fluide possédant une teinte orange sombre proche de l'encaissant, est observé sur les épontes de la faille normale. Ces caractéristiques sont proches de ceux observées dans les failles normales au sein des argiles. Un fluide, non reconnue sur les failles normales recoupant les argiles possédant une teinte beaucoup plus orangé existe au centre des failles (Annexe 1.10 : LME5a).

II-3-4-2 Cracks seals, dominos et plans à composante de fermeture

➤ Au sein des argiles

Les cracks seals sont visibles sur le site de Trescléoux et sont la plupart du temps présents sur les épontes des failles marquant le prolongement de l'ouverture. En cathodoluminescence, leurs teintes correspondent à un orange sombre proche de l'encaissant et identique à la teinte de la faille normale, il marque chimiquement un même fluide (Annexe 1.9 : LMT6b). Ils sont compatibles avec les observations macrostructurales observés sur Trescléoux.

Les dominos observés sont de type 4 (décrits dans la partie II-3-1-2 B). Ils se présentent sous formes de courbe (Annexe 1.9 : LMSD4b et LMSD4c, LMT5a et LMT5c) et sont compatibles avec les observations de direction faite macrostructuralement pour failles normales à Saint didier et à Trescléoux.

Deux types de plans à composante de fermeture on été observés :

- Des plans sur Trescléoux, marquant la croissance de plage de calcite de part et d'autre de ceux-ci, stylolisés, sans marqueur visible de cisaillement ou de déplacement (chap. II-3-1-3) (Annexe 1.9 : LMT6b, LMT6a).
- Des plans, à caractère cisailants, observés près des cracks seals et des dominos (Chap. II-3-1-3). Ils ont une cinématique correspondant aux observations de direction faites macrostructuralement pour les failles normales (Annexe 1.6 : LMT5a et LMSD4b). Ces plans ont un angle de 30° avec la faille supposant par l'illustration d'une zone de Riedel d'être en présence de plan R (Fig.16).

➤ Au sein des calcaires

Sur Espréaux, on trouve la présence de crack seals entre les plages de calcite et les épontes mais aussi au sein des plages de calcite (Annexe 1.10 : LME5b). En cathodoluminescence, leurs teintes correspondent à un orange sombre identique à la teinte de la faille normale, il marque chimiquement un même fluide Sur Trescléoux, on observe aussi la présence de nombreux crack seals non pas entre les plages de calcite et les épontes mais formant par endroit à eux seuls les plages de calcite de la faille normale (Annexe 1.10 : LMT7a et b). Ceux-ci marquent la création de faille par ouvertures successives et rapides. Ils ont une cinématique correspondant aux observations de direction faites macrostructuralement pour les failles normales. On retrouve les mêmes plans à composante de fermeture évoqués pour les failles dans les argiles. Les microstructures, sur les deux sites, confirment les observations de direction faites macrostructuralement pour les failles normales au sein des argiles et des calcaires. Il semblerait que les failles normales au sein des calcaires (site de Trescléoux) s'ouvrent en plusieurs incréments et assez rapidement. Mais des études plus poussées doivent être envisagées.

II -4 Synthèse et scénario évolutifs.

Les trois sites présentent chacun certaines des microstructures recensées (bandes de calcite, cracks seals, domino...) décrites auparavant, mais n'étant pas représentés sur tous les lieux. Le tableau suivant montre, pour les trois sites, les microstructures sur les CHFs et les failles de pendage à 45° observées, permettant de retracer une chronologie par site.

| A Sites | Bandes de calcite | Crack seals | | Dominos | | Plans à composante de fermeture | Zones de liquéfaction | | Zones de dissolution | Brèches tectoniques |
|--------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|---------------------|
| | | compatible* | non compatible* | compatible* | non compatible* | | compatible* | non compatible* | | |
| Espréaux | X | | X | X | X | X | X | | | |
| Trescléoux | X | X | | | X | X | | | | |
| Saint Didier | X | | | X | | X | | | X | X |

*par rapport à la cinématique des failles normales

| B Sites | Bandes de calcite | Crack seals | | Dominos | | Plans à composante de fermeture |
|--------------|-------------------|-------------|-----------|---------|-----------|---------------------------------|
| | | argile* | calcaire* | argile* | calcaire* | |
| Espréaux | X | | X | | | X |
| Trescléoux | X | X | X | X | | X |
| Saint Didier | X | | | X | | X |

*dans les failles à 45° au sein des argiles ou des calcaires

Tableau 9 : A : Tableau résumant la présence ou non des microstructures par sites pour les CHF. B : Tableau résumant la présence ou non des microstructures par sites pour « les failles à 45° » dans les argiles et dans les calcaires. Toutes ces microstructures sont compatibles avec les failles normales.

Ces observations nous permettent de définir des chronologies et des scénarios sur les CHF pour chaque site.

➤ Le site de Saint Didier

Le site de Saint Didier est le site le plus simple à décrire en raison de le moindre nombre de microstructures ainsi de sa cinématique. Une génération de calcite en équilibre avec les argiles (déduction de la cathodoluminescence) s'est mise en place au cours de la phase extensive dans les zones de fractures. Ces fractures se sont ouvertes en plusieurs incréments successifs à partir d'un même plan de fracture horizontal (observation d'épentes au sein du CHF) : Certaines par incrément de domino de type 4, au centre des CHF (observations en optique et compatibles au failles normales), montrant une cinématique d'ouverture en cisaillement ; d'autres par de larges bandes de calcite autour de ces dominos, montrant une cinématique d'ouverture simple. Ici, **deux scénarios qui auraient localisés la création de ces structures peuvent être proposés**. Le premier scénario implique une initiation des CHF selon un mécanisme d'ouverture simple de long d'un plan de fracture subhorizontal. Cette ouverture est marquée par plusieurs larges bandes de calcite. La déformation évolue en mode cisailant avec la formation de plan discret de cisaillement de type R. Leur disposition en échelon implique des relais extensifs au sein desquels se développent des dominos de calcite. Ces segments de fractures cisailante se mettent en place en dehors des plages de calcite antérieures probablement parce que celles-ci constituent des zones plus résistantes. Le deuxième scénario, serait quant à lui une chronologie inverse du premier scénario. Ainsi, on aurait tout d'abord une ouverture de type cisailante située sur des zones localisées dans l'encaissant, formant les dominos observés. Puis une ouverture simple de part et d'autre de cette première ouverture.

Les restants d'épentes au sein de ces bandes de calcite sont stylolisés, montrant par la suite une composante de fermeture liée que nous supposons associée à un régime compressif (pas de cisaillement visible).

Ces conclusions minérales et chronologiques sont les mêmes pour les failles normales dans les calcaires et dans les argiles, où le système est resté ouvert entre les deux formations durant l'histoire géologique (observation par cathodoluminescence).

Enfin, une déstabilisation formant une brèche tectonique a eu lieu sur au moins une partie du CHF, marquée par un cisaillement intense et l'apparition d'un nouveau fluide différent, dans les argiles (observation cathodoluminescence). Ce fluide ne se retrouve pas au sein des failles normales à 45° dans les argiles et dans les calcaires. La cinématique de cette déstabilisation n'est pas contrainte et peut être due à la phase compressive ou à une phase encore plus tardive dans l'histoire géologique.

➤ Le site de Trescléoux

Le site de Trescléoux est marqué par différents fluides (observation en cathodoluminescence) en équilibre avec les argiles. Ils ont cristallisés au cours de la phase extensive, dans des fractures. Sur ce site, il existe deux types d'ouvertures : des ouvertures présentant une cinématique simple formant de larges bandes de calcite et des ouvertures de type cracks seals ayant une composante d'ouverture cisailante. Elles sont issues d'un même fluide. Avec les observations que l'on a actuellement, on ne peut pas définir de véritable chronologie entre ces deux types d'ouvertures, n'ayant pas de recoupement entre ces deux structures (même chimie pour les CHFs, les failles normales dans les argiles et les cracks seals). Par contre, ces différents fluides permettent d'obtenir une chronologie au sein des bandes de calcite. Ainsi, un premier fluide remplit les deux types d'ouvertures observés, étant synchrone du contexte extensif. Superposé au premier, deux fluides montrent des phases récentes au sein des bandes de calcite dont un semble être une circulation de surface (derniers cristaux de calcite fibreux formant certainement des géodes). Cette chronologie semble correcte au vu de l'absence des deux derniers fluides au sein des failles normales dans les calcaires, montrant une phase plus récente.

Les conclusions sont les mêmes pour les failles normales de pendage 45° analysées dans les argiles, mais différentes pour les failles au sein des calcaires (un seul type de structure et de teinte observé pour les cristaux semblable aux failles normales dans les argiles), signifiant que le système s'est fermé entre les deux formations durant l'histoire géologique (observations en cathodoluminescence). D'autre part, la propagation des failles normales au sein des argiles, peut provoquer à certains endroits des zones plissées et former des zones découpées par des plans de cisaillement prolongeant l'initiation de la faille (observation optique).

Par la suite, une reprise en compression a eu lieu, mise en évidence par la création de dominos sur les bords des épontes, par des failles recoupant les cracks seals pré-existants et par la stylolitisation des restants d'épontes au sein des CHFs.

➤ Le site d'Espréaux

Le site d'Espréaux est un site complexe autant par le nombre de microstructures présentes mais aussi par la variété de cinématiques observées.

Une génération de calcite en équilibre avec les argiles s'est mise en place au cours de l'histoire géologique dans les zones de fractures. On sait de la phase extensive, qu'elle a créé des fractures formant des dominos isodiamétriques (de type 4) ayant une cinématique d'ouverture cisailante et des ouvertures en plusieurs phases, de larges bandes de calcite en ouverture simple (restants d'épontes stylolitisés au sein du CHF). Ici les **deux scénarios de création de ces structures qui auraient localisés la création de ces structures sont les mêmes que pour le site de Saint Didier**. D'autre part, cette phase extensive a provoqué des déstabilisations sur certains CHFs, formant des plans de liquéfaction (observation cathodoluminescente et optique).

