

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL POUR L'ÉVALUATION DE POLYMERES APPLIQUES DANS UN PROJET DE BALAYAGE A L'EAU

Abbes BENBAKHTI

⁽¹⁾ Centre de Recherche et Développement, Sonatrach, Boumerdes, 35000, Algeria

E-mail : a_benbakhti@yahoo.fr

Résumé – Les polymères sont largement utilisés dans le secteur pétrolier particulièrement pour l'amélioration des performances des eaux de balayage.

On considère qu'il existe essentiellement deux situations où l'utilisation de polymères peut être considérée:

Un ratio de mobilité huile / eau défavorable.

Une hétérogénéité de réservoir excessive

Les polymères peuvent agir par la combinaison de deux mécanismes:

Control de mobilité, par lequel la viscosité du bouchon eau/polymère modifie l'écoulement du fluide à travers le réservoir.

Adsorption, provoquant le colmatage ou le blocage des pores avec pour résultat la réduction locale de la perméabilité ce qui a pour conséquence l'altération de l'écoulement des fluides.

Les polymères qui sont généralement utilisés dans de telles applications peuvent être classés en trois catégories à savoir : synthétiques, naturels and semi-synthétiques. Ils ont un rôle primordial et doivent être sélectionnés avec beaucoup de soin et leurs propriétés devraient être soigneusement mesurées afin de prévenir toute déficience qui pourrait surgir lors de leur application. La totalité du projet de balayage à l'eau modifiée par les polymères peut réussir ou faillir selon que l'évaluation du polymère utilisé ait été ou non soigneusement menée.

Les travaux d'expérimentation au laboratoire de ces polymères sont essentiels et devraient donc être menés à un stade précoce de l'étude ou de l'évaluation de leur applicabilité.

Un plan systématique de travaux à mener en laboratoire est nécessaire et devrait être fondé sur des estimations réalistes du programme sur le terrain.

Le but de cet article est d'examiner dans le détail les travaux de laboratoire qui devraient être réalisés afin que les polymères appelés à être utilisés satisfassent aux exigences de ces applications.

Mots clés: polymère, balayage eau, analyses, essais, évaluation, laboratoire.

INTRODUCTION

Une classe spéciale de polymères « les polymères hydrosolubles » sont utilisés dans le domaine pétrolier soit pour éviter les venues d'eau en rendant moins perméables certaines couches du réservoir facilitant ainsi migration de l'eau vers les puits de production, soit pour augmenter la viscosité de l'eau pour permettre au fluide injecté une action balayage-piston plus efficace.

D'autres applications des polymères dans le domaine pétrolier existent on peut citer :

- Forage
- Fracturation de réservoir
- Colmatage
- Cimentation
- Modification de profile de perméabilité
- Épaississement ou viscosification de l'eau

Selon leur origine, on peut distinguer trois types de polymères à savoir les :

- Polymères naturels ou biopolymères

Ce sont des polymères d'origine végétale (biopolymères naturels), ou produits par des micro-organismes (biopolymères biotechnologiques ayant pour origine la biomasse)

- Polymères semi-synthétiques

Ce sont des biopolymères chimiquement modifiés. La modification ayant pour but d'augmenter ou de conférer le caractère soluble à des polymères peu ou pas solubles.

Polymères synthétiques

CRITÈRES DE SÉLECTION DE GISEMENTS ET DESIGN D'UN PILOTE SPÉCIFIQUE À UN BALAYAGE PAR POLYMERES

Il s'agit en premier lieu, de procéder à l'identification de réservoirs candidats pour un PF (water polymer flooding) ceci par l'intermédiaire d'une série de critères de sélection; et ensuite de

décrire le procédé d'évaluation quand un réservoir susceptible d'être candidat a été choisi pour une étude plus approfondie.

Que ce soit pour le contrôle de viscosité de l'eau ou pour le contrôle de l'hétérogénéité de la formation on peut distinguer différents critères de sélection.

Chaque facteur négatif devrait être soigneusement évalué afin d'étudier les possibilités qu'il y a à y remédier.

Les critères de sélection présentés dans le tableau suivant sont donnés comme exemple. Chaque condition peut être discutée en détail. La liste n'est donc pas exhaustive mais Chaque critère pourrait être discuté dans le détail.

