

Effet de l'ajout de polyanionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie)

Khaled Benyounes^a, Adel Benchabane^b & Abderrahmane Mellak^a

^(a) Université de Boumerdès, Avenue de l'indépendance Boumerdès 35000 (Algérie)
E-mail : khaled_benyounes@yahoo.fr

^(b) Institut de Mécanique des Fluides et des Solides, IMFS UMR CNRS-ULP 7507
2 rue Boussingault 67000 Strasbourg

Résumé :

Nous étudions l'effet de l'ajout de carboxyméthylcellulose de sodium (CMC) et de chlorure de potassium (KCl) sur le comportement rhéologique d'une suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). Des tests rhéologiques ont mis en évidence l'influence du polymère et du KCl sur son comportement en écoulement. Les tests rhéologiques réalisés sur la suspension de bentonite ont révélé un comportement rhéoépaississant à seuil de type Herschel-Bulkley. Ainsi, il a été montré que le comportement rhéologique de la solution de CMC domine le comportement des mélanges argile-polymère. L'ajout de KCl provoque une augmentation de la viscosité et de la contrainte seuil expliquée par l'agrégation des particules argileuses due à la compression de la double couche électrique.

Abstract:

The aim of this paper is to investigate the effect of addition of carboxymethyl cellulose (CMC) and potassium chloride (KCl) on the rheological behavior of bentonite suspension. The rheological measurements were carried out on the bentonite suspension and showed a shear thickening behavior with a yield stress. It was observed that the polymer solution dominates the rheological behavior of the clay-polymer mixture. The addition of KCl induces an increase in viscosity and yield stress explained by the particle aggregations due to the electrical double-layer compression.

Mots-clefs :

Rhéologie ; bentonite ; additif

1 Introduction

L'opération de forage constitue une phase clef dans l'exploitation des gisements d'hydrocarbures. Cette technique est en évolution, aussi bien en ce qui concerne l'outil de forage que le fluide injecté. Le succès du forage d'un puits dépend essentiellement du bon choix du fluide de forage utilisé. L'optimisation d'une bonne formulation d'une boue de forage permet de réduire d'une manière significative le coût global d'un forage. A cet effet, la boue est choisie en fonction de la nature de la formation, de l'architecture du puits, des objectifs de sondage et des contraintes environnementales et économiques [Cartalos et al. (1997)].

Dans le but de préserver l'environnement, on utilise souvent des boues de forage à base d'eau. Elles sont constituées principalement d'argile, de polymères et d'électrolytes. Ainsi, la compréhension de l'effet de chaque composant sur les caractéristiques rhéologiques de la boue s'avère impérative pour assurer le bon déroulement du forage. Le but de ce travail est double :

(i) La valorisation de la bentonite de Maghnia (Algérie), utilisée souvent dans la composition des fluides de forage dans les champs pétroliers algériens. Ce choix est motivé par

l'intention de combler le vide observé dans la littérature en terme de caractérisation rhéologique des suspensions à base de cette argile.

(ii) La mise en évidence de l'effet d'un polymère anionique (carboxyméthylcellulose de sodium, CMC) et d'un électrolyte (chlorure de potassium, KCl) sur le comportement rhéologique de cette bentonite. Ainsi, ce travail servira de base pour une prochaine étude traitant le comportement rhéologique du système "eau-bentonite-CMC-KCl".

2 Matériaux et appareillages

L'argile utilisée est une bentonite de forage de Maghnia (ouest d'Algérie) commercialisée par la société Bental. La composition chimique de cette bentonite est indiquée dans le tableau 1.

Les additifs utilisés sont :

(i) Le CMC, un polymère anionique hydrosoluble d'une chaîne moléculaire dérivant de la cellulose. Suivant le degré de substitution et la masse moléculaire, la solution aqueuse de CMC se présente sous trois formes : Grande, moyenne et faible viscosité. Dans une boue de forage, le CMC se comporte comme un élément viscosifiant, mais il joue surtout le rôle d'un réducteur de filtrat [Clasen et Kulicke (2001), Benchabane (2006)]. Le CMC utilisé est commercialisé par Sigma-Aldrich, sa masse moléculaire est 7.105 mol/g (Grande viscosité) et son degré de substitution varie entre 0,65 et 0,85.

(ii) L'électrolyte choisi est le chlorure de potassium, KCl (VWR Prolabo), d'une pureté de 99.90%. Ce type de sel est utilisé souvent dans la formulation des boues de forage comme un inhibiteur de gonflement d'argile [M'bodj et al. (2004)].

