



Bulletin
de la

**SOCIÉTÉ LINNÉENNE
DE LYON**



Surpressions de fluides et fracturation horizontale lors de la génération d'hydrocarbures : modélisation analogique à l'aide de la fusion partielle

Ahmed Lemrabott et Malika Aadjour

Université Hassan II de Casablanca, Faculté des Sciences Ben M'Sik, Département de Géologie, BP 7955, Casablanca - ahmed.lemrab@gmail.com - m.aadjour@yahoo.fr – Tél. Fax : 05 22 70 46 71-75

Résumé. – Cette étude concerne l'application de modèles analogiques de fusion partielle, afin de comprendre les surpressions de fluides et la fracturation horizontale lors de la génération d'hydrocarbures. Ces modèles nécessitent un matériau perméable et cohésif pour la circulation de fluides. La poudre de silice répond à ces critères. Les caractéristiques (perméabilité, cohésion) de celle-ci sont définies par RODRIGUES *et al.* (2009). Les modèles sont construits dans une boîte rectangulaire de dimensions 28× 18× 15 cm, qui contient du sable ou de la silice mélangée avec des microbilles de cire d'abeille. Ce mélange représente deux types de roches-mères définissant les mécanismes de génération de surpressions de fluide dans un milieu compact, favorable à la formation de fractures horizontales dues à la surpression anormale des fluides. On a démontré qu'il était possible de maintenir une surpression in situ sans source externe de fluide grâce aux expériences de modélisation. Nos résultats tendent à montrer qu'il y a une pression lithostatique (définie comme un état de pression anormale du fluide ; la pression est supérieure à la pression hydrostatique (SWARBRICK & OSBORNE, 2002) et, sous l'action d'un gradient vertical de circulation de fluides, les fractures les plus fréquemment formées sont horizontales. Ces fractures ressemblent aux filons de bitume (asphaltite) et aux filons de calcite dans le bassin Neuquén (en Argentine), le bassin côtier mauritanien (en Mauritanie) ainsi que le bassin Tarfaya-Boujdour (au Maroc).

Mots-clés. – Modélisation analogique, surpressions de fluides, fusion partielle, génération d'hydrocarbures, fractures hydrauliques horizontales.

Fluid overpressures and horizontal fracturing during hydrocarbon generation: analogous modelling using partial fusion.

Abstract. – This study concerns the application of analogous models of partial fusion in order to understand the fluid overpressure and the horizontal fracturing at the hydrocarbon generation. These models require a cohesive and permeable material for the fluid flow. The silica powder has criteria fitting with the characteristics (permeability and cohesion) defined by RODRIGUES *et al.* (2009). The models are constructed in a rectangular box (28 × 18 × 15 cm) which contains sand or silica mixed with "microbeads beeswax". This mixture represents two types of rocks defining the mechanisms of generation of fluid overpressure in a compact rock, favorable to the formation of horizontal fractures due to the abnormal overpressure. In the models already carried out, it was impossible to maintain an overpressure without external source of fluid. We have demonstrated that it is possible to maintain an overpressure in situ without external source of fluid through experiences of compaction. Indeed, our results suggest that the fractures commonly formed are horizontal. These fractures are the same as the veins of bitumen (asphaltite), in the Neuquén basin (Argentina), Mauritanian coastal basin (Mauritania) and also the Tarfaya-Boujdour basin (Morocco).

Keywords. – Analogous modelling, fluid overpressures, partial fusion, hydrocarbon generation, horizontal hydraulic fractures.

INTRODUCTION

La génération de surpressions de fluides dans les bassins sédimentaires sont semblables et font l'objet de débats concernant leurs origines. Plusieurs articles d'Osborne et de Swarbrick (OSBORNE & SWARBRICK 1997 ; SWARBRICK & OSBORNE, 1998 ; SWARBRICK *et al.*, 2002) résument les mécanismes probables de génération de surpressions dans les bassins sédimentaires. Il est possible de distinguer deux types de mécanismes :

- Une réduction mécanique de la porosité du solide qui provoque la compression du fluide.
- Une expansion du fluide qui, prisonnier dans une roche peu perméable, voit sa pression augmenter.

L'état de surpression caractérise les fluides interstitiels dont la pression est supérieure à celle d'un fluide dans l'état hydrostatique (Figure 1A). Ces surpressions sont souvent associées aux bassins pétroliers ; du moins, elles y sont plus étudiées en raison des difficultés qu'elles génèrent lors des forages. Mais elles se rencontrent également dans bien d'autres environnements (Figure 1B). Elles sont probablement présentes dans toutes les zones de déformation impliquant des sédiments de très faible perméabilité et résultent, pour la plupart, de la compaction des sédiments et de la génération d'hydrocarbures en profondeur (COBBOLD, 2005).

Existe-t-il un mécanisme efficace permettant de générer une surpression de fluide lithostatique dans une roche-mère ? L'objectif est de modéliser de manière analogique des phénomènes de compaction chimique par lesquels une partie des roches solides transfère un liquide ou un gaz par simple fusion ou par des réactions chimiques. Le mécanisme que nous allons illustrer est la formation de pétrole à partir de kérogène solide (microbilles de cire). Les modèles seront constitués de différentes couches d'un mélange de sable avec des microbilles de cire d'abeille en présence d'eau. Certaines de ces couches seront capables de fusion partielle, sous gradient vertical de température. Les modèles seront réalisés dans une boîte transparente permettant de visualiser les évolutions au cours de l'expérience. Nous avons choisi de développer une nouvelle technique de modélisation analogique pour tenter de comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la génération de surpressions de fluides et de fracturation horizontale.