Par la suite, ces structures ont été remaniées par une phase compressive donnant des structures de cracks seals, de dominos losangique et en escalier ; et de plans stylolitisés recoupant les cristaux et affectant les restants d'épentes de la phase extensive (observation optique). Les éléments de chronologie nous montrent que les fractures associées à la réactivation se sont développées en plusieurs phases et par incrément de cisaillement, soit par de petites ouvertures en cracks seals formant au fur et à mesure un domino (type 2), soit par une ouverture plus importantes donnant un domino formant par la suite d'importante plage de calcite.

Pour finir, une troisième phase cinématique tardive induisant des cisaillements, dans la même direction que la phase extensive a affectée le site, observé par la reprise de certains cracks seals issue de la phase compressive.

Les failles normales à 45° dans les argiles et les CHFs ont une histoire commune possédant les mêmes caractéristiques minérales et chronologique. Pour les failles à 45° au sein des calcaires, il existe une histoire commune aux autres failles sauf un à moment précis de l'histoire géologique où le système s'est fermé entre les deux formations (deux teintes distinctes dans les calcaires en cathodoluminescence).

Au vue des conclusions, deux scénarios possibles sont communs aux sites de Saint Didier et d'Espréaux. Pour un scénario, dans un premier temps une ouverture simple a lieu le long de « larges bandes de calcite » au sein de l'encaissant, puis, dans un deuxième temps, une deuxième ouverture a lieu, cette fois-ci de type cisailante formant les dominos. Pour l'autre scénario, on a d'abord une ouverture de type cisailante, puis une ouverture simple de part et d'autre de cette première ouverture. Malgré le peu de données de chronologie sur Trescléoux, on peut imaginer les mêmes types de scénarios entre les ouvertures cisailantes des cracks seals et les ouvertures simples des larges bandes de calcite.

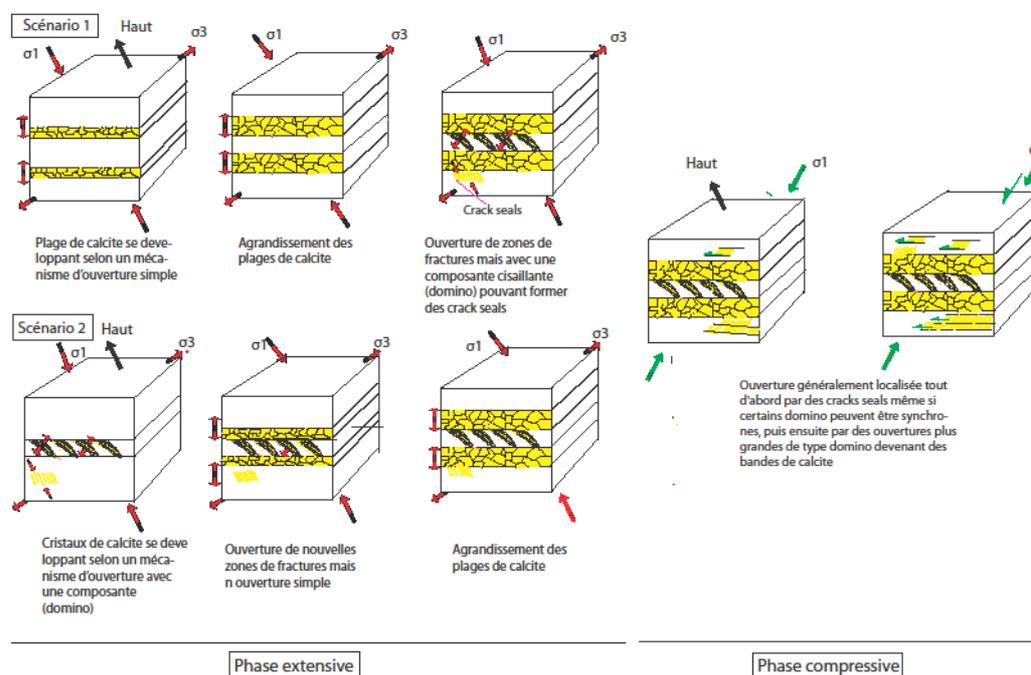


Figure 18: Illustration des deux scénarios possibles dans la création des CHF au vue de l'observation microstructural sur les trois sites.

III Initiation des failles au sein d'un système multicouche : quantification de l'anisotropie à l'aide d'une modélisation 3D.

La modélisation numérique permet d'envisager diverses combinaisons de propriétés de la roche et donc de prendre en considération différentes séquences géologiques. Nous

adoptons cette approche **pour examiner la nucléation préférentielle des fractures au sein d'un système multicouches**. Nous prendrons en compte plus particulièrement l'effet de l'anisotropie de type élastique et frictionnelle, ainsi qu'un léger pendage au sein des couches peu compétentes.

III-1 Conception numérique

Les modèles numériques ont été construits avec un logiciel commercial : 3DEC Itasca Consultants. Il utilise la méthode des éléments finis et permet de calculer les contraintes et les déformations. La discrétisation de l'équilibre statique du milieu est résolue en utilisant la technique des différences finies, et une réponse de chaque volume de maille pour une charge externe ou interne est calculée selon les relations sélectionnées. On utilise une élasticité linéaire pour toutes les couches.

Les couches ont été construites en coupant un support en plusieurs blocs avec un nombre fini de discontinuités horizontales, qui représentent les interfaces lithologiques. Pour tous nos modèles, **il n'y a pas de faille et quelle que soit la couche et l'épaisseur, la section est symétrique et comprend 5 couches (Figure 19)**. De plus, nos études s'effectueront sur les trois centrales afin d'éliminer les effets de bord. Le milieu a ensuite été maillé en éléments polyédriques, les propriétés des matériaux ont été attribuées à chaque bloc et limitées par les discontinuités. Une contrainte hydrostatique initiale in situ égale à la contrainte moyenne de 30 MPa a été fixée à l'intérieur de l'ensemble du bloc avant l'application des contraintes aux limites du système. La phase d'extension a été simulée par une augmentation de la contrainte verticale et une diminution de la contrainte horizontale le long de l'axe X. La contrainte principale verticale (σ_1) et la contrainte principale horizontale (σ_3) ont été fixées à 50 MPa et 10 MPa respectivement.

Le système de couches considéré ici est composé de deux types d'unités, l'une incompétente (« compliant ») anisotrope contrastant avec une compétente isotrope (« stiff ») (Gunzberger et Cornet, 2007, Bourne, 2003). Dans ce qui suit, la couche compétente se trouve au centre du système. Dans tous les modèles, pour être en accord avec les observations de terrain et faciliter la modélisation, les deux couches adjacentes incompétentes sont de même épaisseur, de mêmes propriétés et plus épaisse que la couche centrale. Toutes les couches sont homogènes et ont une résistance de comportement propre. Les couches ne contiennent pas de fractures préexistantes ni d'hétérogénéité comme des grains qui peuvent favoriser la nucléation de faille.

Ces modèles ont été mis en œuvre avec un langage de programmation intégré au sein de 3DEC (Langage FISH), et le programme permet une visualisation des résultats par modèles. 3DEC donne les contraintes principales (σ_1 , σ_2 , σ_3) du centre de gravité de chaque élément. Il permet l'analyse de profil de contrainte le long de l'axe vertical (z) et des deux axes horizontaux (x, y) passant par le centre du bloc.

Différents profils de résistance ont été envisagés, afin de simuler des systèmes multicouches comprenant des roches argileuses, des grès et des calcaires. **Un modèle dit « constant »**, a été étudiée avec des propriétés de résistance moyenne à toutes les roches, soit une cohésion de 40 MPa et une friction de 0.7. **Un modèle de type « cohésif »** avec des valeurs correspondant aux valeurs extrêmes couramment observées dans les roches rigides et les roches flexibles, appliquant ainsi un module de Young pour les couches compétentes et incompétentes respectivement de 70 MPa et de 25 MPa et un frottement de 0,7. L'effet **de friction interne** est analysé à travers un modèle dans lequel les couches compétentes et incompétentes ont respectivement une friction de 0.7 (représentant une grande partie des calcaires et des grès) et 0.1 (correspond à une valeur minimale dans les roches incompétentes). Une valeur intermédiaire de cohésion de 40 MPa a été choisie. Enfin, un

modèle représentant le plus **fidèlement les alternances argilo-calcaires** à été étudiée. La cohésion a été fixée à 45 MPa et 35 MPa et le frottement interne à 0,7 et 0,4 dans les deux couches, respectivement pour les calcaires et les argiles, représentant des valeurs moyennes. Nous avons ensuite calculer et analyser la façon dont la valeur varie le long des profils de Ccn.

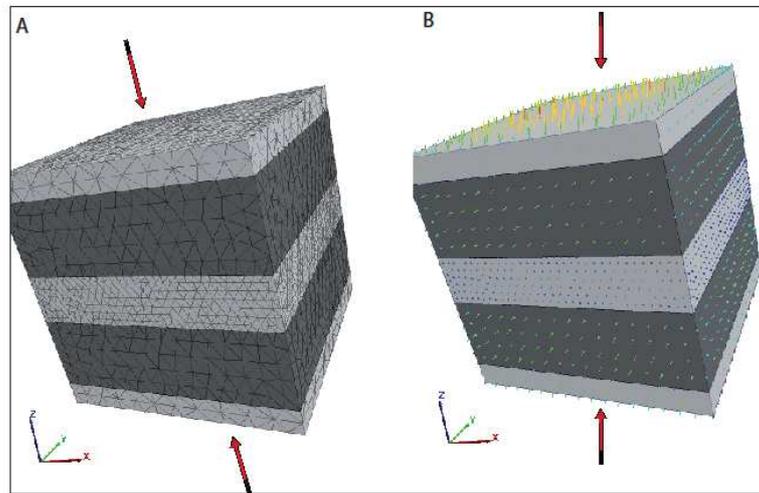


Figure 19: Illustration de la géométrie du modèle. A : Exemple d'un bloc sans faille et sans pendage maillé par des éléments polyédriques. Les deux couches adjacentes correspondant aux couches souples sont de mêmes épaisseurs et de mêmes propriétés. En B, Exemple d'un bloc sans faille et avec pendage maillé par des éléments polyédriques. Les deux couches adjacentes correspondant aux couches souples sont de mêmes épaisseurs et de mêmes propriétés. Chaque bloc est orienté par les coordonnées x, y, z. L'axe Z est utilisé pour analyser le profil de contrainte dans un bloc.

