



MEMOIRE DE MAGISTER

Ecole Doctorale : Science et ingénierie: Matériaux-Structure et environnement

Spécialité : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Matériaux de structure

Par : Mr GUECIOUER Abderazak

SUR LE THEME :

***ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE POLYMERES
ET DES SELS SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE
DES BOUES DE FORAGE A BASE D'EAU.***

Devant le jury composé de :

Mr BOUCENNA.A	Professeur	U.M.B.B	Président
Mr BENMOUNAH.A	Maître de conférences	U.M.B.B	Rapporteur
Mr BENCHABANE. A	Maître de conférences	U.Biskra	Examineur
Mr SAFRI .A	Maître de conférences	U.S.T.H.B	Examineur
Mr BENTRIOU .A	Maître de conférences	U.M.B.B	Examineur

Avant propos

Ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites (LMMC) de la Faculté des Science de l'Ingénieur de l'Université M'hamed Bougara Boumerdès.

Tout d'abord j'adresse de vifs remerciements à Monsieur M^{ed}. T.ABADLIA, directeur du LMMC/FSI .

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon promoteur Monsieur Abdelbaki BENMOUNAH, Maître de conférence, responsable du laboratoire de Rhéologie, du Laboratoire des Matériaux Minéraux et Composites (LMMC), Université de Boumerdès, pour avoir dirigé ce travail et également pour les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer. Je suis heureux de pouvoir lui exprimer mes plus sincères remerciements.

Je remercie particulièrement Monsieur R.KHERIBE qui m'a aidé dans la rédaction de la partie expérimentale avec une parfaite maîtrise et une bienveillante attention. Ce travail n'existerait pas sans son aide et sa bienveillance.

Je remercie l'ensemble des membres du jury. Mes sincères remerciements à Mr BOUCENNA.A, président de jury. Je suis extrêmement reconnaissant envers Mr BENCHABANE. A, SAFRI .A et BENTRIOU .A, pour avoir accepté d'être examinateurs de ce manuscrit.

Mes remerciements vont également à tous les membres de l'équipe de la rhéologie de laboratoire (LMMC).

Je dédie ce travail à mes parents, mes frères et mes sœurs.

A ma fiancée.

Résumé

Résumé :

Le développement dicté par la demande accrue en pétrole et gaz, contraint les prospecteurs et les foreurs à adapter leur matériel pour le forage des différentes formations géologiques (sables, argiles, grés...etc). Les résultats d'un forage dépendent essentiellement des propriétés et des caractéristiques physicochimiques de la boue (boue à huile, à l'eau et émulsionnée...etc).

Les contraintes environnementales sur les bourbiers, obligent les foreurs à s'orienter vers l'utilisation des boues écologiquement plus saines.

Cependant les recommandations gouvernementales sont orientées sur les formulations des boues à l'eau plus écologiques, cette exigence tend à se généraliser sur les différents sites pétroliers.

Les boues locales ont été préparées à différentes concentrations et natures de polymères (CMC, PAC R et Xanthane) , de sels (KCl, NaCl et CaCl₂) et de NaOH. Le comportement rhéologique des différents systèmes obtenus a été étudié.

Les systèmes de boues ainsi préparés sont caractérisés par la méthode zétamétrique. Les résultats ont montré, que les écoulements correspondants à ces systèmes sont rhéofluidifiant et présentent une bonne stabilité. Les courbes d'écoulements des systèmes de boues obtenues suivent parfaitement les corrélations du modèle d'Herschel-Bulkley et de Cross.

Abstract:

The development dictated by the demand increased in oil and gas, bring the prospectors and the borers to adapt their material for the boring of different geological formations (sands, clays, sandstone...etc). The results of drilling essentially depend on the properties and the characteristic physicochemical of the mud (Oil base mud, water base mud and emulsified...etc).

The environmental constraint on the mud pits, oblige the borers to move toward the use of the ecologically mud healthier.

However the governmental recommendations are oriented on the formulations of the more ecological water base mud, this requirement has the tendency to become widespread on the different oil sites.

The local muds have been prepared to different concentrations and natures of polymers (CMC, PAC R and Xanthane), of salts (KCl, NaCl and CaCl₂) and of NaOH. The rheological behavior of different systems gotten has been studied.

The systems of muds thus prepared are characterized by the zetametric method. The results showed, that the outflows corresponding to these systems are rheo thinner and present a good stability. The outflows curves of the muds systems gotten perfectly follow the interrelationships of the model of Herschel-Bulkley and Cross.

المخلص:

إن الطلب المتزايد على النفط والغاز ، يجبر المنقبين والحفارون على التكيف مع معداتهم لحفر التكوينات الجيولوجية المختلفة (الرمال ، الطين والحجر الرملي.... الخ). إن نتائج الحفر تعتمد أساسا على الخصائص والميزات الفيزيائية والكيميائية للمميع (مميع الحفر التي تحتوي على الزيت, مميح الحفر التي تحتوي على الماء و مستحلب معكوس... الخ).

القيود البيئية على المستنقعات الزيتية الناتجة عن الحفر, يضطر الحفارون إلى استخدام مميح أكثر سلامة على البيئة.

ومع ذلك, التوصيات الحكومية موجهة إلى استخدام تركيبات مميحات الحفر التي تحتوي على الماء أكثر إيكولوجية, هذا الشرط يميل إلى التعميم حول المواقع النفطية المختلفة.

سوائل الحفر المحلية أعدت بتركيزات وأنواع بوليمرات مختلفة (Xanthane و PAC R ,CMC), أملاح (NaCl ، KCl ، وCaCl₂ وNaOH)، السلوك الريولوجي لمختلف النظم المتحصل عليها تم دراسته.

إن نظم مميحات الحفر التي أعدت, تم تمييزها بطريقة قياس الزيتا متر. وأظهرت النتائج أن التدفقات المقابلة لهذه النظم هي Rhéofluidifiant و تظهر استقرار جيدا. منحنيات التدفق للنظم المتحصل عليها اتبعت تماما ارتباطات نموذج Cross و Herschel-Bulkley.

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Classification des phyllosilicates.

Tableau IV.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et peaver, 1988).

Tableau IV.3 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (MOREL).

Tableau V.1 : Groupes polaires.

Tableau V.2 : Résumé des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.

Tableau V.3 : Certain groupes non polaires et polaires qui peuvent être incorporés dans une molécule de surfactant.

Tableau V.4 : Types et fonctions des polymères dans les fluides de forage.

Tableau VII.1 : Composition chimique de la bentonite locale.

Tableau VIII.1 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3% .

Tableau VIII.2 : Comportement de stabilité du colloïde en fonction de potentiel zêta.

LISTE DE FIGURES

Partie bibliographique

- Fig. II.1 :** Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.
- Fig.III.1 :** Contrainte relative de différent types de la matière en fonction de temps de relaxation.
- Fig.III.2 :** Différents types de cisaillement.
- Fig.III.3:** Profil de viscosité typique pour une dispersion ou solution de polymère.
- Fig.III.4:** Viscosité en fonction de taux du cisaillement de différents paramètres «C» et «m».
- Fig. IV.1 :** Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).
- Fig. IV.2 :** Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988).
- Fig. IV.3 :** l'agencement des tétraédrites et des octaèdres (Moore et Reynolds 1989).
- Fig. IV.4 :** Exemple de minéral argileux à structure 1/1 : kaolinite (White, 1999).
- Fig. IV.5 :** Représentation d'une smectite (White, 1999).
- Fig. IV.6 :** Chlorite (White, 1999).
- Fig. IV.7 :** Argiles fibreuses (chamley ,1989).
- Fig. IV.8 :** Forme des particules argileuses (Velde, 1995).
- Fig. IV.9 :** Surface des particules argileuses.
- Fig. IV.10 :** Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995).
- Fig. IV.11 :** Adsorption à l'équilibre (Schroeder, 2002).
- Fig. IV.12 :** Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).
- Fig. IV.13 :** Représentation de la structure cristalline d'une smectite hydratée et représentation simplifiée des tétraèdres et octaèdres par Sandrine PAUMIER.
- Fig. IV.14 :** Formes d'organisation supposés des feuillets de montmorillonite en suspension selon la théorie de Van Olphen : A. dispersion, B. association face/face, C. association bord/face, D. association bord/bord.
- Fig. IV.15 :** Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de bentonite(smectite) de l'état sec aux suspensions diluées puis concentrées proposée par PAUMIER.
- Fig. V.1 :** Effet de concentration d'électrolyte sur la configuration de polymère.
- Fig. V.2 :** Effet de concentration sur la viscosité d'un polymère soluble à l'eau et à poids moléculaire faible et élevé.

Fig. V.3 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible poids moléculaire et le rôle de floculation des polymères à haut poids moléculaire.

Fig. V.4 : Glucose.

Fig. V.5 : Lien glucosique entre les unités du glucose.

Fig. V.6 : Structure de la cellulose.

Fig. V.7 : Structure du carboxyméthylcellulose.

Fig. V.8 : Structure d'hydroxyéthylcellulose.

Fig. V.9 : Structure probable de l'unité répétitive de la gomme de xanthane à structure ramifiée complexe.

Fig. V.10 : Structure probable de l'unité répétitive de la gomme GUAR.

Fig. V.11 : Structure de PHPA.

Fig. VI.1 : Energie d'interaction totale en fonction de la distance interparticulaire.

Fig. VI.2 : Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), floculé (B) et coagulé (C) [Yang et al. (1997)].

Fig. VI.3 : Double couche électrique.

Fig. VI.4 : Schéma de la double couche électrique.

Fig. VI.5 : Schéma illustrant les origines des forces d'attraction Van der Waals.

Fig. VI.6 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale stable.

Fig. VI.7 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale instable manifestant une floculation à un niveau élevé d'électrolytes.

Fig. VI.8 : Schéma représente les mécanismes d'adsorption des polymères sur les argiles.

Fig. VI.9 : Diagramme de la position de la face de cisaillement dans une double couche diffuse.

Partie expérimentale

Fig. VII.1 : Image du viscosimètre Thermo HAAKE VT 550.

Fig. VII.2 : Zitamètre du type Zetasizer 2000 de Malvern Instruments.

Fig. VII.3 : Image du granulomètre MASTER SIZER 2000.

Fig. VII.4 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale.

Fig. VIII.1 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

Fig. VIII.2 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

Fig. VIII.3 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de la température d'une suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.4 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents sels.

Fig. VIII.5 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents sels.

Fig. VIII.6 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différents sels d'une suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.7 : Effet de la d'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.8 : Effet de la d'alcalinité sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.9 : Effet de la d'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.10 : Effet de la d'alcalinité sur la contrainte de seuil, le coefficient de consistance et l'indice d'écoulement de la suspension de bentonite 3%.

Fig. VIII.11 : Effet de la concentration de la bentonite sur le potentiel zêta.

Fig. VIII.12 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

Fig. VIII.13 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

Fig. VIII.14 : Effet de la concentration de CMC sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.

Fig. VIII.15 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

- Fig. VIII.16** : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement à l'échelle logarithmique.
- Fig. VIII.17** : Effet de la température sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.
- Fig. VIII.18** : Effet du sel sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.
- Fig. VIII.19** : Effet du sel sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.
- Fig. VIII.20** : Potentiel zêta en fonction de la concentration de CMC.
- Fig. VIII.21** : Effet de la concentration de PAC R sur la contrainte de cisaillement de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.22** : Effet de la concentration de PAC R sur la viscosité de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.23** : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.24** : Effet de la température sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.25** : Effet de l'ajout des sels sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.26** : Effet de l'ajout des sels sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.27** : Potentiel zêta en fonction de la concentration de PAC R.
- Fig. VIII.28** : Potentiel zêta en fonction de la concentration de polymère.
- Fig. VIII.29** : L'état de CMC et de PAC R lors d'hydratation, dans le cas (Eau –polymère).
- Fig. VIII.30** : (a) Effet de la concentration sur la viscosité de CMC et PAC R, (b) Effet de la température sur la viscosité de la suspension de CMC et PAC R.
- Fig. VIII.31** : Effet de la concentration de xanthane sur la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.32** : Effet de la concentration de xanthane sur la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.33** : Effet de la température sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.34** : Evolution de la contrainte de cisaillement de différentes concentrations de xanthane sur la température en fonction du taux de cisaillement.

- Fig. VIII.35 :** Evolution de la viscosité apparente de différentes concentrations du xanthane sur la température en fonction du taux de cisaillement.
- Fig. VIII.36 :** Effet des sels sur la contrainte de cisaillement du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.37:** Effet des sels sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.38 :** Potentiel zêta en fonction de la concentration de Xanthane.
- Fig. VIII.39 :** Effet de l'ajout de CMC sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.40 :** Effet de l'ajout de CMC sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.41 :** Effet de l'ajout de PAC R sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.42 :** Effet de l'ajout de PAC R sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.43 :** Comparaison entre la contrainte de cisaillement de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.44 :** Comparaison entre la viscosité de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.45 :** Comparaison entre le potentiel zêta de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R).
- Fig. VIII.46 :** Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.47 :** Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.48 :** Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.49 :** Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.50 :** Effet de NaOH sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.51 :** Influence de l'ajout de PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite.

- Fig. VIII.52** : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.53** : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.54** : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.55** : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.56** : Effet de NaOH sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.57** : Effet de NaOH sur la viscosité apparente de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Fig. VIII.58** : Potentiel zêta en fonction de (Bentonite – CMC), (bentonite – PAC R) et (bentonite – xanthane).

Liste des symboles

σ_{yx} : Contrainte de cisaillement (Pa).	ϕ : Potentiel entre le noyau et la couche fixe.
F : Force (N).	ξ : Potentiel Zêta.
A : Surface (m ²).	
$\dot{\gamma}$: Taux de cisaillement (S^{-1}).	
η_a : Viscosité apparente (Pa.s).	
τ : Contrainte de cisaillement (Pa).	
U_N : Viscosité newtonienne (Pa.s).	
τ_0 : Contrainte seuil (Pa).	
μ_∞ : Viscosité infinie (Pa.s).	
K : Coefficient de la consistance.	
n : Indice de la loi puissance.	
τ_c : Contrainte d'Herschel (Pa).	
η_0 : Viscosité au cisaillement zéro.	
η_∞ : Viscosité à l'infini de cisaillement.	
m : Constante de taux de Cross.	
C : Constant du temps de Cross.	
V_R : Potentiel répulsif.	
V_A : Potentiel est attractif.	
V_T : Potentiel total.	
ρ : Densité de contre-ions.	
k_B : Constante de Boltzman.	
T : Température absolue.	
Ψ_S : Potentiel de Stern.	
H : Distance entre les centres des deux particules.	
e : Charge de l'électron.	
χ : Longueur réciproque de Debye.	
A : Constante de Hamaker.	
t : Epaisseur du feuillet d'argile.	
E : Potentiel électrocinétique.	

Table des matières

Avant propos	i
Résumé	ii
Introduction générale	01
Partie théorique	03
Chapitre I : Généralités sur le forage des puits du pétrole et de gaz	03
I.1. Historique.....	03
I.2. Introduction générale.....	03
Chapitre II : Notions sur les fluides de forage	05
II.1. Généralités.....	05
II.1.1.Introduction.....	05
II.1.2. Définition de fluide de forage.....	05
II.1.3. Principales fonctions des fluides de forage.....	05
II.1.3.1. Contrôle de la pression	06
II.1.3.2. Stabilisation de la formation rocheuse exposée	06
II.1.3.3. Flottabilité	07
II.1.3.4. Lubrification et refroidissement.....	07
II.1.3.5. Autres fonctions.....	07
II.1.4. Circulation du fluide de forage.....	07
II.2. Classification des fluides de forage.....	08
II.2.1. Les fluides de forage à base d'huile.....	08
II.2.2. Les fluides de forage à base d'eau.....	08
II.2.3. Les fluides de forage gazeux.....	09
II.2.4. Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits.....	09
II.2.4.1. Fluide de forage de réservoir.....	09
II.2.4.2 . Fluide de Complétion et de Workover.....	09
II.2.4.3. Fluide d'annulaire ou fluide de packer.....	09
Chapitre III : La rhéologie	10
III.1. L'histoire de la rhéologie.....	10
III.2. Définition de la rhéologie.....	10

III.3. La caractérisation des matières	10
III.4. Le cisaillement	12
III.5. Types de fluide	13
III.5.1. Les fluides newtoniens	13
III.5.2. Les fluides non newtoniens	13
III.5.3. Les fluides rhéofluidifiants	14
III.5.4. Les fluides rhéoépaississants	14
III.5.5. Les fluides plastiques	14
III.5.6. Les fluides thixotropes	15
III.5.7. Les fluides rhéopectiques	15
III.5.8. Les fluides antithixotropes	15
III.6. Les modèles de comportement d'écoulement	15
III.6.1. Le modèle newtonien	16
III.6.2. Le modèle Bingham	16
III.6.3. Le modèle de loi de puissance	16
III.6.4. Le modèle de Herschel-Bulkley	17
III.6.5. Le modèle de cross	18
Chapitre IV: Caractéristiques physico-chimiques des argiles	20
IV.1. Origines et définitions	20
IV.1.1. Généralités	20
IV.1.2. Définition	20
IV.2. Caractéristiques de base	21
a) Couche octaédrique	21
b) Couche tétraédrique	22
IV.3. Classification des argiles	23
IV.3.1. kaolinite	24
IV.3.2. Illites	24
IV.3.3. Smectites	25
IV.3.4. Chlorites	25
IV.3.5. Vermiculite	26
IV.3.6. Les argiles fibreuses	26

IV.4. Propriétés des argiles.....	27
IV.4.1. Forme et surface spécifique.....	27
IV.4.2. Capacité d'adsorption et de gonflement.....	28
IV.4.2.1. Degré d'hydratation.....	28
IV.4.2.2. Surfaces argileuses.....	29
IV.4.3. L'échange cationique	31
IV.5. Formation et utilisations de la bentonite	31
IV.5.1. La cristalochimie de la bentonite.....	32
IV.5.2. Les formes d'organisation des feuillets	34
Chapitre V : Caractéristiques physico-chimiques des polymères.....	37
V.1. Introduction	37
V.2. Structure fondamentale des polymères	37
a) Le poids moléculaire ou longueur de la chaîne.....	38
b) Type de groupes réactifs.....	38
c) Hydratation et forme finale de polymère	39
V.3. Les fonctions et les caractéristiques principales des polymères dans les fluides de forage.....	40
V.3.1. Viscosifiants.....	40
V.3.2. Déflocculants	42
V.3.3. Flocculants	43
V.3.4. Surfactants	43
V.3.5. Additifs de filtrat	44
V.4. Polymères utilisés dans les fluides de forage	44
V.4.1. Carboxyméthyl cellulose (CMC)	47
V.4.2. Hydroxyéthyl cellulose (HEC)	47
V.4.3. Polysaccharides microbiens – Gomme de xanthane	48
V.4.4. Gommages naturelles – GUAR	49
V.4.5. Polymères synthétiques	50
a) Polyacrylates	50
b) Co-polymères d'acrylamide/acrylate	50
c) Co-polymère de vinyl acétate et anhydrite maléique	51
V.4.6. Emulsifiants d'huile dans l'eau	51
V.4.7. Emulsifiants d'eau dans l'huile	51

V.4.8. Agents moussants	51
V.4.9. Antimoussants	52
V.4.10. Détergents de boue	52
V.4.11. Lubrifiants	52
V.4.12. Inhibiteur de corrosion	52
<i>Pourquoi utiliser des fluides de forage synthétiques ?</i>	52
Chapitre VI : Interactions interparticulaires	53
VI.1. Introduction	53
VI.2. La théorie DLVO	53
VI.3. Forces interparticulaires :	56
VI.3.1. répulsion électrique à double couche	56
VI.3.1.1. Potentiel électrocinétique	57
VI.3.2. Force d'attraction de Van der Waals	58
VI.4. Mécanisme de floculation	59
VI.5. Mécanisme de défloculation	59
VI.6. Forces physicochimiques	60
VI.6.1. Interaction argile-eau	60
VI.6.2. Interaction polymère-eau	60
VI.6.3. Interaction argile-argile	60
VI.6.4. Interaction argile-polymère	61
VI.6.4.1. poids moléculaire du polymère	61
VI.6.4.2. Adsorption de polymère sur l'argile	61
VI.6.5. Interaction polymère-polymère	62
VI.7. Zétamétrie	62
VI.7.1. Rappel sur les colloïdes	64
VI.7.2. Potentiel zêta	65
Partie expérimentale	66
Chapitre VII : Matériaux et appareillages	66
VII.1. Introduction.....	66
VII.2. Matériaux et appareillages.....	66
VII.2.1. Mode opératoire	68
VII.2.2. Caractérisation des matériaux	68
VII.2.2.1. La bentonite	68

Chapitre VIII : Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions de fluide de forage.....	70
VIII.1. Introduction	70
VIII.2. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des argiles.....	70
VIII.2.1. Etude rhéologique et physico-chimique de suspension bentonitique.....	71
VIII.2.1.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique.....	71
VIII.2.1.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique.....	73
VIII.2.1.3. Effet d'alcalinité sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique	75
VIII.2.1.4. Effet de concentration de la bentonite sur le potentiel zêta.....	78
VIII.3. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des polymères	79
VIII.3.1. Etude de la suspension de CMC	79
VIII.3.1.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de CMC	79
VIII.3.1.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de CMC	82
VIII.3.1.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique de CMC.....	84
VIII.3.1.4. Effet de la concentration sur le potentiel zêta de CMC.....	86
VIII.3.2. Etude de la suspension de PAC R	86
VIII.3.2.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de PAC R	86
VIII.3.2.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de PAC R.....	88
VIII.3.2.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique de PAC R.....	89
VIII.3.2.4. Effet de la concentration de PAC R sur le potentiel zêta.....	91
VIII.3.2.5. Comparaison entre le comportement rhéologique de CMC et de PAC R.....	92

VIII.3.3. Etude de la suspension de xanthane.....	93
VIII.3.3.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de xanthane	93
VIII.3.3.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de xanthane	95
VIII.3.3.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique de xanthane.....	97
VIII.3.3.4. Effet de la concentration sur le potentiel zêta de xanthane.....	98
VIII.4. Etude rhéologique et physico-chimique des Suspensions des mélanges.....	99
VIII.4.1. Etude de la suspension du mélange (xanthane – CMC).....	99
VIII.4.2. Etude de la suspension du mélange (xanthane – PAC R).....	101
VIII.4.3. Comparaison rhéologique entre le mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R)	102
VIII.4.4. Etude de la suspension du mélange (bentonite – PAC R)	104
VIII.4.4.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R).....	104
VIII.4.4.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R).....	106
VIII.4.4.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R).....	107
VIII.4.5. Etude de la suspension du mélange (bentonite – xanthane).....	108
VIII.4.5.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane).....	109
VIII.4.5.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane).....	110
VIII.4.5.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane).....	111
IX . Conclusion générale.....	113
Références.....	116
ANNEXES.....	119

Introduction générale :

Actuellement, durant l'opération de forage des puits de pétrole, on utilise souvent des fluides de forage à base d'huile. Parmi ces boues, la plus utilisée en Algérie est la boue à base de gasoil qui est néfaste pour l'environnement. Par ailleurs, durant cette opération, les pertes de circulation à la formation ainsi que les bourbiers formés, constituent une source de pollution sur place et pour les sites avoisinants, qui sont des sources de risque écologique (Pollution des eaux souterraines, destruction des végétaux,....etc).

Pour remédier à ces problèmes, et réduire ces inconvénients, l'emploi de boue de forage à base d'eau, contenant des polymères biodégradables, des sels et de la bentonite, tend à se généraliser.

