

GEOLOGIE DES RESERVOIRS FRACTURES

Module : Géologie des Réservoirs

STU 6

Pr. H. EL-OUARDI

Introduction : Notion de réservoir

Un *réservoir naturel* est habituellement constitué d'un ensemble de formations sédimentaires localisé sur une zone de l'ordre de la dizaine de kilomètres et enfoui à des profondeurs qui varient entre plusieurs centaines de mètres et quelques kilomètres.

Les roches sédimentaires composant un réservoir donné contiennent une forte concentration d'hydrocarbures stockés dans leurs *pores*. Fréquemment, ces hydrocarbures sont stockés dans des roches distinctes de leur formation sédimentaire d'origine. Ils ont donc subi, au cours de leur histoire, une *migration* depuis la roche d'origine (ou *roche mère*) jusqu'à leur lieu de stockage (*formation réservoir*).

Les deux paramètres qui régissent la capacité volumique et les propriétés hydrodynamiques des réservoirs sont la **porosité et la perméabilité**.

Dans ce qui suit, nous distinguerons sommairement les différents types de porosité et nous caractériserons quelques aspects des relations **fracturation/perméabilité** au sein d'un réservoir fracturé.

I. Différents types de porosité

Il existe deux principaux types de porosité responsables du stockage des fluides au sein des réservoirs naturels. Plus le pourcentage de porosité est important, plus la capacité volumique d'un réservoir donné, sera importante, pour autant que la porosité soit connectée.

- **Porosité matricielle**

Elle se rencontre généralement au sein de roches grenues à cimentation incomplète, *i.e.*, où sont présentes de nombreuses régions vacuolaires qui n'ont pas été remplies lors de la diagenèse ou qui ont été dissoutes secondairement. L'origine de cette porosité est variable

et est liée à la nature des grains constituant la roche. Dans les roches carbonatées, on rencontre entre autres :

- **la porosité intragranulaire** : constituée de vides présents au sein des grains constitutifs de la roche. Il peut s'agir, par exemple de loges présentes au sein de tests d'organismes fossiles (gastéropodes, foraminifères, etc.) non colmatées pendant la diagenèse.

- **la porosité de moulage**, qui est issue de la dissolution de certains grains au sein de la roche. La dissolution de ces grains laisse des moulages vides qui peuvent par la suite se remplir de fluide.

- **la porosité intergranulaire**, se rencontre dans les roches dont les grains constitutifs ne sont pas parfaitement jointifs et laissent des espaces vides à leur périphérie.

- **la porosité périgranulaire** est constituée lors de la dissolution de tests fossiles remplis de sédiments. Le pore est alors constitué par l'espace laissé par le fossile dissout autour de son moulage interne.

- **Porosité de fracture**

La porosité de fracture est constituée par des réseaux denses de fractures (en général « de fond ») dont l'ouverture et la connectivité sont suffisantes pour être occupées par les fluides. Ce type de porosité est généralement dominant dans le cas de formations carbonatées à proportion de grains modérée (de type *mudstone* à *wackestone* voire *packstone* selon la classification de Dunham) ou bien cimentées (dans le cas de formations de type *grainstone*). Notons toutefois que la présence de réseaux de fractures denses ne suffit pas à accroître de façon significative la porosité. En effet, la fracturation peut s'avérer « fermée » en subsurface, en raison d'un régime de contraintes *in-situ* défavorable.

Pour constituer un volume poreux, les fractures doivent bâiller (au moins 50 µm pour une perméabilité à l'eau), ce qui peut résulter d'une orientation favorable des contraintes *in-situ*. Dans le cas de porosité de fractures ouvertes et connectées, donc pouvant accueillir des fluides, on parle de *porosité efficace*. Le colmatage des fractures ou leur non connectivité peuvent leur enlever tout intérêt.

- **Cas de la double porosité**

Certaines formations combinent la présence d'une porosité matricielle importante et d'un réseau de fractures ouvertes suffisamment important pour déterminer une porosité de fracture. On parle dans ce cas de *double porosité fractures/matrice*.

