



Rôle de la déformation cassante à méso-échelle et de la pression-dissolution sur les migrations de fluides dans les réservoirs carbonatés plissés. Le cas de la chaîne provençale.

Adresse courriel du contact scientifique : olivier.lacombe@sorbonne-universite.fr

Description du projet de thèse :

Les carbonates contiennent une grande partie des géoressources (huile, gaz, minerais) qui sont distribuées/concentrées dans les strates via des migrations de fluides à plus ou moins grande échelle.

Dans les modèles récents, les migrations de fluides sont partiellement contrôlées par la distribution initiale des faciès et par les structures macroscopiques (ex : failles) et mésoscopiques (ex : joints) liées à la diagénèse (précoce, structurale, ...) des roches. Très peu d'attention a été portée sur l'impact de la pression-solution, *i.e.* la dissolution chimique le long d'une surface rugueuse sous pression (stylolites), sur les migrations de fluides, notamment à l'échelle d'un réservoir plissé (>km). Dans les carbonates, la pression-solution est un mécanisme très efficace pour accommoder la compaction sédimentaire ou le raccourcissement tectonique (jusqu'à 30% du raccourcissement total subi lors d'un épisode compressif).

Les stylolites sont fréquemment remplis par des phases insolubles. En parallèle, lors de la dissolution, une re-précipitation locale des carbonates dissous peut intervenir, soit dans des veines induites autour des stylolites soit dans la porosité des volumes rocheux adjacents. Ce phénomène est étudié pour sa capacité à affecter la porosité et la perméabilité (créant barrières et drains anisotropes), mais il offre aussi un accès indirect aux conditions d'âge et de température valides lors de la pression-solution, paramètres généralement peu contraints et dont la méconnaissance limite notre compréhension du phénomène de pression-solution.

Pour aborder la nature de drains ou barrières des stylolites vis-à-vis des migrations de fluides, il est nécessaire d'étudier l'impact de ces microstructures sur l'hydrologie d'un réservoir en reconstruisant celle-ci sans négliger les stylolites.

L'étude des paléo-fluides consistera à reconstruire la température, la source, les chemins de migration, les conditions chimiques et l'âge de précipitation de ces fluides. L'accès aux fluides passés est rendu possible par la précipitation de calcite dans les pores et dans les espaces ouverts lors de la déformation. Le travail s'appuiera sur des techniques analytiques variées (microthermométrie des inclusions fluides, isotopie de l'oxygène, du carbone et du strontium, isotopologues (Δ_{47}), microscopie électronique à balayage, géochronologie U/Pb, isotopie par nanoSIMS) sur (1) la calcite cimentant les principaux systèmes de veines ainsi que les grandes failles chevauchantes associées aux plis provençaux, et (2) à plus petite échelle la calcite de recristallisation de matrice et des micro-fentes de tension associées aux pics des stylolites.

Le calendrier de développement des stylolites sédimentaires et tectoniques sera établi à partir d'une étude microstructurale visant à établir leur chronologie relative (recoupement) par rapport à certaines phases diagénétiques et/ou veines dont l'âge absolu et la température absolue de cristallisation seront obtenus par datation U/Pb et thermométrie par isotopologues (Δ_{47}). Ceci permettra l'établissement précis de la séquence de développement des mésostructures et de la succession des contraintes par rapport aux événements de cristallisation des carbonates et leur histoire d'enfouissement pendant les phases de subsidence et de déformation/uplift.

Ainsi, il sera possible de caractériser quels types de fluides sont impliqués lors de la pression solution en les comparant aux autres structures, et donc d'illustrer le rôle possible de drains ou de barrières des stylolites à différents moments de leur développement, de l'échelle de l'échantillon jusque l'échelle du réservoir.

En parallèle, l'analyse inverse du signal de rugosité des stylolites sédimentaires permettra de mieux contraindre l'histoire d'enfouissement des terrains étudiés au cours de la déformation. Les orientations et grandeurs des contraintes tectoniques au moment des circulations de fluides seront reconstituées par la combinaison de l'analyse inverse des failles à stries, du signal de rugosité des stylolites tectoniques et des macles de la calcite qui permettra en outre de quantifier les pressions de fluides lors de la déformation.

Le travail comprendra plusieurs campagnes de terrain pour la collecte des données mésostructurales et d'échantillons. La chaîne provençale est un excellent exemple de chaîne plissée où la pression solution d'origine sédimentaire et tectonique est bien exprimée dans les calcaires méso-cénozoïques et est associée à des réseaux de fractures minéralisées. L'objectif du travail sera de caractériser le système de fluides actif lors des différentes

étapes de la déformation compressive pyrénéo-provençale et les paramètres mécaniques et structuraux qui la contrôlent.

Les résultats aideront à proposer un modèle évolutif de la perméabilité des stylolites en fonction de leur géométrie/morphologie, de l'échelle individuelle à l'échelle de la population, et à mieux comprendre comment les fluides influencent en retour la pression-solution. Le travail de thèse devrait déboucher sur une image plus précise du rôle de la pression-dissolution dans la compartimentation et sur les propriétés hydrologiques d'un réservoir carbonaté, et donc améliorer la prédiction des capacités de production et de stockage de ce type de formation rocheuse sur des échelles de temps $>ka$.