Toutes les mesures rhéologiques ont été effectuées à l'aide d'un rhéomètre à contrainte imposée (AR 2000) à une température maintenue constante à 20°C. Les géométries utilisées sont : (i) un système couette (rayons interne et externe de 14 et 15mm) pour les solutions de CMC, et (ii) une vane (rayons interne et externe de 14 et 15mm, avec une hauteur d'immersion de 42mm) pour les suspensions de bentonite et les mélanges bentonite-additif. Et afin d'éviter l'évaporation au cours des manipulations, le dispositif de mesure a été placé dans une ambiance saturée en vapeur d'eau.

3 Mode préparatoire

Le mode de préparation des mélanges est d'une importance considérable sur leur comportement rhéologique. Les échantillons étudiés sont préparés de la façon suivante :

(i) Suspension de bentonite : Dans un premier temps, une quantité d'eau déminéralisée, préalablement déterminée, est soumise à une agitation magnétique. La bentonite, à la concentration voulue, est alors versée par petites quantités dans cette eau pour éviter la formation d'agrégats. Pour assurer une bonne homogénéisation, la suspension obtenue est soumise à une agitation magnétique continue pendant 24 heures.

(ii) Mélange de bentonite-polymère : De la même manière que nous venons de décrire, on prépare simultanément une suspension de bentonite et une solution de CMC aux concentrations voulues. Après 24heures d'agitation, la solution de CMC est ajoutée à la suspension de bentonite. Le mélange ainsi obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures.

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
[%]	60.53	17.41	2.06	0.82	7.63	9.62	1.23	0.03

Tableau 1 : Composition de la bentonite utilisée

(iii) Mélange bentonite-KCl : Après 24 heures d'homogénéisation de la suspension de bentonite, on ajoute la quantité voulue de chlorure de potassium. L'ensemble est agité durant 24 heures. Notons qu'avant chaque test rhéologique le mélange est agité 1 heure.

Par ailleurs, nous avons montré dans la littérature que le pH d'une suspension argileuse est un paramètre déterminant de l'état structural de la suspension [Luckham et Rossi (1999)], donc un changement de pH modifiera la structure de la suspension et par conséquent, de son comportement rhéologique. Le contrôle systématique du pH des suspensions de bentonite (sans et avec additif) a révélé la nature basique de ces systèmes (pH entre 9,5 et 10,5). Dans ce cas, les faces et les bords des particules argileuses sont chargés négativement et le contact entre les particules argileuses est assuré principalement par les liaisons face-face [Benchabane et Bekkour (2006)].

4 Résultats et discussion

Après la mise en place de l'échantillon (suspension de bentonite, solution de polymère ou mélanges bentonite-additif) sous la géométrie de mesure, on lui applique une rampe montante en contrainte imposée ($\sim 0,033$ Pa/s). Nous présentons ci-dessous les résultats relatifs à chaque type de mélange :

4.1 Suspensions de bentonite

Les rhéogrammes relatifs aux différentes concentrations de suspensions de bentonite (1, 2, 3, 4 et 5%) sont représentés sur la figure 1. Conformément à ce qu'on trouve dans la littérature [Benchabane (2006)], la figure montre que le comportement rhéologique de la bentonite de Maghnia peut être décrit par le modèle de Herschel-Bulkley (éq. 1) notamment pour les fortes vitesses de cisaillement.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

où : K est la consistance et n l'indice d'écoulement.

On remarque qu'à partir de 3% d'argile, le comportement non-newtonien des suspensions de bentonite devient plus visible. Ce comportement, rhéoépaississant (indice $n > 1$) à seuil, se confirme et se renforce avec la concentration de la bentonite. On constate également que l'écoulement des suspensions à 4, 5 et 6% de bentonite n'aura lieu que lorsque la contrainte dépasse un certain seuil.

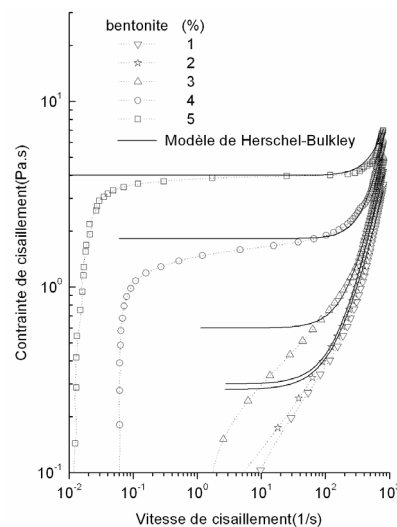


FIG. 1 – Rhéogrammes de la suspension de bentonite de Maghnia à différentes concentrations (de 1 à 5%).