Ces conditions donnent beaucoup plus les conditions de rejeter un réservoir particulier plutôt que de le sélectionner. Ainsi si la température est supérieure à 130°C et s'il n'y a pas de refroidissement préalable dans ce cas les polymères ne peuvent pas être utilisés mais si la température est inférieure à 90°C d'autres critères sont à évaluer. Donc il est nécessaire de définir et prendre en considération les critères qui sont obligatoires.

Il existe un très grand nombre de données qu'il y a lieu d'étudier et comparer. Les règles de sélection sont en général basées sur les mêmes critères techniques. Ces critères sont à définir selon la zone à considérer. Il existe un consensus sur les critères essentiels à prendre en considération.

On peut citer entre autres, en plus du pH, salinité, nature des roches etc.:

Ratio de mobilité ou MR si celui-ci n'est pas connu alors la viscosité de l'huile est à prendre en considération

Température maximum de 95°C autrement des problèmes de dégradation de polymères se poseront et il y lieu de prendre des mesures spécifiques pour y remédier

représente une base raisonnable pour des études plus détaillées.

Critères de selection	PF pour control de viscosité	PF pour control d'hétérogénéité	Commentaire
Viscosité d'huile	Généralement $5 \text{ cP} < \mu_o < 30 \text{ cP}$ Max. 70 cP	Généralement $0.4 \text{ cP} < \mu_o < 10 \text{ cP}$ Max. 20 cP	Le symptôme dans les deux cas est la venue tôt de l'eau et le faible balayage
Niveau d'hétérogénéité - couches perméables ou chenaux	La formation devrait être aussi homogène que possible	Qq hétérogénéité (par définition) $4 < k_{hi}/k_a < 30$	Pour contrôle d'hétérogénéité Un contraste moins sévère ne nécessite pas de polymère et trop sévère est trop important pour polymère
Perméabilité absolue	Min. vers. 20md No max.		Pour éviter la rétention excessive de polymère
Température	Préférer les faibles températures Au mieux $< 80^\circ\text{C}$ Max. $\sim 95^\circ\text{C}$		Les polymères dégradent à températures élevées
Injectivity de l'eau	Devrait être bonne de préférence avec 'une certaine capacité d'injection disponible Fracturation peut aider		S'il y a des problèmes avec de l'eau, ils seront aggravés avec le polymère
Aquifer/oil/water contact	Injection pas profonde dans couche aquifère ou loin au-dessous de contact d'huile/eau		Pertes additionnelles par rétention durant transport vers puits
Argiles	En général devraient être faibles		Tendance élevée à la rétention
Saumure d'injection salinité/dureté	Non critique mais peut déterminer quels polymères peuvent être employés		Salinité / dureté élevées biopolymères ou nouveaux copolymères synthétiques Faible salinité/dureté HPAM
Conditions opératoires Chemical + fluid Logistics	Pas de problèmes majeurs avec: e.g. O ₂ , Fe, biodégradation, H ₂ S, incompatibilité avec additive e.g. stockage de polymère, mixing et équipement d'injection		De tels problèmes peuvent être techniquement solubles mais ils peuvent éliminer le balayage avec polymère pour des raisons économiques

Restrictions spécifiques : ce sont les conditions qui peuvent conduire à une perte excessive du polymère (aquifère, gaz cap, fractures etc.)

Caractéristiques des gisements ou un PF a été appliqué

Température de Réservoir 10 à 115 °C

Salinités 0.3 à 21.3% TDS

Perméabilité moyenne réservoir 0.6 à 15,000mD

OOIP 36 à 97.1%

Viscosités d'huile 0.01 à 1494 cP

WOR 0 à 100

Net pay 4 à 432 ft (1 à 135 mètres)

Réservoirs Sablonneux ou gréseux 4 fois plus fréquents que réservoirs carbonatés

Les réservoirs où l'application de polymères a été un succès ont en commun:

une perméabilité élevée (sup à 0.76 darcy);

formation sablonneuse; température (30 à 60°C).

saturation en huile élevée (71 à 92% OOIP) ;

ratio de viscosité huile/eau élevé (15 à 114) à température de réservoir.