III-2 Approche de la modélisation

Les systèmes multicouches comme les alternances argilo-gréseux et argilo-calcaire se caractérisent par des contrastes de rigidité avec des valeurs de E différentes. Ces unités présentent aussi de forts contrastes de résistance. Les valeurs moyennes de calcaires, grès et argiles sont respectivement de 44, 20 et 14 GPa. Les unités de calcaires et de grès sont généralement les plus résistantes, avec un frottement moyen de 0.7 et une cohésion égale à 44 MPa. Ces paramètres sont plus faibles pour les roches argileuses avec des valeurs moyennes de friction proches de 0,45 et de cohésion de 35 MPa (Hateway et Kiersch, 1989, Einstein and Dowding, 1981, Lockner, 1985). De par leur structuration en feuillets, certaines roches montrent une anisotropie de comportement élastique (Voir partie I-4-2).

III-3 Les paramètres en sortie

En utilisant, la théorie de Mohr-Coulomb on suppose que la fracture a lieu le long d'un plan hypothétique dans un volume de roche lorsque l'état de contrainte atteint un certain seuil en fonction des propriétés de résistance de la roche. L'ensemble des contraintes critiques est estimée par le critère de Coulomb (Cc) et se produit si la condition suivante est satisfaite (Jaeger et Cook, 1978):

$$\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - S \right) \sqrt{\frac{1 + \mu^2}{1 - \mu^2}} - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) = C_c = 0$$

où μ et S , sont tels que définis précédemment et σ_1 et σ_3 représentent les contraintes principales maximales et le minimales. Dans cette partie, nous allons modifier ce terme afin d'observer l'initiation de la nucléation des failles au sein de section en couche non fracturée préalablement. Ainsi, notre objectif est de quantifier l'effet de la superposition mécanique en

lien avec le rôle de l'anisotropie au sein des argiles. Pour les besoins de cette étude un C_c normalisé (C_{cn}) est utilisé l'équation suivante :

$$C_{cn} = \frac{C_c - C_{ch}}{C_{ch}} \quad \text{Où } C_{ch} \text{ est le critère de Coulomb pour un modèle homogène (il sert de référence).}$$

Une valeur positive de C_{cn} exprime que la nucléation de la faille est encouragée dans le milieu modélisé au regard de la situation qui caractérise un milieu homogène et une valeur traduit la tendance inverse. On ne simulera pas les déformations plastiques qui peuvent précéder la faille et/ou les effets de la pression des fluides.

Le C_{cn} calculé permet ainsi d'examiner l'influence de la superposition mécanique dans l'initiation de failles. Les paramètres mécaniques des couches ont été choisis, en supposant que le coefficient de Poisson est peu variable dans les roches naturelles, un rapport de Poisson ν constant de 0,3 a été attribué à tous les blocs (indépendant de C_{cn}).

III-4 Initiation des failles dans les systèmes multicouches et rôle de l'anisotropie

III-4-1 Distribution des contraintes au sein des multicouches isotropes

La figure 30 montre la répartition des contraintes dans une section où les couches ont une rigidité différente selon les rapports de module de Young, dans un modèle isotrope basé sur l'étude de Roche (2011). **Les rapports de module de Young (E_c/E_a) des couches compétentes et peu compétentes sont égal respectivement de 1 à 1.2 de 1.5 à 2.** Cet exemple montre comment le contraste de rigidité influence l'état de contrainte locale. Étant donné que les contraintes ne varient pas dans le plan horizontal mais dans un plan perpendiculaire, les résultats de la modélisation sont présentés dans des sections transversales (selon l'axe Z) pour une lecture facile. Alors que la contrainte principale maximale verticale **σ_1 et la contrainte principale σ_2 restent constantes** et égales à la valeur de champ lointain, la contrainte minimale principale **σ_3 varie en fonction de la résistance de la couche.** Ainsi pour E_c/E_a , σ_3 augmente dans la couche peu compétente et diminue dans la couche compétente. Dans la configuration d'un modèle isotrope de ratio 2, σ_3 est égal respectivement à 17 MPa et -1 MPa dans les couches incompétentes et compétentes. Les perturbations des contraintes décrites ci-dessus impliquant que la contrainte différentielle maximale diffère d'une couche à l'autre, avec une valeur plus élevée dans les couches compétentes que dans les couches peu compétentes (figure 20).

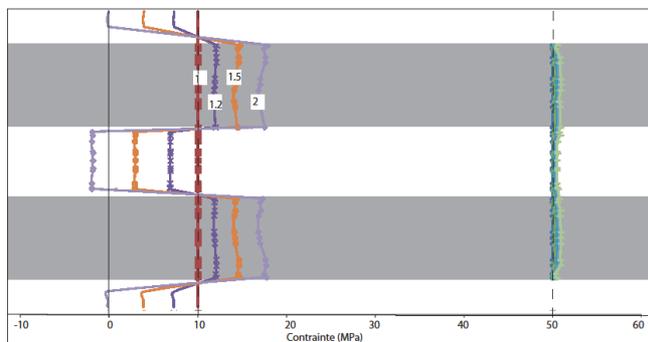


Figure 20 : Exemple de la variation de l'état de contrainte avec la stratification pour un modèle isotrope et le rapport de Module de Young (E_c / E_a) est de 1, 1.2, 1.5 et 2 basée sur les modèles de Roche (2011). La couche compétente et peu compétente sont respectivement en blanc et gris. La courbe bleue et la courbe rouge indiquent respectivement les contraintes maximales (σ_1) et minimale (σ_3) le long de l'axe vertical (z) à travers la section des couches. Les courbes bleues à vert et les courbes rouge à violet indiquent respectivement les contraintes maximales (σ_1) et minimales (σ_3) le long de l'axe vertical (z) à travers la section des couches. Les lignes en pointillés représentent les contraintes

limites maximales et minimales.

III-4-1 Distribution des contraintes au sein des multicouches anisotropes

La figure 21 montre aussi la répartition des contraintes dans une section où les couches ont une résistance différente (gardant les mêmes E_c/E_a que la figure 20), mais on a appliqué des anisotropies de 1, 1.5, 2 et 4 (E_{par}/E_{per}) au sein des couches peu compétentes. On observe ainsi, que plus l'anisotropie est forte plus les valeurs de σ_3 pour les couches compétentes et pour les couches incompétentes sont respectivement faibles et fortes. Ainsi, avec un modèle E_{par}/E_{per} appliqué sur les couches peu compétentes, les contrastes de σ_3 sont accentués au sein d'un système multicouche.

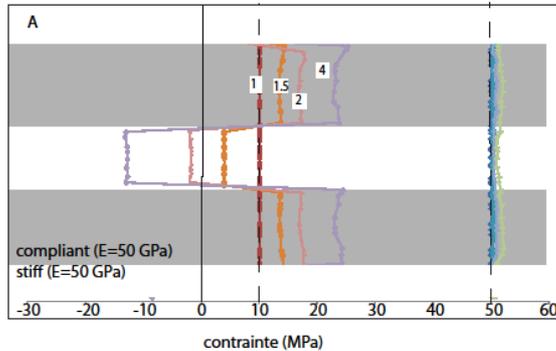


Figure 21 Exemple de la variation de l'état de contrainte avec la stratification pour un modèle de rapport de module de Young de 1 et de différentes anisotropies dans la couche incompétente (1,1.5, 2, 4).

Pour conclure, un fort E_c/E_a augmente σ_3 dans la couche peu compétente, et diminue dans la couche compétente ; ce qui augmente ainsi le contraste σ_{3a}/σ_{3c} et il en va de même pour E_{par}/E_{per} . En effet, la valeur de E_{per} est prise identique à E_a dans le cas d'un système isotrope, et c'est E_{par} qui est augmenté. Ceci va donc encore accroître la valeur de σ_3 au sein des couches incompétentes. Ce choix est lié au fait que les mesures de E sont généralement prises verticalement, et rarement horizontales.

III -4-3 Effet de la rigidité et de la résistance d'un système multicouche sur l'initiation de la nucléation d'une faille au sein d'un modèle anisotrope

Les variations de contrainte décrites au paragraphe précédent impliquent des conditions plus ou moins proches de la rupture. La Fig. 32 illustre la distribution de CC_n dans le cas d'un $E_c/E_a = 2$. Selon les profils de résistance, la variation des contraintes correspondant (Fig.21) implique des CC_n différents selon les modèles de résistance. Ainsi, dans un modèle homogène avec une friction de 0,7 et une cohésion de 40 MPa, pour un E_c/E_a de 1 (tel que le modèle est isotrope) les C_{cn} dans les couches rigides (par exemple grès ou calcaires) sont de 0.03 alors qu'ils ne sont que de -0,2 pour des couches incompétentes (par exemple argile), indiquant que pour cette dernière, les failles sont découragées (Fig. 22A). **Ainsi les paramètres de ce modèle vont encourager la nucléation dans les couches rigides.**

La même conclusion est obtenue pour « des modèles frictionnels » (Fig. 22C) ayant un faible frottement (0.1) pour une couche incompétente mais observant un C_{cn} positif supérieur en tout point à 0.2. Les C_{cn} sont inférieures dans les couches incompétentes, marquant une préférence de nucléation dans que les couches compétentes. Pour les modèles argile/calcaire (Fig. 22D), les C_{cn} sont en tout point en dessous de 0.2 et proches dans les deux types de couches. Là aussi, il y a une préférence de nucléation au sein des couches compétentes. **Les paramètres de ce modèle ont tendance à favoriser la nucléation dans les couches compétentes mais aussi parfois dans les couches incompétentes.** La conclusion est à l'opposé pour système homogène multicouche avec un fort contraste de cohésion tel que suggéré par les valeurs C_{cn} qui atteignent 0,2 alors qu'il est égal à -0.6 dans les couches rigides (fig. 22B). **Ces paramètres favorisent la nucléation dans les couches incompétentes**

L'effet de l'anisotropie (ratio 1.5, 2 et 4) favorise les conclusions apportées plus haut et accroît nettement la tendance à la nucléation dans telle ou telle formation, sauf dans le cas d'une forte anisotropie (soit 4) où la nucléation à lieu préférentiellement dans les calcaires

(Fig 22B). Elle va ainsi amener les caractéristiques des couches compétentes plus proches de la rupture et au contraire éloigner les couches incompetentes de la rupture. Ces résultats indiquent clairement que la stratification mécanique localise la nucléation de la faille.