Une double porosité de fracture peut elle aussi être rencontrée, dans le cas où le réservoir étudié est affecté par deux réseaux de fractures distincts et d'échelles différentes.

II. Intérêts de la fracturation dans les réservoirs fracturés

Dans le domaine pétrolier par exemple, comprendre les paramètres susceptibles de contrôler la nature et la distribution tridimensionnelle des fractures au niveau des réservoirs est très important : en premier lieu, il est indispensable de *connaître l'état de fracturation d'un réservoir donné* afin de construire des modèles (dits *modèles réservoirs*) réalistes.

Certains de ces modèles visent à prédire les réserves, d'autres à prévoir le comportement dynamique, c'est à dire le comportement des fluides lors de la mise en production. Plus la distribution de la fracturation implémentée dans le modèle sera proche de la distribution réelle dans le réservoir, plus les simulations de production seront fidèles à la réalité.

En second lieu, l'exploitation des réservoirs demande une connaissance de plus en plus précise de leur structure géométrique. Cette connaissance permet, par exemple, de construire des modèles structuraux qui facilitent la détermination des emplacements et les trajectoires des puits de production ou d'injection. Or, la fracturation et ses fluctuations de nature et d'intensité est susceptible d'influencer de manière importante les conditions de production, voire même de menacer la pérennité des puits.

III. Typologie des fractures et unités mécaniques

1. Unité mécanique définie par les fractures

La distribution des fractures au sein des piles sédimentaires, ainsi que leur persistance verticale, sont fortement influencées par l'organisation stratigraphique de ces sédiments. Du point de vue de la fracturation, *une unité mécanique sera définie par une portion de la pile sédimentaire dont les interfaces supérieures et inférieures limitent la persistance verticale d'un type donné de fractures.*

Une unité mécanique pour un type de fracture donné est habituellement constituée de plusieurs unités imbriquées correspondant à un ou plusieurs bancs (*i.e.*, les unités mécaniques élémentaires). Ces unités imbriquées sont définies par la persistance verticale de fractures qui ne traversent pas l'intégralité de l'unité mécanique.

Une pile sédimentaire donnée est composée habituellement de plusieurs unités mécaniques successives isolées par des interfaces ou des bancs qui agissent comme des barrières vis-à-vis de la fracturation.

2. Terminologie et origine mécanique des fractures dans les unités mécaniques :

En dehors de la division classique en familles directionnelles, la description des différents types de fractures a nécessité une terminologie précise. Cette terminologie est basée sur la distribution spatiale (espacement), sur la persistance verticale des différents types observés au niveau d'une unité mécanique, ainsi que sur la distinction entre fractures en ouverture et fractures cisailantes.

o Les couloirs fracturés

Dans cette terminologie, un *couloir fracturé* (ou *Fracture Corridor = FC*) est défini par un *groupe de diaclases, ou plus rarement de fractures cisailantes, anormalement dense développé à l'intérieur d'une unité mécanique en général épaisse.*

Certains couloirs sont déterminés par la présence d'hétérogénéités locales telles que failles ou flexures. Un couloir fracturé peut-être composé d'un nombre plus ou moins élevé de fractures caractérisées elles mêmes par une persistance verticale variable au sein de l'unité mécanique. *Toutefois, un couloir fracturé pris dans son ensemble traverse typiquement l'intégralité de l'unité mécanique affectée.*

o Fractures à haute persistance verticale

Une *fracture à haute persistance verticale* (ou *Highly Persistent Fracture = HPF*) est une *fracture de mode I, pouvant être isolée ou faire partie d'un couloir fracturé, traversant typiquement l'intégralité d'une unité mécanique donnée.* La persistance verticale d'une telle fracture sera donc égale à l'épaisseur totale de l'unité mécanique affectée.