A cet effet, nous nous proposons d'étudier le comportement rhéologique, physico-chimique et zétamétrique des suspensions de fluide de forage à base d'eau, afin d'établir une corrélation entre les constituantes de la boue.

Nous nous intéressons d'abord au comportement rhéologique des suspensions bentonitiques et des suspensions polymériques à différentes concentrations, tout en tenant compte de l'effet de la température, des sels et de l'alcalinité.

Ceci nous permettra alors de préciser l'effet de chaque facteurs (Température, sels et alcalinité) sur la boue, et de procéder ensuite à la formulation d'hypothèses nécessaires à la compréhension du comportement de ces suspensions, avant de proposer des explications relatives aux phénomènes rhéologiques se produisant dans les systèmes étudiés.

Ce mémoire sera donc divisé en deux grandes parties, une partie théorique et une partie pratique :

La partie théorique comprend six chapitres :

- Les deux premiers chapitres traitent des généralités sur l'opération de forage et de quelques notions fondamentales sur les fluides de forage.
- Le chapitre trois a trait à un rappel sur quelques notions de rhéologie. Il traite aussi des caractéristiques des différents types de fluides de forage, ainsi que des modèles rhéologiques.
- Le chapitre quatre est consacré à la physico-chimie des argiles, à leurs caractéristiques de base, à leur classification, ainsi qu'à leurs interactions interparticulaires.

Introduction générale

- Le chapitre cinq décrit la structure fondamentale des polymères les plus utilisés dans le domaine des fluides de forage, énumère leurs fonctions ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques.
- Le chapitre six fait le lien entre les chapitres précédents ; il est reparti en trois sous-chapitres :
 - Le premier sous-chapitre se rapporte à l'aspect physique et s'étend sur l'importance des forces interparticulaires se produisant dans les suspensions.
 - Le deuxième sous-chapitre explique les mécanismes de floculation et de défloculation existant et met l'accent sur les forces intervenant dans les interactions se produisant dans les fluides de forage.
 - Le troisième sous-chapitre décrit l'importance de la chimie colloïdale et du potentiel zêta dans la stabilité des systèmes colloïdaux, tout en expliquant le rôle des forces existantes entre les particules colloïdales.

Concernant la partie pratique, le premier chapitre se rapporte aux matériaux, à l'appareillage et à la méthodologie utilisés, nécessaires à la réalisation de ce travail. Il s'intéresse, entre autres, à la caractérisation granulométrique de la bentonite.

Le deuxième chapitre présente les résultats des essais rhéologiques effectués sur différentes suspensions (effet de la température, effet des sels, effet de l'alcalinité et les tests zétamétriques), avant de les discuter.

Avant de conclure, une combinaison entre les différentes suspensions bentonitiques et polymériques, est effectuée dans but d'établir une comparaison entre les suspensions étudiées. Ceci nous permettra de connaître le comportement rhéologique et physico-chimique de ces suspensions mélangées et de préciser les modèles rhéologiques de celles-ci.

Chapitre I : Généralités sur le forage des puits du pétrole et de gaz

I.1. Historique :

Dans le passé, les premiers puits ont été creusés pour rechercher de l'eau potable, pouvant être utilisée pour le lavage et l'irrigation, et pour rechercher de la saumure, dont on extrayait le sel. Ce n'est qu'au 19^{ème} siècle que les forages d'exploration pétrolière se sont développés pour répondre aux besoins croissants en produits pétroliers, nés de l'industrialisation.

On retrouve des traces des premiers forages de puits en Chine, trois siècles avant Jésus Christ. La technique utilisée (forage au câble) consistait à lâcher un outil de forage en métal qui s'enfonçait dans le sol par son propre poids et à extraire la roche réduite en poudre à l'aide d'un conteneur cylindrique. Les Chinois étaient relativement en avance en la matière et ont été les premiers à utiliser des fluides.

Le fluide utilisé à cette époque était l'eau. En assouplissant la roche, elle permettait une pénétration plus facile et facilitait le retrait des débris de roche pulvérisés appelés déblais. [3]

I.2. Introduction :

Il existe plusieurs types de forage, dont l'évolution des techniques de forage n'a pas cessé, Jusqu'au début de ce siècle. ANTONY LOCAS démontre l'efficacité de forage rotatif au U.S.A en utilisant la combinaison d'un outil rotatif et l'injection continue de boue.

Un fluide de forage à faible coût ne signifie pas forcément un puits à prix de revient peu élevé, c'est pour cela que la conception, la formulation et la maintenance des fluides sont primordiales.

La méthode rotatif consiste à utiliser des trépan comme les outils diamants. On applique une force procurée par une masse tout en les entraînant en rotation.

Le forage se base sur les trois fonctions suivantes :

- Poids sur l'outil.
- Rotation de l'outil.
- Injection d'un fluide.

L'appareil de forage rotatif constitue par des masses tiges qui sont vissées au-dessus de l'outil

par son appui, les masses tiges prolongées jusqu'à la surface par des tiges, constitue la garniture de forage, le tout est entraîné en rotation, grâce à un moteur électrique par un système de rotation.

La garniture de forage est percée en son centre afin de canaliser le fluide de forage vers l'outil. Un appareil de levage permet de soutenir le poids de la garniture ainsi que la manœuvre.

En plus de l'appareil de forage, on trouve une installation pour le traitement du fluide et le retour en surface d'un stockage de tubulaires et des abris de chantier.

Il faut préciser qu'au cours du forage, le puits est régulièrement tubé de tubes d'acier qui s'enfoncent sous leur propre poids et dont le diamètre décroît avec la profondeur.

Après le tubage de la première phase, le forage sera poursuivi avec un outil dont le diamètre est inférieur au diamètre intérieur de la colonne de tube descendue, et identiquement pour les phases qui suivent. [1], [3], [4]

Chapitre II : Notions sur les fluides de forage

II.1. Généralités :

II.1.1. Introduction :

Depuis le siècle dernier, le développement des exploitations pétrolières s'avère d'une grande importance alors que l'exploitation d'un gisement pétrolier nécessite plusieurs opérations :

- Localisation de la roche réservoir et confirmation de la présence des hydrocarbures.
- Evaluation de la viabilité économique du développement.
- Le forage et la mise en production des puits de pétrole et de gaz.

Par ailleurs, le succès d'une opération de forage est assuré en grande partie par le bon choix du fluide de forage.

II.1.2. Définition de fluide de forage :

Le fluide de forage ou boue de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile), et gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais). C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastique.

II.1.3. Principales fonctions des fluides de forage :

En 1900, alors qu'ils foraient un puits de pétrole à Spindletop, au Texas, des ouvriers ont conduit un troupeau de bovins dans une fosse remplie d'eau. La boue ainsi obtenue, un lisier boueux et visqueux composé d'eau et d'argile, a été déversée dans le puits. Les fluides de forage sont toujours appelés boue, mais les ingénieurs n'ont plus recours à l'eau et l'argile. A présent, ils préparent des composés et des mélanges satisfaisant aux besoins spécifiques des différentes conditions de forage. Les fluides de forage modernes constituent réellement l'élément vital du puits. Sans ces fluides, les puits profonds actuels n'existeraient pas.

Comme les puits sont de plus en plus profonds, les fluides de forage ont pris de l'importance, en répondant à un grand nombre de besoins et en résolvant des problèmes très différents d'un endroit à un autre.

En vue de concevoir des fluides de forage pouvant jouer plusieurs rôles importants :

II.1.3.1. Contrôle de la pression :

On a tous en tête l'image populaire du pétrole jaillissant d'une installation de forage, haut dans le ciel, pendant que les ouvriers se réjouissent d'avoir trouvé du pétrole. De telles éruptions sont, en fait, assez rares et ne conduisent pas à des manifestations de joie car le but est d'extraire du pétrole d'une manière contrôlée. La boue sert à empêcher les accidents en neutralisant la pression naturelle des fluides dans la formation rocheuse. Il faut réussir à équilibrer la pression du fluide de forage qui doit être suffisante pour contrecarrer la pression exercée par les formations rocheuses et par le pétrole ou le gaz, mais pas trop forte pour ne pas endommager le puits. Si le poids du fluide de forage est trop élevé, la roche risque de se fracturer et le fluide de forage se répandra dans le sol.

La pression d'un liquide dépend de sa densité. Des agents denses peuvent être ajoutés au fluide de forage pour augmenter sa densité et, par conséquent, accroître la pression exercée sur les parois du puits. La densité du liquide peut être ajustée pour satisfaire aux conditions du puits.

II.1.3.2. Stabilisation de la formation rocheuse exposée :

Le processus de forage comprend deux phases. Le forage commence d'abord dans des roches ne contenant pas de pétrole. Le but est de se déplacer le plus rapidement possible et parvenir à la roche contenant du pétrole, appelée réservoir. La priorité consiste à assurer la stabilité de la formation rocheuse mise à nu dans le puits tout en évitant de perdre le fluide. On maintient la pression du fluide de forage au-dessus de la pression interstitielle de la formation rocheuse, le fluide de forage a naturellement tendance à pénétrer la roche perméable de la formation. Ceci peut être évité grâce à des additifs particuliers ajoutés aux fluides de forage.

Le fluide de forage peut interagir avec la roche environnante de plusieurs manières. Par exemple, si la roche renferme beaucoup de sel, l'eau dissoudra le sel et aura tendance à rendre les parois du puits instables. Les formations rocheuses à forte teneur en argile ont également tendance à être évacuées avec l'eau. Ce type de formation nécessite un fluide inhibiteur pour maintenir la stabilité du puits et empêcher l'élargissement du trou ou les fuites d'eau.

II.1.3.3. Flottabilité :

Un puits peut avoir plusieurs milliers de mètres de profondeur. Une tige de forage en acier de cette longueur pèse plusieurs tonnes. L'immersion de la tige de forage dans le fluide produit un effet de flottabilité, ce qui réduit son poids et limite la tension appliquée sur le mécanisme.

II.1.3.4. Lubrification et refroidissement :

Lorsque le métal se déplace contre la roche, un frottement et un échauffement se produisent. Les fluides de forage permettent de lubrifier et de refroidir le trépan, ce qui assure le prolongement de la durée de vie du trépan. La lubrification peut s'avérer particulièrement importante sur les puits très profonds où le frottement entre la tige de forage, le trépan et la surface rocheuse doit être réduit au minimum.

II.1.3.5. Autres fonctions :

- La boue doit favoriser la vitesse de pénétration de l'outil en conservant de faibles teneurs en solides, la viscosité plus basse et le filtrat plus élevé.
- La boue ne doit pas être corrosive; pour le matériel, il existe un certain nombre d'inhibiteurs de corrosion.
- En fin, la boue ne doit pas être abrasive ni toxique et présenter des risques d'incendie.[9]

II.1.4. Circulation du fluide de forage :

Le fluide de forage est en circulation continue durant l'opération du forage et aussi bien dans le sondage qu'en surface.

Le fluide est préparé dans les bacs à boues ; il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil; ensuite il remonte par l'espace annulaire chargé de déblais formés au front de taille (Figure 2).

A la sortie du puits, il subit divers traitements (tamisage, dilution, ajout de produit), de telle façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques aux valeurs initiales (avant injection).

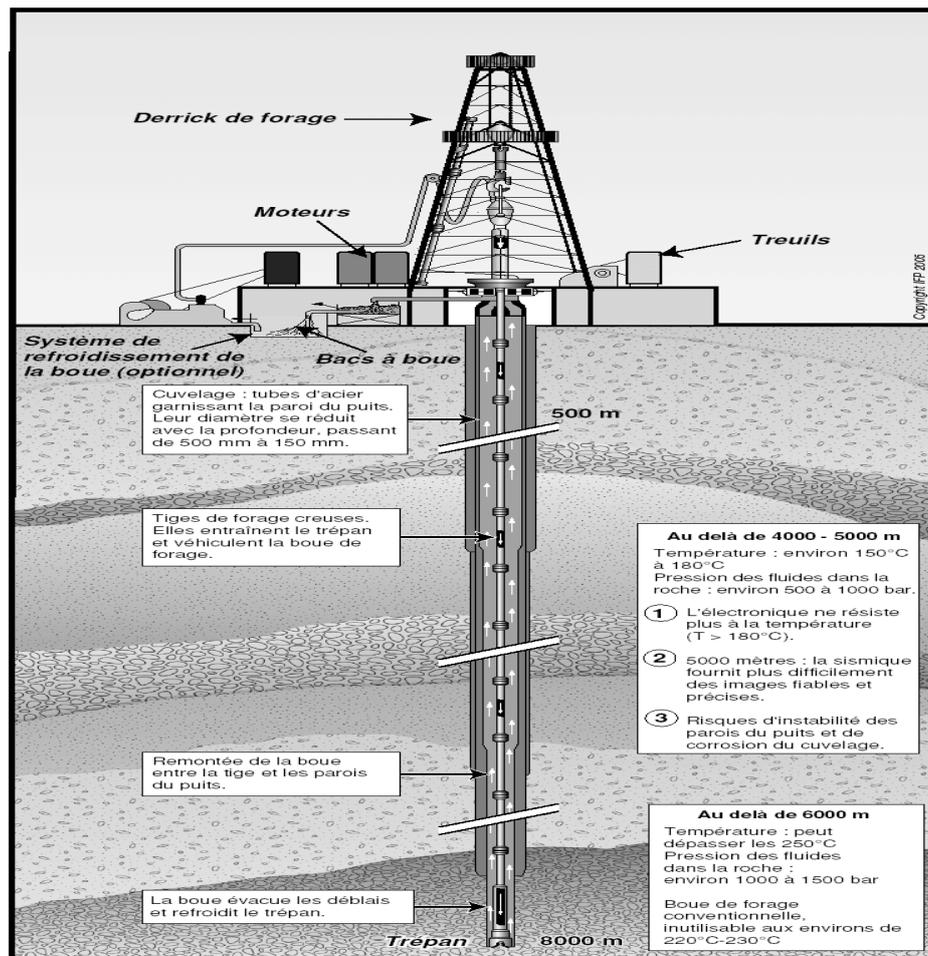


Fig. II.1 : Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.

II.2. Classification des fluides de forage:

II.2.1. Les fluides de forage à base d'huile :

Ce sont des émulsions inverses dont la phase continue est une huile organique ou minérale et la phase dispersée (discontinue) est une solution aqueuse de 50% en volume au maximum tout en gardant l'avantage d'une phase externe constituée par l'huile. Des agents viscosifiants, émulsifiants, stabilisants, fluidifiants et alourdissants sont alors additionnés.

II.2.2. Les fluides de forage à base d'eau :

Les fluides les plus utilisés dans le domaine de forage, ils sont généralement constitués par des suspensions d'argile (bentonite), des solides inertes (baryte) dont les caractéristiques rhéologiques sont ajustées par addition de polymères viscosifiants (xanthane).

Des réducteurs de filtrat entre également dans la composition du fluide de forage, Carboxymethylcellulose CMC, et PAC R (polymères synthétiques).

Il est possible de classer ce type de fluides en deux catégories:

- Boues douces
- Boues salées.

II.2.3. Les fluides de forage gazeux :

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables prévenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement.

Le gaz peut être de l'air, du gaz naturel ou de la mousse.

II.2.4. Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits :

II.2.4.1. Fluide de forage de réservoir :

C'est un fluide utilisé lors du forage du réservoir à exploiter. Son rôle principal, en plus de ces fonctions classiques, est la limitation de l'endommagement des couches productrices.

II.2.4.2 . Fluide de Complétion et de Workover :

L'opération de complétion commence au début du forage du réservoir jusqu'à la mise en place des équipements de production.

Le workover est la reprise ou le reconditionnement du puits.

Le succès de ces deux opérations nécessite le choix d'un fluide dont les caractéristiques permettent :

- D'assurer une bonne stabilité des parois du puits ;
- Le nettoyage du puits en maintenant en suspension les particules et les déblais ;
- D'éviter le colmatage du réservoir ;
- La neutralisation ou la maîtrise du puits ;
- L'inhibition de la formation du cake.

II.2.4.3. Fluide d'annulaire ou fluide de packer :

C'est un fluide qui est mis en place entre le tubing et le cuvelage de production au-dessus du packer, il reste en place pendant toute la durée d'exploitation du puits. [3], [4]

Chapitre III : La rhéologie

III.1. L'histoire de la rhéologie :

La rhéologie, du grec *rhé*, couler, est la branche de la physique qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière. La rhéologie s'applique à tous les types de matières, des gaz aux solides.

La rhéologie est une science qui n'a que 70 ans, mais son histoire remonte très loin. Dans le Livre des Juges de l'Ancien Testament, la prophétesse Déborah déclare: "Les montagnes s'écoulèrent devant le Seigneur...". Traduite en terme rhéologique par le professeur M. Reiner, cette expression signifie que toute chose s'écoule si vous attendez suffisamment longtemps, une affirmation qui s'applique parfaitement à la rhéologie. Elle fut également mentionnée par le philosophe grec Héraclite avec son "panta rhéi" - tout coule. Le professeur Reiner et le professeur E.Bingham furent les fondateurs de la science de la rhéologie dans les années 20.

III.2. Définition de la rhéologie :

La rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement, des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. Elle a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. Elle est proposée par Eugène BINGHAM en 1928.

La rhéologie permet, alors de prévoir le comportement d'un corps réel à condition de ne pas trop s'éloigner des hypothèses ayant servi à la construction de modèle rhéologique utilisé. La section qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides.

III.3. La caractérisation des matières :

L'un des principaux aspects de la rhéologie est la définition et la classification des matières. Le verre normal, par exemple, est généralement défini comme étant une matière solide, mais si l'on mesure l'épaisseur d'une fenêtre de vieille église sur sa hauteur, on remarque une différence. En fait, le verre coule comme un liquide, même s'il s'agit d'un écoulement très lent.

Une matière peut être caractérisée, par exemple, par son temps de relaxation, c'est-à-dire le temps nécessaire pour réduire une contrainte dans la matière par l'écoulement. Les grandeurs types des temps de relaxation des matières sont :

- Gaz $<10^{-6}$ s.
- Liquides 10^{-6} à 10^2 s.
- Solides $>10^2$ s.

On peut également caractériser rhéologiquement les matières par les termes visqueux, élastique ou viscoélastique Fig.III.1. Normalement, les gaz et liquides sont décrits comme étant des fluides visqueux. Un fluide visqueux parfait est incapable d'emmagasiner une énergie de déformation. C'est pourquoi il se déforme irréversiblement lorsqu'il est soumis à une contrainte; il s'écoule et l'énergie de déformation se dissipe en chaleur, d'où une hausse de sa température.

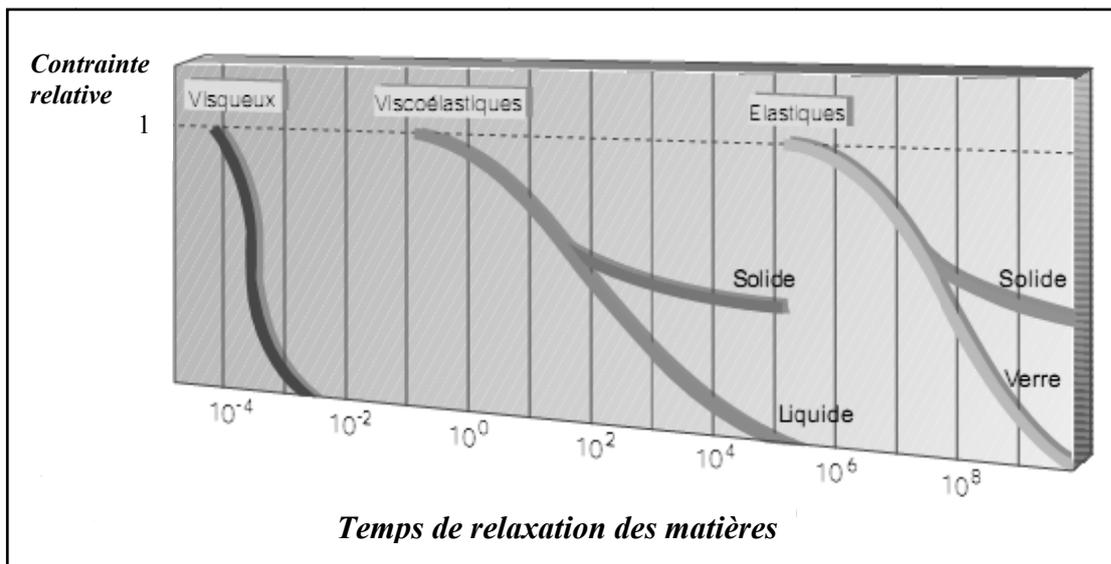


Fig.III.1 : Contrainte relative de différent types de la matière en fonction de temps de relaxation.

A l'inverse, on décrit habituellement les solides comme étant des matières élastiques. Une matière élastique parfaite emmagasine toute l'énergie de déformation imposée et revient par conséquent complètement à son état dès que l'on relâche la contrainte. Ainsi, on peut dire d'un fluide visqueux qu'il résiste à l'acte de déformation plutôt qu'à l'état de déformation, alors qu'une matière élastique résiste aussi bien à l'acte de déformation qu'à l'état de déformation.

Un certain nombre de matières présentent des propriétés visqueuses de même que des propriétés élastiques; c'est-à-dire, elles emmagasinent une partie de l'énergie de déformation

dans leur structure, et en perdent une partie par l'écoulement. On dit que ces matières sont viscoélastiques.

III.4. Le cisaillement :

En rhéologie, le cisaillement d'une substance est l'élément déterminant pour connaître son écoulement et sa structure. On obtient un flux cisailé par l'écoulement entre les plans parallèles, l'écoulement rotationnel entre cylindres coaxiaux, où l'un des cylindres est fixe et l'autre rotatif, l'écoulement télescopique par tubes capillaires et tuyaux, l'écoulement de torsion entre plaques parallèles.

Pour étudier la viscosité d'une matière, le cisaillement doit induire un flux stationnaire de la matière. Pour qu'il y ait écoulement, il doit y avoir réorganisation et déformation des particules et rupture des liaisons dans la structure de la matière.

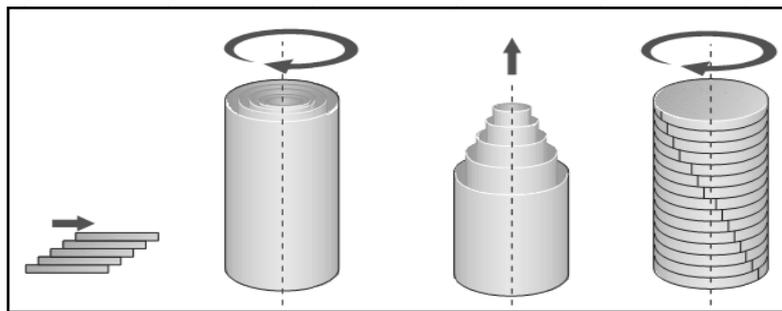


Fig.III.2 : Différents types de cisaillement

On définit la contrainte de cisaillement comme étant

$$\sigma_{yx} = \frac{F}{A} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

F : Force (N)

A : Surface (m²)

et le taux de cisaillement comme étant

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} \quad [1/\text{S}] \quad (2)$$

et la viscosité apparente d'un fluide comme étant

$$\eta_a = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pas}] \quad (3)$$

III.5. Types de fluide :

III.5.1. Les fluides newtoniens :

Les fluides newtoniens sont des fluides ayant une viscosité constante, dépendante de la température mais indépendante du taux de cisaillement appliquée. On peut dire également des fluides newtoniens qu'ils ont une directe proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement dans l'écoulement laminaire.

$$\sigma_{yx} = \eta \cdot \frac{dv}{dt} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

La constante de proportionnalité est ainsi égale à la viscosité de la matière. La courbe d'écoulement, qui correspond à la contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement, est par conséquent une ligne droite, de pente η pour un fluide newtonien. La courbe de viscosité, qui correspond à la viscosité par rapport au taux de cisaillement, est une ligne droite avec une valeur constante égale à η .

