

PROPOSITION DE THESE

Titre de la Thèse : Caractérisation des hétérogénéités réservoirs des systèmes carbonatés continentaux - Liens entre faciès sédimentaire, propriété microstructurale, diagenèse et réponse pétrophysique

Proposants :

- Laboratoires : Cette demande est soutenue par le GIS « Groupement d'intérêt scientifique » [Géosciences Franciliennes](#), dont l'objectif est de fédérer des laboratoires franciliens autour de projets de recherche liés à des problématiques de ressources naturelles et environnementales qui font l'objet d'une forte demande sociétale. Parmi les proposants, 5 laboratoires du GIS sont engagés : Géosciences Paris Sud (CNRS/Univ. Paris-Sud), Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure (CNRS/ENS), ISTEP (CNRS/Sorbonne Université), Institut de Physique du Globe de Paris (CNRS/Univ. Paris) et Géosciences Environnement Cergy (Univ. de Cergy-Pontoise)
- Directeur de thèse envisagé : Benjamin Brigaud (GEOPS)
- Périmètre d'interaction du doctorant : équipe de recherche et co-publiante :
Co-encadrants universitaires : GEOPS: Benjamin Brigaud, Thomas Blaise, Yves Missenard, Antonio Benedicto, LGENS: Jérôme Fortin, GEC: Philippe Robion, IPGP : Magali Ader, Magali Bonifacie, ISTEP : Johann Schnyder
Co-encadrants BRGM : Simon Andrieu, Cécile Allanic, Justine Briaïs

Profil : Candidature ouverte, dans l'une des formations de l'Univ. Paris Saclay, ENS, Sorbonne U, Univ. de Cergy ou Univ. de Paris ou ailleurs en France et à l'étranger. Étudiant géologue de formation, de niveau Master 2, ou ingénieur de grande école, ayant des compétences solides en sédimentologie et/ou mécanique des matériaux poreux.

Proposition scientifique :

L'exploration menée dans l'Atlantique-Sud dans les années 2000, sous des profondeurs d'eau de 2 à 3 km, notamment au large du Brésil (bassins de Campos et Santos) a permis d'atteindre des réservoirs carbonatés présents sous une épaisse couverture d'évaporites, réservoirs connus sous le nom de pre-salt (Beltrao et al., 2009). Très vite, leur mise en production a mis en exergue le manque de connaissance des propriétés pétrographiques, diagénétiques, microstructurales et pétrophysiques des carbonates continentaux, qui constitue un verrou important pour une meilleure caractérisation et modélisation du réservoir. D'une manière générale, les carbonates continentaux sont moins étudiés et connus que les carbonates de domaine marin. De nombreux travaux de Recherche et Développement ont récemment été engagés sur cette thématique (Beltrao et al., 2009) afin de comprendre / prédire leur hétérogénéité « réservoir ». Le challenge applicable est d'utiliser la connaissance des faciès sédimentaires pour optimiser le drainage des réservoirs. Dans la communauté française, nous pouvons citer les travaux académiques engagés récemment par les équipes d'Aix-Marseille, de l'Université de Bourgogne, du laboratoire de Géologie de l'ENS en collaboration avec Total ou l'IFPEN (Letteron et al., 2018, Teboul et al., 2016, Vennin et al., 2018, Bailly et al. soumis). Ces travaux ont pu mettre en évidence les caractéristiques drastiquement différentes des carbonates continentaux par rapport à leurs homologues marins, avec une complexité faciologique, pétrophysique, ou encore diagénétique. La forte composante microbienne et la forte variabilité de salinité des milieux de carbonatation continentale, d'une manière générale, rend les processus de dépôts et de diagenèse très particuliers et donc difficiles à décrypter. Par exemple, les phénomènes de silicification sont communs dans ce type de formation, mais la littérature sur leur origine (processus, types de fluides...) est peu abondante (e.g. Thiry et Ribet, 1999, Teboul et al., 2019). La variabilité des environnements : lacustres, palustres, côtiers, lagunaires, de sols, calcrètes, travertins et des processus diagénétiques rend complexe la prédiction en terme pétrophysique ou de (micro)fracturation. En conséquence, les modélisations des réservoirs sont très aléatoires par manque de liens clairement établis entre perméabilité, propriétés acoustiques, faciès sédimentaire et diagenèse. La complexité des paramètres sédimentaires et diagénétiques affectant les

carbonates continentaux aboutit également à des propriétés de résistance mécanique variées et difficilement prédictives, bien que leur caractérisation soit essentielle dans les zones urbanisées.

Cette difficulté à caractériser les hétérogénéités réservoirs et géo-mécaniques des systèmes carbonatés continentaux constitue la problématique centrale de ce projet dans lequel des liens entre faciès sédimentaire, microstructure sédimentaire et structurale, diagenèse et réponse pétrophysique devront être trouvés.