o Fractures à persistance modérée

Une *fracture à persistance modérée* (ou *Multiple Bed limited Fracture = MBF*) est une fracture de mode I définie par le fait *qu'elle traverse une partie de l'unité mécanique composée de plusieurs bancs.* Le nombre de bancs affectés par une MBF sera *strictement supérieur à 1.* Dans le cas contraire on parlera de *fracture limitée au banc.*

o Notion de fracture limitée au banc et de fracture de fond

Une *fracture limitée au banc* (ou *Bed Controlled Fracture = BCF*) est une fracture de mode I définie par sa persistance verticale qui sera *limitée par l'épaisseur d'une unique unité élémentaire (i.e., un seul banc).*

Les fractures de fond, ou background fractures (i.e., les fractures les plus précoces, qui peuvent ne pas être liées aux stades de déformation majeurs ultérieurs) que l'on observe au niveau des unités mécaniques fracturées sont le plus souvent constituées de fractures limitées au banc.

IV. Les Sept Piliers de l'étude de la fracturation dans un réservoir

Sept types distincts d'analyse structurale peuvent être définis, chacun avec ses propres données et utilisations, constituent la démarche scientifique à suivre dans l'étude d'un réservoir géologique. Ces analyses constituent des étapes d'étude pour enfin proposer un modèle réservoir adéquat.

- (1) description géologique de base;*
- (2) géométries et topologie des fractures;*
- (3) relations chronologiques des fractures;*
- (4) cinématique;*
- (5) tectonique;*
- (6) mécanique des roches ;*
- (7) écoulement des fluides.*

Nous illustrons ces types d'analyse en utilisant l'exemple des failles et des fractures, qui forment généralement des réseaux connectés. Ces types d'analyse devraient être utilisés comme base pour la prédiction de l'écoulement des fluides à travers un réseau de fractures. Un tel modèle doit commencer par la description géologique de base des types de fractures. Les descriptions géologiques de base doivent être suivies par la mesure de leurs géométries et topologies, comprendre leurs relations chronologiques, cinématiques et mécaniques, et proposer enfin un modèle d'écoulement des fluides. Des étapes manquantes peuvent conduire à des interprétations erronées.

Cette démarche d'analyse structurale peut être construite, en utilisant des exemples de structures (failles, veines, joints) parfaitement exposés et formant un réseau de fractures à géométrie mesurable, cinématique connue et chronologies relatives réalisables.



Figure 1 : Exemple de réseau de fractures pouvant être mesurées dans une station tectonique.

1. Description géologique de base

La recherche et l'analyse en géologie structurale commencent généralement par des descriptions, c'est-à-dire les observations élémentaires et fondamentales qu'un géologue ferait, en grande partie par l'observation directe plutôt que par la mesure. Ces observations décrivent les types de structures qui sont présentes, ainsi que des informations sur l'emplacement, types de roches, stratigraphie, épaisseurs des bancs, etc. Par exemple, une description géologique de base d'un réseau de fractures comprendrait la définition des types de fractures présentes, tels que les failles, les veines, les joints, etc.

Un **réseau** de fractures est l'ensemble des fractures pouvant exister dans une station donnée, il représente l'ensemble des failles, fractures, veines et joints.

Un **système** de fractures étant un ensemble de fractures ayant une géométrie, âge, cinématique ou mécanique partagées.



Figure 2 : Distinction entre failles, veines et joints tectoniques (faille avec déplacement relatif des compartiments, veines sont des fractures minéralisées, joints sont des fractures non minéralisées).

Les sources typiques de données pour l'analyse structurale comprennent le travail sur le terrain, les images satellitaires et photographies aériennes, données sismiques et autres données géophysiques et données de puits.