Ceci s'explique par le réseau tridimensionnel ouvert créé par l'encombrement des particules d'argile. Dans ce système, basique et concentré, la liaison face-face est la plus favorisée [Durán et al. (2000), Benchabane et Bekkour (2006)]. Au dessus de la valeur de la contrainte seuil, on obtient la destruction de la structure du fluide, et par conséquent, l'écoulement de la suspension.

Pour étudier l'effet des additifs (CMC et KCl) sur le comportement rhéologique des suspensions argileuses, nous avons choisi de fixer la concentration de bentonite à 3%. Cette concentration moyenne, utilisée dans la formulation des boues de forage, permet de mettre en évidence l'effet de chaque additif sur la suspension de bentonite. Nous commençons ci-dessous par la mise en évidence du comportement des solutions de CMC seul.

4.2 Solution de CMC

Nous avons représenté sur la figure 2 les courbes d'écoulement de la suspension de bentonite de référence (3%) et la solution de CMC à différentes concentrations (entre 0,1% et 0,5% de CMC). On remarque une augmentation de la viscosité en fonction de la concentration de polymère. Le comportement rhéologique de la solution de CMC peut être décrit d'une manière satisfaisante par le modèle de Cross :

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^m} \quad (2)$$

où η_0 est la viscosité à cisaillement nul, η_{∞} est la viscosité à cisaillement infini et λ est un temps caractéristique de relaxation.

On note également le caractère rhéofluidifiant et l'absence de la contrainte seuil sur les solutions de CMC étudiées (fig. 2). Ceci est en accord avec des résultats déjà établis dans la littérature en utilisant d'autres géométries (cône-plan) [Benchabane et Bekkour (2006)].

4.3 Mélange bentonite –CMC

L'effet de l'ajout de CMC sur les propriétés rhéologiques de la suspension de bentonite (3%) est montré dans la figure 3. On observe une augmentation de la viscosité apparente en

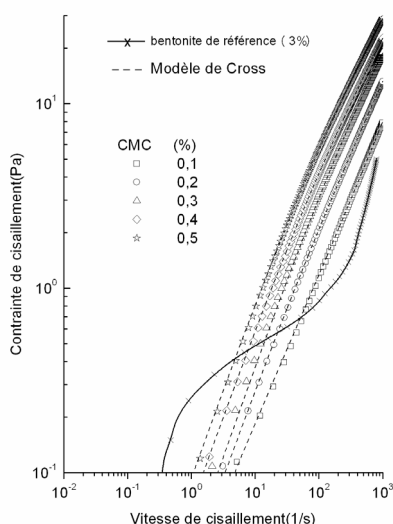


FIG. 2 – Rhéogrammes de la suspension de bentonite de référence (3%) et la solution de CMC à différentes concentrations.

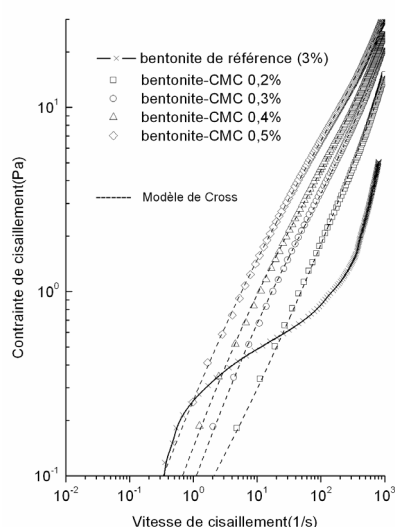


FIG. 3 – Rhéogrammes de la suspension de bentonite de référence (3%) et des mélanges bentonite-CMC.

fonction de la concentration de CMC. A cisaillement égal, et pour la même concentration de polymère, la viscosité apparente du mélange bentonite-CMC reste toujours supérieure à la viscosité de la solution de polymère (figs. 2 et 3). On remarque également sur la figure 3 la disparition de la contrainte seuil sur tous les mélanges bentonite-CMC, à cause de la flexibilité de CMC. Ce résultat est en parfait accord avec des résultats établis dans la littérature en utilisant une bentonite de laboratoire [Benchabane (2006)].

A noter que ces résultats obtenus sur le système "eau-bentonite-CMC, à savoir : la disparition de la contrainte seuil, l'augmentation de la viscosité et la diminution de l'indice de l'écoulement, renforcent l'hypothèse rapporté dans la littérature sur le fait que c'est le comportement du polymère anionique qui domine dans un tel mélange [Benchabane (2006), Benchabane et Bekkour (2006)].

4.4 Mélange bentonite –KCl

Nous présentons sur la figure 4 l'effet de KCl sur la suspension de bentonite de référence. La figure montre que la présence de KCl augmente la viscosité et la contrainte seuil du mélange jusqu'à une concentration critique de 3% de KCl. A partir de cette concentration, le comportement devient quasi-stable.