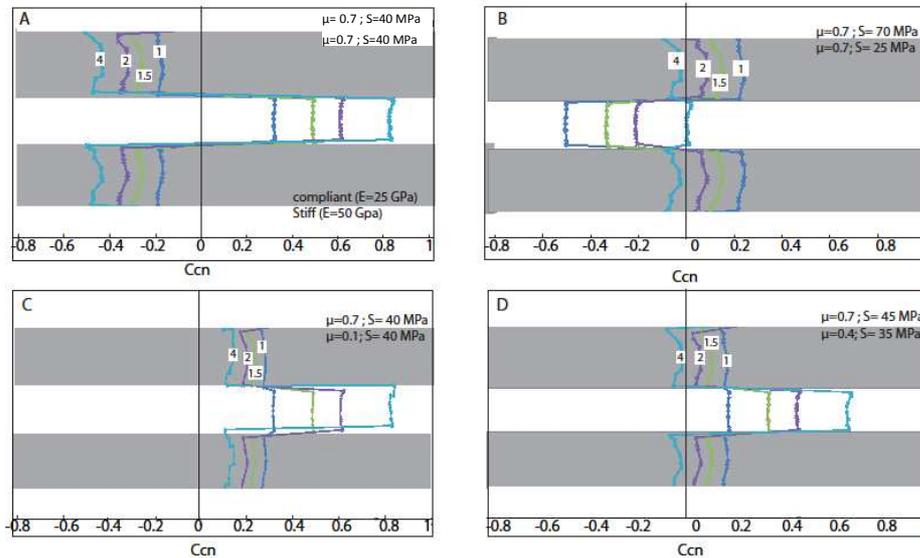


Figure 22. Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisée (CCN). Pour tous les modèles, le rapport du module de Young (E_c / E_a) est de 2 tandis que le rapport d'anisotropie des couches compétentes (E_{apar}/E_{aper}) est de 1.5 ,2 et 4. Les couches compétentes et peu compétentes sont respectivement en blanc et gris. A: Résultat d'un modèle « constant ». B, C et D: Résultats des modèles sur l'effet des propriétés de la résistance. B,C ,D sont le résultat des modèles de «l'effet de la cohésion», de "l'effet de friction" et "argilo-calcaires. Le frottement interne (μ) et la cohésion (S) de la couche sont indiqués.

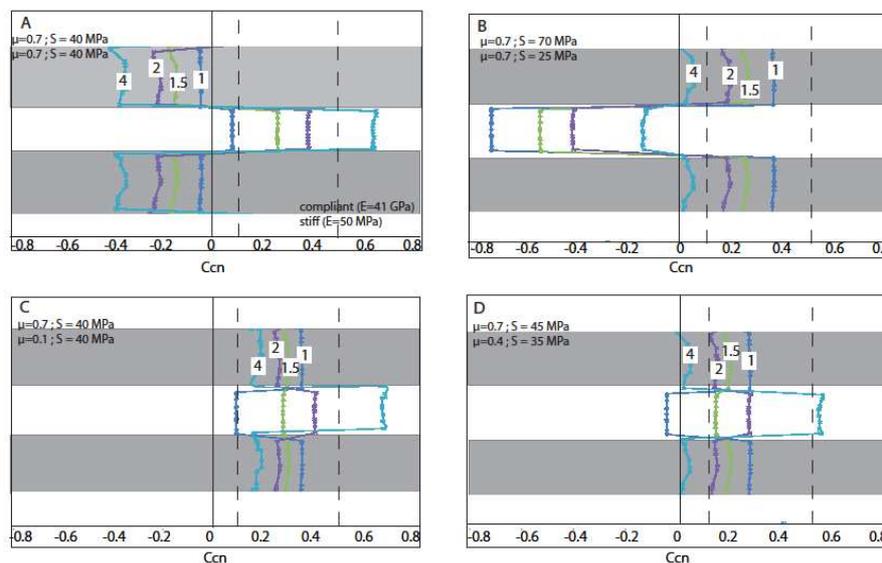


Figure 23 : Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCN) sur la localisation de nucléation de faille. Pour tous les modèles, le rapport du module de Young (E_s / E_c) a été fixé à 1.2 tandis que les propriétés de résistance sont constantes et le rapport d'anisotropie des couches compétentes (E_{apar}/E_{aper}) a été fixé à 1, 1.5 ,2 et 4. La couche compétente et peu compétente sont respectivement en blanc et gris. A: Résultat d'un modèle « constant ». B, C et D: Résultats des modèles sur l'effet des propriétés de la résistance. B,C ,D sont le résultat des modèles de «l'effet de la cohésion», de "l'effet de friction" et "argilo-calcaires. Le frottement interne (μ) et la cohésion (S) de la couche est indiqué.

Si l'on retient un contraste de E moins important égal à 1.2, pour le modèle « constant » et le le Ccn augmente considérablement dans la couche raide et baisse dans la couche peu compétente. Ces variations sont encore plus prononcées à mesure que E_{apar}/E_{aper} augmente,

ainsi le C_{cn} est respectivement de 0.7 et -0.4 dans les couches compétentes et couches peu compétentes lorsque l'anisotropie est de 4 (Fig. 23A). Pour ces modèles, et donc pour les séquences où la résistance de la roche ne s'écarte pas sensiblement, **la faille sera donc préférentiellement nucléée dans la couche compétente quelle que soit la résistance de la couche incompétente** (Tab 10). Ainsi, les résultats vont dans le même sens que le $E_c/E_a = 2$, il en est de même pour le modèle marquant un contraste de cohésion.

Par contre dans le cas, où les couches peu compétentes ont un frottement extrêmement bas comme présenté sur la figure 23C, des valeurs positives de C_{cn} sont observées dans tout le système. Ces conditions favorables par rapport aux caractéristiques des systèmes homogènes sont le résultat d'une contrainte supplémentaire dans les couches rigides et d'une diminution dans les couches peu conformes de la résistance à la fracture. Pour des anisotropies nul voir faible (<1.5) l'initiation des fractures se produit dans les couches peu compétentes pour des rapports de module d'Young allant de 1 et 1.2. Par contre, pour des anisotropies moyennes voire fortes (> 1.5) des fractures se produisent dans les couches compétentes pour n'importe quel module d'Young (Fig. 23). Dans le cas, où on est en présence d'un rapport de module d'Young de 1.2 et d'une anisotropie de 1.5, on se trouve à la limite de préférence de nucléation (Fig. 23C). Les failles peuvent ainsi alternativement nucléer dans l'une ou l'autre unité.

La même conclusion s'applique aux modèles "argilo-calcaires" (Fig. 23D et Tab 10), indiquant que l'anisotropie et le rapport des modules de Young représentent un seuil pour le lieu de nucléation préférentielle dans les systèmes carbonatés. **Par conséquent, si les argiles sont 1 à 1.2 fois moins rigide que les calcaires, et possèdent une faible anisotropie (<1.5) la faille sera nucléée dans les argiles, sinon la nucléation se fera au sein des calcaires.**

Compte tenu de ces données, la nucléation est susceptible de se produire préférentiellement dans les calcaires. Cette conclusion est bien en accord avec l'observation des systèmes naturels.

Plus généralement, ce tableau résume la façon dont E_c/E_a en fonction de l'anisotropie affecte la distribution C_{cn} dans les systèmes multicouches et ce pour un système caractérisé par des profils de résistance différents. Le E_c/E_a a été étudiée pour 1, 1.2, 1.5 et 2 et pour E_{apar}/E_{aper} de 1, 1.5 et 4. La variation du C_{cn} est considérée pour quatre configurations de résistance introduites auparavant.

| E_c/E_a E_{aper}/E_a par | Ratio 1 | | | | Ratio 1.2 | | | | Ratio 1.5 | | | | Ratio 2 | | | |
|------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|---------------|-----------------------|---------------|--------------------------------|
| | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 U=0.7 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 U=0.7 U=0.4 |
| Ratio 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 1.5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |

■ On privilégie la nucléation dans les argiles
■ On privilégie la nucléation dans les calcaires
■ On se trouve à la limite de préférence de nucléation

Tableau 10 : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie et des 4 configurations de résistance. On peut observer en bleu les zones où l'on privilégie la nucléation des argiles, en orange la zone où on privilégie la fracturation dans les calcaires et en rouge les zones limites de préférence de nucléation.

Considérant toutes la gamme des paramètres qui caractérisent les multicouches sédimentaires nous concluons que pour un modèle isotrope, l'initiation de la fracturation a souvent lieu dans les couches peu compétentes comparativement à un modèle anisotrope (Tab.10), où la nucléation se fait préférentiellement dans les couches compétentes, en adéquation avec les observations de terrain. Ainsi pour des modèles de type « constants » on

privilégie la nucléation dans les couches compétentes pour n'importe quel modèle. A l'inverse, pour les modèles de type « cohésifs » on privilégie la nucléation dans les couches peu compétentes sauf dans le cas où il existe une forte anisotropie (ratio de 4). Pour les deux autres modèles de résistance variable (« effet de cohésion » et « effet de friction »), la tendance est plus changeante. Ainsi, pour de forts rapports de Young calcaire/argile (illustré par un rapport de 2) et une forte anisotropie, la nucléation se fait préférentiellement dans les couches compétentes, alors que pour de faibles anisotropies (anisotropie 1.5) et des faibles rapports de Young calcaire/argile la nucléation a tendance à s'effectuer dans les couches peu compétentes. Au vu de ces résultats, ce changement de nucléation intervient pour un faible E_a/E_c et de faible anisotropie soit respectivement 1.2 et 1.5 comme illustré plus haut.