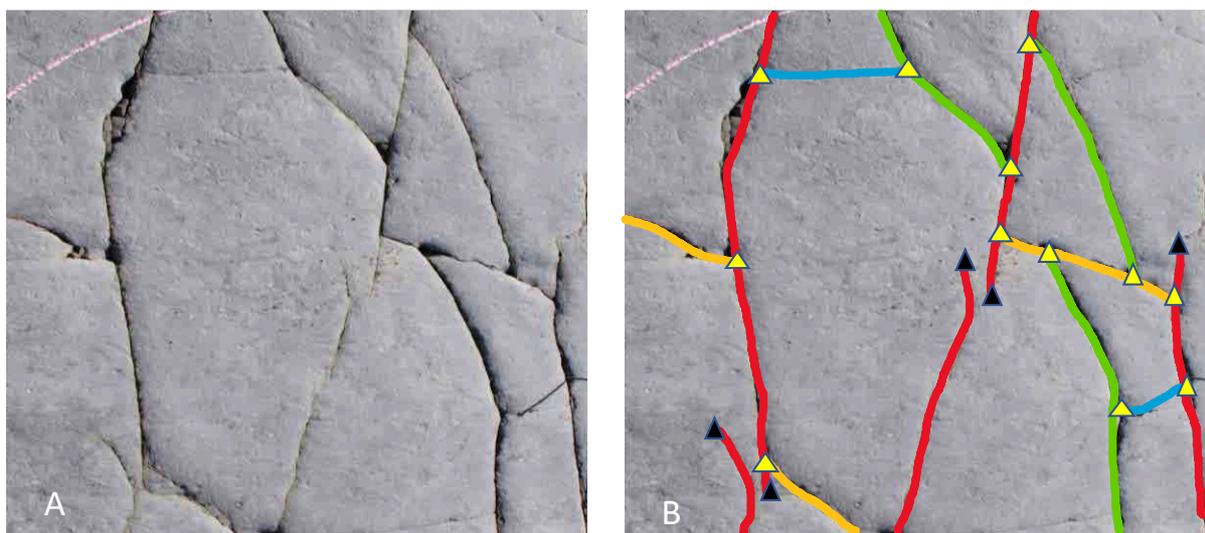
Les failles sont décrites selon leur jeu : FN, FI, FD par contre les fractures sont souvent plus complexes, mais on considère que les veines et les joints sont des structures différentes qui peuvent partager les caractéristiques mécaniques, les veines contiennent un remplissage minéral et les joints sont, par définition, non minéralisés.

2. Analyses géométriques et topologiques

L'analyse géométrique implique la description et la mesure de l'orientation (par exemple), taille (comme les longueurs de faille ou de fracture, par exemple), et la forme des caractéristiques géologiques (telles que le rapport d'aspect des failles). Ces données qui peuvent être collectées par des mesures 3D (par exemple, sismique), 2D (par exemple, cartographie de terrain) et 1D (par exemple, ligne de balayage ou *scanlines*). Il est également important de tenir compte du nombre d'ensemble des failles et de fractures et les rapports angulaires entre les failles et les fractures. Les populations de fractures peuvent être caractérisées par leur fréquence d'apparition ou espacement et distribution, y compris le regroupement. De nombreuses structures sont connues pour se produire à différentes échelles, avec les données géométriques utilisées pour étudier les relations d'échelle, y compris les failles avec déplacements, ouvertures des veines, longueurs des failles et l'espacement des fractures. Un large éventail de termes géométriques sont utilisés pour décrire les réseaux de fractures. Divers termes descriptifs sont utilisés pour les réseaux de fractures basés sur des géométries, tels que conjuguée, zone endommagée, duplex, structure en fleurs, imbriqué, polygonal, système. Les termes descriptifs pour d'autres types de réseaux de fractures comprennent les réseaux, concentrique, couloir, famille, zone, essaim, stockwerk et radial. Une gamme de termes descriptifs peut être appliquée aux réseaux de fractures, notamment : isolés, en échelle, radiaux, concentriques et aléatoires. Les termes géométriques liés à d'autres structures géologiques ont tendance à se rapporter à leurs tailles et orientations (par exemple, amplitudes de pli et longueurs d'onde).