Les formations cénozoïques (Danien à Aquitainien) du Bassin de Paris se sont déposées sur une grande plate-forme à sédimentation mixte carbonatée, silicoclastique et évaporitique (Mégny et Mégny, 1980, Aubry et al., 2005). Cette plate-forme a subi quelques incursions marines franches (Danien, Lutétien) mais une grande partie de sa sédimentation s'est effectuée en environnements restreints, majoritairement continentaux i.e. lacustres, palustres, à salinité très variables, avec des phénomènes microbiens très marqués (Thiry, 1989, Thiry et Ribet, 1999). Les dépôts de carbonates continentaux de cette plateforme carbonatée ont été abondamment étudiés dès le XIX^{ème} siècle pour leur contenu faunistique (e.g. Lapparent, 1883). Les travaux récents de Biais (2015) et Gély (2016) ont permis de reconstituer l'évolution des faciès, des paléo-environnements, des paléo-géographies et de l'architecture sédimentaire de cette plate-forme. Le travail de thèse de Justine Biais est basé sur les données de surface et de sub-surface et la description de coupes sédimentaires et du forage carotté d'Ussy-sur-Marne présent à la géothèque du BRGM. Trois grands cycles transgressifs-régressifs sont identifiés et corrélés à l'échelle du bassin grâce à l'identification de discontinuités majeures correspondant à des surfaces séquentielles. Le cadre chronostratigraphique est bien connu. Les carbonates continentaux du bassin de Paris, intensément forés et carottés actuellement avec le chantier du Grand Paris, offrent un cas d'étude exceptionnel pour définir leurs signatures faciologiques, diagénétiques, microstructurales et pétrophysiques pour caractériser les différents degrés d'hétérogénéité (micro, méso et macro).

La construction de modèles permettant d'être prédictif à la fois sur la répartition des faciès et des processus diagénétiques dans les systèmes carbonatés est un verrou essentiel pour une meilleure prédiction spatiale des propriétés réservoirs (Morad et al., 2010). La plate-forme carbonatée continentale cénozoïque du Bassin de Paris, constitue de bons réservoirs, qui méritent d'être caractérisés en détails. En Ile-de-France, ces réservoirs sont localisés sous un des bassins de populations les plus importants d'Europe avec 12 millions d'habitants. Ils constituent donc une ressource importante du sous-sol parisien. Les calcaires comme les Travertins de Brie (Rupélien), les Calcaires de St Ouen (Bartonien), ou encore les Marnes et Caillasses (Lutétien-Bartonien) servent « d'armatures rigides » à de nombreux aménagements dans le sous-sol de l'Ile-de-France (réseaux ferroviaires de la RATP avec le métro parisien, le RER et les actuels percements dans le cadre du Grand Paris). De nombreux captages permettent également d'alimenter la population en eau potable. Cependant, les synthèses hydrogéologiques existantes (SIGES BRGM) font état d'aquifères hétérogènes avec des variations très importantes notamment de transmissivités (10^{-2} m²/s à 10^{-4} m²/s) et de débit (100 m³/h/m à 1 m³/h/m) dont l'origine est très complexe à prévoir. Ces fluctuations de propriétés réservoirs sont très probablement à mettre en lien avec des hétérogénéités de faciès, de diagenèse et de structures qui restent à ce jour à caractériser. Une autre application possible amenée à être déployée dans le futur est l'utilisation de ces réservoirs en terme de géothermie, c'est-à-dire la mobilisation de la chaleur à très basse température. C'est l'un des enjeux pour réaliser la transition énergétique. L'optimisation de l'utilisation de la géothermie dans ces réservoirs est un enjeu majeur pour la Région Ile-de-France. Une telle optimisation nécessite une connaissance précise de l'hétérogénéité des réservoirs en termes de géométries sédimentaires, de porosité/perméabilité et de connectivité. Une connaissance des géométries et des qualités réservoirs sera donc nécessaire afin d'optimiser la gestion de la ressource en eau et son usage croisé (potable versus géothermie).

L'objectif principal du projet sera de comprendre et conceptualiser, via une approche intégrée, comment (1) les paramètres de dépôt, (2) les mécanismes physico-chimiques fondamentaux contrôlant les interactions entre les fluides et les milieux poreux et (3) la fracturation interagissent et impactent les propriétés hydromécaniques (pétrophysiques, pétroacoustiques, géomécaniques).

Le projet focalisera sur les formations carbonatées des Travertins/Calcaires de Brie (Rupélien), des marnes supragypseuses (Marnes blanches de Pantin et Marnes bleues d'Argenteuil, Priabonien), du Calcaire de Champigny (Priabonien), des Calcaires de St Ouen (Bartonien) et des Marnes et Caillasses (Lutétien-Bartonien) de façon à contraindre au mieux les modèles de dépôt, l'architecture sédimentaire, l'évolution diagénétique et son calage dans le temps, et finalement la répartition des propriétés réservoirs et géomécaniques.