Il est par conséquent possible de définir un fluide newtonien simplement par sa viscosité à une température donnée. Parmi les fluides newtoniens, citons l'eau, les huiles minérales et végétales et les solutions de saccharose pures. Pour des raisons pratiques, on peut qualifier de fluides newtoniens les liquides faiblement concentrés en général, tels que le lait entier et le lait écrémé.

III.5.2. Les fluides non newtoniens :

Les matières que l'on ne peut définir simplement par leur viscosité à une température donnée sont appelées fluides non newtoniens. La viscosité de ces matières doit toujours être indiquée avec une température et un taux de cisaillement correspondants. Le fait de modifier le taux de cisaillement modifie également la viscosité. En général, une forte concentration et une température peu élevée induisent ou augmentent le comportement non newtonien.

Mise à part sa dépendance par rapport au taux de cisaillement, la viscosité des fluides non newtoniens peut être également dépendante du temps, auquel cas la viscosité dépend non seulement du taux de cisaillement mais également de la durée et, dans la plupart des cas, de la fréquence des applications successives du cisaillement. Les matières non newtoniennes indépendantes du temps peuvent être rhéofluidifiantes, rhéoépaississantes ou plastiques. Les matières non newtoniennes dépendantes du temps peuvent être thixotropes, rhéopectiques ou antithixotropes.

III.5.3. Les fluides rhéofluidifiants :

La viscosité d'un fluide rhéofluidifiant (appelé parfois fluide pseudoplastique) diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. La dépendance de la viscosité au taux de cisaillement peut varier considérablement d'un produit à l'autre, mais également pour un même liquide, selon sa température et sa concentration. La cause de la rhéofluidification réside dans le fait qu'un taux de cisaillement plus élevé déforme et/ou réorganise les particules, ce qui réduit la résistance à l'écoulement et par conséquent la viscosité.

III.5.4. Les fluides rhéoépaississants :

La viscosité d'un fluide rhéoépaississant augmente en même temps que le taux de cisaillement. Ce type de comportement se rencontre généralement parmi les suspensions très concentrées. Un fluide rhéoépaississant manifeste un comportement dilatant; c'est-à-dire, le solvant agit comme lubrifiant entre les particules en suspension lorsque le taux de cisaillement est faible, mais le solvant est expulsé lorsque le taux de cisaillement est plus élevé, ce qui augmente la compacité des particules. Parmi les systèmes rhéoépaississants, citons le sable humide et les suspensions d'amidon concentrées.

III.5.5. Les fluides plastiques :

Les fluides plastiques sont des fluides présentant un seuil de plasticité. Dans la pratique, il faut appliquer une force importante avant que la matière ne commence à couler comme un liquide. Si la force appliquée est inférieure à la force correspondant au seuil de plasticité, la matière stocke l'énergie de déformation; autrement dit, elle présente des propriétés élastiques et, partant, se comporte comme un solide. Dès que le seuil de plasticité est dépassé, le liquide peut s'écouler comme un liquide newtonien; on dit alors que c'est un liquide plastique de Bingham.

Ou bien, il peut s'écouler comme un fluide rhéofluidifiant; dans ce cas, il s'agit d'un liquide viscoplastique.

III.5.6. Les fluides thixotropes :

On appelle fluides thixotropes les fluides rhéofluidifiants dont la viscosité diminue non seulement lorsque le taux de cisaillement augmente, mais également en fonction du temps avec un taux de cisaillement constant. Le comportement des fluides thixotropes est étudié généralement dans un test de bouclage. Au cours de ce test, la matière est soumise à des taux de cisaillement croissants, suivis des mêmes taux de cisaillement en ordre décroissant. Le comportement thixotrope dépendant du temps est caractérisé par la différence entre la viscosité ascendante et la viscosité descendante, et les courbes de contrainte de cisaillement. Pour récupérer sa structure, la matière doit reposer pendant un certain temps, qui lui est spécifique. Ce type de comportement se manifeste dans tous les systèmes gélifiants.

III.5.7. Les fluides rhéopectiques :

Les fluides rhéopectiques sont des fluides thixotropes, mais dont la structure ne récupère complètement que si elle est soumise à un faible taux de cisaillement. Cela signifie qu'un fluide rhéopectique ne reconstruit pas sa structure au repos.

III.5.8. Les fluides antithixotropes :

Les fluides antithixotropes sont des systèmes rhéoépaississants, c'est-à-dire des fluides où la viscosité augmente sous l'effet de l'augmentation du taux de cisaillement, mais également en fonction du temps avec un taux de cisaillement constant. Le comportement des fluides antithixotropes est étudié généralement dans un test de bouclage, comme pour les fluides thixotropes.

III.6. Les modèles de comportement d'écoulement :

Il existe plusieurs modèles pour décrire mathématiquement le comportement des fluides non newtoniens, tels que les modèles Ostwald, Herschel-Bulkley, Steiger-Ory, Bingham, Ellis et Eyring. Ces modèles mettent en relation la contrainte de cisaillement d'un fluide et son taux de cisaillement, ce qui permet, là encore, de calculer la viscosité apparente comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement.

La caractérisation de l'écoulement d'un matériau passe par l'étude de ses caractéristiques rhéologiques (terme inventé par Bingham, en 1929, pour définir l'écoulement des corps sous l'effet des déformations et des contraintes qui leurs sont appliquées). Le comportement de la matière s'exprime en général sous forme d'un rhéogramme (évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement). Grâce au rhéogramme, différents modèles empiriques peuvent caractériser les propriétés d'écoulement du matériau (*Jean-Philippe GUILLEMIN, Micro-Nano : des comportements différents, des procédés à adapter, Département PYROTECHNIE, Giat-industries, Centre de Bourges, 7 route de Guerry, 18023 Bourges).France (2005)*). Les modèles susceptibles de représenter les matériaux énergétiques sont définis ci-dessous :

III.6.1. Le modèle newtonien :

$$\tau = \mu_N \dot{\gamma} \quad (5)$$

Avec τ : contrainte de cisaillement (Pa).

μ_N : viscosité newtonienne (Pa.s).

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1}).

III.6.2. Le modèle Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu_\infty \dot{\gamma} \quad (6)$$

avec τ_0 : contrainte seuil (Pa).

μ_∞ : viscosité infinie (Pa.s).

III.6.3. Le modèle de loi de puissance :

Le modèle de loi de puissance (parfois appelé le modèle Ostwald) est facilement utilisé, ce modèle est idéal pour les rhéofluidifiants, les fluides relativement mobiles tels que les gels faibles et des dispersions de faible viscosité. Le modèle n'est rien de plus que le modèle newtonien, avec un exposant ajouté sur le taux de cisaillement:

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

K est le coefficient de la consistance . Ceci décrit la plage globale des viscosités dans la partie de la courbe de débit qui est modélisée. Aussi, si la région de loi de puissance inclut un taux de cisaillement $1s^{-1}$, alors K est la viscosité ou la contrainte à ce point.

L'exposant n est connue comme l'indice de la loi puissance (ou parfois l'indice de taux). Pour un fluide rhéofluidifiant: $0 < n < 1$. Plus le fluide devient rhéofluidifiant , plus le n est proche de zéro.

III.6.4. Le modèle de Herschel-Bulkley :

Les courbes rhéologiques font apparaître une partie concave sur la plage des faibles cisaillements pour les fortes concentrations en bentonite. Afin de pouvoir représenter l'évolution de cette concavité, le modèle Herschel-Bulkley sera utilisé :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

avec τ_c : contrainte d'Herschel (Pa).

K : consistance de la structure.

n : paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 et pouvant être considéré comme une indice de structure.

Les courbes rhéologiques font apparaître une partie concave sur la plage des faibles cisaillements pour les fortes concentrations en bentonite. Afin de pouvoir représenter l'évolution de cette concavité, le modèle Herschel-Bulkley sera utilisé. Ce modèle peut représenter l'ensemble des comportements rhéologiques rencontrés.

Ainsi pour un comportement newtonien, $\tau_c = 0$ et $n = 1$

L'équation (4) s'écrit donc sous la forme :

$$\tau = K \dot{\gamma} \quad (9)$$

Et pour un fluide de Bingham, $n = 1$ et l'équation (3) s'écrit alors :

$$\tau = \tau_c + K \dot{\gamma} \quad (10)$$

En posant ces conditions, l'ensemble des modèles proposés peuvent donc être généralisés par le modèle de Herschel-Bulkley.

Les courbes expérimentales sont ensuite retraitées avec ce modèle.

III.6.5. Le modèle de cross :

Le modèle rhéologique de Cross est l'un des plus populaires en service aujourd'hui. Il peut être trouvé pratiquement dans le progiciel d'un rhéomètre, et il peut être utilisé pour extraire les nombres significatifs de l'ensemble de la viscosité et de la vitesse de cisaillement.

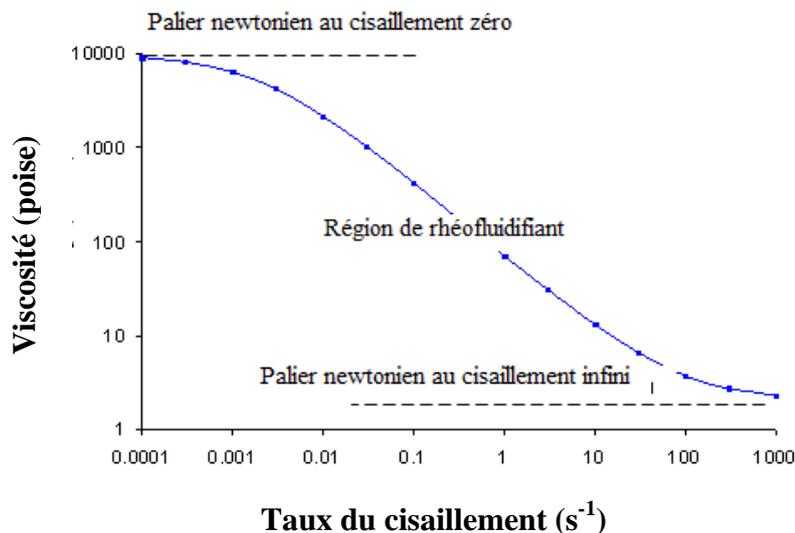


Fig.III.3: Profil de viscosité typique pour une dispersion ou solution de polymère.

L'équation de Cross, exprimant la viscosité en fonction du taux de cisaillement:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (C \dot{\gamma})^m} \quad (11)$$

η_0 : La viscosité au cisaillement zéro, est la valeur de la viscosité au palier newtonien inférieur. C'est une propriété matérielle critique qui peut s'avérer utile pour effectuer des évaluations de la suspension, de la stabilité de l'émulsion, des estimations de poids moléculaire de polymères comparatifs et des changements dus au processus de suivi ou de la formulation des variables etc.

η_{∞} est la Viscosité à l'infini de cisaillement. Ce qui nous indique comment notre produit est susceptible de se comporter dans les situations de traitement très élevée au cisaillement.

Le paramètre "**m**" est connu sous le nom (Cross) constante de taux. Il est sans dimension, et représente une mesure du degré de dépendance de la viscosité sur le taux de cisaillement dans la région fluidifiée. La valeur de zéro pour "**m**" indique un comportement newtonien, et avec **m** tend vers unité, le comportement est de plus en plus rhéofluidifiant.

"**C**" est connu comme le constant du temps de Cross (ou parfois de la consistance). La réciproque, $1/C$, donne un taux de cisaillement critique qui prouve un indicateur utile du taux de cisaillement pour un rhéofluidifiant.

Ainsi, le modèle de cross mesure le total de (viscosité/taux de cisaillement) pour un fluide rhéofluidifiant.

Il est facile de se confondre entre les paramètres de modèle de cross **C** et **m** et les paramètres **K** et **n** de modèle de loi de puissance ils ne sont pas identiques bien qu'ils tous décrivent la partie de rhéofluidifiant.

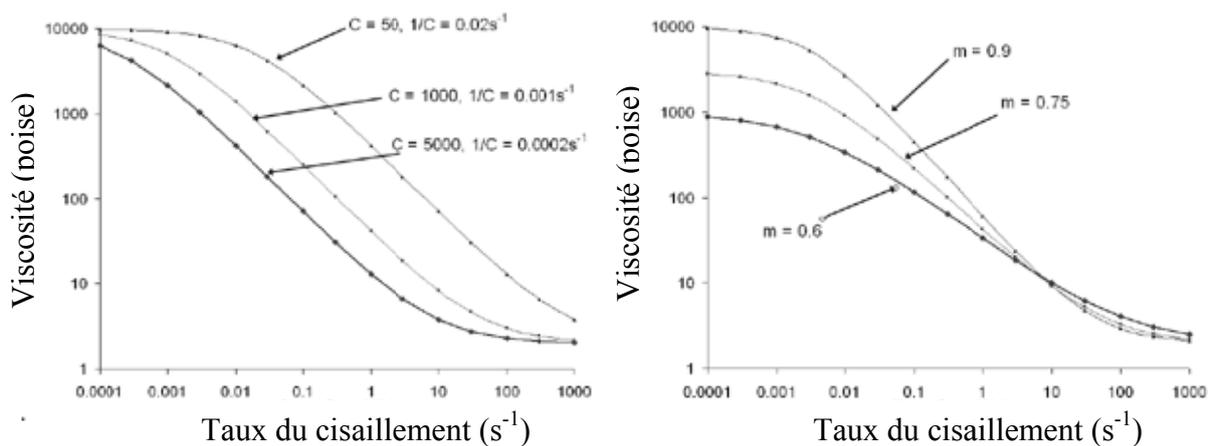


Fig.III.4: Viscosité en fonction de taux du cisaillement de différents paramètres «**C**» et de «**m**».

Chapitre IV: Caractéristiques physico-chimiques des argiles

IV.1. Origines et définitions :

IV.1.1. Généralités :

Les argiles sont issues de la transformation de roches, et se présentent sous la forme de feuillets dont la taille est inférieure à $3,9 \mu\text{m}$ selon le critère de Wentworth. Les argiles font donc partie des colloïdes. Il existe quatre modes de formation des argiles. Le premier provient d'un héritage mécanique, érosion d'une roche puis sédimentation, le deuxième plus récent fait intervenir la cristallisation en solution, le troisième est le résultat de la dégradation d'une argile complexe en une autre plus simple et enfin le dernier, est issu de la formation d'une argile élaborée à partir d'une argile simple. Ces argiles se reconnaissent par leur couleur, leur granulométrie, leur forme, leur réactivité, leur capacité d'échange ionique. A la suite de l'arrivée de la diffraction des rayons X, les argiles ont été classées selon la famille cristallographique à laquelle elles appartiennent.

IV.1.2. Définition :

Les argiles jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines de la technologie des fluides de forage. Le groupe des argiles peut-être décrit chimiquement comme silicate d'aluminium. Étant donné que les éléments constituant les argiles représentent plus de 80% de la masse terrestre (8.1% d'aluminium 27.7% de silice et 46.6% d'oxygène). On comprendra facilement qu'à chaque étape du forage d'un trou, on rencontre des argiles.

Les formations les plus souvent forées sont des argiles dans lesquelles le type et la quantité de minéraux argileux présents représentent un des aspects les plus importants déterminant les caractéristiques chimiques et mécaniques de la roche. Le choix du fluide de forage est souvent lié aux réactions entre le fluide et la roche, car celles-ci influencent la stabilité du puits.

Il est donc important de bien comprendre le rôle de la chimie des argiles dans la sélection des systèmes des fluides de forage et de la stabilité du puits. [17], [33]

Les argiles sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des minéraux argileux appartiennent au groupe des silico-aluminates phylliteux. Ils sont organisés en

couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ce type de structure ayant très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface. La structure de base des silicates phylliteux, comme de tous les silicates, est l'ion SiO_4^{4-} , où le silicium est tétra coordonné par rapport à l'oxygène.

Fréquemment de faible granulométrie, les argiles sont des minéraux, souvent mal cristallisés et hydratés, de forme lamellaire ou fibreuse. Elles sont souvent présentes en mélanges complexes d'espèces. Les minéraux argileux sont formés par l'empilement de feuillets, eux même constitués d'un empilement de couches. [1]

IV.2. Caractéristiques de base :

Il existe un certain nombre de caractéristiques des minéraux argileux qui les distingue en tant que groupe. Ils sont essentiellement composés de silice, d'alumine, d'eau, et souvent de quantités non négligeables de fer, de magnésium et de plus faibles quantités de sodium et de potassium.

D'autres caractéristiques comme la petite taille des particules, une grande superficie et la réactivité chimique à la surface, sont toutes liées aux détails de la structure.

Les minéraux argileux sont construits à partir de deux structures de bases simples :

a) Couche octaédrique :

Cette structure est composée de deux feuilles d'oxygènes ou hydroxyle compactes dans lesquelles des ions d'aluminium, fer ou magnésium sont incrustés dans une structure octaédrique.

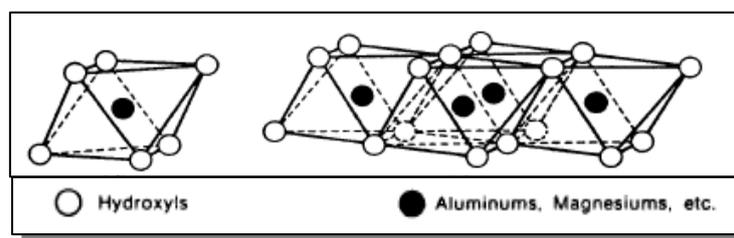


Fig. IV.1 : Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).

b) Couche tétraédrique :

Dans chaque couche tétraédrique, un atome de silice se trouve au centre d'un tétraèdre, à équidistance des 4 atomes d'oxygène ou d'hydroxyle, s'il est nécessaire d'équilibrer la structure ; les groupes tétraèdres de silice sont disposés en un réseau hexagonal qui se répète à l'infini pour former une feuille de la composition $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$.

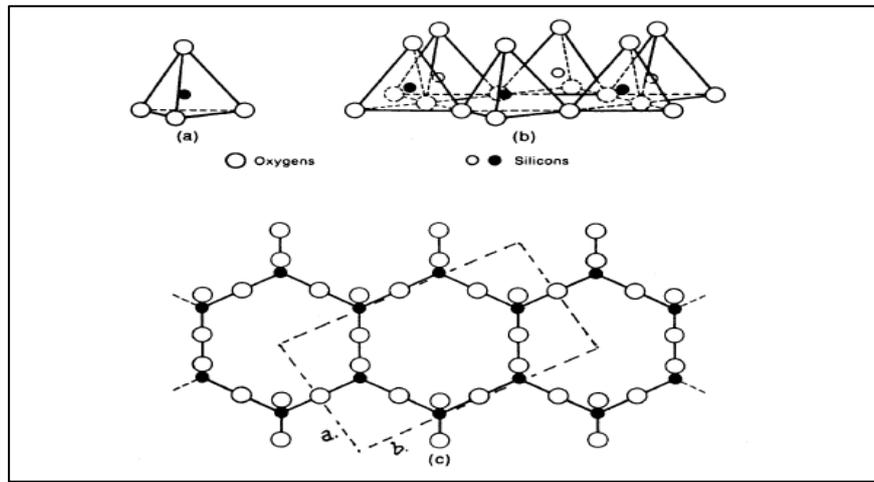


Fig. IV.2 : Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988).

Les unités de base des feuilles tétraédriques et octaédriques peuvent se combiner avec le groupe hydroxyle de la couche tétraédrique contribuant à former ainsi la couche octaédrique. Les combinaisons et les modifications chimiques ont créé 26 minéraux argileux différents. Les minéraux argileux sont formés de différents rapports de couche silice/couche octaédrique. Le groupe le plus important est celui ayant un rapport de 2 à 1.[1]

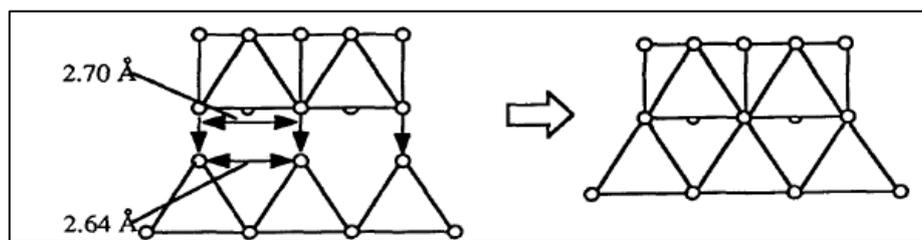


Fig. IV.3 : l'agencement des tétraédrites et des octaèdres (Moore et Reynolds 1989)

IV.3. Classification des argiles :

Les principaux critères de classification sont basés sur les paramètres suivants:

- La combinaison de feuillets.
- Le type de cation dans l'octaèdre.
- La charge de la couche.
- Le type de matériel dans l'espace interfolier (cation, molécules d'eau...).

Quelques critères secondaires sont le polytypisme (ou mode d'empilement), la composition chimique, le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les interstratifiés.

Selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux:

- Les minéraux de type 1:1 (ou T-O) à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1Å. Ce type correspond le groupe de la kaolinite.
- Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet. Ce type correspond les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et celui des micas.
- Les minéraux de type 2:1:1(ou T-O-T-O) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques, et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdres ; l'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å. Ce type correspond le groupe du chlorite.

Tableau IV.1 : Classification des phyllosilicates.

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèces	Formules
1/1	kaolinite	kaolinites	dichite nacrite kaolinite métahalloysitehalloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$
		Serpentine	Antigorite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
	talc	Pyrophyllite	pyrophyllite	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
		Talc	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
	smectite	smectites dioctaédriques	montmorillonite	$(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$
		smectites trioctaédriques	Saponite	$Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
2/1	Vermi-culites	vermiculite dioctaédrique	vermiculite dioctaédrique	$(Al,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$

		vermiculite trioctaédrique	vermiculite	$(\text{Mg,Fe...})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	micas	Micas dioctaédrique	muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		Micas trioctaédrique	phlogopite	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		chlorite dioctaédrique	sudoite	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
2/1/1	chlorite	chlorite trioctaédrique	espèces différentes	$(\text{Mg,Fe...})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

IV.3.1. kaolinite (1/1, $d=7\text{Å}$) :

Pas de substitution dans les couches. Le feuillet est neutre. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés, par pH acide, surtout en climat subtropical et tropical. Ses cristaux sont souvent grands (jusqu'à $15\ \mu\text{m}$).

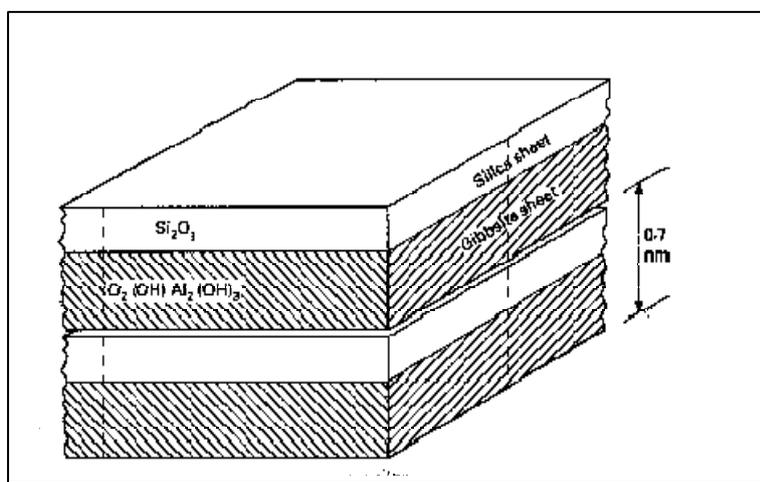


Fig. IV.4 : Exemple de minéral argileux à structure 1/1 : kaolinite (White, 1999)

IV.3.2. Illites (2/1, $d=10\text{Å}$) :

Association d'une CO (alumineuse) et deux CT (siliceuses). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace interfoliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (plus d'eau, moins de K^+).