Les veines fibreuses parallèles à la stratification de la roche (*beef*), ainsi que les veines de bitume (COBBOLD *et al.*, 2013), sont des marqueurs de paléo-fracturation hydraulique sous l'effet de la surpression des fluides au sein des bassins sédimentaires et plus particulièrement au sein des roches-mères d'hydrocarbures. La modélisation des systèmes en surpression des fluides en géologie a commencé au début des années 2000, notamment avec les modèles de COBBOLD & CASTRO (1999) et COBBOLD *et al.* (2001). Depuis, plusieurs études ont mis en avant la modélisation analogique dans l'étude des surpressions de fluides et de la fracturation (i.e. MOURGUES & COBBOLD, 2003 ; COBBOLD & RODRIGUES, 2007 ; RODRIGUES *et al.*, 2009 ; ZANELLA *et al.*, 2013).

Tous ces modèles ont généré des surpressions de fluides par un système d'injection de fluide (air ou eau) à la base des modèles. L'étude que nous avons menée a montré que l'utilisation de microbilles de cire d'abeille, mélangées à de la poudre de silice, constituait un mélange très adéquat pour représenter une roche-mère. Ainsi, nous avons développé un dispositif analogique d'échelle métrique pour étudier les mécanismes qui interviennent lors de la génération de surpressions de fluides et de la fracturation hydraulique horizontale.

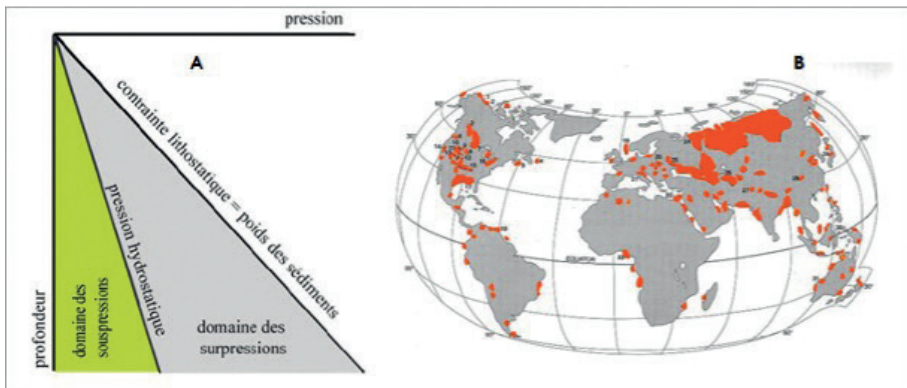


Figure 1. A) Définition du domaine des surpressions de fluide. B) Distribution des zones en surpression de fluide (LAW & SPENCER, 1998).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Afin de mieux comprendre l'influence de la compaction chimique sur la génération des surpressions de fluides d'un matériau à comportement cassant, des expériences analogiques ont été réalisées. Les microbilles de cire d'abeille sont utilisées comme fluide. La matière première est une poudre de silice (MilliSil C4), la taille des grains est de moins de 0,15 millimètre et elle présente une perméabilité intrinsèque du Darcy (qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux) d'environ 1,6 (Tableau I).

Pour simuler la roche-mère, nous avons mélangé la poudre de silice (50 % du volume) avec des microbilles de cire d'abeille d'environ 1 millimètre de diamètre. Le point de fusion de la cire d'abeille est de 61,5 °C. Nous avons mené trois séries d'expériences A, B et C, à l'aide de matériaux analogiques composites : un mélange de sable, de silice et de microbilles de cire d'abeille, en présence de l'eau dans les pores.

Dans les trois cas, le mélange se fait avec 50 % de chaque espèce (sable ou grains transformables). Le matériau composite est suffisamment perméable pour que la pression aux pores soit homogène dans tout l'échantillon. L'utilisation d'un sable coloré ou de silice colorée par un colorant SIKACIM COLOR nous permet d'estimer visuellement le pourcentage de chaque composant, si ceux-ci viennent à changer.

Lors de chaque expérience, l'échantillon se trouve dans un récipient clos et transparent. Nous y ajoutons suffisamment de liquide (eau) pour immerger largement

l'échantillon et remplir les pores. Ensuite, nous chauffons la base du récipient, à l'aide d'une plaque électrique à thermostat.

Paramètres	D	ρ	k
Silice MilliSil C4	0-150 μm	1.34g/cm ³	1.6 Darcy
Sable	0-160 μm	1.43g/cm ³	14 Darcy
Microbilles de cire	1 mm	0.96g/cm ³	61.5 points de fusion

Tableau I. Paramètres des expériences (D : dimensions ; ρ : densité ; k : coefficient de perméabilité) (RODRIGUES *et al.*, 2009).

RÉSULTATS

Série A

Dispositif expérimental

Lors des premières étapes de notre travail de recherche sur le développement des surpressions des fluides, nous avons créé nos modèles dans de petits dispositifs. Nous avons utilisé une boîte rectangulaire de 18 cm de long, 12 cm de large et 10 cm de hauteur, qui reposait sur une plaque électrique chauffante. L'objectif était de chauffer à la base le modèle jusqu'à ce que la température de la cire excède son point de fusion (62-64 °C).

Les modèles consistent en deux couches horizontales de deux matériaux : un mélange à volume égal de poudre de silice (ou de sable) et de microbilles de cire d'abeille (5), représentant la roche-mère, et de la poudre de silice pure (2), représentant la couverture imperméable. On recouvre les matériaux (sable et silice) d'eau. (Figure 2).

Les découpes faites à travers le modèle après refroidissement ont montré que la cire fondue avait migré à travers les micro-fractures jusque dans des fractures ouvertes (sills) (Figure 3).

La série A comprend les expériences de 1 à 9.



Figure 2. Schéma du dispositif expérimental pour la série A (sable ou silice, plus microbilles de cire d'abeille). 1 Plaque chauffante - 2 Couche de silice - 3 Tube de verre - 4 Couche d'eau superficielle - 5 Sable coloré plus microbilles de cire (LEMARABOTT & COBBOLD, 2010).