Les failles et les fractures forment généralement des réseaux de nombreuses structures individuelles, dont les relations peuvent être étudiées par analyse topologique. Notez que la géométrie et la topologie décrivent toutes les deux des formes et des motifs. En 2D, un réseau peut être représenté par un système de nœuds et de branches (figure 3), avec les branches

représentant les traces de fracture et les nœuds enregistrant des informations sur les types et distributions d'intersections entre les fractures. La topologie met l'accent sur les relations entre deux ou plusieurs structures individuelles, p. Ex. Croisement et butée. Il s'est avéré utile dans la caractérisation de nombreux aspects des réseaux de fractures pour établir l'âge relatif des différents éléments structuraux. C'est aussi la base pour comprendre la connectivité des fractures, et pour comprendre les propriétés des roches, telles que la résistance, la rigidité et la perméabilité. La mesure et la quantification de la géométrie et de la topologie permettent de faire des comparaisons entre différentes structures et permettre des analyses supplémentaires, y compris la détermination des âges relatifs, mesure des déformations et interprétation des contraintes et de la mécanique. Les paramètres géométriques et topologiques fournissent également des données quantitatives pour des analyses statistiques.



	Pointe	Rouge	Jaune	vert	Bleu
Rouge	5	-	-	-	-
Jaune	0	4	-	-	-
Vert	0	2	2	-	-
Bleu	0	2	0	2	-

Figure 3 : Topologie et chronologie relative d'un réseau de fractures dans une station de mesure. A. Réseau de fractures, B. Interprétation du réseau en termes de systèmes de fractures (Rouge, Jaune, Vert, Bleu). (Chronologie relative : 1. Fractures en rouge se terminent en pointes dans la roche, 2. Fractures en jaune buttent contre les rouges, 3. Fractures en vert buttent contre les jaunes, 4. Fractures en bleu buttent contre les vertes).

3. Analyse des relations chronologiques

De nombreux systèmes de fractures représentent une séquence de structures différentes qui peuvent être formées à différents moments. Leur âge absolu (par exemple, basé sur la datation radiométrique, les relations avec la stratigraphie connue) ou relatif (par exemple, sur la base de relations de recoupement ou amortissement) âges de différentes structures. De telles analyses peuvent donner des informations sur le nombre d'événements de déformations identifiables, et si certaines structures ont été réactivées.

Les observations géologiques de base et les caractéristiques géométriques peuvent être utilisées pour déterminer les âges relatifs. Par exemple, les structures doivent être du même âge ou plus jeunes que les roches dans lesquelles elles se trouvent.

De même, les veines se sont formées avant ou pendant la minéralisation alors que les joints dans les mêmes roches peuvent généralement être supposés formés après la minéralisation (Fig. 2).

La terminologie liée aux âges stratigraphiques indique quand les événements se sont produits à l'échelle du temps géologique basée sur l'ordre de superposition des strates ou des assemblages fossiles. Ceux-ci peuvent ensuite être calibrés à des âges absolus (approximatifs) par datation radiométrique des éléments de la séquence stratigraphique.

La figure 2 montre l'occurrence courante de joints qui viennent en butée contre d'autres formés plus tôt. Chaque Y-nœuds (triangles) indique ainsi l'ordre relatif de formation de deux joints. En utilisant ces relations contiguës, nous pouvons construire une séquence locale (figure 2) dans laquelle nous reconnaissons que l'âge relatif peut être résumé par quatre ensembles de fractures (rouge, jaune, vert, bleu), chaque ensemble ayant ses propres caractéristiques géométriques (c'est-à-dire l'orientation, la dimension). Ces relations peuvent être résumées dans une matrice qui enregistre le nombre d'occurrences d'une fracture (ligne) contiguë à une autre (colonne). Dans cet exemple, seules les premières fractures formées se terminent dans la roche (*tips* ou pointes). Tous les ensembles ultérieurs se terminant par une butée contre les fractures antérieures (Fig. 3).

4. Analyse cinématique

L'analyse cinématique fournit une description des déplacements, de la rotation et des déformations impliquées dans le développement d'une structure, d'un ensemble de structures ou de toutes les structures dans une zone. Une telle analyse peut comprendre la

description des directions de déplacement des failles et la mesure du pourcentage de raccourcissement ou d'extension représenté par ces structures.