IV.3.3. Smectites (2/1, $d=14\text{Å}$) :

L'empilement des feuillets est désordonné; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent. Les substitutions d'atomes sont importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption des molécules variées (eau, cations, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte ($d = 18\ \text{Å}$). Les

smectites, ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques. Elles sont formées dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme des interstratifiés.

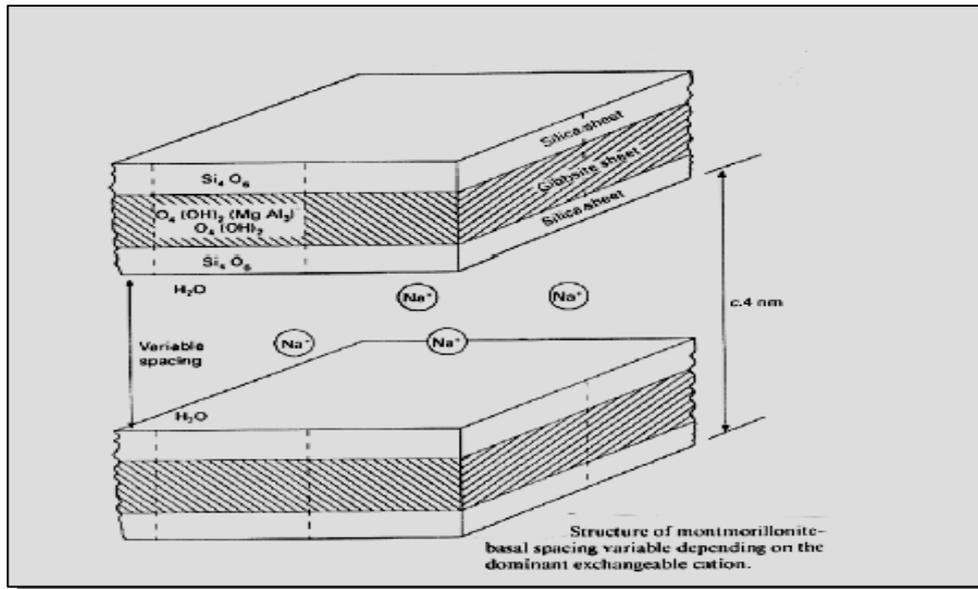


Fig. IV.5 : Représentation d'une smectite (White, 1999)

IV.3.4. Chlorites (2/1, $d=14\text{\AA}$) :

L'espace interfoliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Al est remplacé localement par le Fe. Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques; elles sont également formées pendant la diagenèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif.

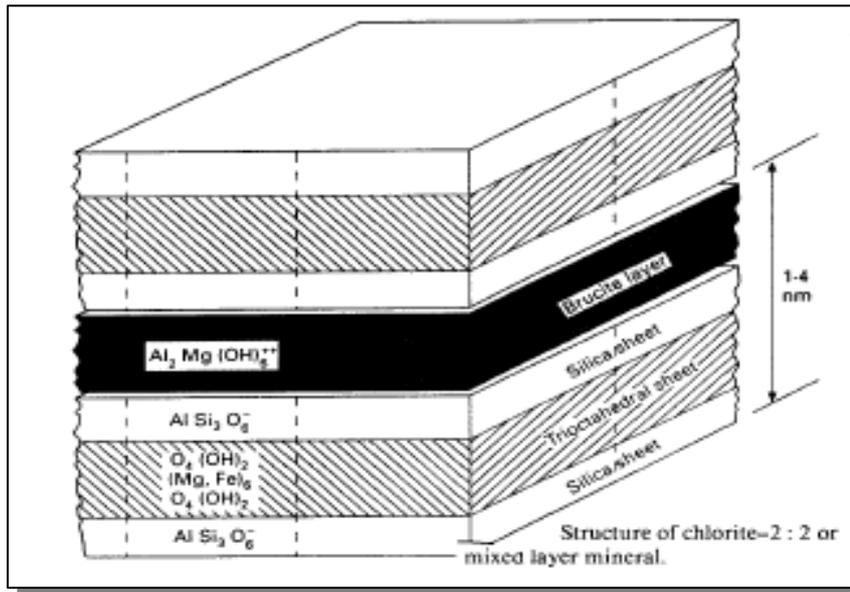


Fig. IV.6 : Chlorite (White, 1999)

IV.3.5. Vermiculite (2/1, d=12A°) :

Fréquente dans les sols de la zone tempérée. La couche octaédrique contient du Fe et du Mg. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes.

IV.3.6. Les argiles fibreuses :

Les feuillets sont discontinus et forment des rubans. Les principaux types sont la sépiolite et l'attapulgite.[6]

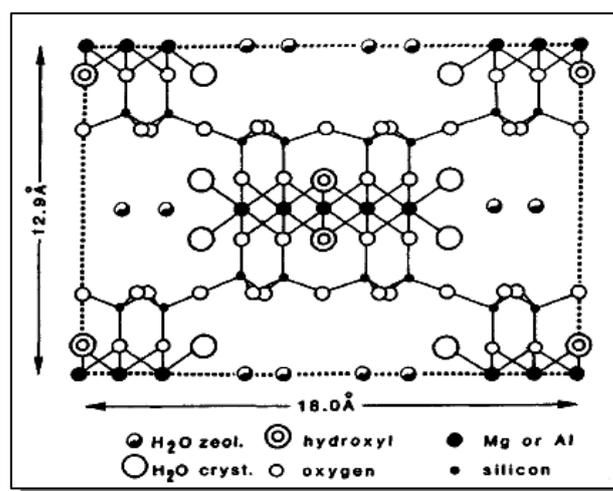


Fig. IV.7 : Argiles fibreuses (chamley, 1989)

IV.4. Propriétés des argiles :

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales:

- Leur forme et leur surface spécifique.
- Leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement.
- Leur multiple possibilité d'échanges ioniques.

IV.4.1. Forme et surface spécifique :

Les argiles se présentent sous trois formes :

- En flocons, caractérisés par même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à $1/20^{\text{ème}}$ de la longueur.
- En latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à $1/20^{\text{ème}}$ de la longueur.
- En aiguilles, deux dimensions identiques et la $3^{\text{ème}}$ beaucoup plus grande.

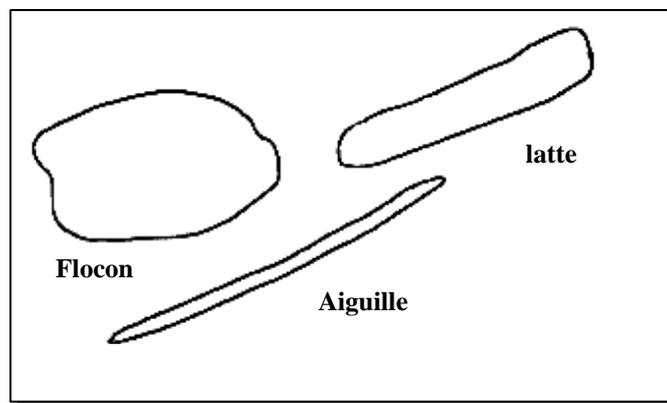


Fig. IV.8 : Forme des particules argileuses (Velde, 1995)

Les argiles sont définies depuis le XIX siècle comme des minéraux de petite taille. Ces minéraux ne sont donc pas identifiables au microscope optique. En fait, la majorité des argiles ont des caractéristiques communes, ce qui justifie à posteriori la définition. La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre. La surface des argiles est supérieure par rapport à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. Le rapport

épaisseur/largeur est de l'ordre de 20 pour les argiles. Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface.

Le Tableau 2 donne les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace interfoliaire (Fig. IV.9). Les smectites ont les surfaces totales maximales: surface Smectites > Vermiculites >>> Illites > Kaolinites = Chlorites.

Tableau IV.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et peaver, 1988).

Type d'argile/surface spécifique (m ² /g)	Interne	Externe	Total
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	1	750
Chlorite	0	15	15
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30

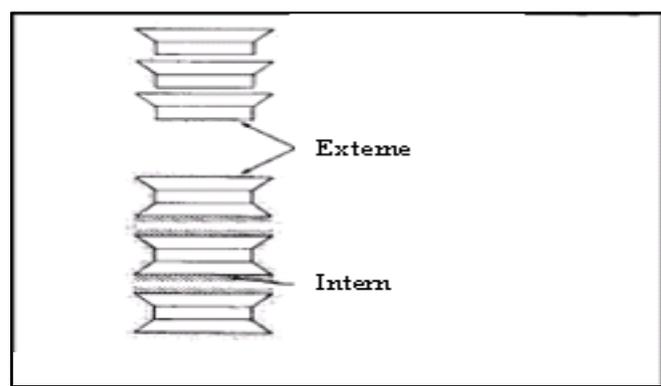


Fig. IV.9 : Surface des particules argileuses.

IV.4.2. Capacité d'adsorption et de gonflement :

IV.4.2.1. Degré d'hydratation :

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau (**Fig.14**). Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes. Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses.

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10Å. Selon l'hydratation, une couche d'eau de 2,5 à 5.2Å d'épaisseur se développe. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume pouvant atteindre 95%. Notons qu'il existe des minéraux comprenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement.

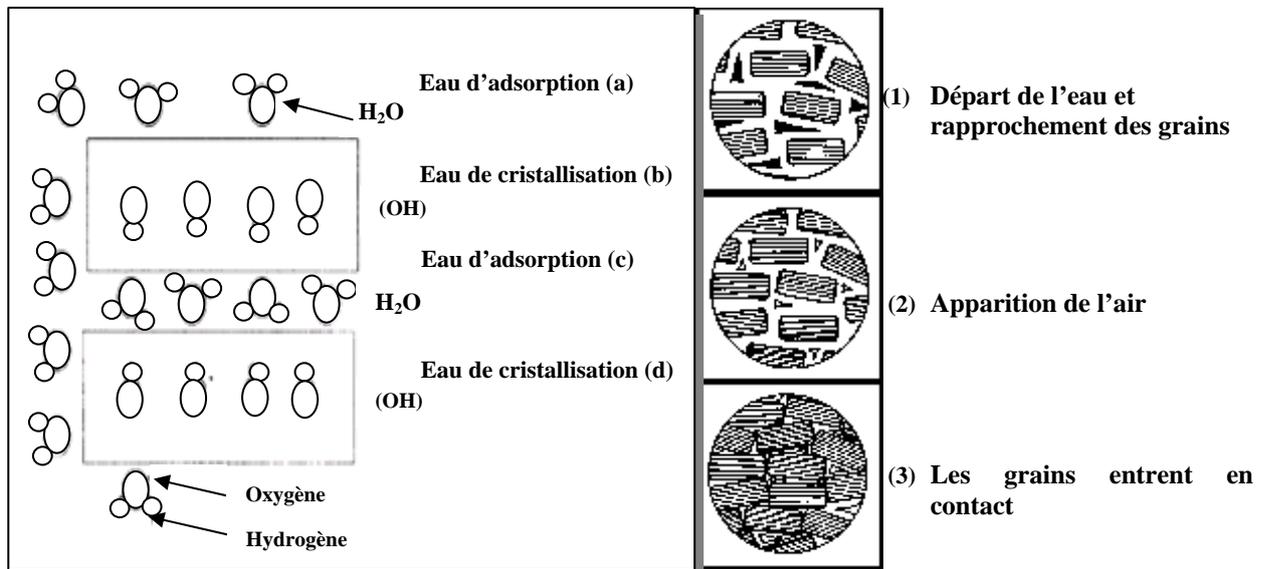


Fig. IV.10 : Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995).

IV.4.2.2. Surfaces argileuses:

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non neutre. Il existe deux types de charge :

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans T, Mg^{2+} ou Fe^{3+} pour Al^{3+} dans O), de signe négatif.
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux ou suite à l'adsorption de surfactants, de signe (+) ou (-).

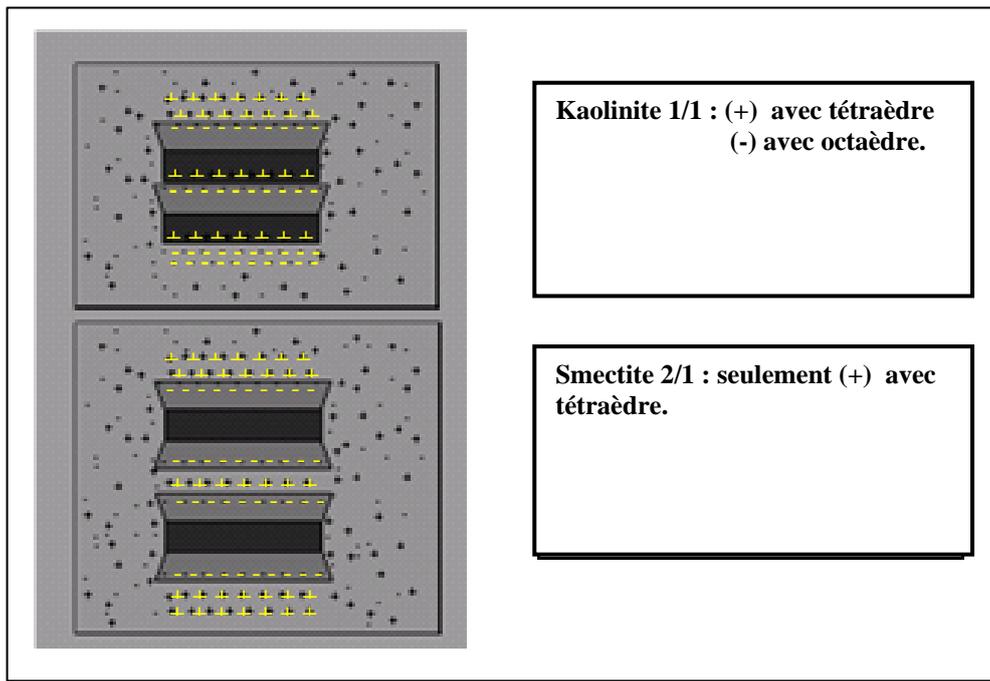


Fig. IV.11 : Adsorption à l'équilibre (Schroeder, 2002).

La charge de surface est liée à l'hydrolyse de liens rompus Si-O et Al-OH, le long des surfaces. A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique, H⁺ se lie plus par rapport à OH⁻, une charge positive se développe, à fort pH, une capacité d'échange cationique (CEC) se développe, les OH⁻ se lient davantage que H⁺ et une charge négative se développe (Fig.14).[2]

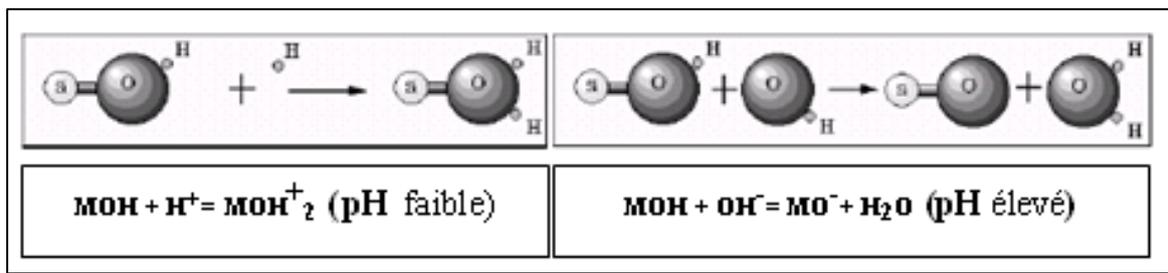


Fig. IV.12 : Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

IV.4.3. L'échange cationique :

Dans le cas des argiles, la charge de surface résulte des substitutions isomorphes au sein même des feuillets, et cette charge est fixée. Elle peut être modifiée par différents cations compensateurs. Ainsi, si la solution contient ces cations spécifiques, la charge de surface est susceptible d'évoluer. Toutefois, plus la Capacité d'Echange Cationique de l'argile est grande, plus les cations compensateurs sont mobilisables, et l'on reste alors dans une configuration de type charge fixe. On parle généralement pour les argiles, notamment les argiles gonflantes qui possèdent une CEC élevée, de la charge de surface plutôt que d'un éventuel potentiel de surface.[10]

Tableau IV.3 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (MOREL).

Minéral	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface totale (m ² /g)	C.E.C. (milliéquivalent/100g)
kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
illite	20-55	80-120	100-175	10-40
smectites	600-700	80	700-800	80-150
vermiculite	700	40-70	760	100-150
chlorite	-	100-175	100-175	10-40

IV.5. Formation et utilisations de la bentonite :

Les bentonites sont issues de l'altération de produits du volcanisme soit par sédimentation de cendres en milieu lacustre ou lagunaire soit par altération des roches volcaniques sous forme de filons [14]. Théoriquement, les bentonites sont des roches constituées à plus de 50 % de smectite. De nombreux autres minéraux, témoins des roches originelles, néoformées ou transportées peuvent y être associés.

Les bentonites sont utilisées sous de nombreuses formes depuis le simple concassage du matériau jusqu'à son extraction et son traitement approfondi [22] [8] [21]. En particulier, les smectites contenues dans les bentonites confèrent des propriétés adsorbantes, d'étanchéité, de transport ou de liant largement utilisées dans la construction [10] [20], l'industrie chimique [24] [19] et l'ingénierie environnementale [13] [15].

Les bentonites sont utilisées sous différentes formes de la poudre ou granulés (associé à un géotextile), jusqu'à la suspension plus ou moins concentrée et plus ou moins traitée (fluides de forage). Les applications dans les domaines liés à l'agroalimentaire, la pharmacie et la

cosmétiques nécessitent une connaissance accrue de la minéralogie de la bentonite étudiée. Leur utilisation est alors soumise à des règles strictes de composition.[1]

Les travaux souterrains : forage, excavation Lors d'un forage, la boue bentonitique est injectée sous pression à l'intérieur de la tige de forage puis remonte le long des parois du forage. Sur son passage, la boue va tout d'abord lubrifier la tête de forage puis englober les déblais afin de faciliter leur extraction et enfin déposer une pellicule stabilisatrice sur les parois. Lors d'un arrêt temporaire des travaux, la boue se gélifie et les déblais sont maintenus en suspension, évitant ainsi leur sédimentation. Lors de la reprise, la boue se fluidifie et les travaux reprennent. Si les pertes en circulation ne sont pas trop importantes, la boue utilisée est recyclée puis éventuellement réinjectée dans le forage. L'ajustement des propriétés de la boue peut, dans certaines conditions, permettre de colmater les pertes [17].

Dans le milieu naturel, l'utilisation de la bentonite pose le problème du vieillissement des structures lié principalement aux propriétés d'échange. En effet, les interactions entre les bentonites et les eaux chargées peuvent conduire à une évolution de leurs propriétés mécaniques. Par exemple, les eaux chargées provenant de pluies acides, des aquifères marins sous-jacents ou encore des massifs carbonatés voisins. Les risques liés aux échanges avec la bentonite sont mal connus, ils pourraient diminuer significativement les propriétés d'étanchéité. De même, lors d'un forage, le fluide bentonitique est en contact avec de nombreux matériaux et fluides qui peuvent modifier ses propriétés mécaniques.

Les recherches sur la synthèse des argiles pourraient apporter de nouvelles solutions, mais leur élaboration reste difficile, coûteuse et dans des quantités souvent incompatibles avec leur utilisation industrielle.

IV.5.1. La cristallographie de la bentonite :

Les phyllosilicates sont des silicates particuliers pour lesquels les tétraèdres $(\text{SiO}_4)^{4-}$ sont disposés en couches (la couche tétraédrique T) selon un motif hexagonal par mise en commun de trois oxygènes. La base de la couche tétraédrique est électriquement neutre. Les oxygènes apicaux sont reliés à une couche d'octaèdres (O). Lorsque la couche O est liée de part et d'autre à une couche T, on obtient le groupe des phyllosilicates TOT ou 2 : 1. L'épaisseur d'un feuillet est alors de 10 \AA , ce groupe réunit de nombreux minéraux (talc, mica, illite, smectite).

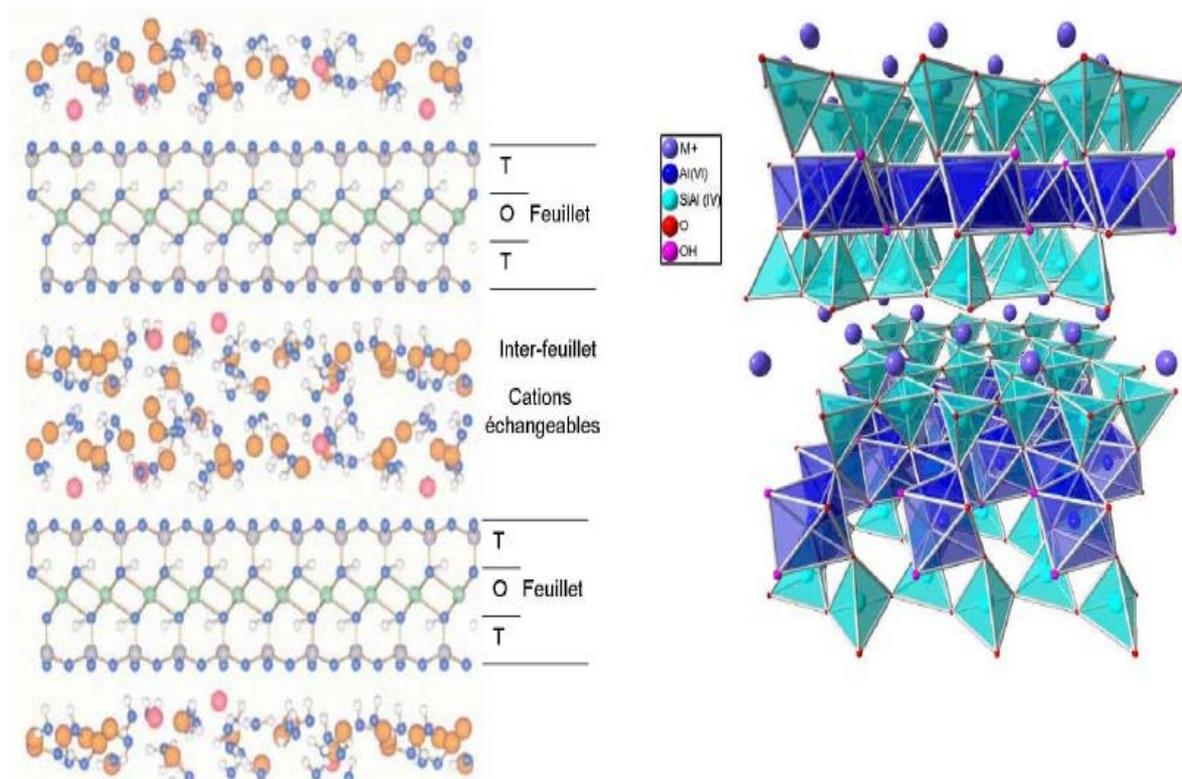


Fig. IV.13 : Représentation de la structure cristalline d'une smectite hydratée et représentation simplifiée des tétraèdres et octaèdres par Sandrine PAUMIER [12].