Expérience No 3 - Série A						
Épaisseur de sable avec microbilles de cire	Épaisseur de silice	Quantité de sable	Quantité de microbilles de cire	Quantité de silice	Température de la plaque chauffante	Épaisseur de la couche d'eau
1.5 cm	1.7 cm	200 g	400 g	600 g	100 °C	1 cm
Expérience No 6 - Série A						
Épaisseur de sable avec microbilles de cire	Épaisseur de silice	Quantité de silice colorée	Quantité de microbilles de cire	Quantité de silice	Température de la plaque chauffante	Épaisseur de la couche d'eau
1.7 cm	0.7 cm	300 g	300 g	150 g	100 °C	1 cm

Tableau II. Conditions expérimentales pour la Série A (LEMRA BOTT & COBBOLD, 2010).

Résultats

Mesure de pression – Expérience N° 3				
Heure	15h52	16h00	16h13	17h00
Pression	9 mm	11 mm	13 mm	10 mm

Tableau III. Valeurs de la pression mesurée au cours de l'expérience N° 3 (LEMRA BOTT & COBBOLD, 2010).

Mesure de pression – Expérience N° 6								
Heure	15h57	16h14	16h30	16h50	17h15	17h22	17h27	17h35
Pression	3 mm	8 mm	12 mm	14 mm	18 mm	22 mm	30 mm	40 mm

Tableau IV. Valeurs de la pression mesurée au cours de l'expérience N° 6 (LEMRA BOTT & COBBOLD, 2010).



Figure 3. A gauche, vue de la surface de l'expérience N°6 après enlèvement de la couche tampon, qui montre la migration de la cire jusqu'à la barrière de perméabilité et la formation de sills (visible sur la photo de gauche ainsi que sur les coupes à droite) (LEMRA BOTT & COBBOLD, 2010).

Lors de la première série d'expériences, la montée en température conduira à la fonte des microbilles de cire et à la formation de cire liquide. Nous prévoyons que la partie solide restante se tassera sous son poids, comblant en partie les vides. Ainsi l'augmentation du liquide sous la compaction fait monter la pression aux pores. Pour encourager une montée progressive, nous ajouterons une couche supérieure de poudre de silice très fine et donc peu perméable. Au cours de chaque expérience, nous visualiserons les changements progressifs de composition, et donc la compaction des couches inférieures, par de simples examens de couleur. La pression aux pores s'affichera automatiquement sur un tube de verre. En fin d'expérience, nous examinerons de manière plus détaillée la composition de chaque couche et sa structure interne à partir de coupes du modèle. Nous porterons une attention particulière à la nouvelle phase qui apparaît : la cire qui se solidifie.

- La cire qui se solidifie est remplie de fractures et/ou de l'espace poral ;
- Après 1h30 de mise en route de l'expérience, extrusion de fluide qui se solidifie à la surface du modèle ;
- Formation de sills (filons-couches) horizontaux, liée à des surpressions à la base de la barrière de perméabilité entre la silice et le sable (Figure 3).

Interprétation

La formation de sills est due à la migration du fluide jusqu'à la silice, qui est faiblement perméable ; le fluide reste prisonnier et forme des filons-couches. La différence de perméabilité entre le sable et la silice permet aux fluides de venir s'accumuler à la base de la silice. Cette accumulation se traduirait par la création de surpressions de fluide (Tableaux II et III) et la formation de sills (Figure 3).

Les structures obtenues dans nos expériences montrent des similitudes avec les structures observées dans le bassin Neuquén (Argentine), le bassin Tarfaya-Boujdour (Maroc) et le bassin côtier mauritanien (Figure 13).

Série B

Dispositif expérimental

La série B correspond aux 10^e, 11^e et 12^e expériences. Pour améliorer ces expériences, nous avons conçu une nouvelle boîte et fait l'acquisition d'une plaque chauffante avec thermostat plus précis que la première.

Les modèles sont construits dans une boîte en plastique transparente de 28×18×15 cm (Figures 4A et 4B).

Cette étude a montré que les microbilles de cire d'abeille mélangées à de la poudre de silice constituaient un matériau très adéquat pour représenter une roche-mère. Ainsi, nous avons développé un dispositif analogique d'échelle métrique pour étudier les mécanismes qui interviennent lors de la génération de surpressions de fluides et la fracturation.

La roche-mère de la Série B est composée de 2 couches : une première couche de silice colorée en bleu ou de sable, de 1 cm d'épaisseur (Figures 4A et 4B, élément 5),

une deuxième couche de silice colorée en jaune ou de sable, de 1 cm (Figures 4A et 4B, élément 4). On ajoute une troisième couche de poudre de silice pure, représentant la couverture imperméable (Figures 4A et 4B, élément 2).

Durant chaque expérience, nous avons utilisé plusieurs tubes de verre pour mesurer la pression de liquide dans les pores. Les tubes étaient placés sur les côtés des modèles, afin de minimiser les troubles possibles (qui auraient pu déclencher des fractures horizontales). Nous avons muni le pied de chaque tube d'une maille métallique afin d'éviter que des particules solides n'y pénètrent (élément 3 sur les figures 4A et 4B).

Après chaque expérience, nous avons drainé le modèle et l'avons laissé sécher durant une nuit sur une assiette chaude à 50 °C. Puis, avant de le découper (Figures 5 et 7), nous l'avons imprégné d'une solution gélatineuse et l'avons fait sécher à nouveau. À l'aide d'un couteau, nous l'avons sectionné tous les 2 cm.

Nous présentons ici les expériences N° 10 et N° 11.

A - Expérience No 10							
Épaisseur de sable avec microbilles de cire	Épaisseur de sable jaune et microbilles de cire	Épaisseur de silice	Quantité de sable bleu et microbilles de cire	Quantité de sable jaune et microbilles de cire	Quantité de silice	Température plaque chauffante	Épaisseur de la couche d'eau
1 cm	1 cm	1,5 cm	400 g	400 g	800 g	80 °C	1 cm
B - Expérience No 11							
Épaisseur de sable avec microbilles de cire	Épaisseur de sable jaune et microbilles de cire	Épaisseur de silice	Quantité de sable bleu et microbilles de cire	Quantité de sable jaune et microbilles de cire	Quantité de silice	Température plaque chauffante	Épaisseur de la couche d'eau
1 cm	1 cm	1,5 cm	400 g	400 g	800 g	80 °C	1 cm

Tableau V. A) Conditions expérimentales pour l'expérience No 10. B). Conditions expérimentales pour l'expérience No 11 (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).