PF utilisé avec des concentrations élevées en H P A M ou polyacrylamide hydrolysé (1000 à 2000 ppm) dans eau faiblement saline et de grandes quantités (162 à 520 lbm/acre-ft).

Récupération supplémentaire élevée (11 à 30% OOIP ou 155 à 499 bbl oil/acre-ft)

PLANIFICATION DES TESTS D'ÉVALUATION DES POLYMÈRES

La planification d'un PF couvre les domaines d'activité suivants

Étude et essais de champ (gisement, secteur, zone, puits)

Essais de laboratoire

Études économiques

Simulations (techniques et économiques)

Étude et essais de champ.

Description détaillée du réservoir

Injection de traceur

Équipement de manutention polymère

Essais d'injectivité du polymère

Essais en laboratoire.

Essais de sélection de polymère et de compatibilité

Data de balayage du plug par polymère

Data de performance du polymère (déplacement d'huile)

Simulations par ordinateur.

Évaluation Préliminaire du PF (2D)

Simulation de balayage par le traceur (2D, 3D)

Prédictions préliminaires des polymères (3D)

ETUDES EXPERIMENTALES / ESSAIS DE LABORATOIRE A L'APPUI D'UN PF

La propriété la plus importante d'un polymère est son volume hydrodynamique. Ce facteur est celui qui contrôle le rapport concentration / viscosité, la rhéologie de la solution et le taux de pénétration du polymère dans les pores et canaux.

Le volume hydrodynamique est fonction de la structure chimique du polymère, de la longueur de chaîne et des interactions polymère/solvant.

Cette structure chimique peut être modifiée à volonté par synthèse de polymères nouveaux ou par modification de polymères existants.

Le choix du type de polymère, les concentrations des solutions, les volumes du ou des bouchons injectés, la durée d'injection etc., dépendent essentiellement des conditions de gisement et sont fixés après des études approfondies en laboratoire et des simulations numériques en tenant compte des

Exactement comment le procédé de PF est appliqué et comment la conception de l'inondation est déterminée dépend de la nature du mécanisme de récupération choisi.

L'analyse économique du projet devra prendre en considération la prédiction du profile de récupération, les calculs de simulation du réservoir, pour l'application d'un processus continu de balayage ou pour une gamme de balayages i.e. soit l'injection d'une concentration donnée soit une série d'injections à différentes concentrations.

Les essais appropriés en laboratoire devant être effectués sur des polymères à l'appui d'un pilote PF peuvent porter soit spécifiquement sur des polymères commerciaux donnés soit être étendus à une partie développement et/ou modification de la structure des polymères.

Nous pouvons donc avoir des travaux:

ANALYSES et ESSAIS

Établir la relation existant entre les paramètres endogènes liés aux polymères et les paramètres exogènes qu'ils soient liés aux milieux liquides présents (pH, salinité, nature des ions présents, température etc.) ou liés aux formations présentes (perméabilité, hétérogénéité, natures des pores etc.)

DEVELOPPEMENT

Étude de la structure et caractéristiques des polymères portant sur la connaissance des caractéristiques moléculaires et structurales des polymères étudiés à savoir la nature et la longueur des chaînes principales et latérales, la nature des groupements fonctionnels présents. Nécessite la maîtrise de la synthèse pour la mise en œuvre de polymères à structure définie (copolymères statistiques, séquencés, greffés) selon les impératifs imposés par les conditions d'utilisation.

Les travaux d'analyse et les essais pourront être réalisés sur des produits commerciaux, polymères et/ou surfactants

Une compréhension détaillée des mécanismes en jeu et des effets mis en jeu pourrait éventuellement conduire à l'étude de la modification des produits existant ou éventuellement à la synthèse de nouveaux produits.

Des essais de simulation pourraient éventuellement être réalisés avant les études de laboratoire.

Le synergisme par combinaison de produits chimiques divers (stabilisants, agents mouillants, gels etc.) apportent des solutions nouvelles permettant l'accroissement de l'efficacité et la réduction des coûts.