Les smectites présentent des substitutions isomorphes : les ions silicium (Si^{4+}) des couches tétraédriques peuvent être remplacés par des ions aluminium (Al^{3+}). De même, les ions métalliques de la couche octaédrique (Al^{3+}) peuvent être remplacés par des ions de valence inférieure (Mg^{2+} , Fe^{2+}).

Lors de la mise en suspension de la poudre, les cations interfoliaires s'hydratent, des couches d'eau supplémentaires s'intercalent entre les feuillets, c'est le gonflement osmotique. On considère que les feuillets sont alors espacés de quatre couches d'eau dans le cas d'une saturation calcique et que ce nombre augmente considérablement dans le cas d'une saturation avec un cation monovalent (sodium, lithium).

Rappelons que les cations sont issus de l'environnement chimique de la smectite mais que la composition du cortège d'échange n'est pas le reflet de cette composition. Les lois de sélectivité cationique conduisent à des différences, qui peuvent être très importantes entre la composition chimique du fluide suspendant et le cortège d'échange.

IV.5.2. Les formes d'organisation des feuillets :

Les feuillets dispersés dans la suspension (Fig. IV.14 , cas A) interagissent et finalement s'associent sous certaines conditions pour former des structures. Trois modes d'association élémentaire de particules ont été définis par Van Olphen [27] :

- B : association entre des oxygènes plans de deux feuillets parallèles (face/face, FF).
- C : association entre une surface périphérique et une surface plane (bord/face, BF).
- D : association entre les surfaces périphériques de deux particules voisines (bord/bord, BB).

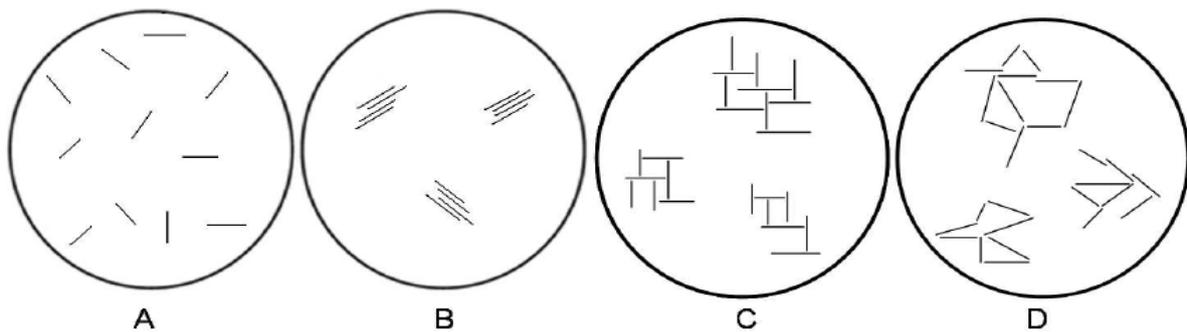


Fig. IV.14 : Formes d'organisation supposés des feuillets de montmorillonite en suspension selon la théorie de Van Olphen: A. dispersion, B. association face/face, C. association bord/face, D. association bord/bord. [27]

- A- La délamination des particules n'est possible que lorsque la concentration de la suspension est suffisamment faible pour permettre le développement optimal de la double couche diffuse. Dans ce cas, les feuillets se répartissent dans la suspension en se repoussant vers une organisation minimisant les interactions. En suspension, une telle dispersion des feuillets induit une forte occupation volumique donc une viscosité relativement importante dès les plus faibles concentrations.
- B- L'association face/face des feuillets est à l'origine de la formation des cristallites, ce type d'organisation suppose la coalescence des doubles couches. Deux types d'organisation sont alors possible :
- soit l'existence de petites unités compactes avec recouvrement quasi total (Fig.IV.14 ,cas B),
 - soit la création d'une structuration extensive dans la suspension par recouvrement partiel tel que le modèle en bandes. [28]

La flexibilité de la structure obtenue pourrait permettre l'obtention d'un réseau tridimensionnel. Plusieurs auteurs [26] [11] [18] [16] confirment cette interprétation, Abend et Lagaly [9] qualifient cet état de gel attractif.

L'hétérogénéité de répartition des charges à la surface des feuillets induirait l'existence de zones ponctuelles, non chargées, susceptibles de s'associer. La flexibilité de la structure serait alors due à la seule flexibilité du feuillet. Cependant, la flexibilité d'un feuillet seul est limitée et l'évaluation précise de l'hétérogénéité des charges reste difficile. La combinaison de ces deux modes d'association pourrait être en accord avec la description des espaces poreux intra-particulaires, interparticulaires et inter-agrégats.[25]

- C- L'association bord/face est théoriquement possible entre les faces constamment chargées négativement et les bords, chargés positivement lorsque le pH est inférieur au point isoélectrique. Ce mode d'association est à la base de la théorie de l'organisation en château de cartes proposée par Hofmann. Ce mode d'association permettrait le piégeage de grandes quantités d'eau, il est donc souvent proposé pour expliquer l'apparence géline des suspensions et leur forte viscosité.
- D- L'association bord/bord des feuillets est envisageable dans la mesure où les bords des feuillets sont des zones où le potentiel électrostatique est minimal [23]. Ces liaisons seraient alors privilégiées lors de la compaction du système par augmentation de la concentration. L'organisation en ruban s'appuie sur cette hypothèse. Elle permettrait, au même titre que l'organisation en château de carte de mobiliser une grande quantité d'eau et donc d'expliquer les propriétés mécaniques des suspensions.

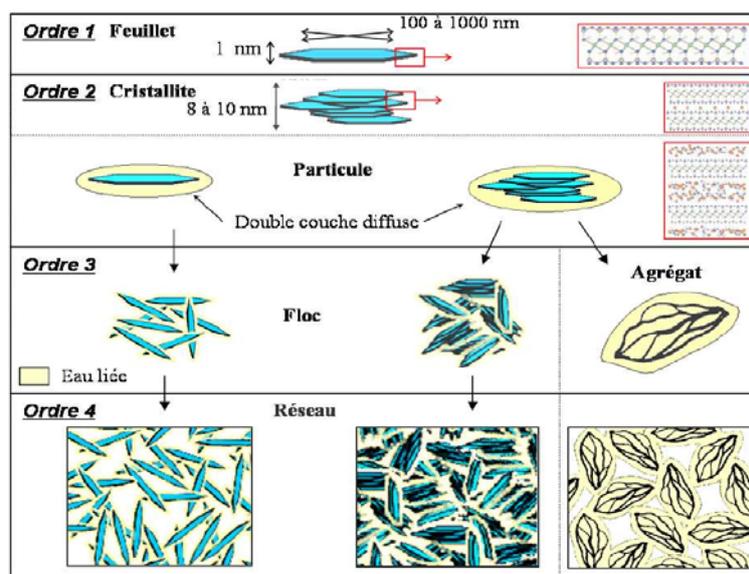


Fig. IV.15 : Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de bentonite(smectite) de l'état sec aux suspensions diluées puis concentrées.[1]

Par définition, l'agrégat est l'association de particules des plusieurs feuillets avec coalescence de leurs doubles couches (associations face/face), des liaisons fortes se créent entre les feuillets issus de particules initialement séparées. Les agrégats sont susceptibles de piéger de l'eau intra-agrégat. La déformabilité de ces structures est liée à l'élasticité de chaque feuillet et à la structure résultante. (Fig. IV.15).

La connexion des structures ponctuelles d'ordre 3 à l'ensemble de la suspension, par exemple lors de l'augmentation de la concentration, conduit à la formation d'un réseau connecté d'ordre 4. L'existence de cette structure donne à la suspension des propriétés mécaniques spécifiques (visco-élasto-plasticité).

En bref, l'étude des suspensions de smectite est liée aux propriétés intrinsèques des feuillets (ordre 1) mais également à leur environnement physico-chimique (sels) ainsi qu'à la concentration de la suspension. Les feuillets mis en suspension peuvent s'associer en cristallites (ordre 2) puis former des agrégats ou des flocs (ordre 3). Enfin ces structures locales peuvent s'étendre à l'ensemble de la suspension pour former un réseau (ordre 4).

Chapitre V : Caractéristiques physico-chimiques des polymères

V.1. Introduction :

L'utilisation des polymères dans les fluides de forage a commencé pour la première fois en 1937 lorsque l'on ajouta de l'amidon de maïs à la boue bentonique pour contrôler les caractéristiques de filtration.

L'utilisation initiale était d'accroître les propriétés d'un système simple à base d'argiles et de protéger la bentonite de la floculation du sel. Les substances utilisées se produisaient naturellement ou étaient extraites par des procédés simples.

Depuis cette époque, les polymères utilisés sont devenus beaucoup plus sophistiqués, et sont souvent conçus spécialement pour une situation de forage particulier ; dans certains cas, ils peuvent même remplacer totalement les argiles, particulièrement pour le forage des zones argileuses sensibles à l'eau ou des zones productrices d'eau et d'hydrocarbures.

V.2. Structure fondamentale des polymères :

Un polymère consiste en une unité de base (monomère) ou plusieurs unités chimiquement reliées entre elles (polymérisées) pour former une chaîne. Les unités peuvent être identiques ou radicalement différentes.

Après polymérisation, les groupes peuvent être modifiés chimiquement. Un certain nombre de variations peuvent être visualisées à partir de ce schéma simple. Certaines sont énumérées ci-après :

1. type de monomère ou monomères.
2. nombre de monomères reliés pour former une chaîne – c'est-à-dire le poids moléculaire.
3. nombre de réticulations ou ramifications dans la chaîne.
4. type et ampleur des modifications chimiques ultérieures.

Les facteurs qui déterminent le comportement d'un polymère particulier sont assez complexes et souvent des modifications relativement simples dans la structure d'une molécule

peuvent altérer considérablement ces propriétés. Ceci confère aux polymères une versatilité inhérente qui se reflète dans leur grande variété d'applications.

Leurs variations structurales les plus importantes sont :

a) Le poids moléculaire ou longueur de la chaîne. Il peut varier par la limitation du nombre de groupes de fin de chaîne ou par la dégradation chimique de chaînes plus longues. Un autre point important est la distribution des poids moléculaires.

b) Type de groupes réactifs. La réaction chimique dépend essentiellement du type des groupes qui sont attachés à la molécule et du nombre des groupes. Il y a souvent plus d'un type de groupes réactifs. La distribution des groupes sur la chaîne du polymère affecte aussi les propriétés et la réactivité. Souvent, en raison de la nature complexe des polymères, on ne connaît pas les détails de la structure ; mais les diverses conditions de la réaction peuvent produire des différences dans la structure qui peuvent influencer les performances du polymère.

Les groupes qui peuvent être attachés aux polymères peuvent être divisés en trois catégories :

- (I) non anioniques.
- (II) anioniques ou chargés négativement.
- (III) cationiques ou chargés positivement.

Plus d'un type de groupes peuvent être présents dans la molécule. Les types de groupes sont donnés dans le tableau V.1.

La nature de la charge de certains groupes dépend du pH du système, qui peut changer de non-anionique vers cationique ou anionique parce que les groupes sont respectivement faiblement basiques ou faiblement acides.

Tableau V.1. : Groupes polaires

Classe	Groupe	
	Nom	Formule
Non ionique	Hydroxyle Liaison éther ester	- OH R - O - R - O - CH ₃
Anionique	OH phénolique Carboxyle Sulfonique Phosphate	C ₆ H ₅ OH - C ₆ H ₅ O ⁻ COOH - COO ⁻ - SO ₃ H- -PO ₃ ⁻ - PO ₃ H- -PO ₃ ⁻
Cationique	amine	- NH ₃ ⁻ -NH ₄ ⁺

c) **Hydratation et forme finale de polymère** : La forme finale de polymère après l'hydratation dépend des facteurs suivants :

(i) *ramifications* ou réticulations dans la structure.
(ii) *Concentration* et type des groupes de molécules
(iii) *pH de la solution*, changeant le caractère ionique des molécules, et par conséquent, les forces de répulsion et d'attraction entre les molécules.

(iv) *La teneur ionique* ou en sel. Et son effet sur la répulsion électrostatique entre les charges. L'effet sur un polymère chargé négativement est de changer la configuration d'un polymère étiré en eau douce (où les charges de répulsion étirent la molécule) en une structure semblable à une bobine compacte dans une solution saline où les forces de répulsion sont plus faibles. Ceci est montré par un schéma dans la fig.17. Le changement de la forme moléculaire modifie les propriétés physiques du polymère dans la solution. On peut voir que le polymère ainsi "torsade " présente une surface moindre à l'eau ou aux autres molécules de polymères. Ces réactions étant à l'origine du développement des propriétés visqueuses, on comprendra qu'une augmentation du sel réduira la viscosité d'un polymère chargé.

A l'inverse, les propriétés visqueuses d'un polymère non ionique doivent être essentiellement inaltérées par le sel.

(V) *Les ions multivalents* peuvent agir comme des agents de liaison par réaction ou par complexification avec plus d'un groupe chargé de la molécule. La liaison peut réduire la solubilité et la viscosité. Le degré de la réaction dépend de la concentration des ions multivalents et du pH de la solution.

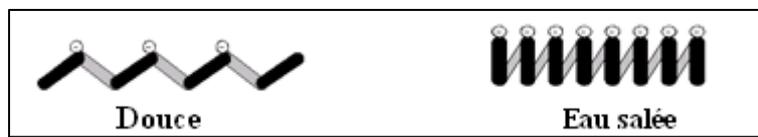


Fig. V.1 : Effet de concentration d'électrolyte sur la configuration de polymère.

V.3. Les fonctions et les caractéristiques principales des polymères dans les fluides de forage:

On étudiera les traits généraux nécessaires à un polymère pour être performant dans une fonction particulière au sein d'un fluide de forage.

Le tableau 5 résume les relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et les traits essentiels de la structure du polymère.

Tableau V.2 : Résumé des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.

FONCTION	Caractéristiques principales
Viscosité	Poids moléculaire élevé
Viscosité et gélification	Poids moléculaire élevé et structure à haute ramification ou agent de réticulation.
Viscosité dans des solutions salées	Poids moléculaire élevé et types non ioniques ou anioniques à haute substitution.
Défloculation, dispersion, ou fluidification	Poids moléculaire faible, chargé négativement à des valeurs de pH alcalines.
Floculation	Poids moléculaire élevé avec groupes chargés pour adsorption aux argiles.
Surfactant	Groupe hydrophobe et groupes hydrophiles sur la même molécule.
Additif de filtrat	Particules à forme colloïdale.

V.3.1. Viscosifiants :

Les propriétés visqueuses conférées à l'eau par la solution d'un polymère sont dues aux interactions eau/polymère et polymère/polymère. Plus les molécules sont longues, plus il est difficile de séparer les molécules les unes des autres et plus elles deviennent enchevêtrées. La Fig. V.2 donne la relation entre la concentration et la viscosité pour deux polymères de poids moléculaires différents.

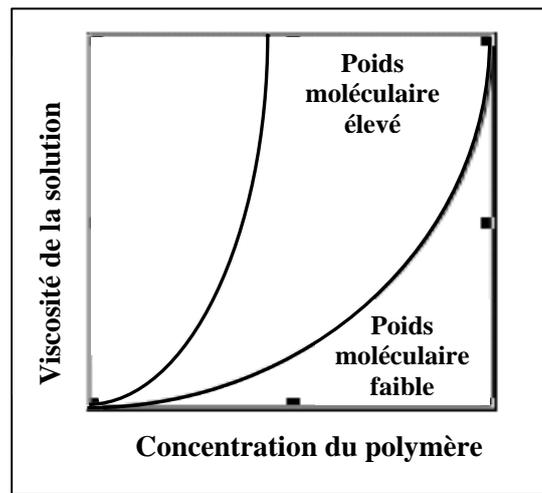


Fig. V.2 : Viscosité en fonction de la concentration de différents poids moléculaire de polymère soluble dans l'eau.

Ces forces qui engendrent la viscosité peuvent être interrompues par l'apport d'énergie ou de cisaillement. Il en résulte que plus le taux de cisaillement est élevé, plus la viscosité est faible. Les solutions qui ont un tel comportement sont dites pseudo-plastiques ou fluides "fluidifiants par cisaillement". Ceci est le comportement d'écoulement idéal pour les fluides de forage du fait qu'une basse viscosité est nécessaire dans les zones à taux de cisaillement élevé près de l'outil et des viscosités plus élevées sont nécessaires dans les zones à taux de cisaillement plus faible dans l'espace annulaire, pour transporter les déblais vers la surface.

Les molécules linéaires, comme celles dérivées de la cellulose, tendent à être plus sensibles à la dégradation mécanique que les polymères à ramifications plus importantes comme les polysaccharides bactériens. Des conditions de haute température, haute teneur en oxygène et haute alcalinité tendraient à rendre la plupart des polymères organiques plus sensibles à une dégradation chimique.

Comme on l'a déjà vu, le sel a pour effet de réduire la force de répulsion des sites chargés de la molécule, produisant ainsi une contraction du polymère avec une perte non négligeable de la viscosité. Cet effet peut réduire l'efficacité du polymère de 50%. L'effet peut être minimisé dans la mesure où le polymère peut être d'abord hydraté en eau douce. Bien sûr, l'effet sera minime sur les molécules non ioniques.

La solubilité et les dimensions moléculaires peuvent être modifiées par réaction avec des ions multivalents, telle que la réaction entre les CMC et le calcium. La stabilité de ces polymères anioniques aux cations multivalents est assez compliquée et dépend surtout des cations présents, des concentrations et du pH de la solution.

Généralement, la combinaison de pH élevé et d'alcalinité élevée, tendent à rendre le système moins stable du fait de la précipitation d'hydroxyde de métal complexe de polymères.

V.3.2. Déflocculants :

Les déflocculants ou fluidifiants dans les systèmes à base d'argiles alcalines, permettent d'obtenir généralement des résultats par adsorption du polymère chargé négativement sur les plaquettes d'argile, neutralisant ainsi les charges positives et créant une charge négative globale. Ceci est illustré en Fig. V.3 . Ainsi, les fluidifiants sont caractérisés par leur charge négative et leur poids moléculaire faible.

Si le polymère est trop long, il liera les particules entre elles et manifestera une action de floculation.

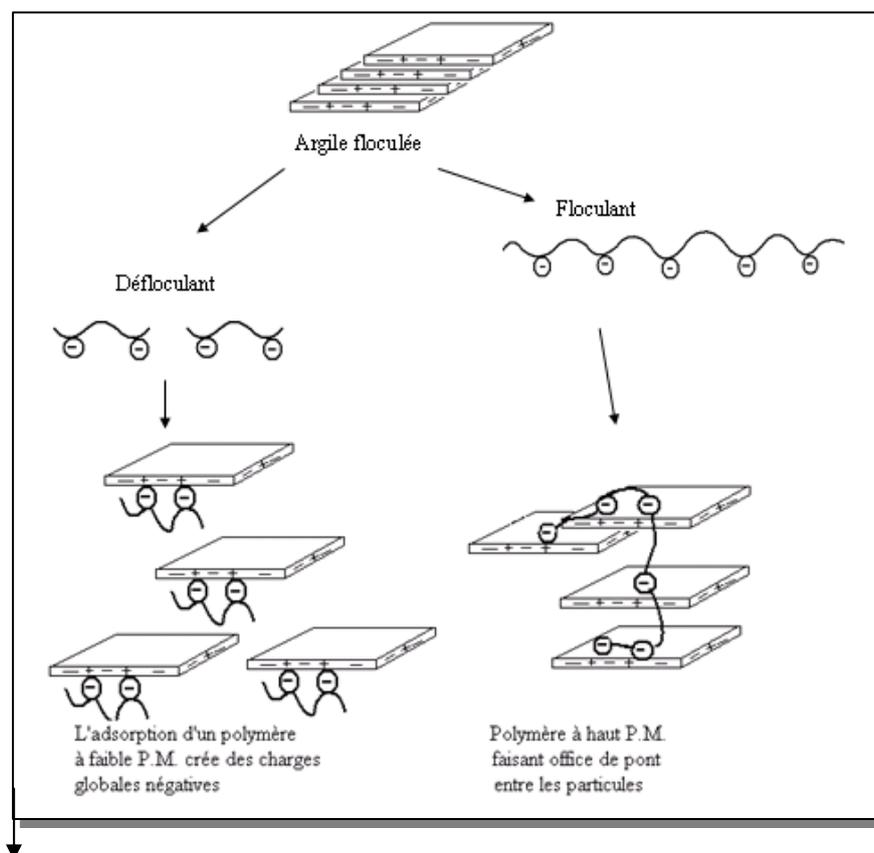


Fig. V.3 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible poids moléculaire et le rôle de floculation des polymères à haut poids moléculaire.

V.3.3. Flocculants :

Les flocculants sont principalement caractérisés par un poids moléculaire élevé, ce qui permettra au polymère de former des liaisons de particule à particule. Les molécules de groupe ionique peuvent adsorber plus fortement sur les sites ioniques et ainsi flocculer de façon plus efficace. La Fig. V.3 tente de montrer comment un polymère avec les mêmes groupes réactifs peut agir comme un déflocculant, avec un poids moléculaire élevé.

V.3.4. Surfactants :

Les surfactants sont des polymères dans lesquels chaque molécule contient deux assemblages d'atomes ou groupes. Un groupe est polaire s'il est attiré vers les surfaces polaires, telle que l'eau et est appelé hydrophile ou groupe "aimant l'eau". L'autre est non polaire, hydrophobe ou groupe "haïssant l'eau". La nature de surfactant est liée au type de groupe hydrophobe ou hydrophile et à la combinaison des groupes. Quand les groupes sont polymériques, une famille complète de molécules peut être produite avec un équilibre entre les groupes hydrophobes et hydrophiles changeant progressivement de série en série.

Le Tableau V.3 donne la liste d'un certain nombre de ces groupes qui peuvent être combinés pour former un surfactant. La propriété particulière des surfactants utilisés dans les fluides de forage est la capacité de ces molécules à exister à l'interface des surfaces hydrophobes et hydrophiles.

Tableau V.3 : Certain groupes non polaires et polaires qui peuvent être incorporés dans une molécule de surfactant.

Groupes non polaires	Groupes polaires
Chaîne d'hydrocarbures $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}$ provenant souvent d'huiles ou de graisses naturelles ou de pétrole. Peut contenir des liaisons insaturées dans la molécule -CH=CH-	Hydroxyle -OH Phénolique R-OH Ether $\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O-CH}_2\text{-CH}_2\text{OH}$ Carboxylique -R-COO^- Ester $\text{-R-COOR}'$ Sulfonate -OSO_3^- Sulfate -SO_3^- Sulfosuccinate $\text{CH}_2\text{COOR-O}_3\text{S-CHCOOR}$ Amine -R-NH_2

V.3.5. Additifs de filtrat :

Les additifs polymères peuvent affecter le filtrat, essentiellement, par trois mécanismes différents. Un cake défloculé va se tasser pour former un cake plus mince et plus imperméable de façon à ce que les polymères qui agissent comme défloculants, tels que les CMC à base viscosité ou les lignosulfonates, réduisent le filtrat. Si la phase liquide, que l'on fait passer à travers le cake, est visqueuse, cela réduira aussi le filtrat. Des exemples de ces polymères sont la CMC à poids moléculaires élevé ou la gomme de xanthane. Ces deux mécanismes sont des fonctions secondaires de ces deux types de polymères et particulièrement les flocculants ou viscosifiants.