Figure 4A. Schéma du dispositif expérimental pour la série B (silice plus microbilles de cire). 1 Plaque chauffante - 2 Silice - 3 Tube de verre - 4 Silice colorée en jaune plus microbilles de cire - 5 Silice colorée en bleu plus microbilles de cire - 6 Eau (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

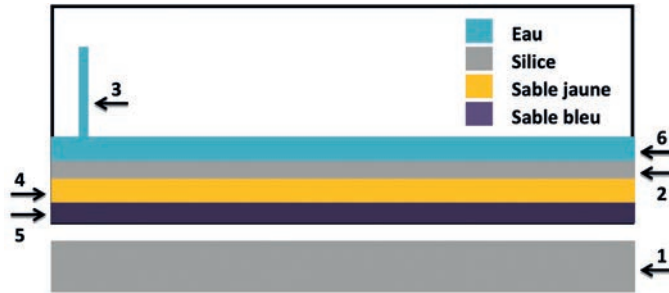


Figure 4B. Schéma du dispositif expérimental pour la série B (sable plus microbilles de cire).
1 Plaque chauffante - 2 Couche de silice - 3 Tube de verre - 4 Sable coloré en jaune plus microbilles de cire - 5 Sable coloré en bleu plus microbilles de cire - 6 Niveau de l'eau (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

Résultats

Mesure de pression – Expérience N° 10					
Heure	15h21	15h32	16h18	16h30	17h25
Pression	1,5 mm	1,7 mm	2 cm	2,5 cm	2,6 cm

Tableau VI. Valeurs de pression mesurées au cours de l'expérience N° 10 (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

Mesure de pression – Expérience N° 11				
Heure	10h30	10h45	14h19	14h45
Pression	0,9 mm	1,1 mm	1,5 cm	2 cm

Tableau VII. Valeurs de pression mesurées au cours de l'expérience N° 11 (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

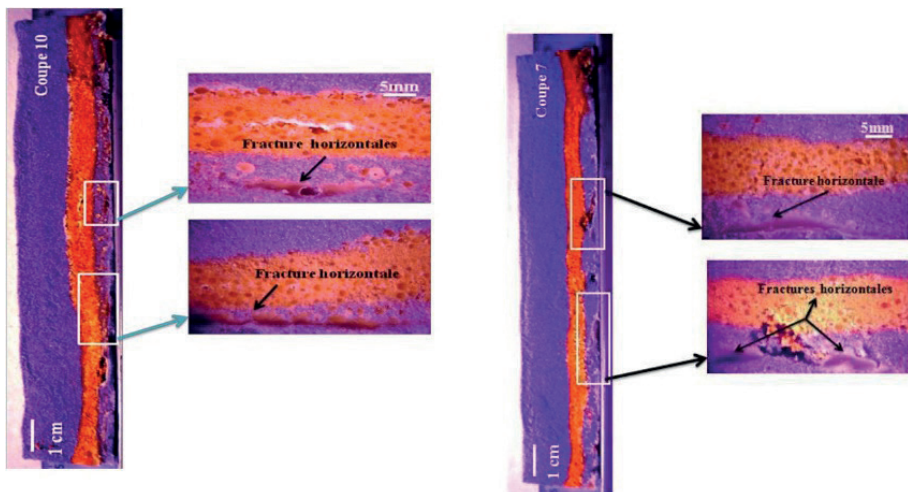


Figure 5. Localisation des fractures horizontales sur les coupes 10 et 7 (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