III-4-4 Comparaison aux modèles isotropes

Des modèles isotropes ont déjà été obtenus antérieurement (Roche, 2011) avec des configurations identiques à celles utilisées dans la partie III -4-2 et des rapports de module de Young de 1, 1.25, 1.7, 2, 2.5 et 5. En les comparant avec les données des modèles anisotropes effectués, on en arrive aux conclusions suivantes :

- pour les modèles de types « homogènes », l'initiation de la nucléation lieu au sein des couches compétentes en isotrope, voit cette tendance renforcée en anisotrope.
- pour les modèles de types « cohésifs », le contraste de cohésion important entraînant l'initiation de la fracturation dans la couche incompétente en isotropie, reste inchangé en anisotropie. L'anisotropie ne suffit pas à créer des conditions favorables pour l'initiation des failles au sein des couches compétente.
- Pour des modèles de types « frictionnel » et « carbonaté », la nucléation peut avoir lieu dans les deux types de formations selon le rapport de module de Young en isotrope et en anisotropie. Le seuil de préférence de nucléation passant d'une couche incompétente à une couche compétente diminue au sein des modèles anisotropes; tel que le seuil du E_c/E_a en isotrope se situait entre 1.7 et 2 alors que celui du E_c/E_a en anisotrope se situe à 1.2. Ainsi, statistiquement, par rapport au modèle isotrope il y a une nucléation plus importante dans les calcaires que dans les argiles (Tab 10).

III-5 Effet d'un pendage sur la nucléation de faille.

III-5-1 Effet d'un pendage.

L'observation des sites naturels étudiés (Chap. I) a montré que les plans de faille subhorizontaux (CHF) présentent un pendage tellement faible qu'il n'est mécaniquement pas possible qu'ils aient été mobilisés par une extension horizontale. Il est possible qu'un léger pendage des couches ait favorisé leur jeu en cisaillement. Un pendage a été rajouté au sein des formations présentes sur la modélisation. Pour cela, un angle de l'ordre de 20 degrés a été appliqué par rapport aux contraintes limites initiales (Fig. 24B), ce qui équivaut à appliquer un pendage aux couches d'autant. Ce pendage est élevé en comparaison des sites étudiés (soit 10°) mais il permet de maximiser les conclusions que l'on peut en ressortir. Ainsi, le rapport du module de Young a été fixé à 1 (bloc homogène), 1.5 et 2 et l'anisotropie a été fixée (E_{aper}/E_{apar}) à 1, 1.5 et 4. On considère la variation du C_{cn} pour les quatre configurations de résistance déjà utilisées plus haut.

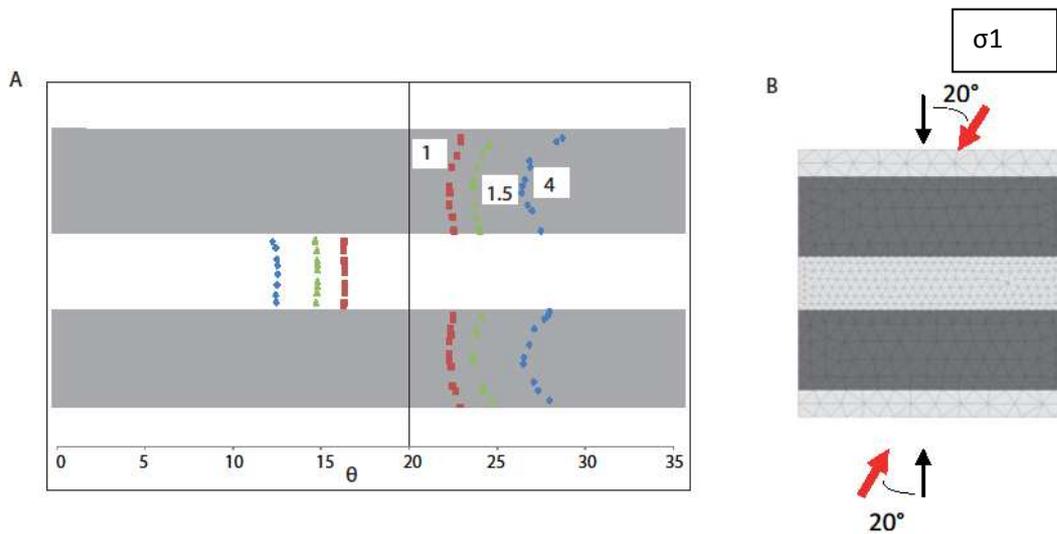


Figure 24 : A : Illustration des pendages θ observés en fonction de E_c/E_a égal à 2 et une anisotropie (E_{apar}/E_{aper}) de 1, 1.5 et 4. B : représentation schématique de l'angle appliqué à la contrainte limite pour créer un pendage sur 3DEC.

Les résultats observés au niveau de l'angle du pendage montrent qu'il semblerait exister une variation de pendage selon que les couches sont compétentes ou peu compétentes (Fig. 24A). Cette variation est d'autant plus prononcée qu'on est en présence d'une anisotropie forte. Ainsi pour une anisotropie égale à 4, il existe une variation de 5° à 7° par rapport au pendage respectivement négative et positif dans les couches compétentes et peu compétentes. Cette variation n'est pas une réelle variation de pendage mais de contrainte σ_1 , et **montrant ainsi une rotation des contraintes** différentes selon les formations (argile/calcaire).

Les conclusions pour des modèles de type « constants » et de type « cohésifs » restent les mêmes que précédemment (Chap. III-3-1 et III -3-2), on ne les étudiera pas ici. Pour les deux autres modèles, on observe des valeurs de C_{cn} qui diminue lorsqu'on considère une anisotropie avec un pendage. Pour le modèle « frictionnel » sans pendage, le C_{cn} augmente dans la couche compétente et baisse dans la couche peu compétente. Ainsi, le C_{cn} est de respectivement 0.5 et 0.2 dans les couches compétentes et les couches peu compétentes lorsque l'anisotropie est de 1.5 (Fig.25A). Lorsqu'on prend en compte un pendage, le C_{cn} est de respectivement 0.35 et 0.30 dans les couches compétentes et les couches peu compétentes pour une même anisotropie, ce qui est en soit la limite préférentielle de nucléation. De même, pour une anisotropie nulle et un pendage, l'initiation de la nucléation sera privilégiée au sein des couches peu compétentes. Les conclusions sont les mêmes pour le modèle « carbonaté » (Fig 25B).

Au vu des résultats, et comme évoqué plus haut, un pendage suffit à accentuer l'initiation des fractures au sein des formations peu compétentes (de type argile) pour une anisotropie faible (<1.5). On peut nucléer dans les argiles pour des gammes de rapport de module de Young plus élevées. Cependant, il faut nuancer les résultats, car on a considéré un pendage de 20° c'est à dire un pendage plus élevé que ceux observés dans des domaines naturels.

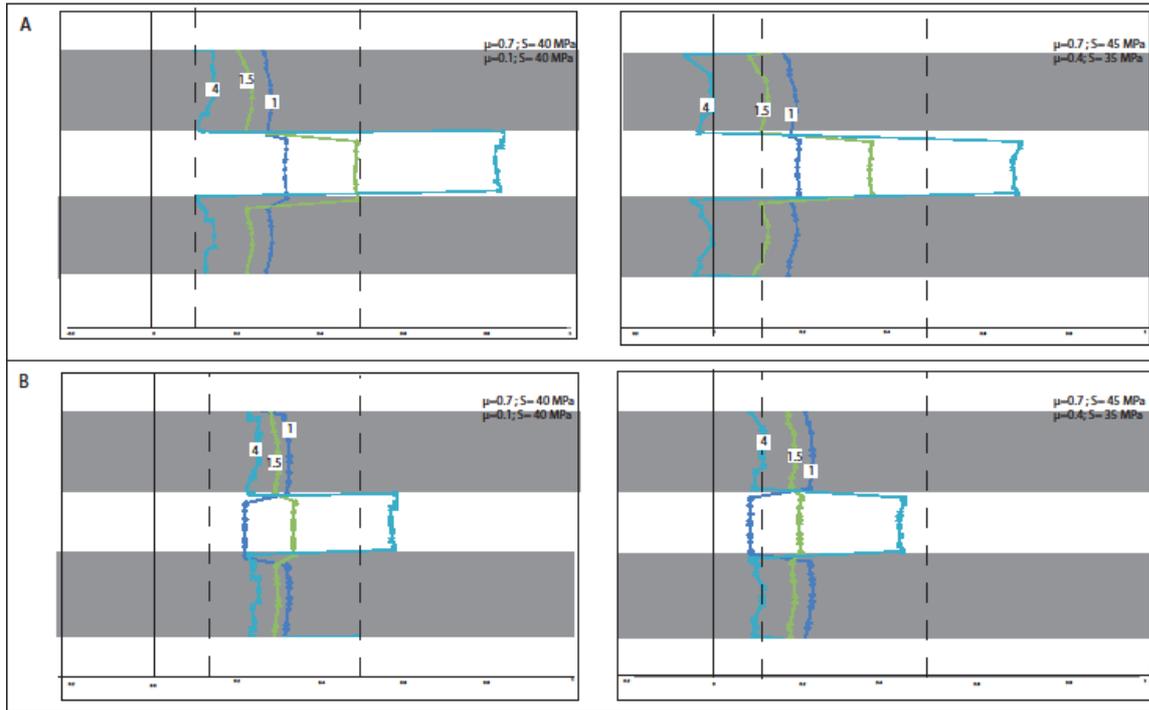


Figure 25: Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCN). Pour tous les modèles, le rapport du module de Young (E_s / E_c) a été fixé à 2 tandis que les propriétés de résistance sont constantes et le rapport d'anisotropie des couches compétentes (E_{aper}/E_{aper}) ont été fixées à 1, 1.5 et 4. Les couches compétentes et peu compétentes sont respectivement en blanc et gris. A: Résultat du modèle «frictionnel» et « carbonaté» sans pendage et B : Résultats du modèle «frictionnel» et « carbonaté» avec pendage. Le frottement interne (μ) et la cohésion (S) de la couche sont indiqués.

| Ec/Ea Eaper/Ea par | Ratio 1 | | | | Ratio 1.5 | | | | Ratio 2 | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 |
| | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | |
| | | | U=0.4 | | | | U=0.4 | | | | U=0.4 | |
| Ratio 1 | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 1.5 | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 4 | | | | | | | | | | | | |

| Ec/Ea Eaper/Ea par | Ratio 1 | | | | Ratio 1.5 | | | | Ratio 2 | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 | S=40 U=0.7 | S=70 S=25 | S=40 U=0.7 | S=45 S=35 |
| | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | | U=0.7 | U=0.1 | U=0.7 | |
| | | | U=0.4 | | | | U=0.4 | | | | U=0.4 | |
| Ratio 1 | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 1.5 | | | | | | | | | | | | |
| Ratio 4 | | | | | | | | | | | | |

■ On privilégie la nucléation dans les argiles
■ On privilégie la nucléation dans les calcaires
■ On se trouve à la limite de préférence de nucléation

les zones limites de préférence de nucléation.