Un troisième mécanisme de réduction de filtrat est d'ajouter des particules colloïdales qui peuvent se déformer et se comprimer pour boucher les pores du cake.

V.4. Polymères utilisés dans les fluides de forage :

Les polymères classés comme polysaccharides représentent le groupe de polymères le plus utilisé dans les fluides de forage, et comprennent les dérivés de cellulose, les amidons, les polysaccharides bactériens et les gommes. L'unité de base est le glucose qui contient seulement des atomes de carbone, hydrogène Fig. V.4 .

Les polymères sont construits à travers un atome d'oxygène reliant les atomes de carbone d'une autre unité de glucose pour former un lien glucosique (Fig. V.5).

Une gamme considérable de polymères peut être fabriquée en modifiant des produits naturels. Il contiendront tous le même groupe de monomères mais différeront par leur poids moléculaire, leur type de liaison et leur modification chimique. Les différentes structures peuvent être reliées aux différentes fonctions des molécules.

Tableau V.4 : Types et fonctions des polymères dans les fluides de forage.

Types de polymères	Description	Exemples	Fonctions
Ether de carboxymethyl Cellulose (CMC)	Groupes COO ⁻ anioniques à polymère linéaire polysaccharide poids moléculaire élevé	CMC haute viscosité CMC basse viscosité	Viscosifiant additif du filtrat. Additif de filtrat.
Ether d'hydroxyethyl Cellulose (HEC)	Groupe d'éther non ionique à polymère linéaire polysaccharide poids moléculaire élevé	HEC	Viscosifiant particulièrement pour les saumures

Amidon	Polysaccharide fortement ramifié forme une solution colloïdale normalement $-\text{COO}^-$ on ionique ou anionique	Maïs, pomme de terre, tapioca etc....avec modifications chimiques variables.	Contrôle du filtrat dans les solutions salées.
Polysaccharide à gommages bactériennes	Polysaccharide structure complexe ramifiée – quelques groupes anioniques. Poids moléculaire élevé	Gommages Xanthan	Viscosifiant surtout dans l'eau salée et là où des propriétés de suspension sont nécessaires
Gommages naturelles provenant d'arbres et buissons	Polysaccharide ramifié – poids moléculaire élevé structure complexe avec quelques groupes anioniques	GUAR Gomme arabique	Viscosifiant
Lignosulfonate	Sulfonate soluble à l'eau dérivé de la lignine sels métalliques	Lignosulfonate de calcium. Lignosulfonate de calcium – chrome. Lignosulfonate Ferrochrome.	Fluidifiant défloculant contrôle du filtrat
Lignines minières	Sels métalliques d'acide humique pétrifié	Lignite de chrome, lignite de potassium, lignite causticisé	Contrôle du filtrat et fluidifiant
Tannin	Extraits d'arbre et d'écorce	Quebracho	Fluidifiant
Polyphosphates	Phosphates déshydratés moléculairement	Acide de sodium pyrophosphate	fluidifiant
Polymère vinyle	Polymère d'acide acrylique $\text{CH}_2=\text{CH COOH}$	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-$ $\text{O}-\text{Na} \quad \text{O}-\text{Na}$	Faible poids moléculaire < 1.000 fluidifiant Floculant à haut P.M.
Polymère vinyle	Co-polymère d'acide acrylique et acrylamide avec rapports différents	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-$ $\text{O}-\text{Na}^+ \quad \text{NH}_2$	Stabilisateur d'argile floculante
Co-polymère	Acétate vinylanhydride malléique poids molécule élevé	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CO}}{\text{CH}}-\underset{\text{CO}}{\text{CH}}-\underset{\text{CO}}{\text{CH}}-$ $\text{O}=\text{C}-\text{CH}_3 \quad \text{OH} \quad \text{OH}$	Extenseur de bentonite floculante
Surfactant	Savon de résine Savon de chaux de lécithine de tall oil nonylphénoéthoxylate alkylsulfonates	Polymères synthétiques	Emulsifiant pour eau dans émulsifiant à l'huile Pour huile dans détergent de forage à l'eau

Surfactant	Ethanol n-tricedyl polyoxy éthylène éther nonylphénol- polyéthylèneglycol	Polymères synthétiques	Agent moussant
Surfactant	Alcools supérieurs huiles végétales sulfatées	Polymères synthétiques	Antimoussant
Surfactant	glycérides d'acides gras alkyldiamine éthoxylé à longue chaîne	Polymères synthétiques	Inhibiteur de corrosion lubrifiant

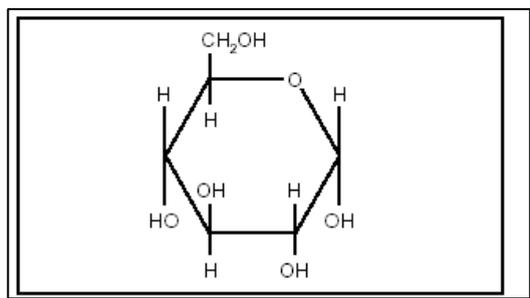


Fig. V.4 : Glucose.

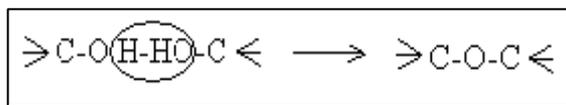


Fig. V.5 : Lien glucosique entre les unités du glucose.

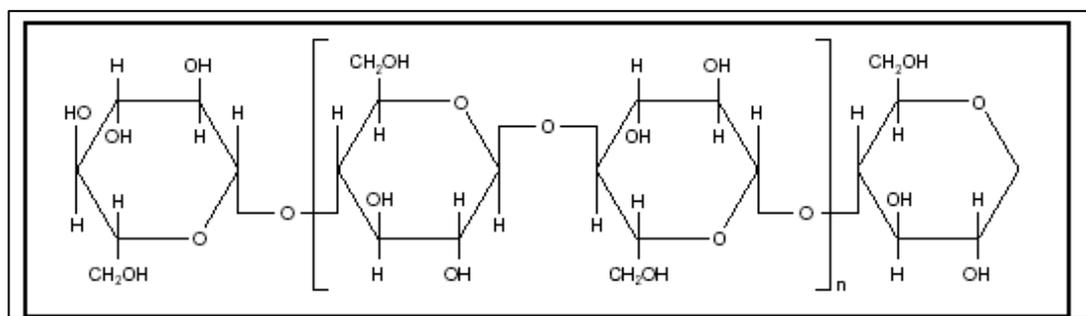


Fig. V.6 : Structure de la cellulose.

V.4.1. Carboxyméthyl cellulose (CMC) :

Dans le cas des CMC, un groupe carboxyméthyl (-CH₂COOH) est fixé à un atome de carbone par une liaison éther comme on le voit en fig. V.7 . On fait réagir la cellulose en premier lieu avec l'hydroxyde de sodium pour former la cellulose alkali et ensuite avec de l'acétate monochlore. Le degré de la réaction est appelé degré de substitution ou DS qui se situe normalement dans une gamme de 0.8 à 1.2 pour les CMC utilisés dans les fluides de forage.

On verra donc qu'une CMC à poids moléculaire faible montera les caractéristiques requises pour un défloculant, c'est-à-dire un poids moléculaire faible et une charge négative. Une CMC à poids moléculaire élevé sera utilisé comme viscosifiant et possédera aussi certaines propriétés de filtrat.

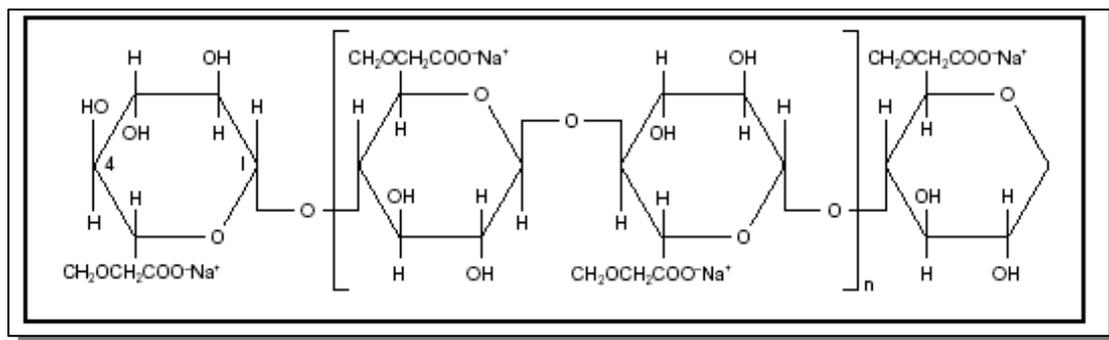


Fig. V.7 : Structure du carboxyméthylcellulose.

V.4.2. Hydroxyéthyl cellulose (HEC) :

Le procédé de fabrication des HEC est fondé sur la réaction entre la cellulose alkali et les oxydes éthylène comme suit :



Des réactions ultérieures peuvent avoir lieu sur les oxydes d'éthylènes. Une structure d'unité idéale est donnée en Fig. V.8.

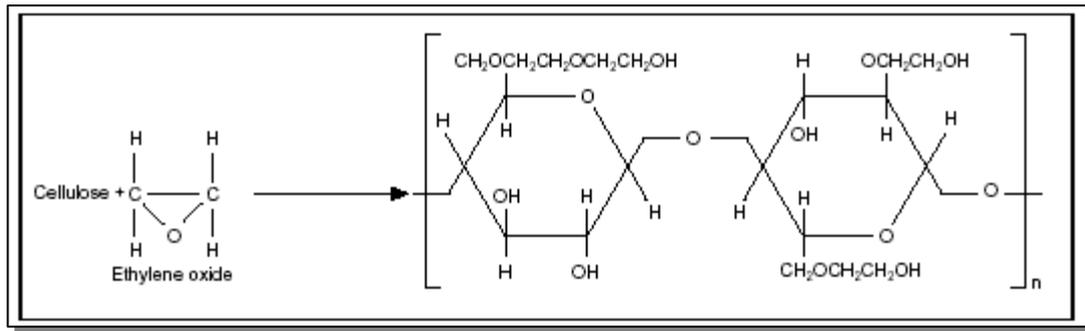


Fig. V.8 : Structure d'hydroxyéthylcellulose.

Le contrôle des conditions de réaction peut produire des polymères différents en agissant sur les 4 variables principales.

- 1) Longueur de la chaîne de cellulose.
- 2) Degré de substitution (DS) sur l'unité cellulose, normalement 1.5 – 2.5 DS pour un polymère soluble dans l'eau.
- 3) Degré de polymérisation des chaînes latérales polyéthylènes appelé substitution molaire (SM).
- 4) Uniformité de la substitution.

V.4.3. Polysaccharides microbiens – Gomme de xanthane :

Les bactéries du genre *Xanthomonas* peuvent produire des colonies de gommes. Ces simples bactéries, à cellule unique, secrètent une gomme polysaccharide qui forme une couche protectrice, empêchant la déshydratation et procurant une barrière physique contre l'attaque des bactériophages. Les bactéries sont tuées après fermentation et la gomme est extraite et précipitée à l'aide d'alcool isopropylique. Lorsque l'alcool est récupéré, la gomme est séchée et moulue. Le procédé de purification est très onéreux.

La gomme Xanthane est un hétéropolysaccharide avec un poids moléculaire supérieur à 1 million. La gomme contient une unité de base répétitive de 16 unités. Une structure probable est donnée en Fig. V.9. C'est une structure ramifiée contenant des groupes carboxyles polaires et des groupes ester. Le polymère forme des solutions visqueuses qui sont pseudoplastiques ou fluidifiantes par cisaillement fort et épaississante par cisaillement faible.

Les solutions de polymères Xanthan ont d'excellentes propriétés de suspension qui ne peuvent être comparées à d'autres polymères à concentration équivalente.

Les propriétés visqueuses de ces polymères ne sont généralement pas affectées par le sel ou la température. Ce polymère a une application particulière dans les fluides à base de potassium, à faible teneur en solides et accroît la capacité porteuse sans augmenter fortement la viscosité.

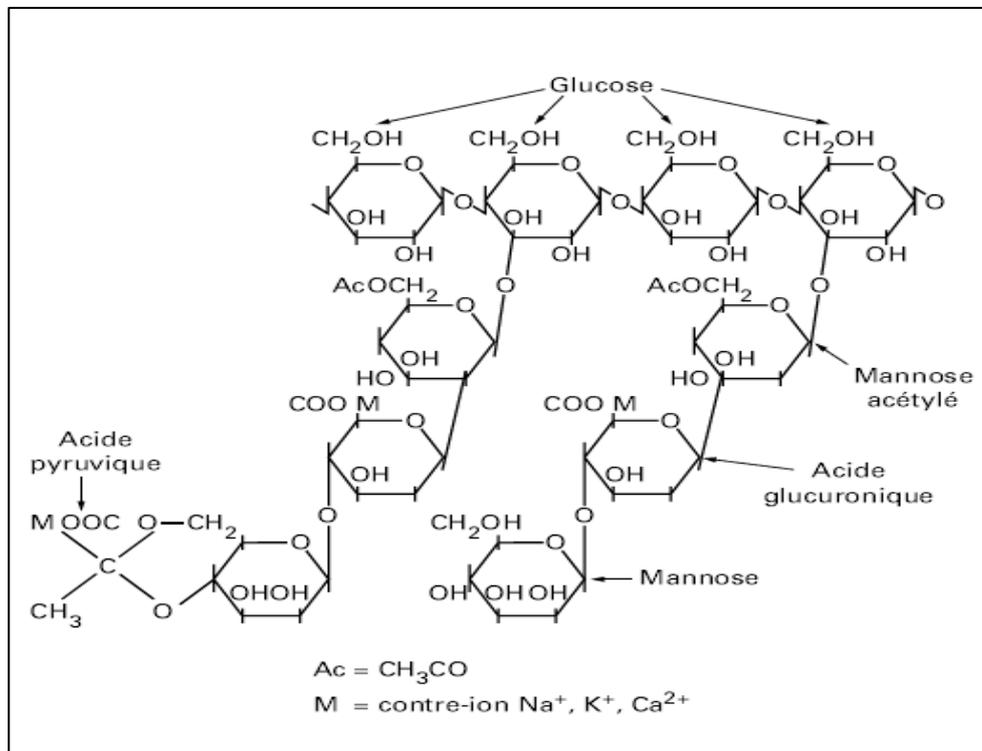


Fig. V.9 : Structure probable de l'unité répétitive de la gomme de xanthane à structure ramifiée complexe.

V.4.4. Gommages naturelles – GUAR :

La gomme GUAR provient de la graine de la plante de GUAR. C'est un polymère polysaccharide à poids moléculaire d'environ 220 000. L'unité de répétition est composée de galactose et de manose.

Le polymère peut être modifié chimiquement par réaction avec les groupes hydroxyles. Les caractéristiques de la structure à poids moléculaire élevé et le groupement non ionique, assurent de très fortes viscosités et une absence de sensibilité au sel. Il peut être utilisé pour fabriquer un fluide à polymère visqueux pour le forage de puits à grande superficie.

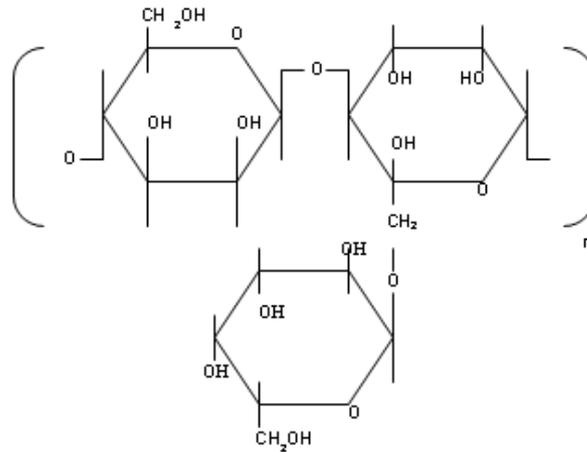


Fig. V.10 : Structure probable de l'unité répétitive de la gomme GUAR.

V.4.5. Polymères synthétiques :

De nombreux polymères synthétiques sont fondés sur la polymérisation des molécules que l'on peut décrire en tant qu'éthylène de synthèse. Ils polymérisent pour former une structure carbone-carbone.

a) Polyacrylates :

Les substances à poids moléculaire inférieur à 1000 peuvent être des défloculants efficaces et avoir des applications particulières à températures plus élevées parce qu'ils possèdent une plus grande résistance aux détériorations thermiques et bactériennes que les polymères naturels comme l'amidon et le CMC. Leur application est limitée par la tendance qu'ils ont à former des sels insolubles avec les ions polyvalents.

b) Co-polymères d'Acrylamide/Acrylate :

Les chaînes de polyacrylamides hydrolysés contiennent des groupes carboxyle et amide. Ils peuvent être préparés par polymérisation d'acrylamide et d'acrylate ou par hydrolyse de polyacrylamides. Le poids moléculaire et le rapport des groupes acides/amides peuvent varier.

Les polymères à poids moléculaires élevés avec environ 30% de groupes acides se sont révélés efficaces en tant qu'agents stabilisants des argiles sensibles à l'eau. Ils peuvent aussi être utilisés comme flocculants dans les fluides de forage d'eau claire lorsque les poids moléculaire dépassent 2 millions et que les groupes carboxyles représentent moins de 10% des groupes.

Les substances à poids moléculaire intermédiaire (150 000 – 250 000) avec 60 – 70% de groupes acides sont utilisés pour un contrôle du filtrat.

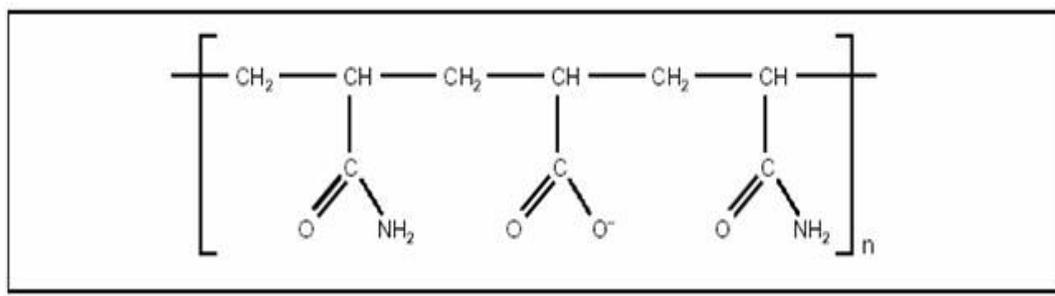


Fig. V.11 : Structure de PHPA.

c) Co-polymère de vinyl Acétate et anhydrite Maléique :

Ces co-polymères ont une application particulière comme extenseur de bentonite. Peuvent doubler la viscosité plastique de 3 à 5%.

Le polymère agit comme un flocculant sélectif et caractérisé par un poids moléculaire élevé et des charges négatives.

V.4.6. Emulsifiants d'huile dans l'eau :

On peut ajouter de l'huile volontairement à une boue à base d'eau pour réduire la densité, accroître le taux d'avancement et améliorer la stabilité du puits.

V.4.7. Emulsifiants d'eau dans l'huile :

Des fluides sont conçus avec une phase continue où l'eau est maintenue en fines gouttelettes par l'action des surfactants. Pour stabiliser une émulsion d'eau dans l'huile, les surfactants sont dans la phase huile.

V.4.8. Agents moussants :

On ajoute un surfactant pour stabiliser la mousse formée lorsque l'eau, utilisée comme moyen de rinçage, est introduit dans un puits foré à l'air comprimé.

Des exemples typiques sont l'éther glycol polyéthylène nonylphénol et l'éthanol n-tridecylpoly-oxyéthylène.

V.4.9. Antimoussants :

Les équipements de surface ou les gaz à haute pression provenant de la formation, peuvent entraîner de l'air ou d'autres gaz dans la boue. La libération de ce gaz est facilitée par un antimoussant.

Des exemples sont des alcools supérieurs, les huiles végétales sulfatées et le stéarate d'aluminium.

V.4.10. Détergents de boue :

On a découvert que les détergents de boue réduisent la tendance des argiles. A adhérer à l'outil en cours de forage, ce qu'on appelle "bourrage de l'outil".

Souvent des détergents non-ioniques du type surfactants d'huile dans l'eau, sont efficaces.

V.4.11. Lubrifiants :

Un surfactant peut être ajouté dans le but de former une pellicule lubrifiante entre la tige de forage et le trou. Il peut être du type de ceux utilisés pour émulsifier l'eau dans l'huile ou être un additif spécifique comme un acide gras ou de l'ester.

V.4.12. Inhibiteur de corrosion :

Un agent actif de surface peut former une pellicule sur les surfaces métalliques pour les isoler de l'environnement corrosif. Des produits chimiques, comme les alkali-diamines éthylatés à longues chaînes, peuvent être utilisés dans ce but.[1]

Pourquoi utiliser des fluides de forage synthétiques ?

L'impact sur l'environnement des déblais pollués par les boues à base d'huile a entraîné de fortes restrictions concernant leur utilisation dans de nombreuses régions du monde et a conduit au développement de fluides de forage synthétiques plus respectueux de l'environnement et performants tout en étant moins toxiques et plus facilement biodégradables.

Chapitre VI : Interactions interparticulaires

VI.1. Introduction :

Lorsque deux molécules neutres s'approchent l'une de l'autre, différentes interactions entre les électrons et noyaux d'une molécule et les électrons et noyaux de l'autre molécule génèrent une énergie potentielle d'interaction. À de très grandes distances de séparation entre les molécules, là où il n'y a pas d'interaction, on peut arbitrairement définir l'énergie potentielle du système à zéro. Lorsque les molécules s'approchent l'une de l'autre, des interactions de différente nature se font sentir (attractives et/ou répulsives) de sorte que l'énergie potentielle d'interaction est non nulle. Un exemple de profil d'interaction est illustré à la **Fig. VI.1**. Par convention, l'énergie d'interaction attractive est négative et l'énergie d'interaction répulsive est positive. L'énergie d'interaction totale est donnée par la somme de toutes les contributions, interactions attractives et répulsives. La nature des différentes forces intervenant peut être diverse (Van der Waals, électrostatique, liaison hydrogène, etc.).[5]

VI.2. La théorie DLVO :

Les forces d'attraction, de répulsion et de friction interparticulaires en milieu aqueux sont les composantes de base du comportement mécanique, macroscopique, des suspensions colloïdales. Nous reprenons ici l'inventaire réalisé par Güven et Pollastro (1992) et résumé par Besq (2000) et Leyama (2001) dans le cadre de la compréhension des différents types d'interactions entre les feuillets de smectites :

i) Mouvement Brownien et diffusion : Ce type de force est caractérisé par l'ensemble des mouvements aléatoires qui tendent à éloigner de leur position initiale les particules solides en suspension dans un fluide. Ce phénomène est issu de l'agitation thermique des molécules du fluide qui entrent en collision avec les particules solides.

ii) Forces de répulsion de Born : Elles proviennent lorsque les particules sont séparées par de courtes distances (0.1 nm). Elles résultent de l'impossibilité de recouvrement des nuages électroniques et ont pour rôle d'empêcher un contact trop étroit entre les particules et, de ce fait, génèrent un potentiel d'interaction assez important.

iii) Forces de Van der Waals : Ces forces d'attraction résultent des fluctuations thermodynamiques du champ électromagnétique à l'intérieur et autour des particules. Elles

sont liées aux interactions entre dipôles fluctuants. Même les atomes ou les molécules non polaires possèdent un dipôle instantané créé par le mouvement des électrons. Ce dipôle génère un champ électrique qui polarise n'importe quel atome environnant devenant alors un dipôle induit. L'interaction entre ces deux dipôles crée une force attractive instantanée dont la moyenne temporelle n'est pas nulle. La portée de ce type de force est relativement grande (§10nm).

iv) Forces osmotiques (répulsion de la double couche) : Ce sont les forces de répulsion provenant du rapprochement de deux surfaces chargées de même signe (leur double couche est de même signe également). Les principaux paramètres de cette force sont le potentiel de surface (<0), la concentration en électrolyte et la valence des ions. L'énergie répulsive définie par ces paramètres conduit à une barrière d'énergie limitant l'agrégation des particules.

v) Forces de solvation et d'interactions stériques : Puisque les modèles classiques utilisés pour décrire les forces de Van der Waals et les forces osmotiques ne tiennent pas compte de la taille des molécules du solvant et donc, de la nature discrète du milieu de séparation des particules aux

courtes distances, le solvant (l'eau) ne peut être considéré simplement comme une phase continue. Par sa structure spécifique et ses propriétés, l'eau interagit spécifiquement avec la surface et les ions (effet stériques et physicochimiques) [Güven et Pollastro (1992)]. Un type particulièrement important d'interaction "stérique" sera traité dans le troisième chapitre. Il s'agit de particules argileuses ayant adsorbé des polymères.