Il s'agira également de proposer une méthodologie permettant de conceptualiser les architectures fines pour les carbonates continentaux et la distribution des hétérogénéités dans ces systèmes sédimentaires.

Les sites d'études choisis seront principalement localisés dans la zone du « Grand Paris », mais l'utilisation de certains forages et affleurements clés, localisés un peu plus loin, est envisagée. L'Université Paris-Sud a pu bénéficier de la donation d'une dizaine de forages carottés complets permettant d'avoir accès aux Travertins/Calcaires de Brie (Rupélien), aux Marnes supragypseuses (Priabonien), aux Calcaires de St Ouen (Bartonien), Marnes et Caillasses (Lutétien) du chantier Peripôle de Fontenay-sous-Bois, Aubervilliers (SC8) et du Parc Astérix (SC16). D'autres carottes seront utilisés dans le cadre du projet : Nanterre (SC301), Maison blanche (18/00316/Paris), D-SCS1 (Charles de Gaulle Express), Clichy-sous-Bois (SC21), Clamart (SC14 et SC21). Le forage carotté d'Ussy-sur-Marne, disponible à la géothèque du BRGM. En complément, des affleurements seront étudiés à proximité de Creil, de Villers-Cotterêts, de Meaux ainsi que la carrière de Corneilles-en-Parisis.

Pour candidater : https://www.adum.fr/as/ed/voirproposition.pl?site=PSaclay&matricule_prop=24285

Date limite : 12 avril 2019

Références :

- Aubry, M. P., Thiry, M., Dupuis, C., & Berggren, W. A. (2005). The Sparnacian deposits of the Paris Basin: A lithostratigraphic classification. *Stratigraphy*, 2(1), 65-100.
- Bailly, C. Y. Hamon, M. Adelinet and J. Fortin (soumis) Diagenetic control on seismic properties in continental carbonates (Samos Island, Greece): hydrologic and stratigraphic implications
- Beltrao, R. L. C., Sombra, C. L., Lage, A. C. V., Netto, J. R. F., & Henriques, C. C. D. (2009, January). SS: Pre-salt Santos basin-Challenges and New Technologies for the Development of the Pre-salt Cluster, Santos Basin, Brazil. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Brais, J. (2015). Le Cénozoïque du bassin de Paris: un enregistrement sédimentaire haute résolution des déformations lithosphériques en régime de faible subsidence (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- Gély, JP., (2016). Le Paléogène du Bassin de Paris : corrélations et reconstitutions paléogéographiques. *Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris*, 53, 2-13
- Lapparent, A. D. (1883). *Traité de Géologie Paris*. Paris, Savy.
- Lettéron, A., Hamon, Y., Fournier, F., Séranne, M., Pellenard, P., & Joseph, P. (2018). Reconstruction of a saline, lacustrine carbonate system (Priabonian, St-Chartes Basin, SE France): Depositional models, paleogeographic and paleoclimatic implications. *Sedimentary Geology*, 367, 20-47.
- Mégrien, C. (1980). Synthèse géologique du Bassin de Paris (No. 101-103). Édition du BRGM.
- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J. M., & De Ros, L. F. (2010). The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *AAPG bulletin*, 94(8), 1267-1309.
- Teboul, P. A., Durllet, C., Gaucher, E. C., Virgone, A., Girard, J. P., Curie, J., B. Lopez & Camoin, G. F. (2016). Origins of elements building travertine and tufa: New perspectives provided by isotopic and geochemical tracers. *Sedimentary Geology*, 334, 97-114.
- Teboul, P. A., Durllet, C., Girard, J. P., Dubois, L., San Miguel, G., Virgone, A., Gaucher, E., & Camoin, G. (2019). Diversity and origin of quartz cements in continental carbonates: Example from the Lower Cretaceous rift deposits of the South Atlantic margin. *Applied Geochemistry*, 100, 22-41.
- Thiry, M. (1989). Geochemical evolution and paleoenvironments of the Eocene continental deposits in the Paris Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 70(1-3), 153-163.
- Thiry, M., & Ribet, I. (1999). Groundwater silicification in Paris Basin limestones; fabrics, mechanisms, and modeling. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1), 171-183.
- Vennin, E., Bouton, A., Bourillot, R., Pace, A., Roche, A., Brayard, A., Thomazo, C., Virgone, A., Gaucher, E., Desaubliaux, G., & Visscher, P. T. (2019). The lacustrine microbial carbonate factory of the successive Lake Bonneville and Great Salt Lake, Utah, USA. *Sedimentology*, 66, 165-204