Tableau 11 : A : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie et d'un pendage de 20° en fonction des 4 configurations de résistance. B : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie obtenue dans la partie III -3-1 en fonction des 4 configurations de résistance. On peut observer en bleu les zones où on privilégie la nucléation des argiles, en orange la zone où on privilégie la fracturation dans les calcaires et en rouge

Ce pendage des couches permet d'enlever les ambiguïtés de préférence de nucléation dans les deux types de formations pour les fortes anisotropies (Tab 11). C'est sur les deux autres modèles (« effet de cohésion », « effet de friction ») que des changements sont encore une fois observés mais seulement sur des faibles anisotropies. Ainsi au vu des résultats, un modèle possédant un faible pendage permettrait de nucléer plus facilement dans les couches

peu compétentes pour des rapports de module de Young plus élevés mais toujours à de faibles anisotropies. Pour illustrer ces deux modèles, on a observé un rapport de Young calcaire/argile de 2 avec pendage et sans pendage.

III-5-2 Exploration du rôle de l'anisotropie frictionnelle

Pour cette partie, on a effectué une anisotropie frictionnelle sur le modèle carbonaté, celui-ci étant celui qui représente le mieux nos formations au sein des systèmes naturels. La littérature nous indique que le type d'anisotropie le plus proche de nos résultats est l'anisotropie de type U (Ramurthy, 1993) (voir partie I). Ainsi, on s'est basé sur une droite $y = a * \theta + C$ en fonction de l'angle que fait la contrainte avec les feuillets, soit dans notre cas $\theta = 90 - 20 = 70^\circ$ (comme on pu le faire Donath, 1964 ; Ramurthy, 1993) et de la friction maximale et minimale imposées comme paramètres initiaux soit pour nous $\mu_{min}=0.1$ et $\mu_{max}=0.4$, proches des résultats en mécanique des roches. Ici, les paramètres de modélisation sont restés les mêmes (Fig. 26).

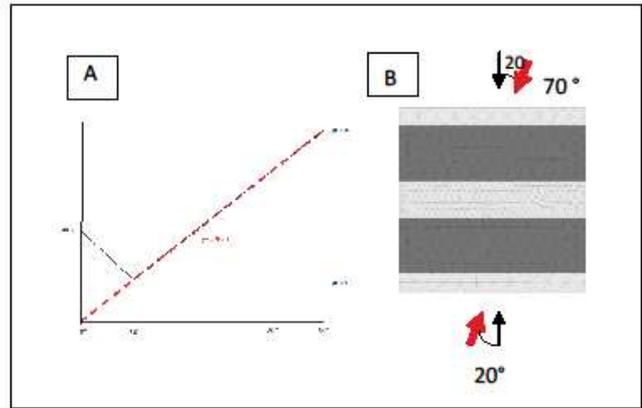


Figure 26: A: Illustration du modèle frictionnel d'anisotropie de type U représenté par une droite $y = a * \theta + C$ compris entre des valeurs de friction imposé pour des valeur minimale et maximale. B: Illustration du pendage de 20° effectué sur 3DEC où l'écart entre les contraintes limites et les feuillets est égale à $\theta = 70^\circ$

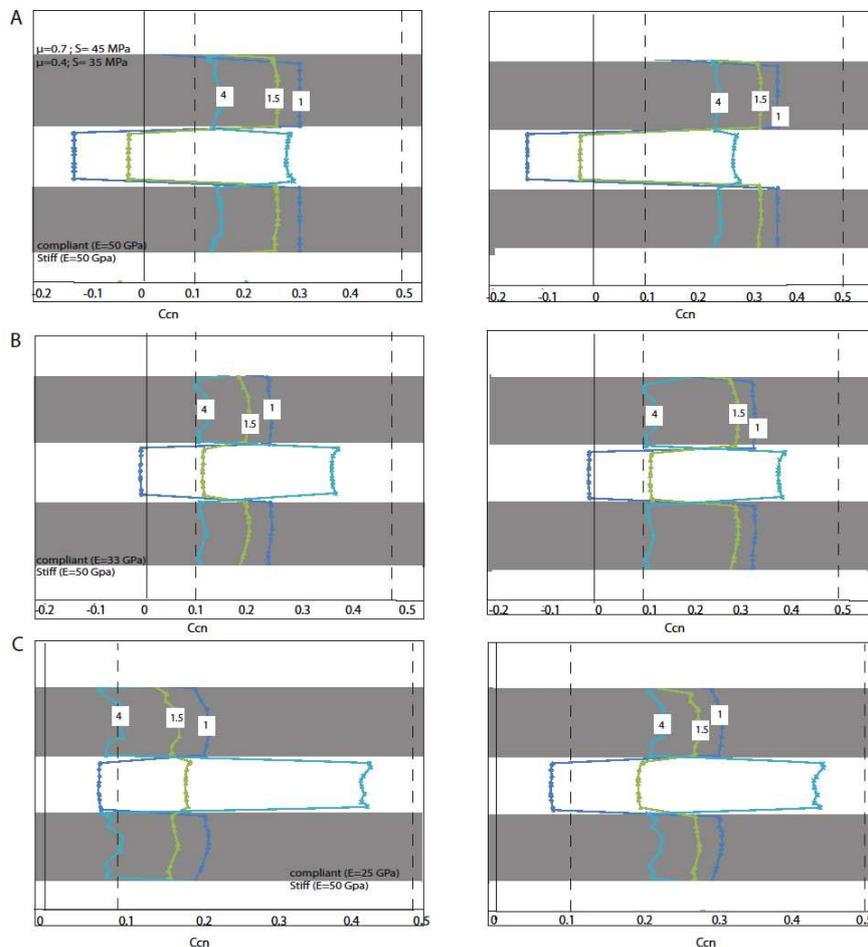


Figure 27 : Effet du contraste de la rigidité et des propriétés de résistance sur des couches par le critère de Coulomb normalisé (CCn). Tous les résultats représentent le modèle « carbonaté ». On trouve à gauche et à droite le modèle frictionnel .A : Résultat du rapport du module de Young (E_c / E_a) à 1 et l'anisotropie des couches compétentes (E_{apar}/E_{aper}) à 1, 1.5 et 4 . B : Résultat du rapport du module de Young (E_c / E_a) à 1.5 et l'anisotropie des couches compétentes (E_{apar}/E_{aper}) à 1, 1.5 et 4. Résultat du rapport du module de Young (E_c / E_a) à 2 et l'anisotropie des couches compétentes (E_{apar}/E_{aper}) à 1, 1.5 et 4. Les couches compétentes et peu compétentes sont respectivement en blanc et gris. Le frottement interne (μ) et la cohésion (S) de la couche sont indiqués.

Le modèle frictionnel (Fig.27 à droite) permet d'augmenter les valeurs de C_{cn} au sein des couches argileuses et ainsi augmenter les chances de nucléation des fractures au sein des couches argileuses (Fig.27). Ainsi au sein des argiles, avec un rapport de module de Young de 1.5 et une anisotropie de 1.5, on a un C_{cn} égal à 0.2 et à 0.3 respectivement pour un modèle sans apport frictionnel et pour un modèle avec un apport frictionnel (Fig.27B). Cette augmentation de C_{cn} va permettre pour certaines caractéristiques mécaniques, de nucléer non plus dans les calcaires (Fig 27C) mais au sein des argiles (par exemple $E_a/E_c = 2$ et $E_{apar}/E_{aper} = 1.5$).

| A | | Ratio 1 | Ratio 1.5 | Ratio 2 |
|-----------|---------------------|--|--|--|
| E_c/E_a | E_{apar}/E_{aper} | | | |
| Ratio 1 | | | On privilégie la nucléation dans les argiles | On se trouve à la limite de préférence de nucléation |
| Ratio 1.5 | | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires |
| Ratio 4 | | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires |

| B | | Ratio 1 | Ratio 1.5 | Ratio 2 |
|-----------|---------------------|--|--|--|
| E_c/E_a | E_{apar}/E_{aper} | | | |
| Ratio 1 | | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les argiles | On se trouve à la limite de préférence de nucléation |
| Ratio 1.5 | | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires |
| Ratio 4 | | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires |

| C | | Ratio 1 | Ratio 1.5 | Ratio 2 |
|-----------|---------------------|--|--|--|
| E_c/E_a | E_{apar}/E_{aper} | | | |
| Ratio 1 | | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les argiles |
| Ratio 1.5 | | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les argiles | On privilégie la nucléation dans les argiles |
| Ratio 4 | | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires | On privilégie la nucléation dans les calcaires |

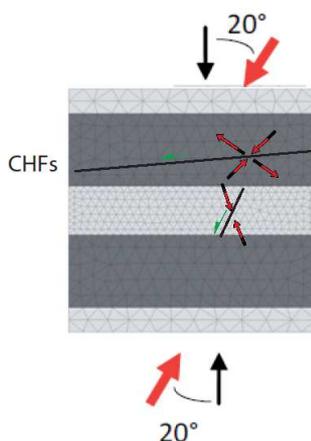
■ On privilégie la nucléation dans les argiles
■ On privilégie la nucléation dans les calcaires
■ On se trouve à la limite de préférence de nucléation

Tableau 12 : A : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie pour le modèle carbonaté obtenu dans la partie III - 3-1. B : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie et d'un pendage de 20 ° pour le modèle carbonaté. C : Résultats des différents rapports du module de Young en fonction de l'anisotropie, d'un pendage et du modèle frictionnel, pour le modèle carbonaté. On peut observer en bleu les zones où on privilégie la nucléation des argiles, en orange la zone où on privilégie la fracturation dans les calcaires et en rouge les zones limites de préférence de nucléation.

Sur tableau 12, on observe, pour un modèle de type « carbonaté » proche des valeurs moyennes au sein des systèmes naturels, que la nucléation au sein des argiles est privilégiée pour des rapports de module de Young plus élevés et une faible anisotropie lors d'un faible pendage (Chap. III-3-4A). Avec un modèle frictionnel rajouté aux modélisations déjà effectuées, on va pouvoir nucléer dans les argiles à des rapports de module de Young et d'anisotropies supérieurs. Ainsi, pour un rapport de module de

Young de 2, qui auparavant permettait la nucléation préférentiellement dans les calcaires pour n'importe quelle anisotropie, avec le modèle frictionnel, la nucléation dans les calcaires ne s'effectue que pour une forte anisotropie, d'une valeur de 4.