Les analyses cinématiques sont basées sur des mesures ou la modélisation des déformations et peuvent être basées sur des déplacements le long de failles ou à travers des fractures. Les analyses cinématiques comprennent l'interprétation de la déformation progressive au cours d'un événement de déformation unique, des déformations au cours de la déformation polyphasée ou des déformations finies. Les caractéristiques cinématiques généralement mesurées pour les failles et autres fractures comprennent:

- Directions et quantités de déplacement le long des failles ;
- Directions d'ouverture et quantités pour les fractures d'extension ;
- Relations cinématiques entre les différentes composantes du réseau.

La quantification des déformations et des déplacements est un élément clé de la géologie structurale. Une telle quantification permet, par exemple, de modéliser et de comprendre la déformation progressive d'une zone, et donne un moyen de comparer la déformation entre ou à travers des structures ou des régions (Fig. 4). Les analyses cinématiques aident à interpréter l'histoire tectonique, fournissent une contribution critique aux analyses des contraintes et de la mécanique des roches, et sont couramment utilisées comme indicateur de la distribution des fractures et donc de l'écoulement des fluides dans un réservoir. La mesure de l'ouverture des fractures est d'une grande importance dans la modélisation de l'écoulement des fluides à travers la roche.



Figure 4 : Chronologie relative des différentes structures tectoniques dans une station de mesure (1. Failles normales, 2. Failles décrochantes, 3 ; Joints tectoniques).

5. Analyse tectonique

L'analyse tectonique signifie relier les structures aux processus régionaux ou à l'échelle des plaques qui les ont formés et aux processus de dépôt, magmatiques et métamorphiques associés. Ces études sont généralement basées sur la connaissance des géométries, des relations chronologiques, de la cinématique et de la mécanique des structures dans une région. Par exemple, Vendeville (2005) analyse la tectonique du sel en termes de cinématique et de mécanique. La tectonique couvre un large éventail de paramètres et de processus structuraux, y compris l'extension, la contraction, le glissement, le sel et la gravité. Les termes cinématiques et de déformation sont couramment utilisés pour la tectonique. Le soulèvement et l'affaissement associés à l'activité tectonique sont également responsables du développement de structures, telles que les joints.

Les analyses tectoniques peuvent être utilisées pour relier les structures observées aux événements et processus connus à l'échelle régionale ou à l'échelle des plaques (Fig. 4). Il peut, par exemple, être utile de savoir comment un ensemble particulier de structures est lié à différentes étapes du cycle orogénique ou à différents emplacements en relation avec les mouvements des plaques (Fig. 4). Les analyses tectoniques peuvent également être l'inverse, les structures observées étant utilisées pour déduire des événements et des processus à l'échelle régionale ou à l'échelle des plaques. Le résultat de ces analyses tectoniques peut être une meilleure compréhension des liens entre les structures et d'autres caractéristiques et processus géologiques, y compris les sédiments, l'activité magmatique, la minéralisation et les tremblements de terre.

Exemple : Les failles normales et les veines de calcite associées ont été causées par le développement du bassin mésozoïque et des régions avoisinantes. Les failles normales réactivées en failles inverses et les décrochements associés se sont développées dans l'avant-pays de la ceinture orogénique. Les joints sont liés à la réduction des contraintes alpines (Fig. 5).