Notons que le saut de la vitesse de cisaillement, observé à faibles cisaillements sur la figure, est obtenu également sur les géométries de mesure de type couette et cône-plan (nous ne présentons pas dans cet article ces mesures). Nous pensons que ce phénomène, répétitif sur toutes les géométries citées, est probablement dû à la nature des agrégats dans le mélange.

En effet, nous trouvons dans la littérature que l'augmentation de la contrainte seuil est liée à l'évolution de l'agrégation des particules argileuses [M'bodj et al. (2004)]. Cette agrégation est causée par la diminution des forces répulsives due à la compression de la double couche électrique. Lorsqu'on augmente la concentration de KCl, l'agrégation se renforce dans le système et des paquets de particules rigides sont formés. Ce rapprochement progressif des particules argileuses favorise la réorganisation des particules en un réseau tridimensionnel où les associations de type face-face sont dominantes [Durán et al. (2000), M'bodj et al. (2004), Benchabane (2006)].

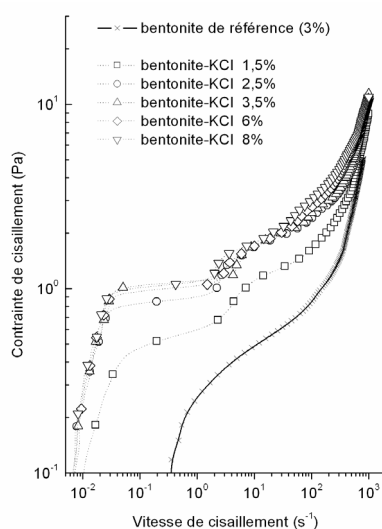


FIG. 4 – Rhéogrammes de la suspension de bentonite de référence (3%) et du mélange bentonite-KCl à différentes concentrations d'électrolyte (de 1,5 à 8%).

5 Conclusions

Nous avons étudié l'effet de l'ajout de carboxyméthylcellulose de sodium (CMC) et de chlorure de potassium (KCl) sur le comportement rhéologique d'une suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). Il s'agit d'un travail préliminaire pour la compréhension du comportement rhéologique du système "eau-bentonite-CMC-KCl". Cela rentre dans le cadre d'une valorisation de la bentonite de Maghnia (Algérie), utilisée souvent dans la composition des fluides de forage dans les champs pétroliers algériens.

Les différents tests rhéologiques réalisés dans ce travail ont permis de mettre en évidence le comportement rhéoépaississant à seuil de la suspension de bentonite étudiée. Le modèle de Herschel-Bulkley a été utilisé pour modéliser le comportement rhéologique de la suspension d'argile à différentes concentrations. Il a été montré que l'ajout de CMC dans la suspension de bentonite de référence (3% d'argile) change considérablement son comportement rhéologique. On a pu remarquer une disparition de la contrainte seuil sur le mélange bentonite-CMC, et surtout un rapprochement vers un comportement rhéofluidifiant. Ce comportement obtenu, très proche de celui de la solution de CMC, a été reproduit d'une manière satisfaisante par le modèle de Cross. Ce résultat confirme l'explication rapportée dans la littérature sur la dominance du comportement du polymère dans le mélange bentonite-polymère anionique [Benchabane (2006)]. Par ailleurs, nous avons montré que l'ajout du KCl à la suspension de référence provoque une augmentation de la viscosité et de la contrainte seuil. Ce phénomène a été discuté en se basant sur la littérature qui l'explique par une agrégation des particules d'argile due à la compression de la double couche électrique.

Références

- Benchabane, A. 2006 Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg, p. 169.
- Benchabane, A. & K. Bekkour 2006 Effects of anionic additives on the rheological behavior of aqueous calcium montmorillonite suspensions. *Rheologica Acta*. **45**, 425-434.
- Cartalos, U., P. Baylocq, J. Lecourtier & J.-M. Piau 1997 Caractérisation rhéologique et modélisation structurelle des systèmes argile-polymère. *Oil & Gas Science and Technology*. **52**, 285-297.
- Clasen, C. & W.-M. Kulicke 2001 Determination of viscoelastic and rheo-optical material functions of water-soluble cellulose derivatives. *Progress in Polymer Science*. **26**, 1839-1919.
- Durán, J. D. G., M. M. Ramos-Tejada, F. J. Arroyo & F. Gonzalez-Caballero 2000 Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*. **229**, 107-117.
- Luckham, P. F. & S. Rossi 1999 Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*. **82**, 43-92.
- M'bodj, O., N. K. Ariguib, M. T. Ayadi & A. Magnin 2004 Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay-water-electrolyte-xanthan. *Journal of Colloid and Interface Science*. **273**, 675-684.