III-5-2 Effet sur la propagation.



Au-delà, de l'initiation de la fracture, on sait que la propagation de ceux-ci se fait plus facilement le long de plan de faiblesse au sein des couches argileuses et plus particulièrement le long des feuilletts argileux que constitue la stratification. Ici, avec la modélisation d'un faible pendage sur un système multicouche on permet de faire suffisamment tourner les contraintes pour faire fonctionner un CHF en cisaillement et ainsi propager la fracture dans l'ensemble de la couche argileuse.

Figure 28 : Illustration de la propagation des failles au sein d'un système multicouche, par rotation de contrainte.

III-6 Application à des systèmes multicouches argilo-calcaire de sites naturels.

Après, avoir effectué des modélisations dans quatre configurations et pour des rapports de module de Young et d'anisotropie variant, tout d'abord sur des modèles anisotropes, puis

en affectant ces modèles d'un faible pendage de l'ordre de 20 ° et enfin en y projetant une approche frictionnelle, il faut maintenant appliquer les valeurs issues des sites étudiés. Le tableau 13, sont indiqués les rapports de module de Young et d'anisotropie mesurés sur les systèmes naturels que l'on a étudié (Espréaux, Trescléoux et le site de Meuse et Haute Marne), de l'IRSN. Ainsi, on peut connaître la configuration de ces sites et obtenir dans une moindre mesure « la préférence de nucléation » par rapport à nos caractéristiques de modélisation.

| | COx | Toarcien | Argiles à Opalines | Espréaux (Hauterivien) | Trescléoux (Argovien) | Vogué (Argovien) | Flaviac (Callovo-oxfordien) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|
| Epar/Eper | 1.2 (1 à 1.4) | 2.9 | 2.9 | 1.45 | 1.40 | 1.43 | 3.82 |
| Ec/Ea | 1.9 | | | 2.2 | 1.4 | 1.3 | |

Tableau 13. Anisotropie de module d'Young (*Epar/Eper*) pour différentes roches argileuses et rapport de module de young entre les calcaires et l'argile. COx : argilites de Meuse/Haute-Marne, Toarcien : argilites du Toarcien de Tournemire, Espréaux : argile de l'Hauterivien, Trescléoux et Vogué : argile de l'Argovien, Flaviac : argile du Callovo-oxfordien. D'après les données de Niandou et al. (1997), Constantin (2002), Thury (2002), Roche (2011).

| sites | modèle anisotrope | modèle anisotrope avec pendage | modèle anisotrope avec pendage et approche frictionnelle |
|------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
| Espréaux | | | |
| Trescléoux | | | |
| Site de Meuse et Haute Marne | | | |

■ On privilégie la nucléation dans les argiles
■ On privilégie la nucléation dans les calcaires

Tableau 14 : Résultats selon la modélisation de différentes caractéristiques des modèles et les caractéristiques des modules de Young et des anisotropies pour les sites naturels obtenus en laboratoire. On peut observer en bleu les zones où on privilégie la nucléation des argiles et en orange la zone où on privilégie la fracturation dans les calcaires.

En comparant les données de modélisation et les caractéristiques des modules de Young et d'anisotropie sur les sites d'Espréaux, de Trescléoux et de Meuse et Haute Marne (Fig.35), selon les caractéristiques que l'on a fournies aux modèles de type « carbonaté », on conclut que pour un modèle anisotrope, la fracture va de préférence nucléer au sein des formations calcaires. Par contre, il suffit d'un léger pendage (ici selon le modèle de 20°) pour que la fracturation nucléée ne se produise pas au sein des calcaires mais au sein de la formation argileuse. Cette fracturation au sein des argiles se confirme pour une anisotropie frictionnelle.

L'existence d'un léger pendage lors de l'initiation des failles normales est possible sur les sites d'Espréaux actuellement basculé, de 60° (vers l'Est en raison d'un plissement tardif), et de Trescléoux. En revanche, le site de Meuse et Haute Marne présente un pendage actuel de quelques degrés vers le centre du Bassin Parisien (vers l'WSW), il est donc peu probable qu'il ait été assez basculé pour former l'initiation des failles dans les argiles et la propagation des CHF.

D'autre part, il faut nuancer ces conclusions puisqu'on observait des pendages faibles pour Trescléoux (15°) et saint Didier (17°) mais aussi à Vogué (12°) et Flaviac (15°) où il n'y a pas la présence de CHF (Roche, 2011).

IV Discussion

Les résultats d'analyse microstructurale sur les CHF ont permis de bien confirmer la cinématique déduite des observations macrostructurales, validant le fait que ces CHF ont

bien été initiés en extension, et repris tardivement en compression. Bien que les sites d'observations soient différents (lieu, profondeur d'enfouissement et rhéologie), on trouve systématiquement des microstructures montrant des directions d'ouverture soit en fente de tension, soit par des plans de cisaillement, contraignant les cinématiques successives. Un même mécanisme de formation des CHF's en contexte extensif, est identifié, avec la création d'ouverture simple, ou réduites et de cicatrisation de type crack-seals, ainsi que par des ouvertures plus grandes formant des géométries de type domino finissant par donner des grandes plages de calcite. Deux scénarios qui auraient localisés la création de ces structures ont été proposés. Cependant on sait qu'il peut exister une surpression de fluide au sein de ces argiles, laissant penser que la première ouverture se ferait plus de façon simple et non cisailante ; ainsi le premier scénario serait plus en accord avec la réalité. Ces observations microstructurales sont assez proches de celles réalisées sur d'autres formations (Constantin, 2002 ; Labaume et al, 2003 ; Cox. F, 1987). Ces processus d'ouverture de dimensions variables au sein des argiles restent assez complexes, révélant peut être une différence de type d'argile, une zone de faiblesse ou une contrainte locale plus importante à un moment donné. Pour Cox. (1987), le développement de veines au niveau des microstructures dépend d'un certain nombre de facteurs autres que l'histoire des cinématiques de déplacement. Le plus important de ces facteurs est la nucléation et la cinétique de croissance des cristaux ayant précipité à partir de fluides dans les fractures, ainsi que la localisation des sites d'accrétion de matière lors d'incrément successifs de crack-seals. Ces microstructures sont appelées à se développer seulement si une proportion importante de cristaux continue de croître au cours d'incrément successifs de crack-seals sans être gênés par un rythme plus rapide de croissance voisin.

Ce phénomène d'ouverture est par ailleurs similaire pour les failles normales à 45° dans les argiles ainsi que pour les failles normales dans les calcaires quand ces failles traversent ces systèmes multicouches. Une phase de cristallisation supplémentaire est cependant observée au sein des failles normales dans les calcaires, ce qui marque une fermeture du système ; Ainsi, les interactions des fluides entre ces failles, au sein de ces formations multicouches, ne sont pas aussi simples et amènent beaucoup de questionnements et d'incertitudes sur le lien calcaire-argile. D'autres failles s'arrêtant dans un système argileux s'amortissent en marquant un plissement des couches. Les observations ont conduit à évoquer l'hypothèse de la création de zones d'ouvertures plus importantes proches de la faille et au maximum de la zone plissée tout en formant des zones de glissement à composante cisailante. Cependant, les observations macrostructurales au niveau de ces failles ne sont pas confirmées par l'analyse microstructurale (reprise compressive). Ainsi, d'autres approches cinématique pourraient être envisagées, comme une analyse complète du maillage de la calcite sparitique (Constantin, 2002) ou même une observation des CHF's en lames minces dans une autre direction (les lames ayant été faites parallèlement au sens de mouvement de la faille). De plus, des études portant sur l'analyse statistique sur l'orientation préférentielle des feuillettes d'argiles ont été effectuées et pourraient être envisagées pour confirmer des zones de cisaillement difficilement visibles ou montrer quel type d'argile est le plus affecté par la cinématique (Wenk H et al, 2010).

La modélisation numérique réalisée permet de caractériser la façon dont les propriétés d'anisotropie élastique, le pendage des couches, et l'anisotropie de rupture influencent la croissance des failles dans les alternances de roches de propriétés différentes. La stratigraphie mécanique localise la nucléation de failles dans un système multicouche. Un fort rapport de module de Young entre les couches favorise la nucléation au sein d'une couche compétente, et il en va de même pour une forte anisotropie d'élasticité, accentuant ce phénomène. Ainsi,

pour les modèles présentant un faible contraste de propriété élastique et d'anisotropie de la roche (c'est-à dire inférieur respectivement à 1.5 et 2), la nucléation de la faille aura lieu préférentiellement dans la couche incompetent alors qu'un fort rapport d'élasticité et une forte anisotropie privilégient la nucléation dans la couche compétente. Ces conclusions sont légèrement différentes de celles déduites de modélisations isotropes effectuées auparavant (Roche, 2001). Bien sûr, nos résultats montrent que l'anisotropie élastique autorisant la propagation de la faille dépend des propriétés des roches. En effectuant une rotation du champ de contraintes par rapport aux couches pour simuler un pendage de la stratification, les failles au sein des couches incompetentes peuvent nucléer pour des rapports d'élasticité et d'anisotropie élastique plus élevées. Il en va de même lorsqu'une anisotropie de rupture est prise en compte, amplifiant d'autant plus ce phénomène.

Les valeurs des rapports d'élasticité et d'anisotropie élastique mis en avant par ces modèles sont assez similaires à ceux observés sur systèmes naturels (Niandou et al. 1997 ; Constantin 2002 ; Thury 2002 ; Roche 2011). Ainsi, un faible contraste de modules de Young et d'anisotropie associé à un faible pendage (avec ou sans anisotropie de rupture), permet la nucléation au sein de couches de type argile. Cependant, nos modèles comprennent un certain nombre de simplification. En outre, sur un site, on n'observe pas de faille dans tous les bancs argileux ; on peut se demander si d'autres processus peuvent agir. Ainsi, une pression de fluide anormalement élevée au sein des couches incompetentes peut amener la contrainte minimale principale à la courbe de rupture plus rapidement (Jaeger et Cook, 2007), et cette tendance peut être encore accrue en d'anisotropie de perméabilités. D'autre part, nos modèles sont simulées en tant que matériaux parfaitement élastiques, or la plupart des calcaires et des grès sont compatibles avec ce comportement, mais les roches argileuses peuvent avoir un comportement beaucoup plus complexe. Le fluage plastique intra-granulaire peut précéder la faille pendant le chargement (Donath, 1970 ; Ferril et P. Morris, 2008). Ces déformations plastiques sont susceptibles de modifier les contraintes dans la couche d'argile (Roche, 2011) et affecter plusieurs couches comprenant des couches de calcaire ou de grès (Ferrill et al, 2005).