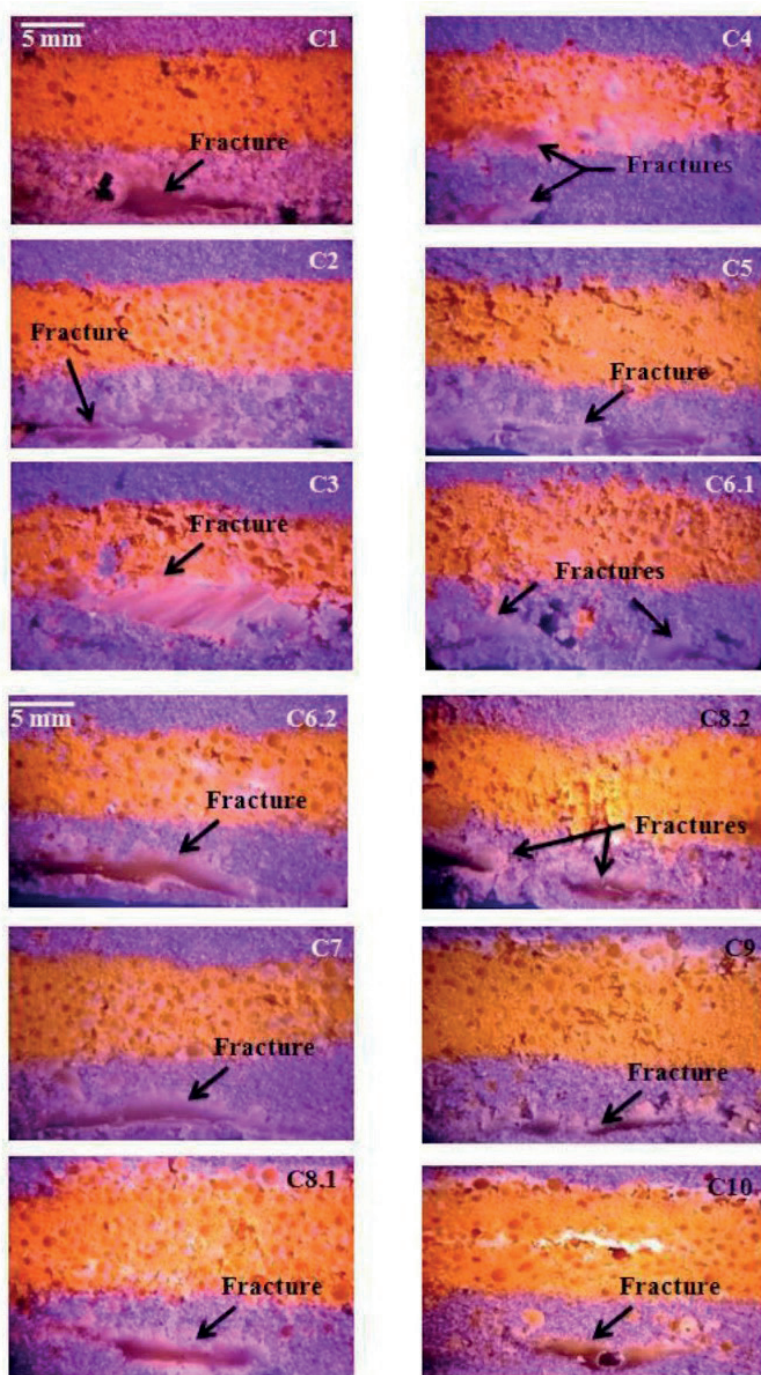


Figure 6. Photographies sous microscope des zones fracturées (LEMRA BOTT & COBBOLD, 2010).

Expérience No 11 - Coupe 10.



Expérience N° 11 - Coupe 11.

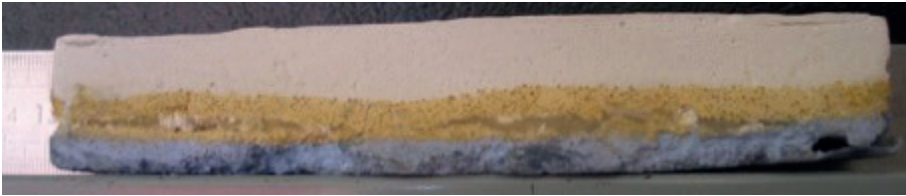


Figure 7. Coupes longitudinales 10 et 11 de l'expérience N° 11 (2 cm de large et 18 cm de long) (LEMRAHOTT & COBBOLD, 2010).

Interprétation

Les coupes de modèle des expériences N° 10 et N° 11 et les photographies prises à l'aide d'un microscope montrent parfaitement la formation de fractures horizontales (Figures 6 et 7). Les fractures se situent dans les deux couches qui représentent la roche-mère.

- Les structures sont observées dans les modèles soumis à de fortes pressions de fluides (indiquées dans les Tableaux VI et VII) ;
- La migration du fluide (la cire) s'est étendue jusqu'à la surface du modèle ; cela signifie que la surpression au toit du modèle est suffisamment forte pour que le fluide sorte ;
- La fusion de la cire a conduit à la compaction verticale de la roche mère, ainsi qu'à la formation de fractures horizontales parallèles à la stratification consécutives au poids de la couverture et à une surpression anormale de fluides.

Cela démontre que, lorsque la pression de fluide devient supérieure à la pression lithostatique, on atteint le seuil de fracturation hydraulique horizontale. Cela se traduit par la propagation de fractures ouvertes dont le fluide est sous pression (Figures 5, 6 et 7). Dans les roches-mères, les fractures créées servent de drains pour les fluides et permettent leur expulsion.

L'expulsion du fluide, dans l'expérience N° 10, est liée à la porosité de fracture développée lors de la génération des fluides en surpression. Plusieurs articles d'Osborne et Swarbrick (OSBORNE & SWARBRICK, 1997 ; SWARBRICK & OSBORNE, 1998 ; SWARBRICK *et al.*, 2002) résument et discutent les mécanismes probables de génération des surpressions dans les bassins sédimentaires. Il est possible de distinguer deux mécanismes :

- Une réduction mécanique de la porosité du solide qui provoque la compression du fluide ;
- Une expansion du fluide qui, prisonnier dans une roche peu perméable, voit sa pression augmenter.

En effet, les structures observées dans nos résultats tendent à montrer qu'il y a une pression lithostatique (pression anormale du fluide : la pression est supérieure à la pression hydrostatique) (SWARBRICK *et al.*, 2002) ; sous l'action d'un gradient vertical de circulation des fluides, les fractures les plus fréquemment formées sont horizontales et non pas verticales comme généralement admis. Après avoir analysé les résultats et la formation de fractures horizontales parallèles à la stratification dans toutes les coupes (surtout dans l'expérience N°11), on a pu conclure que ces fractures se formaient horizontalement lors de la compaction de couches au moment de la génération de surpression.

Série C

Dispositif expérimental

La série C représente des modèles, d'échelle réduite et très simplifiés, d'un système géologique naturel. La simplification de ces systèmes découle également de la technicité des modèles analogiques. En effet, l'un des plus grands défis de cette méthode est de trouver les matériaux adéquats pour représenter la nature. Nos modèles ont démontré que les microbilles de cire d'abeille mélangées à de la poudre de silice constituait un mélange très adéquat pour représenter une roche-mère.

Dans le monde des sciences de la Terre, la modélisation analogique remplace petit à petit la méthode historique de modélisation que les géologues, en particulier, ont développée depuis presque deux siècles. Néanmoins, l'utilisation de la modélisation analogique s'avère être un outil-clé pour la compréhension de certains phénomènes, comme les systèmes sédimentaires en surpression de fluides.

Les modèles de la troisième série ont été construits de la même manière que ceux de la deuxième série. La série C est représentée par les expériences N°13 et N°14.