Il y a fondamentalement **trois types d'expériences** de laboratoire qui peuvent être effectués mettant en jeu les solutions polymériques, l'eau d'injection et les carottes ou plug. Ces travaux de laboratoire portent sur :

La sélection de polymère et l'étude des compatibilités

La production de données concernant le balayage du Plug par la solution polymérique

Les expériences de déplacement du système polymère/huile

4.1 Sélection de polymères et études de compatibilité

Ce type d'essai est relié au choix du type le plus approprié de polymère à utiliser pour une application donnée. Même dans une classe donnée, par exemple les polyacrylamides hydrolysés, d'autres choix sont possibles concernant des propriétés liées au polymère per se telles que le poids moléculaire et le degré d'hydrolyse ou alors liés à la forme réelle dans laquelle le polymère est fourni, par exemple émulsion, gel ou poudre.

Les essais de compatibilité et de sélection sont, dans un sens, des préalables pour qu'un polymère (ou sa solution) puisse être choisi et comportent l'étude de la compatibilité de polymère/saumure, la filtrabilité, la sensibilité à d'autres additifs, etc. Si un polymère donné, ou un type de polymère, ne passe pas de tels essais de sélection, alors il devrait être exclu de la liste de polymère candidat à moins qu'il n'y ait une solution technique simple qui puisse remédier à ce problème.

Il est essentiel qu'un polymère choisi passe les essais à ce stade avant d'effectuer des essais plus poussés. Des essais de sélection de polymère devront être effectués sur une solution de polymère à différentes concentrations (par exemple 500, 1000 et/ou 2000 ppm) dans la saumure d'injection. Un ensemble typique d'essais serait comme suit :

Dissolution de polymère : Il est essentiel que le polymère se dissolve d'une manière satisfaisante dans la saumure d'injection. Aucune précipitation à court terme du polymère de cette saumure ne serait acceptable. De tels essais informent sur la forme la plus commode de polymère à manipuler, par exemple poudre, gel ou émulsion.

Capacités de Viscosification : Cet essai permet de déterminer la concentration optimale de polymère pour arriver à une viscosification satisfaisante. Des polymères ayant à des concentrations raisonnables une puissance de viscosification réduite seraient ainsi éliminés. Les effets du réservoir, la température, la teneur et la nature des sels présents enfin tous les facteurs pouvant avoir un effet quelconque négatif ou positif sur la viscosité devraient être étudiés.

Vieillessement à court terme : Le Vieillessement de la solution de polymère pendant quelques jours doit être effectué à température ambiante (autour de 30°C) en présence de tous les autres additifs principaux qui seront présents dans la saumure d'injection, par exemple fer, biocide, etc.

Filtrabilité millipore : Des essais de filtrabilité par des entassements de filtres devront être effectués sur la solution de polymère pur et sur la même solution après différents niveaux de pré-filtration. Sauf pour des réservoirs très peu perméables, la dimension des macromolécules est généralement inférieure au diamètre des pores. La présence de microgels doit être prise en considération. Des pertes élevées après le passage par des piles de filtres sont une indication de fortes rétentions de polymère et éventuellement bouchage / colmatage de la formation ; et des essais de sélection appropriés devraient être installés pour détecter des solutions de polymère avec une faible filtrabilité, particulièrement si leur utilisation est prévue dans des réservoirs de faible perméabilité.

Filtrabilité sur plug : Des essais de filtrabilité sur plug sont à mener avec des solutions des polymères sélectionnés (candidats) qui ont donné des résultats satisfaisants dans les essais d'écoulement par les filtres millipore. Le plug employé dans ce travail de sélection devrait être constitué de sables plus perméables que la formation de réservoir dans la région

d'inondation. Dans les essais de ce type, la pression à travers le plug devrait être surveillée et on devrait analyser toutes les pertes de polymère de la solution. Le plug devrait être inspecté après essai d'écoulement pour détecter tout colmatage qui aurait pu se produire.

Stabilité du polymère en général : Il est très important de s'assurer que le polymère est suffisamment stable pour la durée totale du PF considéré, car c'est l'un des paramètres principaux qui détermine l'efficacité du processus.

La dégradation de polymère se rapporte à n'importe quel processus qui décomposerait la structure moléculaire de la macromolécule et les principales voies de dégradation possibles dans ces applications sont :

Dégradation chimique : elle se rapporte à la rupture des molécules de polymère, par une attaque à court distance par des contaminants, tels que l'oxygène, ou par l'attaque à plus long distance de la chaîne principale par des processus tels que l'hydrolyse.

