

## **Titre du projet : Mécanisme de fluage des failles actives : apport des grands forages et expérimentation de laboratoire**

*Volet* : Recherche

*Porteur du projet* : Jean-Pierre GRATIER

*Laboratoires impliqués* : ISTerre

## **Bilan du projet**

### **Bilan d'activité** (1 page max)

Les processus de fluage aismique le long des failles actives relaxent un part des contraintes tectoniques soit par un fluage permanent soit par un fluage épisodique souvent post-sismique limitant ainsi l'occurrence des séismes. L'objet de l'étude était de mieux comprendre les mécanismes de ce fluage et comment ces mécanismes évoluent dans le temps. Les résultats s'appuient sur deux types de résultats : des analyses des déformations naturelles sur l'exemple de la faille de San Andreas et des essais expérimentaux menés au laboratoire à ISTerre.

Pour la partie observation des structures naturelles, nous avons bénéficié, dans le cadre d'un consortium international, d'échantillons prélevés en forage à 3 km de profondeur au coeur de la portion de faille active de San Andreas qui glisse en permanence de manière aismique. Ce travail a été effectué dans le cadre de la thèse de Julie Richard (**Richard et al 2014a**). Il a permis de distinguer les comportements de trois types de roches.

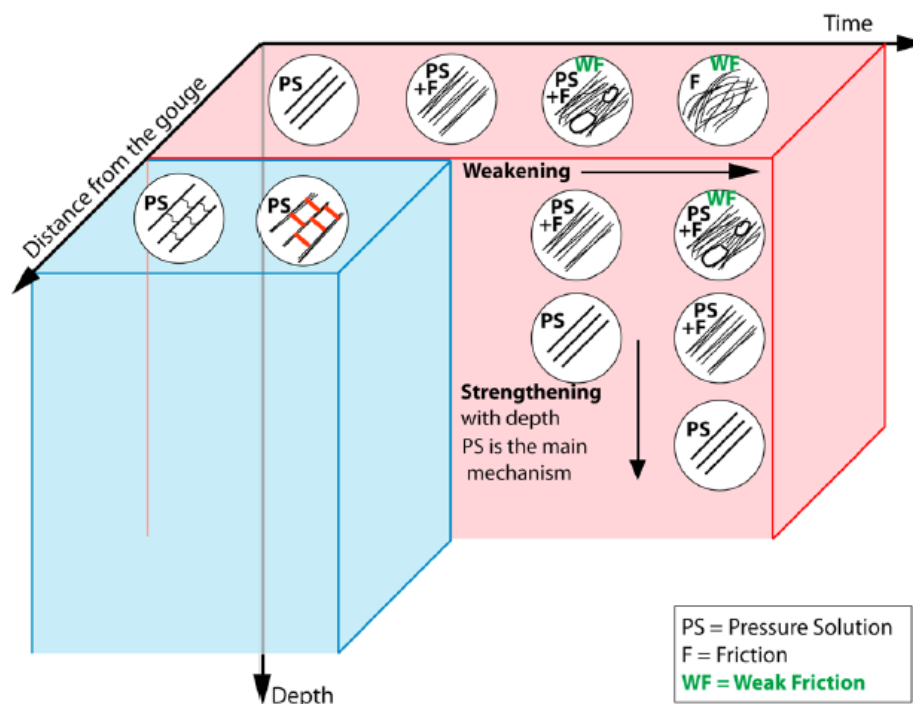
- (i) L'état des roches initiales relativement peu déformées, marqueurs des premières étapes de l'initiation de la faille, lors de processus sismique de fracturation et post-sismique d'indentation des grains par dissolution sous contrainte.
- (ii) L'état des zones où la déformation s'est clairement localisée par le développement de grands cisaillements avec des déformations de type schistosité de dissolution sous contrainte et fentes tectoniques. On note dans ce cas deux types d'évolution selon le rapport entre la quantité de dissolution et la quantité de re-précipitation. Les zones avec le maximum de re-précipitation dans les fentes tectoniques se sont progressivement durcies. Au contraire, les zones avec le maximum de dissolution se sont progressivement amollies. La raison de cette différenciation est que la dissolution des minéraux solubles sous contrainte comme le quartz, la calcite, les feldspaths ou la serpentine conduit à une concentration passive des autres composants moins solubles de la roche comme les phyllosilicates. La concentration en phyllosilicates active le processus de dissolution en empêchant les minéraux les plus solubles de se cicatriser entre eux. Il se développe ainsi un processus auto-organisé qui amplifie des différences initiales et conduit d'une part à des zones relativement dures et cassantes là où les minéraux dissous re-précipitent en masse dans des veines et d'autre part des zones relativement molles qui se déforment de manière ductile là où les éléments solubles sont évacués.

(iii) Ces dernières zones sont celles qui montrent actuellement le fluage actif qui est encore facilité par des transformations métamorphiques des phyllosilicates vers des minéraux argileux à très faible friction.