La courbe force-distance entre deux particules résulte de la combinaison de toutes les forces précitées. Elle permet de connaître les conditions de stabilité ou d'agrégation irréversible. Une analyse théorique des interactions entre particules colloïdales a été développée par Derjaguin et Landau (1941) et Verwey et Overbeek (1948). Le modèle développé ("DLVO" comme initiales des noms des auteurs) décrit les interactions entre colloïdes comme une compétition des forces répulsives développées par les doubles couches électriques et les forces attractives de Van der Waals. Il permet de rendre compte quantitativement de la stabilité d'un grand nombre de systèmes colloïdaux dont les systèmes eau-bentonite.

Le potentiel répulsif (V_R) est créé par les interactions entre les doubles couches électriques de deux particules s'approchant l'une de l'autre. Suivant la théorie de la double couche diffuse, le potentiel répulsif V_R décroît exponentiellement lorsqu'on augmente la distance entre particules suivant la relation :

$$V_R = \frac{64\rho k_B T}{\chi} \left(\tanh \frac{ze\psi_S}{4k_B T} \right) e^{-kH} \quad (13)$$

$$K = \sqrt{\frac{2e^2 \rho z^2}{\varepsilon_0 k_B T}} \quad (14)$$

où ρ est la densité de contre-ions, k_B la constante de Boltzman, T la température absolue, ψ_S le potentiel de Stern, H la distance entre les centres des deux particules, e la charge de l'électron et χ la longueur réciproque de Debye.

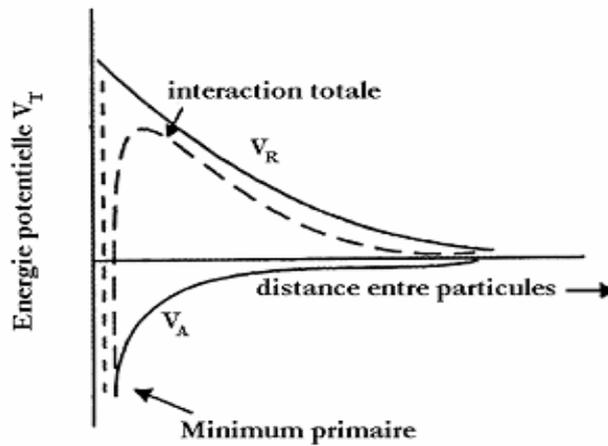


Fig. VI.1 : Energie d'interaction totale en fonction de la distance interparticulaire.

On note que cette théorie considère que les particules ne sont pas hydratées et qu'il n'y a donc pas de force répulsive additionnelle quand deux particules s'approchent en milieu aqueux. Il semble cependant que pour des montmorillonites sodiques par exemple, l'expression de l'interaction totale entre les feuillets doit prendre en compte une force de répulsion à faible distance due aux cations hydratés partiellement liés et une force répulsive à plus grande distance due aux ions hydratés de la double couche [Keren et al. (1988)].

Le deuxième potentiel est attractif (V_A). Il est dû aux forces de Van der Waals. Dans les systèmes colloïdaux, les forces de dispersion de London (forces attractives dues à des dipôles instantanés que créent les fluctuations des nuages électroniques des atomes) représentent la quasi-totalité des forces attractives de Van der Waals [Luckham et Rossi (1999)] :

$$V_A = -\frac{A}{12\pi} \left(\frac{1}{H^2} + \frac{1}{(H+2t)^2} - \frac{1}{(H+t)^2} \right) \quad (15)$$

Où A est la constante de Hamaker qui dépend de la nature du matériaux des particules, H la distance entre les surfaces et t l'épaisseur du feuillet d'argile.

La somme des potentiels attractifs (V_A) et répulsifs (V_R) est donnée par l'équation suivante :

$$V_T = V_R + V_A \quad (16)$$

Le potentiel total V_T peut avoir différents profils en fonction de la concentration en électrolyte et de la température de la suspension. Ces deux paramètres vont conditionner la stabilité de la suspension et son mode de floculation ou de coagulation. L'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour trois cas typiques est schématisée sur la figure suivante.

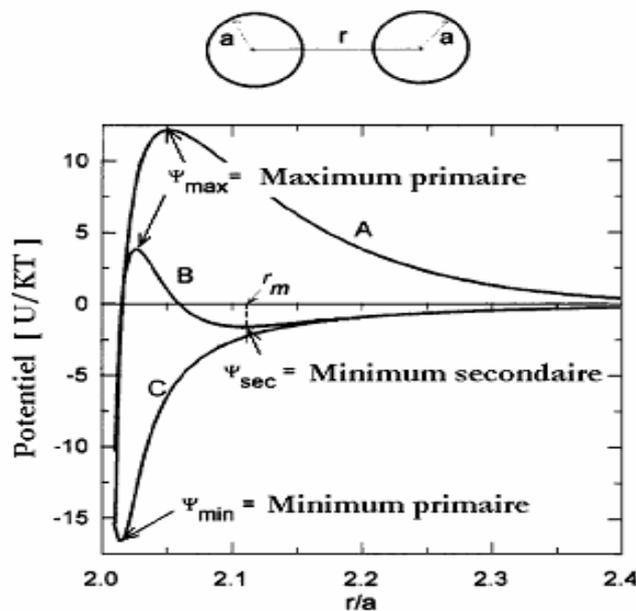


Fig. VI.2 : Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), floculé (B) et coagulé (C) [Yang et al. (1997)].

VI.3. Forces interparticulaires :

VI.3.1. Répulsion électrique à double couche :

La surface des solides immergés dans l'eau est chargée électriquement ; donc on a décrit les particules comme de petits cristaux possédant une surface à charge négative. Une charge compensatrice provient des ions en solution qui sont attirés électrostatiquement à la surface. En même temps, les ions doivent s'éloigner de la surface tout en se diffusant vers le reste de la solution. L'action de ces deux tendances opposées produit une surface qui diminue progressivement à la mesure qu'on s'en éloigne. Le volume à proximité de la surface de la particule est appelé couche diffuse ou couche GOUY.

Quand deux particules, chacun avec son milieu diffus d'ions opposés, s'approchent l'une de l'autre ; une interférence se produit en provoquant des modifications dans la distribution des ions dans les couches doubles des deux particules : toute modification implique un apport d'énergie dans ce système afin d'obliger les particules à se rassembler. En d'autres termes, il se produira entre les particules une répulsion qui augmentera avec le rapprochement entre elles.[1]

VI.3.1.1. Potentiel électrocinétique :

Sur la surface de chaque particule se forme une double couche électrique.

Le potentiel total entre la surface du noyau et la solution est égal à la somme de potentiel entre le noyau et la couche fixe et le potentiel entre la couche fixe et la couche mobile appelée potentiel électro-cinétique Zêta.

$$E = \phi + \xi \quad (17)$$

ϕ : Potentiel entre le noyau et la couche fixe.

ξ : Potentiel Zêta.

Plus l'épaisseur de la couche diffuse augmente, plus ξ croît, et par conséquent les forces de répulsions électriques agissent entre les particules augmentent.

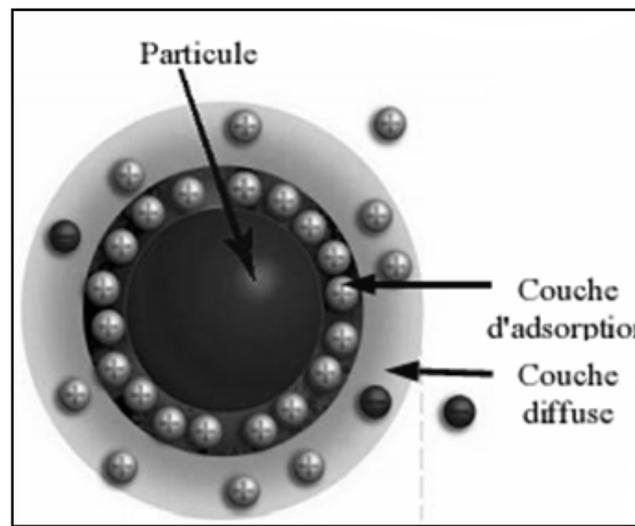


Fig. VI.3 : Double couche électrique

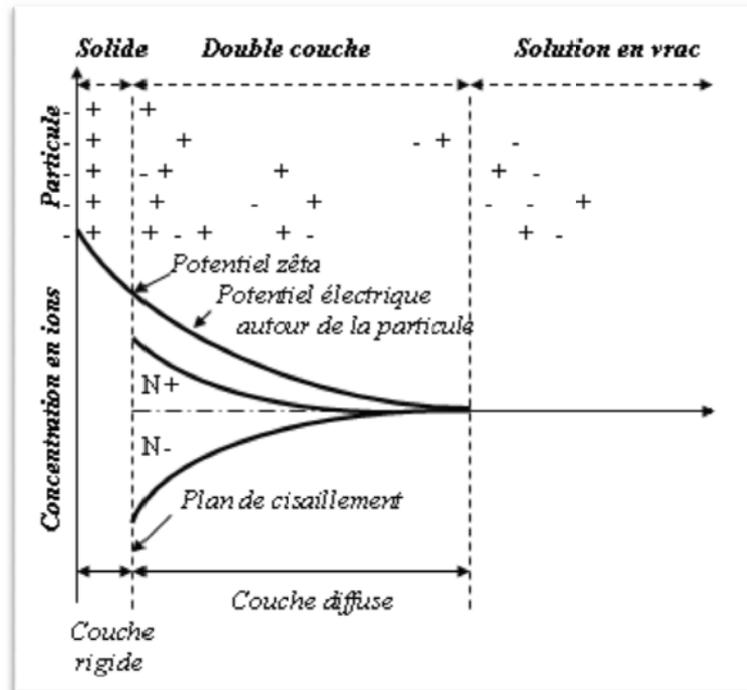


Fig. VI.4 : Schéma de la double couche électrique.

VI.3.2. Force d'attraction de Van der Waals :

Les forces de Van der Waals apparaissent lors de l'attraction de dipôles spontanés provenant de la déformation du nuage d'électrons autour de chaque atome. Les phénomènes de surface et d'interface sont dus aux attractions moléculaires. Toutes les forces intermoléculaires de Van der Waals (Keesom, Debye, London) qui justifient ces attractions moléculaires sont de nature électrique. Les phénomènes électriques d'interface sont dus: Soit à la libération de charges (Ions et électrons) qui se libèrent et se concentrent près des interfaces, soit à des molécules polaires qui s'orientent.

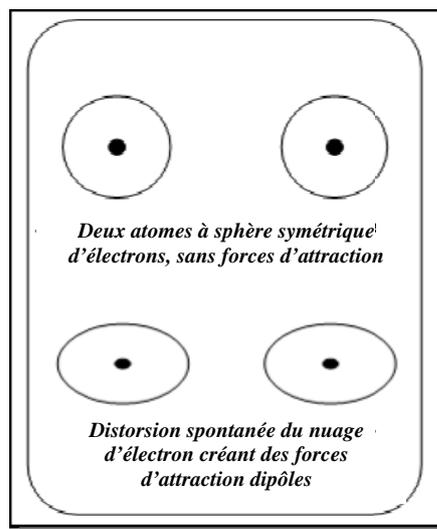


Fig. VI.5 : Schéma illustrant les origines des forces d'attraction Van der Waals.

VI.4. Mécanisme de floculation :

On dit d'un système qu'il est floculé lorsqu'il existe des forces d'attraction nettes entre les particules et que celles-ci peuvent s'associer entre elles.

Il existe un certain nombre de mécanismes qui permettent soit d'augmenter les forces d'attraction entre les particules soit de réduire les forces de répulsion ; un taux élevé de sel réduit l'épaisseur de la couche diffuse. La réduction de l'épaisseur tient à la concentration en sel et à la valence des ions de charges opposés. Ainsi le chlorure de calcium comprimera plus efficacement la double couche que le chlorure de sodium car un cation soluble ayant plus d'une charge positive peut réagir avec plus d'un lieu d'échange des surfaces.

VI.5. Mécanisme de défloculation :

On qualifie de « défloculé » le système de particules en suspension. Quand il existe une force générale de répulsion entre les particules, ce que l'on obtient normalement en créant les conditions où les particules possèdent la même charge.

Afin de maximiser la répulsion électrostatique, la concentration d'électrolyte doit être aussi faible que possible.

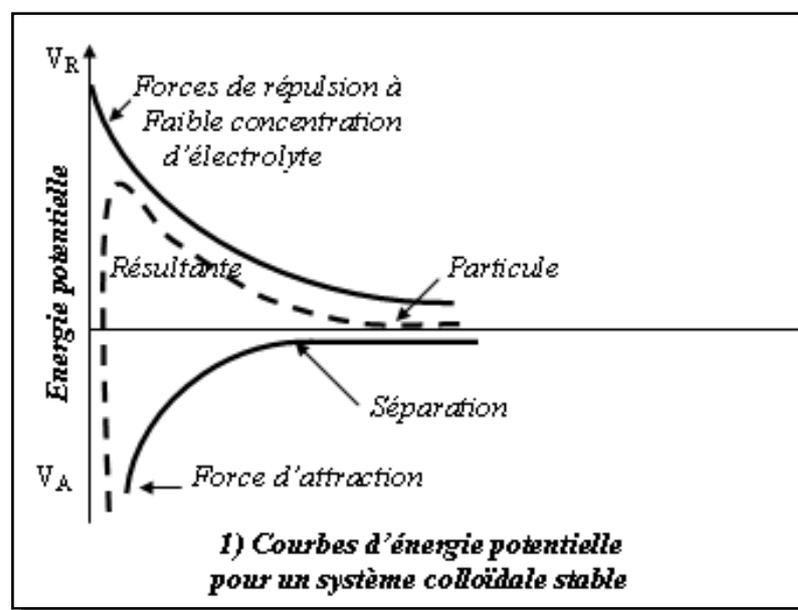


Fig. VI.6 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale stable.

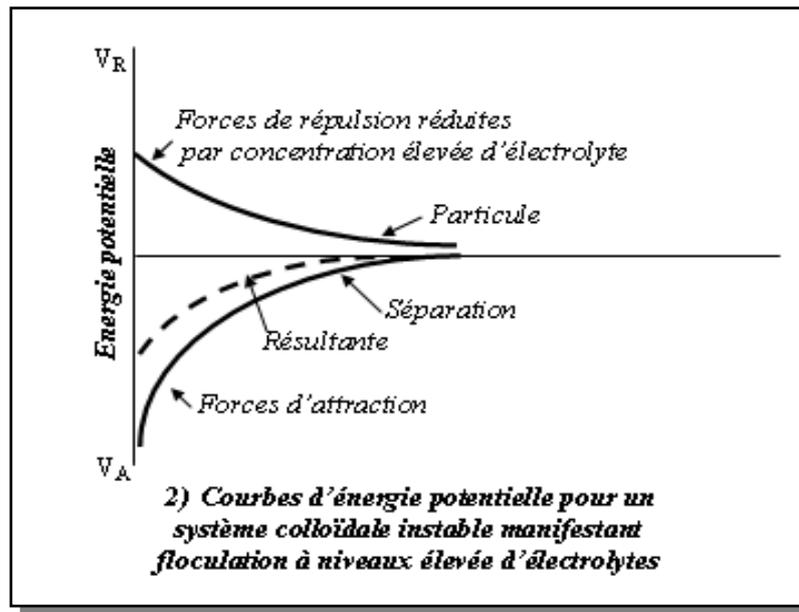


Fig. VI.7 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdal instable manifestant une floculation à un niveau élevé d'électrolytes.

VI.6. Forces physicochimiques :

Il existe des forces physicochimiques et des interactions entre les particules d'une suspension et les polymères solubles dans l'eau.

VI.6.1. Interaction argile-eau :

Les surfaces des argiles contiennent des groupes d'hydroxyles et d'oxygène qui forment des liaisons d'hydrogène avec des molécules d'eau. Les cations échangeables adsorbés à la surface de l'argile auront également une enveloppe de molécules d'eau en association étroite. De plus l'eau formera une liaison avec les sites négatifs des bords. Ces interactions se combinent afin de créer une zone de 10 à 15 couches d'eau en association étroite avec l'argile créant ainsi l'enveloppe d'hydratation. Ainsi, l'introduction des argiles dans l'eau réduit le volume d'eau libre.

VI.6.2. Interaction polymère-eau :

De même que pour les argiles, les polymères à poids moléculaire élevé soluble dans l'eau, créent une gaine d'eau en association étroite autour de chaque molécule.

VI.6.3. Interaction argile-argile :

Elle existe une interaction entre les particules d'argile en terme d'attraction nette ou répulsion entre les particules dans des états soit de floculation soit de défloculation respectivement.

VI.6.4. Interaction argile-polymère :

Les réactions entre argiles et polymères dépendent d'un certain nombre de facteurs :

VI.6.4.1. Poids moléculaire du polymère :

Il y a une relation directe entre le poids moléculaire et la longueur de la molécule d'un polymère. Une substance à poids moléculaire élevé comme le *polyacrylate synthétique* avec un poids moléculaire de 10 millions a une longueur de chaîne d'environ 20 microns qui peut être beaucoup plus importante que les particules d'argiles.

Ainsi, une molécule peut adsorber plus d'une particule d'argile et donc former une association entre les particules d'argile. Par conséquent les polymères à poids moléculaire élevé agissent en tant que flocculants. Les polymères à poids moléculaire faible peuvent modifier la charge des particules d'argiles individuelles de façon à ce qu'elles aient une charge égale et qu'elles soient défloculées.

VI.6.4.2. Adsorption de polymère sur l'argile :

L'adsorption est un phénomène physique de fixation des constituants d'une phase liquide ou gazeuse sur une surface solide. Dans le cas de l'adsorption de polymère par les surfaces de particules argileuses, les macromolécules s'adsorbent généralement par segments de chaînes appelés "trains". Entre deux trains consécutifs, ces macromolécules forment une "boucle". Le segment de chaîne situé avant le premier train ou après le dernier est appelé "queue" (**Fig. VI.8 .A**) [De Gennes (1987) ; Mongondry (2003)]. Les études d'adsorption montrent que les mécanismes qui gouvernent l'adsorption sont spécifiques à la nature de la macromolécule adsorbée, ainsi qu'à la nature de la particule adsorbante. De façon générale, les polymères s'adsorbent par des interactions de type Van Der Waals, électrostatiques, hydrophobes ou par la création de liaisons hydrogène [Israelachvili (1992) ; Tadros (2003)]. L'adsorption des polymères sur les surfaces d'argile conduit généralement à un système stérique stable ou à une floculation par ponts, ce qui a des conséquences sur la rhéologie et la stabilité du système [Chang et al. (1992)]. [41]

La puissance et le site de l'adsorption sont fonctions du caractère chimique du polymère. En général les polymères à charge négative peuvent être adsorbés sur les sites cationiques créés sur les bords. La plupart des polymères utilisés dans les fluides de forage appartiennent à ce groupe. L'adsorption est plus importante pour les substances à poids moléculaire élevé.

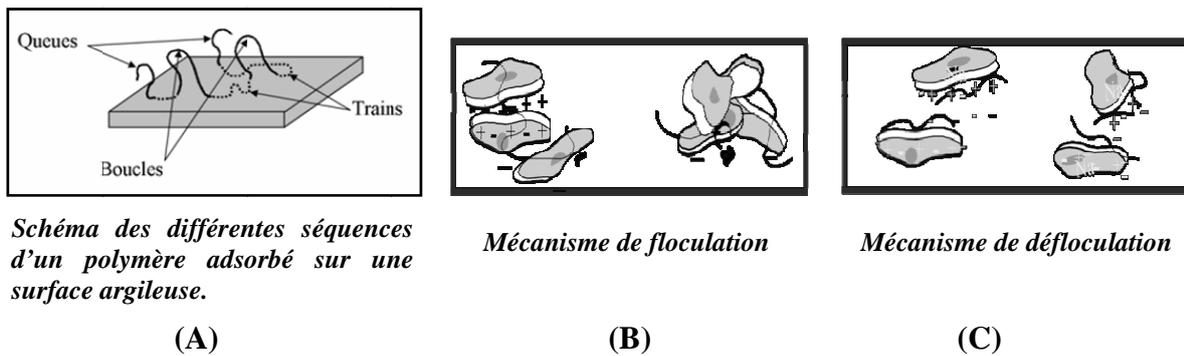


Fig. VI.8 : Schéma représentant les mécanismes d'adsorption des polymères sur les argiles.

VI.6.5. Interaction polymère-polymère :

En plus des réactions polymères avec les argiles, il y a également des interactions entre les polymères par un mécanisme d'enchevêtrement d'autant plus prononcé que les chaînes sont longues. Ainsi, à poids moléculaire élevé ont des viscosités plus élevées que les polymères plus courts ou à poids moléculaire faible.[1]

Pour des solutions plus concentrées, des enchevêtrements de molécules apparaissent, et les interactions polymère-polymère deviennent prédominantes. Dans ce cas, la solution est dite semi-diluée. Lorsque les polymères sont de même nature, on aura plutôt des répulsions par effet stérique. Les polymères se repoussent et s'excluent mutuellement de l'espace qu'ils remplissent. Dans le cas contraire, les interactions sont essentiellement attractives et les polymères s'attirent mutuellement et s'attachent entre eux. Ces deux cas d'attraction résument le fait que certains polysaccharides se comportent comme des épaississants s'ils sont seuls et comme des gélifiants s'ils sont associés à un autre type de polysaccharides [De Gennes (1979)]. [41]

VI.7. Zétamétrie :

La détermination du potentiel zêta (ξ) est très importante dans l'étude de la chimie de colloïde et d'interface. Puisque c'est un potentiel dans la double couche diffuse (DDL), il peut être mesuré expérimentalement; simultanément, le potentiel zêta est étroitement associé à la stabilité des suspensions colloïdales aussi bien que le gonflement des matériaux pleins dans les systèmes aqueux et ainsi de suite.