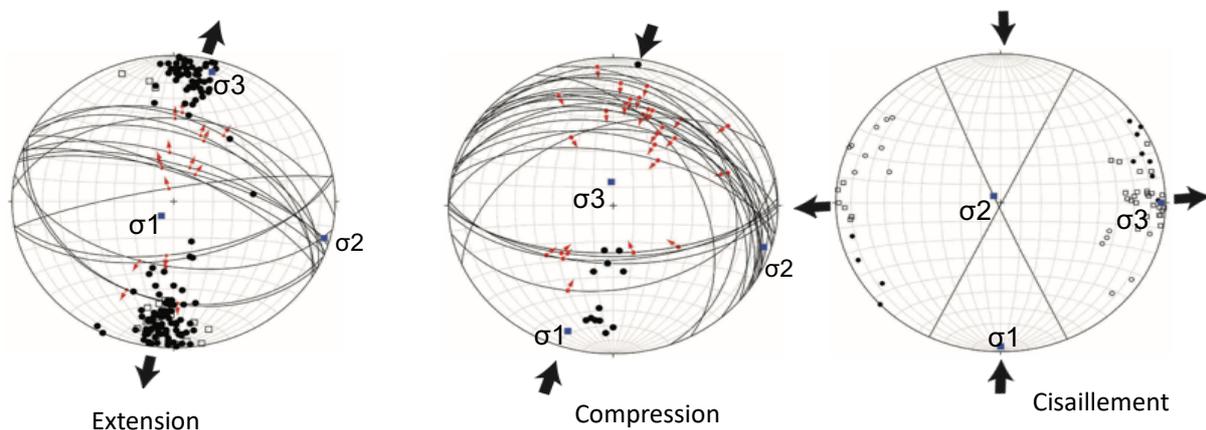


Figure 5 : Détermination des évènements tectoniques ayant conduit à la genèse des différentes structures analysées dans la région (3 évènements successifs : extension, compression et décrochements).

6. Analyse mécanique

Une analyse mécanique décrit les processus par lesquels les structures géologiques se sont formées en réponse aux contraintes et aux déplacements, et implique la prise en compte des propriétés rhéologiques des roches. Les propriétés rhéologiques de la roche sont liées aux contraintes (c.-à-d. Force / surface) et à la déformation. Les analyses mécaniques peuvent inclure des inférences sur le comportement mécanique basées sur des observations des textures rocheuses et sur des tests de déformation des roches. De telles analyses peuvent être basées sur des inférences faites à partir de données cinématiques (par exemple, l'analyse d'orientation paléo-contraintes) et la mesure des contraintes in situ (par exemple, à partir de mécanismes focaux sismiques ou de données de puits).

Les types de structures présentes dans la roche sont utilisés pour déduire les conditions mécaniques pendant la déformation, avec des structures liées à la fragilité, au transfert de masse par fluage. Des processus fournissant des informations importantes sur les conditions de déformation, telles que la température, la pression, les pressions des fluides, etc.

Comprendre les contraintes et la mécanique des roches est également importante pour prédire et modéliser l'écoulement des fluides dans ces roches.



Figure 6 : Les calcaires compétents se cassent, les argiles incompétentes se déforment de façon plastique. Le pull-apart est rempli d'argiles signifie que la déformation s'est produite avant que les argiles soient compactées.

7. Analyse de l'écoulement des fluides

L'analyse de l'écoulement des fluides à travers la roche a un large éventail d'applications dans l'industrie des hydrocarbures, l'énergie géothermique, l'hydrogéologie, etc. Nous suggérons que des analyses significatives de l'écoulement des fluides pour de telles applications doivent être basées sur des descriptions géologiques de base, ainsi que des analyses des géométries, de l'âge des structures (chronologie), cinématique et mécanique. Par exemple, une étude de l'écoulement des fluides qui ne fait pas de distinction entre les joints et les veines sera erronée. Examinons différents types de fractures dans la roche et leurs implications pour l'écoulement des fluides. Les failles sont couramment citées comme conduits pour l'écoulement des fluides, y compris celui des hydrocarbures. Paradoxalement, les failles sont souvent citées comme étant des obstacles à la migration et créant des pièges. Les joints sont des fractures non remplies, de sorte que l'écoulement de fluide actuel peut se produire à travers des réseaux conjoints. En revanche, les veines sont partiellement ou complètement remplies de minéraux, donc ont tendance à être des déflecteurs de l'écoulement actuel des fluides, bien que la minéralisation partielle puisse former des ponts qui soutiennent les

fractures ouvertes et préservent la conductivité. Les réseaux de veines indiquent cependant un écoulement de paléo-fluide. Les dykes et les sills illustrent la migration du magma.