Nous avons simplement ajouté une couche de poudre de silice colorée en violet à la base du modèle. Les modèles consistent en plusieurs couches horizontales : une première couche de poudre de silice violette, une deuxième couche jaune (un mélange à volume égal de poudre de silice et de microbilles de cire d'abeille) et une troisième couche violette (un mélange à volume égal de poudre de silice et de microbilles de cire d'abeille). Les deuxième et la troisième couches représentent la roche-mère ; la quatrième couche (poudre de silice pure) représente la couverture imperméable. L'ensemble des matériaux est recouvert d'eau (Figure 8).

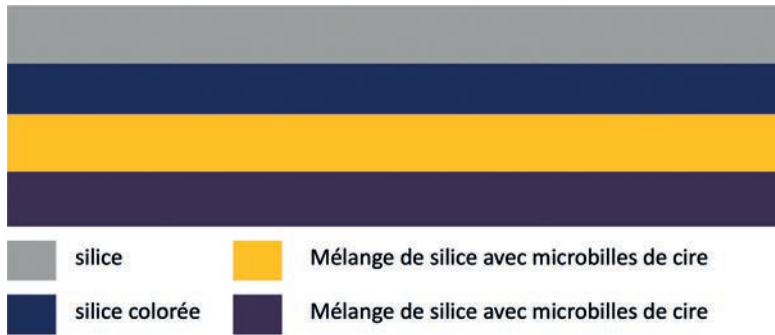


Figure 8. Schéma du dispositif expérimental pour la série C (silice plus microbilles de cire) (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

Résultats

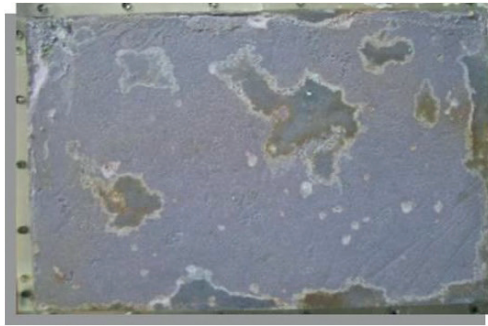


Figure 9. Photographie de la surface de l'expérience No 13. Le liquide (gris foncé) a migré vers la base du modèle (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

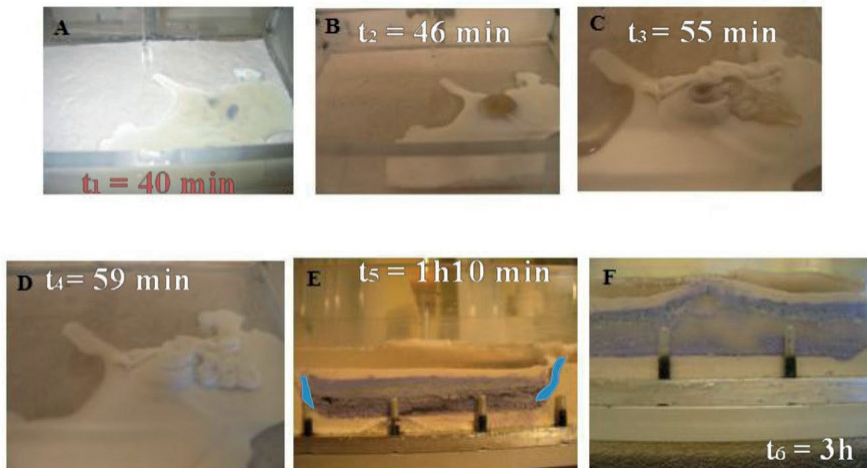


Figure 10. Expérience N° 14 : évolution de la surface du modèle en fonction du temps ; le fluide est expulsé quand la pression a approché la valeur lithostatique (LEMABOTT & COBBOLD, 2010).

Interprétation

Nous avons drainé le modèle de l'expérience N° 14 et l'avons laissé sécher durant une nuit sur une assiette chaude à 50 °C.

Le tassement des sédiments et l'expulsion de fluides entraînent des variations d'épaisseur des couches observées (Figure 11). Ces couches subissent un fort phénomène de compaction et de surpression anormale de fluides.

Nous avons constaté une migration de fluides vers le haut et le bas, ce que nous n'avions pas observé jusque là. La présence d'une pression interne due aux fluides a créé une surpression des fluides anormale à l'intérieur de la roche-mère mature en entraînant une fracturation importante qui permet aux fluides de migrer vers le haut et le bas (Figure 9).

Voici les trois points qui résument l'ensemble de ce qui a été remarqué lors des expériences N° 13 et N° 14.

- Une extrusion du fluide (la cire) jusqu'à la surface dans nos modèles de l'expérience N° 14 : t1 (après 40 minutes), t2 (après 46 minutes), t3 (après 55 minutes), t4 (après 59 minutes), t5 (après 1 heure et 10 minutes) (Figure10) ;
- Le modèle a été déprimé à cause de la perte de la cire : on observe le rôle de la compaction ;
- La formation de laccolite (intrusion de fluides) dans notre modèle t6 (après 3 heures).



Figure 11. Expérience N° 14 : vue de la surface du modèle qui subit une forte déformation pendant l'expulsion de fluide. (LEMRAVOTT & COBBOLD, 2010).

DISCUSSION

Différents types de fractures horizontales ont été formés dans nos expériences lors de la génération de surpression des fluides. Les paramètres de contrôle principaux peuvent être aussi bien la perméabilité et la résistance des couches les plus cohésives que la mobilité des fluides. Des fractures sont formées dans la poudre de silice et de sable, quand la surpression des fluides dépasse la surcharge des sédiments. Des fractures horizontales se forment et sont remplies de cire : c'est le rôle des forces de courant (Figure 12) induites par la circulation des fluides en surpression dans des sédiments perméables. Le fluide a été expulsé en partie vers la surface.