Dégradation mécanique : décrit la rupture des molécules dans un écoulement ou elles subissent des forces de cisaillement élevées. Dans ces cas il y a rupture des chaînes moléculaires provoquant une baisse de la viscosité. Cet effet est important dans le réservoir près du puits (et également dans certains des appareils de maintenance, etc.).

Dégradation biologique : se rapporte à la rupture microbienne des macromolécules par des bactéries pendant le stockage ou dans le réservoir. Elle est importante seulement à basses températures ou en l'absence des biocides efficaces. L'utilisation de biocides peut affecter l'efficacité d'autres adjuvants.

Dans la dégradation chimique des polymères, deux processus distincts peuvent être envisagés.

L'un concerne l'attaque active de la molécule de polymère par des contaminants, des additifs ou d'autres composants présents dans les fluides injectés, par exemple l'oxygène, fer, etc.

Deuxièmement, il y a l'instabilité intrinsèque de la molécule, même en l'absence de l'oxygène ou de toute autre espèce attaquante ; à cet égard, l'hydrolyse est très importante pour des polyacrylamides et des xanthanes, et pour d'autres molécules encore.

Le besoin d'un tel essai également augmente de manière significative si les températures sont supérieures à 85°C, et la stabilité à très long terme est exigée dans l'application de champ (sup. à 2 ans). Dans l'un ou l'autre cas, les conditions exactes de l'essai de stabilité de polymère devraient être assurées.

Une compréhension des mécanismes de dégradation donne une indication sur les voies de modification ou de "renforcement" de la macromolécule.

L'objectif avec des polymères synthétiques est de s'assurer que les spécifications à la base de la conception du polymère sont encore acceptables après le processus de cisaillement simulé dans le réservoir. Si la solution synthétique de polymère s'avère acceptable dans de telles conditions, alors des essais plus poussés tel qu'adsorption/rétention et in-situ rhéologie doivent être effectués sur le polymère pré-cisillé.

4.2 La génération de données concernant le balayage du Plug par la solution de polymère

Ces données sont essentielles car elles peuvent être utilisées directement (ou indirectement) dans les études de simulations pour évaluer la viabilité du PF.

Les essais dans cette catégorie sont effectués seulement sur les solutions de polymère qui ont été très prometteuses dans les essais de sélection décrits ci-dessus.

Il est très important d'effectuer ce type d'expériences d'une façon très soignée et avec une grande attention apportée au détail. La solution polymérique doit être rigoureusement identique à la solution qui agirait au fin fond de la formation à savoir qu'elle doit être filtrée, bien dispersée, sans aucun micro-gel etc. La solution à utiliser n'est donc pas la même que celle qui doit être injectée!

Les essais principaux portent sur :

adsorption/rétention et le degré de réduction de perméabilité.

Rhéologie *in-situ*

Paramètres de transport

Les données d'adsorption/rétention sont les plus critiques au vu de leur impact sur l'efficacité de récupération par PF, et le plus grand soin devrait être pris en effectuant ces balayages.

Rhéologie in-situ informe sur la relation entre la viscosité apparente du polymère dans un milieu poreux et le débit.

Mesure des paramètres de transport: c'est principalement la mesure du volume de pore inaccessible ou exclus au polymère par rapport au traceur utilisé. D'autres mesures concernent le coefficient de dispersion du polymère, et les paramètres de digitalisation.

A noter que dans chacune des trois expériences à savoir l'adsorption, la rhéologie in-situ et paramètres de balayage les essais peuvent être réalisées sur le même plug.

4.3 Les expériences de déplacement du système polymère/huile

Ce troisième type d'expérience informe sur l'efficacité du déplacement d'huile par la solution de polymère et il est habituellement effectué seulement dans les systèmes linéaires courts (1D). L'efficacité éventuelle dans la récupération d'huile observée dans cet essai ne peut pas être étendue à tout le gisement. Il existe des problèmes dans l'interprétation des résultats obtenus et leur extension à tout le gisement n'est pas représentative.