Bibliographie

- Ackermann R; V., Schlishec, R. W. Withjacka ,M. O., 2001, The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. *Journal of Structural Geology*, pp 1803–1819
- Benedicto, A., Labaume, P., Séguret, M., Séranne, M., 1996. Low-angle crustal ramp and basin geometry in the Gulf of Lion passive margin: Oligocene aquitanian Vistrenque graben, SE France. *Tectonics*, v. 15, p. 1192-1212.
- Bons P. D., 2000. *Journal of the Virtual Explorer*.
- Bourne, S.J., 2003. Contrast of elastic properties between rock layers as a mechanism for the initiation and orientation of tensile failure under uniform remote compression. *Journal of Geophysical Research*, v. 108(B8).
- Brace, W.F., 1964. Brittle fracture of rocks. In: Judd W. R. (ed) *State of stress in the Earth's crust*, American Elsevier, New York, p. 111-174.
- Bradshaw, G.A., and Zoback, M.D., 1988. Listric normal faulting, stress refraction, and the state of stress in the Gulf Coastal Basin. *Geology*, v. 16, p. 271-274.
- Chiarelli, A.S., Shao, J.F., Hoteit, N., 2003. Modeling of elastoplastic damage behaviour of a claystone. *International Journal of Plasticity*, v. 19.
- Corkum, A.G., and Martin, C.D., 2007. The mechanical behaviour of weak mudstone (Opalinus Clay) at low stresses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v.44
- 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 de doctorat de l'Université Paris XI Orsay.
- Cox. F., 1987. Antitaxial crack-seal vein microstructures and their relationship to displacement paths. *Journal of structural Geology*, Vol 9, No 7, pp 779 à 787
- Donath, F. A., 1964. Strength variation and deformational behaviour in anisotropic rock. In: *State of stress in the Earth's Crust*, Judd, M.R, Elsevier, New York, p 281-297.
- Egholm D.L., Clausen O.R., Sandiford M., Kristensen M.B., Korstgard J.A, 2008. The mechanics of clay smearing along faults. *The geological Society of America*, v36, no 10, p787-790.
- Einstein, H.H., and Dowding, C.H., 1981. Shearing resistance and deformability of rock joints. In: Touloukian, Y. S., Judd, W. R., Roy, R.F., (ed) *Physical Properties of Rocks and Minerals*, McGraw-Hill, New York, p. 177-220.
- Evans, K.F., Engelder, T., Plumb, R.A., 1989. Appalachian stress study 1. A detailed description of in situ stress variations in devonian shales of the Appalachian plateau. *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 7129-7154.
- Evans, M.A., 1994. Joint and decollement zones in Middle Devonian shales: Evidence for multiple deformation events in the central Appalachian Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, p. 447-460.
- Fabre, G., 2005. *Fluage et endommagement des roches argileuses, Evolution de la microstructure et modélisation phénoménologique*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble I.
- Ferrill, D.A., and Morris, A.P., 2008. Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas. *AAPG Bulletin*, v. 92, p. 359-380.
- Fesneau C., Deconink J-F., Pellenard P., Reboulet S., 2009. Evidence of aerial volcanic activity

- during the valanginian along the northern Tethys margin. *Cretaceous Research* vol30, p533-539
- Fouché, O., Wright, H., Le Cléach., J.M., Pellenard, P., 2004. Fabric control on strain and rupture of heterogeneous shale samples by using a non-conventional mechanical test. *Applied Clay Science*, v. 26, p. 367-387.
- Gaviglio P., 1986. Crack-seal mechanism in a limestone a factor of deformation in strike-slip faulting. *Tectonophysics*, 131, p 247-255.
- Gross, M.R., Gutiérrez-Alonso, G., Bai, T., Wacker, M.A., Collinsworth, K.B., Behl, R.J., 1997. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations. *Journal of Structural Geology*, v. 19, p. 171-183.
- Gunzberger, Y., and Cornet, F.H., 2007. Rheological characterization of a sedimentary formation from a stress inversion. *Geophysics. J. Int.*, v. 168, p. 402-418.
- Hatheway, A.W., and Kiersch, G.A., 1989. Engineering Properties of Rock. In *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, p. 671-715.
- Hommand, F., Shao, J.F., Giraud, A., Auvray, C., Hoxha, D., 2006. Pétrofabrication et propriétés mécaniques des argilites. *C. R. Géoscience*, v. 228, p. 882-891.
- Jackson, C.A.L., Gawthorpe, R.L., Sharp, I.R., 2006. Style and sequence of deformation during extensional fault-propagation folding: examples from the Hammam Faraun and El-Qaa fault blocks, Suez Rift, Egypt. *Journal of Structural Geology*, v. 28, p. 519-535.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*. Blackwell Publishing Ltd, v. - 4th ed.
- Katz B., Elmore D.R., Cogoini M., Engel H.M., Ferry S., 2000. Associations between burial diagenesis of smectite, chemical remagnetization, and magnetite authigenesis in the Vocontian through, SE France. *Journal of geophysical research*, vol 105, P 851-868
- Labaume.P., Berty C. et Laurent Ph., 1991. Syn-diagenetic evolution of shear structures in superficial nappes : an example from the Northern Apennines (NW Italy). *Journal of structural geology*, vol 13, No 4, pp385 à 398.
- Lockner, D.A., 1995. Rock failure. In: Ahrens, T. J. (ed), *Rock physics and phase relation, A handbook of physical constant*. American Geophysical Union, Washington, D. C., v. AGU Reference Shelf 3, p. 127-147.
- Meunier, 2003, Argiles.SGF, Collection Géoscience p1-15, p83-87 et p168-203
- Muraoka, H., and Kamata, H., 1983. Displacement distribution along minor fault traces. *Journal of Structural Geology*, v. 5, p. 483-485.
- Nicol, A., Watterson, J., Walsh, J.J., Childs, C., 1996b, The shapes, major axis orientations and displacement patterns of fault surfaces. *Journal of Structural Geology*, v. 18, p. 235-248. Paterson, M.S., and Wong, T.F., 2005. *Experimental Rock Deformation -The Brittle Field*. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Niandou, H., Shao, J.F., Henry, J.P., Fourmaintraux, D., 1997. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of tournemire shale. *international Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 34, p. 3-16.
- Olhoeft, G.R., and Gordon, R.J., 1989. Densities of Rocks and Minerals. In *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, p. 139-176. Paterson, M.S., and Wong, T.F., 2005. *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Pincus, H.J., 1981. Constitution of rocks. In: Y. S. Touloukian, W. R. Judd and R. F. Roy, Editors, *Physical Properties of Rocks and Minerals*, McGraw-Hill, New York, p. 1-19.
- Ramsay John G. 1980. The crack-seal mechanism of rock deformation. *Journal of Nature*, vol 284.
- Ramurthy, T., 1993, Strength and modulus responses of anisotropic rocks. In: Hudson, J. A.,

- (ed) Comprehensive rock engineering principles, practice and projects vol. 1, Pergamon Press, Oxford, p. 313-329.
- Renard F.,Andréani M ;,Boulier A.M.,Labaume P., 2005. Crack-seal patterns: records of uncorrelated stress release variations in crustal rocks. *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: from Minerals to the Lithosphere*. Geological Society, London, Special Publications, 243, 67-79.
- Roche V, 2011. Architecture et croissance des failles dans les alternances argilo-calcaires, exemples dans les alternances du Bassin du Sud Est (France) et modélisation numérique. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Roen John B.,1984. Geology of the devonien black shales of Appalachian Basin. *Org Geochem*, Vol 5, p 241-254.
- Sarout, J., and Guéguen, Y., 2008. Anisotropy of elastic wave velocities in deformed shales: Part 1 -Experimental results. *Geophysics*, v. 73, p. D75-D89.
- Seranne, M., Benedicto, A., Labaum, P., Truffert, C., Pascal, G., 1995. Structural style and evolution of the Gulf of lion Oligo-Miocene rifting: role of the Pyrenean orogeny. *Marine and Petroleum Geology*, v. 12, p. 809-820.
- Smart, K.J., Ferrill, D.A., Morris, A.P., 2009. Impact of interlayer slip on fracture prediction from geomechanical models of fault-related folds. *AAPG Bulletin*, v. 93, p. 1447-1458
- Soliva, R., and Benedicto, A., 2005. Geometry, scaling relations and spacing of vertically restricted normal faults. *Journal of Structural Geology*, v. 27, p. 317-325.
- Soliva, R., Benedicto, A., Maerten, L., 2006. Spacing and linkage of confined normal faults: importance of mechanical thickness. *Journal of Geophysical Research*, v. 110.
- Thury, M., 2002. The characteristics of the Opalinus Clay investigated il the Mont Terri underground rock laboratory in Switzerland. *C. R. Physique*, v. 3, p. 923-933.
- Wilkins, S.J., Gross, M.R., 2002. Growth in layered rocks at Split Mountain, Utah: influence of mechanical stratigraphy on dip linkage, fault restriction and fault scaling. *Journal of Structural Geology*, v 24, p 1413-1429.
- Y. li, 1976. The anisotropic behavior of poisson's ratio, Young's Modulus, and shear Modulus in Hexagonal materials. *Physica status solidi* vol p171-175
- Wibberley, C.A.J., Petit, J.P., Rives, T., 2007. The effect of tilting on fault propagation and network development in sandstone - Shale sequences: A case study from the Lodève Basin, southern France. *Journal of the Geological Society*, v. 164, p. 599-608.
- Wenk HR. , Kanitpanyacharoen W., Voltoni M., 2010. Preferred orientation of phyllosilicates : Comparison of fault gouge, shale and schist. *Journal of structural Geology*, v 32, p478-489.