Cette étude montre comment les interactions entre les déformations cassantes et ductiles conduisent à de profondes transformations des roches et comment une zone de cisaillement peut évoluer d'un comportement sismique à un comportement ductile. En parallèle on discute aussi de l'évolution des mécanismes de fluage en fonction de la profondeur : les argiles à faible friction qui facilitent le glissement entre les grains, donc la déformation ductile, dans les premier 3 ou 4 km de la croûte se transforment en profondeur en minéraux beaucoup plus rigides qui ne peuvent plus jouer ce rôle. Le glissement entre les grains devrait alors être contrôlé en profondeur par dissolution cristallisation sous contrainte.

Dans une deuxième approche de type expérimentale il s'agissait de reproduire au laboratoire les processus de cicatrisation des fractures à deux types d'échelles : (i) la cicatrisation de très fines fractures étudiée dans des essais de poinçonnement (**Gratier et al 2014**) et (ii) le colmatage de fractures plus largement ouvertes dans des essais de circulation de fluides. Ce dernier aspect a été aussi étudié dans la thèse de Julie Richard (**Richard et al 2014b**). L'idée était de fracturer des roches de manière dynamique (chocs avec des barres de Hopkinson) permettant de fragmenter plus ou moins les roches (d'une fracturation dispersée à une totale pulvérisation) puis d'étudier les paramètres importants dans l'évolution de la cicatrisation de ces roches fracturées placées sous contrainte dans des cellules avec un flux de fluides réactifs saturés (avec une solubilité artificiellement amplifiée pour réaliser en quelques mois ce qui se passe en quelques dizaines d'années). On montre que les échantillons déformés de manière dynamique présentent deux types de structures : une série de fractures circulaires et radiales en interne et une zone de pulvérisation au coeur de l'échantillon. Les densités de fractures déterminées par tomographie RX sont corrélées avec l'énergie dissipée imposée évaluée par les données macro-mécaniques. Des essais de percolation sous contrainte sur les échantillons ainsi déformés sont ensuite réalisés. Des tomographies RX permettent de bien évaluer l'endommagement des échantillons avant et après les essais. Elles révèlent un processus de compaction progressive intégrant une compaction pour une part mécanique et pour une part chimique (par dissolution cristallisation sous contrainte). On reproduit ainsi le processus de fluage et de compaction post-sismique. On observe que les réseaux de micro-fractures sont colmatés plus rapidement que les réseaux de fractures plus larges ce qui conduit à un durcissement hétérogène de la roche qui pourrait dans la nature avoir un effet important sur le processus de nucléation et de propagation des séismes.

## Illustrations - avec légende et crédit (à envoyer également séparément)



**FIGURE** Modèle d'évolution dans le temps et l'espace des mécanismes de déformation autour d'une faille sur l'exemple de la faille de San Andreas. Le domaine bleu correspond à la zone endommagée autour de la faille où les processus de fracturation sismique sont associés à une déformation ductile post-sismique par dissolution cristallisation. Le domaine rouge correspond à l'évolution de la zone de fluage active d'abord au début (gauche) avec un fonctionnement épisodique post-sismique puis devenant progressivement de plus en plus molle par l'évolution de sa composition chimique (concentration en phyllosilicates et leur transformation en argile) et évoluant vers une zone de fluage permanent dans son état actuel (droite). On montre aussi que les argiles à faible friction qui facilitent le glissement entre les grains, dans la partie supérieure de la zone de faille active (droite) se transforment en profondeur en minéraux beaucoup plus rigides et que le glissement entre les grains devrait alors être contrôlé en profondeur par dissolution cristallisation sous contrainte, Richard et al (2014a).

## Production scientifique (articles scientifiques dans revue internationales)

Richard, J., Gratier, J-P., Doan, M-L., A-M. Boullier, Renard, F. 2014a Rock and mineral transformations in a fault zone leading to permanent creep : interactions between brittle and viscous mechanisms in the San Andreas Fault, Journal of Geophysical Research - Solid Earth, doi : 10.1002/2014JB011489, in press.

Richard, J., Doan, M-L., Gratier, J-P., Renard, F. 2014b Microstructures induced by dynamic loading and fracture healing in porous limestone : an experimental approach, Pure and Applied Geophysics, PAAG-D-14-00025R3, in press.

Gratier, J-P., F. Renard, B. Vial 2014 Postseismic pressure solution creep : evidence and time-dependent change from dynamic indenting experiments, Journal of Geophysical Research Solid-state, first on-line April 2014, doi : 10.1002/2013JB010768.

*(Thèse)*

Richard, J. (2013), Mécanismes de fluage des failles actives: apport des grands forages et expérimentation de laboratoire, Thèse Université of Grenoble, France, direction ML Doan & JP Gratier.

**Bilan financier succinct** (*avec suivant les cas : co-financements éventuels, équipements achetés, missions, recrutements divers, fonctionnements divers...*)

Pour la partie des observations naturelles les dépenses ont porté sur la confection de lames minces et leur observation au microscope à balayage (3500 €), des missions (4000 €) et des frais de publication (2000 €).

Pour la part expérimentale les dépenses ont porté sur l'aménagement de l'appareillage de circulation sous contrainte (pompe, régulation de chauffage, système de prélèvement des fluides) pour 7800 €, sur l'usinage de pistons (2500 €) et sur le fonctionnement courant du labo (3200 €) pour un total de 23 160 €.

**Annexes si besoin ou lien sur des sites existants et pérennes jusqu'à la fin du Labex (2020)**