Dans des conditions hétérogènes, l'étude de déplacement en 1D ne peut pas être d'un grand secours. Des études menées sur des couches 2D bien caractérisées sont plus représentatives quoique encore limitées. Dans ce cas-ci, la simulation sur ordinateur serait employée pour étudier les mécanismes dans des systèmes multicouches plus complexes.

Récapitulatif des expériences.

Un programme expérimental complet à l'appui d'un PF a été décrit dans cette section comprenant :

La sélection de polymère et l'étude des compatibilités**La production de données concernant le balayage du Plug par la solution polymérique****Les expériences de déplacement du système polymère/huile**

Les essais des deux premières catégories sont plus importants que les expériences de déplacement d'huile.

Cependant, il est possible d'effectuer une évaluation plus restreinte en laboratoire en omettant selon la nécessité certains essais. En effet, pour des cas où on pense que le polymère fonctionnerait par contrôle d'hétérogénéité, il n'y a aucun point à étudier des déplacements huile 1D dans des plug du réservoir.

La majeure partie des essais de sélection peut être effectuée rapidement et facilement, et ces essais doivent être pratiquement toujours être exécutés; particulièrement les essais de dissolution de polymère, les études de vieillissement à court terme et les essais de filtrabilité.

La stabilité chimique à long terme du polymère doit être soigneusement évaluée, particulièrement aux températures supérieures à 85°C. La stabilité mécanique est en général importante seulement pour les polymères synthétiques et, dans ces cas-ci le polymère pré-cisaillé (presheared) devrait être employé dans toutes les évaluations suivantes telles que l'adsorption, la rhéologie *in-situ*, etc.

Dans les études de balayage, les essais les plus importants sont les essais d'adsorption/rétention et de la réduction correspondante de perméabilité. La rhéologie *in-situ* est après cela l'essai le plus important en termes de données de simulation.

Il y a lieu de mentionner pour finir que les travaux simulations par ordinateur constituent une partie très importante de l'étude du projet PF, et plusieurs problèmes peuvent être étudiés et clarifiés par une simulation appropriée.

Des simulations basées sur différents cas peuvent être réalisées. En effet, les simulations aident à indiquer quelles peuvent être les valeurs acceptables de divers paramètres, par exemple jusqu'à quel point l'adsorption peut être acceptable, et, dans d'autres cas, les simulations peuvent donner des indications sur par exemple la viscosité optimale de la solution injectée de polymère

Le but final de la partie simulation de l'étude de projet PF est de produire des prévisions fiables des scénarios possibles de balayage par des solutions polymériques dans la zone prévue.

Les estimations des profils de récupération du PF/ huile récupérée peuvent alors être utilisés pour la conception du projet PF et pour réaliser des études économiques afin d'évaluer les stratégies de balayage les plus attrayantes.

Par exemple, il y aura probablement une taille optimale du slug de polymère à utiliser dans le balayage, qui sera un équilibre entre la quantité optimale de polymère à utiliser pour produire un effet observable de récupération d'huile, et la quantité minimale d'huile à récupérer.

Ces travaux de simulation pourront au besoin être menés avant qu'ils ne soient alimentés par les résultats expérimentaux des essais menés avec les polymères. Les bases de données disponibles sont très nombreuses et les programmes de simulation facilement accessibles (freeware).

CONCLUSION

Bien que la récupération d'huile par polymères reste relativement minime comparativement aux autres méthodes de récupération, il n'en demeure pas moins qu'elle représente une alternative intéressante ; l'exemple de Daqing en Chine entre autres en est la parfaite illustration.

Il est essentiel de procéder avec la plus grande minutie à la sélection et à l'étude des polymères à utiliser. La communauté des polyméristes en Algérie est parfaitement outillée

pour mener à bien dans un premier temps tous les essais et analyses décrits dans le présent document ; elle pourrait éventuellement contribuer dans un second temps à la synthèse et mise en œuvre de polymères à structure définie selon les impératifs imposés par les conditions d'utilisation.

BIBLIOGRAPHIE

Sorbie, K. S. « Polymer Improved Recovery» Ed. Blackie, 1991

Green,D.W and Paul Willhite,G; “Enhanced Oil Recovery”, SPE Textbook Series Vol.6;1998

Shalaby, S.W; McCormick,C.L. and Butlerr,G.B. “Water-Soluble Polymers”; ACS Symposium Series 467; 1991.