Dans l'expérience N° 14, la laccolite qui a été formée a entraîné une déformation de la couche de silice. Ce résultat ressemble à celui décrit par RODRIGUES *et al.* (2009). Plus généralement, la formation des fractures, des sills et des laccolites dans nos expériences ressemble beaucoup à celle observée dans la nature et particulièrement dans la région de Vaca Muerta, du bassin de Neuquén en Argentine, du bassin côtier mauritanien et aussi du bassin Tarfaya-Boujdour au Maroc. L'observation la plus impressionnante dans cette étude est que les fractures sont localisées en profondeur dans les roches-mères, alors que les laccolites se trouvent près de la surface (observations dans la nature et modélisation analogique).

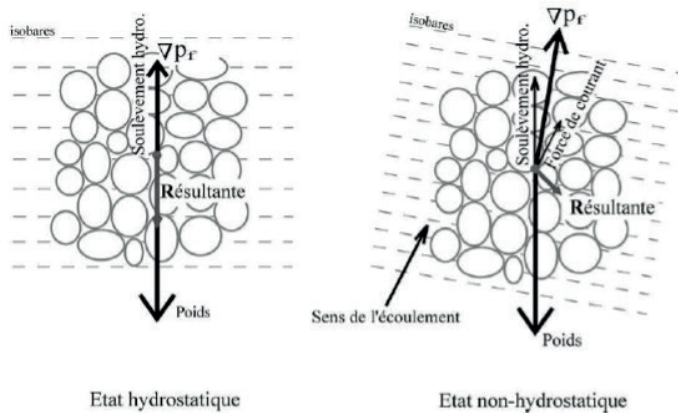


Figure 12. Résumé de l'action du fluide sur le milieu granulaire en termes de forces de volume (le gradient des pressions est bien supérieur aux gradients lithostatiques) (MOURGUES & COBBOLD, 2003).

Plusieurs auteurs ont proposé que la génération des hydrocarbures puisse mener à la surpression des fluides dans une roche-mère mature de faible perméabilité. Notre expérience au laboratoire illustre bien ce phénomène dans le cas de l'utilisation de la poudre de silice aussi bien qu'avec le sable fin. Le type de sédiment est également déterminant pour l'expulsion des fluides et pour la création de pressions. La génération de fluides est toujours présente pour développer la surpression.

Il est nécessaire d'invoquer les forces de courants qui existent inévitablement dans le cas d'une circulation des fluides de type Darcy. Les forces de courants verticales,

qui accompagnent le flux ascendant en réponse au gradient de surpression, s'opposent au poids de la surcharge et peuvent lui être supérieures générant alors une contrainte verticale en traction dans l'ensemble des couches. Les variations de la pression des fluides observées dans nos expériences dépendent de la compaction des couches et la génération des fluides, des paramètres des expériences et des changements de perméabilité.

Ces mécanismes sont très efficaces dans les sédiments peu perméables qui retardent l'échappement des fluides. La présence des surpressions implique des gradients de pression non hydrostatique. Ces derniers sont bien supérieurs au gradient lithostatique au niveau des barrières de perméabilité. Ces gradients anormaux de pression exercent une force de courant sur les sédiments. Ces mécanismes sont à l'origine de la génération des surpressions dans nos expériences, comme elles le sont dans quelques bassins sédimentaires (MOURGUES & COBBOLD, 2003 ; RODRIGUES *et al.*, 2009).

CONCLUSION

Le travail développé en 2009 a permis de comprendre l'importance des compactions chimiques dans les processus géologiques faisant appel à la génération de surpression des fluides.

La formation de fractures horizontales a été observée dans tous les modèles réalisés. Le réseau de fractures se remplit de fluide qui provient de la cire (transformation de la cire de l'état solide à l'état liquide). La fracture ressemble aux filons de bitume et de calcite horizontaux de certains bassins pétroliers (Figure 13).

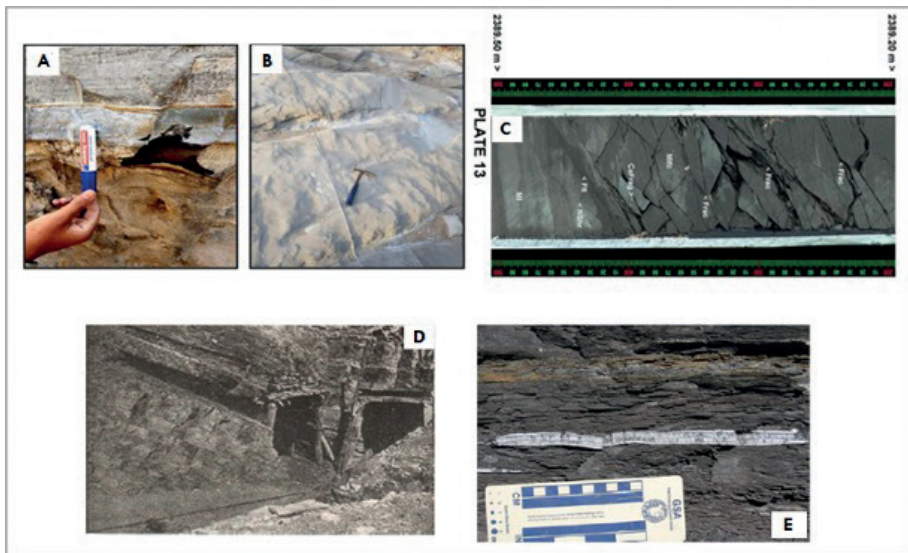


Figure 13. (A et B) Veines de calcite traversant la série bitumineuse du bassin Tarfaya-Boujdour (Maroc). C) Zones fracturées du bassin côtier mauritanien (30 cm de long). D) galerie d'exploitation de bitume de Los Castanos en Argentine (150 à 200 m de long) (Photo : Berrell, 1991). E) Photographie de filons horizontaux de calcite (1 à 1,30 m de long) (COBBOLD & ROSSELLO, 2003).