V. Fracturation et plissement : *Plis forcés (forced folds) ou plis passifs et plis de flambage (buckle folds)*

La distribution de la fracturation au sein des plis est en très grande partie responsable de la géométrie de ces plis. Ainsi, la création d'un pli en chevron, d'un pli à charnière arrondie ou d'un pli coffré peut s'avérer essentiellement influencée par la plus ou moins forte concentration de la fracturation dans des zones plus ou moins étroites.

1. Typologie et cinématique des plis forcés

Les plis forcés peuvent se former sous l'influence de sollicitations profondes de types variés (compression, extension, transtension, poinçonnement) associées à la gravité. Le mécanisme dominant qui régit leur apparition est le fléchissement passif des couches composant une série donnée. Ce fléchissement peut être induit par le biais de mouvements verticaux de failles localisées dans le socle rigide sous-jacent, ou lors de mouvements sur des failles localisées dans la pile elle-même. On parle dans ce dernier cas de plis sur rampe (ou de *fault bend folds*). Dans le cas de remontées diapiriques, le pli formé a une géométrie caractéristique en forme de dôme hémisphérique et présente une fracturation typique composée de fractures radiales et/ou concentriques.

Un dernier type de plis forcés est rencontré à l'aplomb de failles décrochantes. Dans ce cas, le plissement est généralement échelonné à l'aplomb du plan de décrochement.

2. Les plis de flambage (*Buckle folds*)

Les plis de flambage se développent habituellement perpendiculairement (ou avec une obliquité modérée) à la direction de la contrainte principale majeure σ_1 appliquée ou à la direction de raccourcissement correspondante. Une fois les plis amorcés, une rotation du raccourcissement ne suffit pas à les réorienter.

3. *Plis de flambage et plis forcés sont ils a priori si différents ?*

■ *Au niveau de la géométrie*

Etant donné que les *plis forcés* se forment classiquement à l'aplomb d'une faille, d'un réseau de failles, ou d'un diapir, sous-jacents, leur géométrie se trouve très influencée par la

géométrie de la faille en question. Les exemples naturels et expérimentaux montrent bien que cette origine entraîne l'apparition de plis très asymétriques (géométrie de plis en genoux).

Pour leur part, les *plis de flambage* voient leur géométrie évoluer à partir d'une forme initiale sinusoïdale dont la longueur d'onde est fonction de l'épaisseur de l'unité mécanique rigide plissée et du contraste rhéologique qu'elle présente avec son « encaissant » moins rigide. Les plis de flambage sont donc généralement symétriques au début de leur développement, sauf si les unités plissées contiennent des hétérogénéités mécaniques susceptibles de générer des asymétries (fractures préexistantes, hétérogénéités d'origine sédimentaire, etc.). Par la suite, les plis de flambage peuvent évoluer par *amplification homogène* et garder leur symétrie. Toutefois, très souvent, on assiste à l'apparition de failles inverses dans les flancs de plis dont le rejet induit une asymétrie qui augmente progressivement avec l'évolution du serrage. D'autres plis montrent par contre une forte tendance à devenir asymétriques : on assiste ainsi à l'apparition de plis déjetés, puis déversés, puis des plis-failles par rupture de flancs.

■ *Au niveau de la fracturation*

Les régimes de contraintes aux limites qui président à la formation de plis forcés ou de plis de flambage peuvent être très différents. En effet, les *plis forcés* à l'aplomb de failles normales de socle ou les anticlinaux de rampe de type *roll-over* se forment dans le cas de régimes régionaux extensifs. Les plis forcés sur faille inverse et les plis en flambage s'initient pour leur part dans des régimes régionaux compressifs.

On pourrait donc s'attendre à observer la présence de styles de fracturation très contrastés au niveau des différents types de plis qui refléteraient les différents régimes des contraintes régionales qui agissent directement sur le substratum. Dans la réalité des plis forcés, l'état de contrainte local qui contrôle la fracturation des couches résulte de l'interaction complexe entre d'une part des efforts d'origine profonde transmis à travers un milieu multicouche très hétérogène, et la gravité d'autre part.