Role of mesoscale brittle deformation and pressure-solution on fluid migrations in folded carbonate reservoirs. The case of the Provence fold-and-thrust belt.

Carbonates host a large part of georesources (oil, gas, minerals) which are distributed / concentrated in sedimentary strata through migrations of fluids on a range of spatial scales.

In recent models, fluid migrations are partially controlled by the initial distribution of sedimentary facies and by macroscopic (eg: faults) and mesoscopic (eg: joints) structures linked to the diagenesis (early, structural, etc.) of the rocks. Very little attention has however been paid to the impact of pressure-solution, ie chemical dissolution along a rough surface under pressure (stylolites), on fluid migrations, especially at the scale of a folded reservoir ($> km$). In carbonates, pressure-solution is a very efficient mechanism to accommodate sediment compaction or tectonic shortening (up to 30% of the total shortening experienced during a compression episode).

Stylolites are frequently filled with insoluble phases. At the same time, during dissolution, local re-precipitation of dissolved carbonates can occur, either in veins induced around stylolites or in the porosity of adjacent rock volumes. This phenomenon is studied for its ability to affect porosity and permeability (creating anisotropic barriers and drains), but it also offers indirect access to age and temperature conditions valid during pressure-solution, which are generally poorly constrained parameters the poor knowledge of which limits our understanding of the pressure-solution phenomenon.

To address the nature of drains or barriers of stylolites for fluid migration, it is necessary to study the impact of these microstructures on the hydrology of a reservoir by reconstructing it without neglecting the stylolites. The proposed study of paleo-fluids will consist of reconstructing the temperature, source, migration paths, chemical conditions and age of precipitation of these fluids. Access to past fluids is made possible by the precipitation of calcite in the pores and in open spaces during deformation. The work will be based on various analytical techniques (microthermometry of fluid inclusions, oxygen, carbon and strontium isotopes, clumped isotopes ($\Delta 47$), scanning electron microscopy, U/Pb geochronology, nanoSIMS) on (1) calcite cementing the main vein systems and the fault cores of strike-slip and thrust faults associated with the Provençal folds, and (2) on a smaller scale matrix recrystallization calcite and micro-veins associated with stylolite peaks.

The sequence and timing of development of sedimentary and tectonic stylolites will be determined from a microstructural study aiming at establishing their relative chronology (crosscutting relationships) with respect to certain diagenetic phases and/or veins the absolute age and absolute crystallization temperature of which will be obtained by U/Pb dating and thermometry by clumped isotopes ($\Delta 47$). This will allow for the precise establishment of the sequence of mesostructure development and the stress history in relation to carbonate crystallization events and burial evolution during subsidence and deformation / uplift phases.

Thus, it is intended at characterizing which types of fluids are involved during pressure solution by comparing them to other structures, and therefore to illustrate the possible role of drains or barriers of stylolites at different times of their development, from the sample scale to the reservoir scale.

At the same time, the inverse analysis of the roughness of sedimentary stylolites will make it possible to better constrain the burial history of the formations during deformation. The orientations and magnitudes of the tectonic stresses at the time of fluid circulation will be reconstituted by the combination of the inverse analyses of fault-slip data, roughness of tectonic stylolites and calcite twins, with possible additional information about the fluid pressures during deformation.

The work will include several field campaigns for the collection of mesostructural data and for rock sampling. The Provençal range (SE France) is an excellent example of a fold-and-thrust belt where pressure solution of sedimentary and tectonic origin is well expressed in Meso-Cenozoic limestones and is associated with networks of mineralized fractures. The objective of the work will be to characterize the fluid system active during the different stages of the Pyrenean-Provençal compressional deformation but also before and after this shortening phase, and the mechanical and structural parameters that control it.

The results will help propose an evolutionary model of the permeability of stylolites based on their geometry / morphology, from the individual scale to the population scale, and to better understand how fluids in turn influence pressure-solution. The thesis work should lead to a more precise picture of the control of pressure-

dissolution on the compartmentalization and the hydrological properties of a carbonate reservoir, and therefore should improve the prediction of the production and storage capacities of this type of rock formations on time scales > ka.

Compétences et connaissances requises :

Géologue-structuraliste ou géologue sédimentologue-géochimiste

Goût et capacité pour l'apprentissage des techniques d'étude de la diagenèse des carbonates (pétrographie, géochimie isotopique, interactions roche-fluide) ET de la géologie structurale (terrain, analyse des stylolites, fracturation, analyse des macles de la calcite).

Capacités d'observation, de réflexion, de synthèse et d'intégration

Capacité de rédaction et de présentation

Les travaux abordés permettront à l'étudiant d'intégrer des pratiques et des connaissances valorisables tant dans le monde académique que dans le monde industriel (sédimentologie et diagenèse, géochimie, microthermométrie, analyse micro- et méso-structurale, quantification des paléo-contraintes, hydrogéologie, ...).