On suppose que la fracturation est due à la migration du fluide et à la force du courant. Ces fractures se sont formées avec des conditions de pression du fluide correspondant au poids de la colonne lithostatique. Les modèles analogiques ont fourni des résultats qui sont remarquablement similaires aux exemples naturels observés dans les bassins de Neuquén en Argentine, de Tarfaya-Boujdour au Maroc et dans le bassin côtier mauritanien.

Ces expériences pourront être améliorées par l'utilisation de matériaux encore plus fins pour augmenter le contraste de perméabilité, par une augmentation de la dimension des modèles et par un suivi des coupes via une méthode d'imagerie (scanner).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- COBBOLD P.R. & CASTRO L., 1999. Fluid pressure and effective stress in sandbox models. *Tectonophysics*, 301: 1-19.
- COBBOLD P.R., DURAND S. & MOURGUES R., 2001. Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments. *Tectonophysics*, 334: 245-258.
- COBBOLD P.R. & ROSSELLO E.A., 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 429-443.
- COBBOLD P.R., 2005. Hydrocarbon generation, fluid overpressure and source mother. Detachments in thrust belts, vol. 99. *Thrust Tectonics*, Egham:7-9. Extended Abstracts.
- COBBOLD P.R. & RODRIGUES N., 2007. Seepage forces, important factors in the formation of horizontal hydraulic fractures and bedding-parallel fibrous veins ("beef" and "cone-in-cone"). *Geofluids*, 7: 313-332. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-8123.2007.00183.x>
- COBBOLD P.R., ZANELLA A., RODRIGUES N. & LØSETH H., 2013. Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydrocarbon generation and mineralization. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 1-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.01.010>
- LAW B.E. & SPENCER C.W., 1998. *Abnormal pressures in hydrocarbon environments*. In: B.E. Law, G.F. Ulmishek & V.I. Slavin (Eds.), *Abnormal pressures in hydrocarbon environments*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 70:1-11.
- Lemrabott A. & Cobbold P.R., 2010. *Physical modeling of fluid overpressure and compaction during hydrocarbon generation in source rock of low permeability*. American Association of Petroleum Geologists, International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, Brazil. Conference from November 15th to 18th, 2010. Search Discov. Article #40518 <http://www.searchanddiscovery.com>
- MOURGUES R & COBBOLD P.R., 2003. Some tectonic consequences of fluid overpressures and seepage forces as demonstrated by sandbox modelling. *Tectonophysics*, 376: 75-97.
- OSBORNE M.J. & SWARBRICK R.E., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 81: 1023-1041.
- RODRIGUES N., COBBOLD P.R. & LØSETH H., 2009. Physical modelling of sand injectites. *Tectonophysics*, 474: 610-632.
- SWARBRICK R.E. & OSBORNE M.J., 1998. *Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview*. In: B.E. Law, G.F. Ulmishek and V.I. Slavin (Eds.), *Abnormal pressures in hydrocarbon environments*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 13-34.
- SWARBRICK R.E., OSBORNE M.J. & YARDLEY G.S., 2002. *Comparison of overpressure magnitude resulting from the main generating mechanisms*. In: A.R. Huffman & G.L. Bowers (Eds.), *Pressure regimes in sedimentary basins and their prediction*, vol. 76. American Association of Petroleum Geologists Memoir: 1-12.
- ZANELLA A., COBBOLD P.R., RUFFET G. & ROJAS L., 2013. Beef veins and thrust detachments in Early Cretaceous source rocks, foothills of the Magallanese Austral Basin, southern Chile and Argentina: structural evidence for fluid overpressure during hydrocarbon maturation. *Marine and Petroleum Geology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.10.006>

SOCIÉTÉ LINNÉENNE DE LYON

Siège social : 33, rue Bossuet, F-69006 LYON

Tél. et fax : +33 (0)4 78 52 14 33

<http://www.linneenne-lyon.org> — email : secretariat@linneenne-lyon.org

Groupe de Roanne : Maison des anciens combattants, 18, rue de Cadore, F-42300 ROANNE

Rédaction : Marie-Claire PIGNAL – Directeur de publication : Pascal TERRIER

Conception graphique de couverture : Nicolas VAN VOOREN



Tome 91 Fascicule 5-6 mai - juin 2022

SOMMAIRE

Mesnil S. – Première donnée de reproduction de <i>Cordulegaster bidentata</i> , Selys, 1843 au sud du département du Rhône (Odonata : Cordulegastridae)	98-100
Bange C. – Identification d'une Fougère litigieuse (<i>Polystichum abbreviatum</i>) signalée par l'abbé Cariot aux environs de Lyon.....	101-106
Lemrabott A. & Aadjour M. – Surpressions de fluides et fracturation horizontale lors de la génération d'hydrocarbures : modélisation analogique à l'aide de la fusion partielle.....	107-122
Philippe M. – Sortie flore vernale et bryophytes à Chasselay (Rhône) du 19 mars 2022	123-128

Couverture : *Pseudoscleropodium purum*, une mousse observée lors de la sortie à Chasselay (Rhône) le 19 mars 2022. Crédit : B. Berthet-Grelier

CONTENTS

Mesnil S. – First breeding observation of <i>Cordulegaster bidentata</i> in the south Rhône department (Odonata: Cordulegastridae)	98-100
Bange C. – Identification of a Fern (<i>Polystichum abbreviatum</i>) reported by Cariot from Lyon suburbs.....	101-106
Lemrabott A. & Aadjour M. – Fluid overpressures and horizontal fracturing during hydrocarbon generation: analogous modelling using partial fusion.....	107-122
Philippe M. – Spring flora and Bryophytes at Chasselay (Rhône) on March 2022	123-128

Prix 10 euros

ISSN 2554-5280 – N° d'inscription à la CPPAP : 0724G85671

Imprimé par Imprimerie Brailly, 69564 Saint-Genis-Laval Cedex

Imprimé en France • Dépôt légal : Mai 2022

Copyright © 2022 SLL. Tous droits réservés pour tous pays sauf accord préalable.