Le potentiel zêta est le potentiel à la face de cisaillement. Cependant, actuellement, les gens ne savent pas la position réelle de la face de cisaillement dans le DDL. L'opinion générale est que la face de cisaillement est très près de la surface des particules colloïdales et que la

position est rudement égale à la face sévère ou à la face externe de Helmholtz; il signifie qu'il y aura une distance au sujet de moins de deux à trois diamètres de molécule d'eau, ou environ 5 Å, de la surface des particules colloïdales. [43]

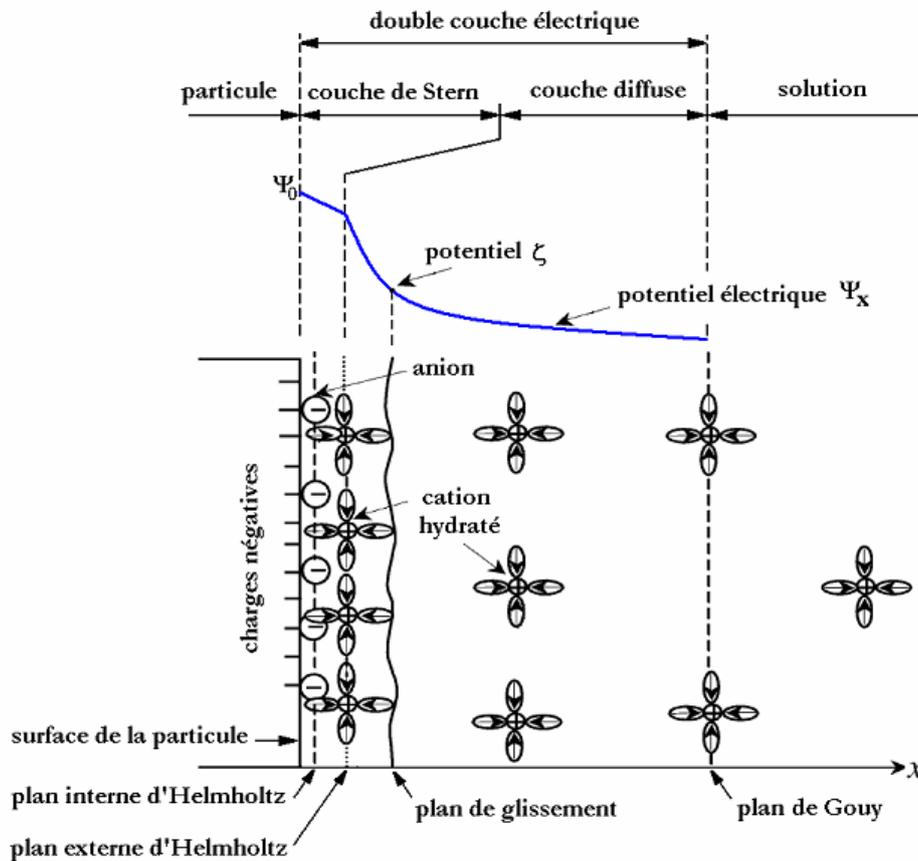


Fig. VI.9 : Diagramme de la position de la face de cisaillement dans une double couche diffuse. [suivant Güven et Pollastro (1992) et Li et al. (2003)].

La mesure du potentiel zêta permet de prévoir le comportement des émulsions et des dispersions (stabilité, floculation, coalescence...), et donc de résoudre certains problèmes de formulation.

Domaines d'application concernés : peintures et pigments, traitement des eaux, céramiques, filtration, santé, pharmacie, cosmétologie, agroalimentaire, boue de forage...etc.

Le potentiel zêta correspond au potentiel électrique mesuré au niveau du diamètre hydrodynamique de particules en suspension au sein d'un milieu liquide. Il permet de caractériser la charge électrique au voisinage de la surface de la particule, en fonction de son environnement. Il permet ainsi de rendre compte des interactions entre les particules et avec les espèces chargées présentes en solution.

La zétamétrie permet également de caractériser la stabilité de suspensions colloïdales en fonction de différents paramètres (pH, concentration en ions ou en tensioactifs).[6]

Il est ainsi possible de caractériser le comportement de certains ions en contact avec une surface chargée (adsorption spécifique ou interaction purement électrostatique). [7]

VI.7.1. Rappel sur les colloïdes :

Toutes les particules en suspension sont soumises à deux forces :

- Force gravitaire (pesanteur) fonction de la masse c'est à dire de la densité et surtout du volume.
- Force électrostatique de répulsion entre les particules chargées, fonction de la quantité adsorbée c'est à dire du carré du rayon.

Quand la taille des particules diminue le rapport force électrostatique / force gravitaire diminue en fonction de l'inverse du rayon. Quand le rayon diminue, il arrive un moment où les forces électrostatiques sont plus fortes que les forces gravitaires, il ne peut plus y avoir de décantation, ce qui donne un système de colloïde.

Le potentiel zêta peut être appliqué également à une surface adsorbante (une membrane par exemple), c'est le potentiel électrostatique superficiel du à l'adsorption des ions. En ce qui concerne les colloïdes, le plus souvent chargés négativement, on peut les décharger (annuler le potentiel zêta), en ajoutant des ions positifs fortement chargés (Al^{3+} ; Fe^{3+} ...). C'est la coagulation des colloïdes. On peut alors facilement les faire décanter en les flocculant (agglomération des particules initialement déchargées par coagulation). De part et d'autre d'une membrane il peut y avoir plusieurs causes de différence de potentiel :

- *Potentiel électrochimique* si de part et d'autre de la membrane on a deux solutions à potentiel électrochimique différent : soit deux solutions complètement différentes soit deux solutions d'un même produit à des concentrations différentes : loi de Nernst.
- *Potentiel de jonction*, en statique (sans écoulement à travers la membrane), du à la différence de mobilité (de vitesse de diffusion) entre les cations et les anions de la solution.

En électrochimie on utilise le plus souvent comme électrolyte du chlorure de potassium car Cl^- et K^+ ont tous les deux la structure de l'argon (même nombre d'électrons périphériques) à la charge du noyau près. Ils ont donc sensiblement la même mobilité et donnent un minimum de potentiel de jonction (cas des électrodes de référence où l'électrolyte est toujours du KCl).

- *Potentiel d'écoulement en dynamique* : quand un liquide s'écoule à travers une membrane, il apparait une différence de potentiel qui dépend de la nature de la membrane, de sa porosité,

de son épaisseur, et de la solution utilisée. Ces 3 potentiels sont indépendants les uns des autres.

VI.7.2. Potentiel zêta :

Le potentiel zêta mesure l'importance de la répulsion ou de l'attraction entre les particules. Il donne une description détaillée du mécanisme de la dispersion et constitue un élément essentiel dans le contrôle de la dispersion électrostatique. La mesure du potentiel zêta est un paramètre extrêmement important dans un grand nombre de secteurs, notamment, les céramiques, la pharmacie, la médecine, le traitement des minéraux et le traitement des eaux ainsi que les boissons en général.

Dans la formulation de nouvelles suspensions ou émulsions, l'une des tâches les plus longues consiste à mesurer la stabilité des formulations dans des conditions variées. Le potentiel zêta peut être utilisé pour tester les formulations potentielles et rejeter les mauvaises au début du processus, ce qui réduit le coût de l'étude de stabilité. Il permet également une meilleure compréhension des mécanismes de stabilité et contribue ainsi à l'amélioration de la qualité des produits.

De nombreux secteurs industriels utilisent l'eau en grande quantité et cette eau se retrouve contaminée pendant le processus de production. Le traitement de l'eau devient aujourd'hui important à mesure que le coût des rejets s'accroît. La mesure du potentiel zêta peut être utilisée pour optimiser l'utilisation de flocculant et accélérer le processus de floculation.

Le potentiel de membrane est un potentiel qui se produit dans un liquide sans écoulement. Il est dû à un surcroît de charges d'un certain signe d'un côté de la membrane. Le potentiel d'écoulement ne se produit que lorsqu'un liquide s'écoule. Les ions qu'il contient ne s'écoulent pas tous à la même vitesse. Certains ions ont tendance à rester "collés" contre les parois. Si les ions de signe contraire n'ont pas cette propriété, cela crée un potentiel qui s'oppose à l'écoulement.

Le potentiel zêta est surtout utilisé pour les colloïdes. Autour de chaque particule en suspension, il y a adsorption d'ions (le plus généralement négatifs : anions, car ils sont moins solvatés par l'eau que les cations. De ce fait, ils sont plus libres de s'adsorber. Le potentiel zêta d'une particule colloïdale correspond alors à la charge de surface. On mesure le potentiel zêta en mesurant la vitesse de déplacement d'un colloïde dans un champ électrique. Il s'agit donc de forces électrostatiques.

Chapitre VII : Matériaux et appareillages

VII.1. Introduction

Les fluides de forage sont des fluides à seuil rhéofluidifiants. Les modèles rhéologiques les plus utilisés pour les représenter sont donc les modèles de Bingham, d'Ostwald et d'Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$). Dans le passé, ce sont surtout les modèles de Bingham et d'Ostwald qui ont été utilisés car ils donnent lieu à des formules de calcul des pertes de charge assez simples et bien documentées. Actuellement c'est le modèle d'Herschel-Bulkley qui s'impose, car il est plus universel et représente mieux le comportement rhéologique de ce type de fluides.

Notre travail est principalement consacré à l'étude de l'effet de l'ajout de différents polymères et des sels sur le comportement rhéologique d'une boue à base de bentonite.

VII.2. Matériaux et appareillages :

La bentonite qu'on a choisie est une argile locale de Maghnia (Algérie), souvent utilisée dans la composition des fluides de forage. Une caractérisation rhéologique des suspensions à base de cette argile a été effectuée et la mise en évidence de l'effet de l'ajout des polymères [carboxyméthylcellulose de sodium (CMC), polyanionique cellulose (PAC R), et xanthane] et des électrolytes [chlorure de potassium (KCl), chlorure de sodium (NaCl), et chlorure de calcium (CaCl₂)] sur le comportement rhéologique de cette bentonite. Ainsi, ce travail servira de base pour une étude comparative de comportement rhéologique du système "bentonite-CMC" et "bentonite-PAC R".

Pour déterminer le comportement rhéologique des différentes suspensions de bentonite et de polymère que nous étudierons, nous utilisons un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550 » (Fig. VII.1), c'est un viscosimètre de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique, par exemple détermination de la viscosité, de la contrainte seuil et de la thixotropie. La technique la plus utilisée avec ce type de viscosimètre, consiste à imposer une vitesse de cisaillement et calculer la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente. Un régulateur de température de type (HAAKE DC 30) pour but de maintenir la température à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et cela pour tout nos essais.

Nous avons choisi le système couette de notre viscosimètre en utilisant la géométrie NV, cette dernière été choisie selon les normes de Thermo HAAKE, il s'agit d'un cylindre de rayon/longueur 20.1/60 (mm) et de volume de remplissage 9 (cm³), il est recommandé pour les fluides de faible viscosité (2 - 2000 m.pas) et de taux du cisaillement (27-27000 s⁻¹). Tous les résultats sont montrés dans l'affichage numérique intégré de LED ou dans le Rheowin-logiciel facultatif de HAAKE. Tous les essais sont effectués au sein du laboratoire LMMC/FSI Université M'hamed Bougara Boumerdès.



Fig. VII.1 : Image du viscosimètre Thermo HAAKE VT 550.

Les systèmes Zetasizer de Malvern Instruments , permettent une mesure scientifique et objective qui fait correspondre l'expérience pratique avec les nouvelles performances escomptées. En mesurant les paramètres fondamentaux connus pour affecter la stabilité - tels que le potentiel zêta, la taille des particules, le pH et la conductivité.

Les chercheurs peuvent identifier, mesurer et faire varier ces paramètres.



Fig. VII.2 : Zitamètre du type Zetasizer 2000 de Malvern Instruments.

VII.2.1. Mode opératoire :

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

La suspension de la bentonite : Une quantité d'eau distillée, 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.

La suspension d'un mélange de bentonite-polymère : De la même manière, on prépare simultanément une suspension de bentonite en ajoutant le polymère aux concentrations voulues par petites quantités pour éviter le phénomène d'agrégation. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures pour assurer une bonne homogénéisation du mélange et une bonne hydratation de polymère.

L'effet de sel dans ce travail est effectué par le mode opératoire suivant : on ajoute la quantité voulue du sel à une quantité d'eau distillée soumise à une agitation magnétique, puis on ajoute la quantité voulue du mélange dans cette eau salée. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures.

Notons qu'avant chaque test rhéologique, le mélange est agité pendant 1 heure.

VII.2.2. Caractérisation des matériaux :

VII.2.2.1. La bentonite :

La bentonite qu'on a utilisé est issue du gisement de Maghnia (Algérie), la montmorillonite est le minéral argileux prépondérant.

L'analyse granulométrique a été effectuée au Laboratoire (LMMC) Faculté des sciences de l'ingénieur, Université M'hamed Bougara Boumerdès, avec un granulomètre du type MALVERN Instruments MASTER SIZER 2000 (Fig.VII.3).

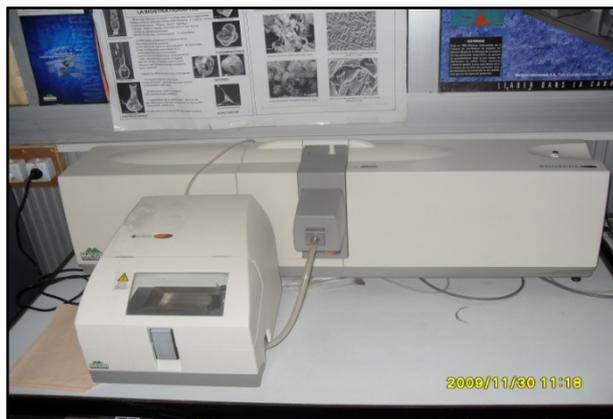


Fig. VII.3 : Image du granulomètre MASTER SIZER 2000.

Cette analyse nous a permis d'avoir la conformité de la bentonite de Maghnia en se basant sur la granulométrie des particules qui est relative à leur suspension et à leur hydratation.

D'après l'analyse qu'on a effectuée, nous avons trouvé que la taille moyenne des particules de la bentonite est de 88,85 μm et la surface spécifique est de 0,188 m^2/g (**Fig. VII.4**).

Ces résultats assurent la bonne qualité granulométrique de la bentonite et permettent d'utiliser cette poudre dans les systèmes colloïdaux.

Tableau VII.1 : Composition chimique de la bentonite locale :[5]

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	PAF
%	46.12	18.03	1.62	1.19	0.65	0.87	-	0.16	28

PAF : perte au feu a 1100°C.

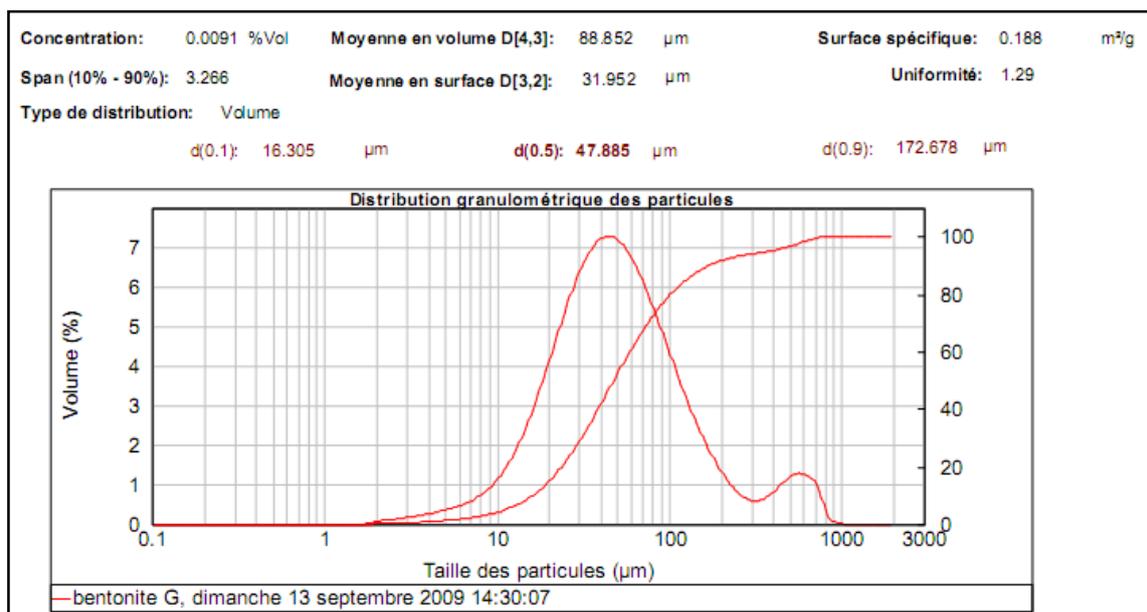


Fig. VII.4 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale.

Chapitre VIII : Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions de fluide de forage.

VIII.1. Introduction :

La rhéologie des suspensions est généralement connue dans le cadre de suspensions diluées, alors que l'écoulement des suspensions plus concentrées est mal connu et surtout plus difficile à comprendre.

Dans le cadre des suspensions diluées, le calcul de la viscosité du fluide peut être réalisé à partir de l'équation d'Einstein pour des concentrations inférieures à 2%, et pour de plus grandes fractions volumiques en solides (< 10%) par l'équation de Batchelor. Pour des suspensions moyennement concentrées ou concentrées, beaucoup d'approches théoriques ont également été proposées. Cependant, pour de fortes concentrations en solide, un contact direct peut apparaître entre deux particules. Ceci est possible si les forces attractives sont suffisamment fortes par rapport aux forces répulsives.

VIII.2. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des argiles :

Pour le cas des argiles, la polarisation des surfaces rend ces contacts quasiment obligatoires dès les très faibles concentrations. Le comportement sous cisaillement des suspensions d'argile n'est pas simple et dépend évidemment de la concentration en solide. En plus d'un caractère rhéofluidifiant, ces fluides ont classiquement un seuil de contrainte sous lequel ils ne peuvent s'écouler. Ce seuil est fonction de la concentration en particules. Les suspensions d'argile ont la particularité d'être également thixotropes, ce qui implique des phénomènes temporels.[5]

VIII.2.1. Etude rhéologique et physico-chimique de suspension bentonitique :

Pour étudier l'effet de la température sur le comportement rhéologique sur la suspension, nous avons représenté l'évolution de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une solution de bentonite (3%).

La **Fig. VIII.1** et **Fig. VIII.2** montrent que l'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension bentonitique. Pour différentes températures par exemple, le passage de la température de 20 °c à 80 °c fait décroître la viscosité apparente d'environ un facteur de 2,18 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 100 s⁻¹.

Le comportement rhéologique de la suspension bentonite (3%) de différentes températures peut être décrit par le modèle d'Herschel-Bulkley.

VIII.2.1.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique :

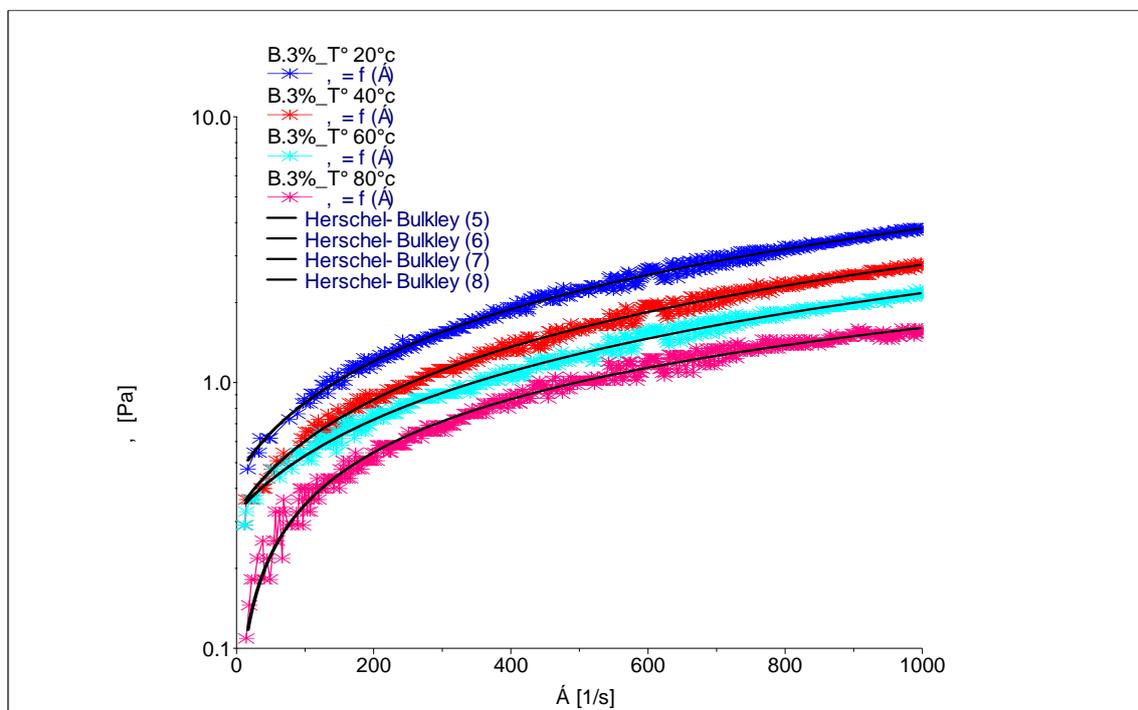


Fig. VIII.1 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

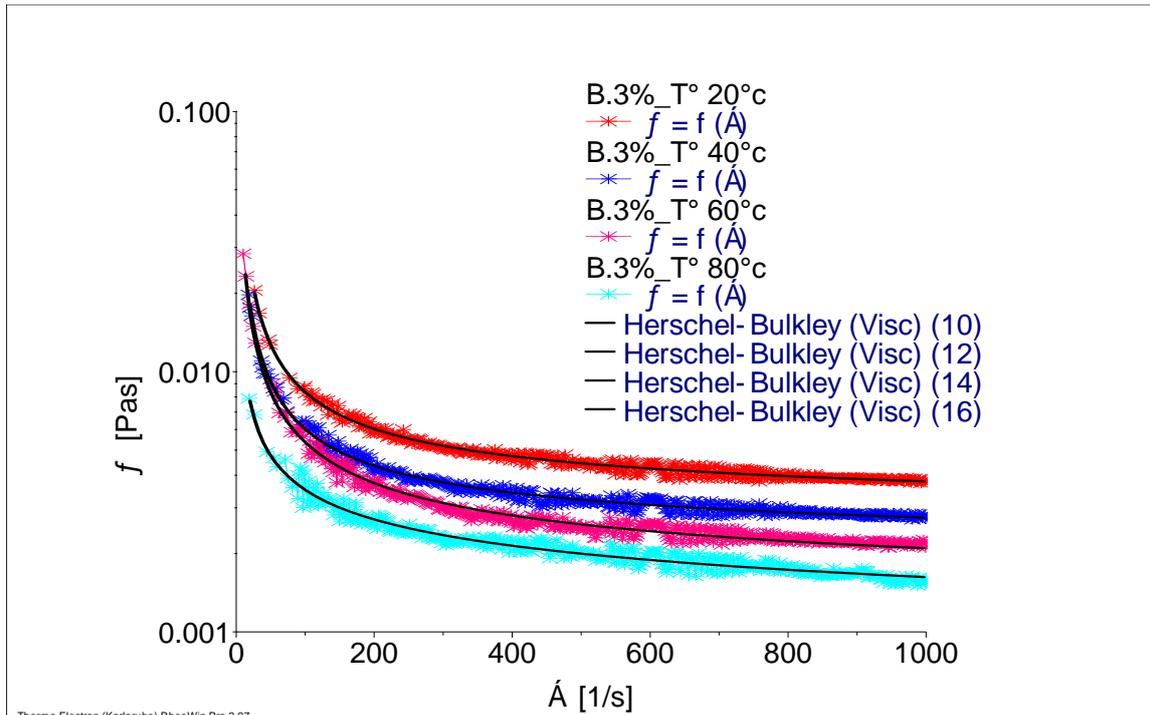


Fig. VIII.2 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d’une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

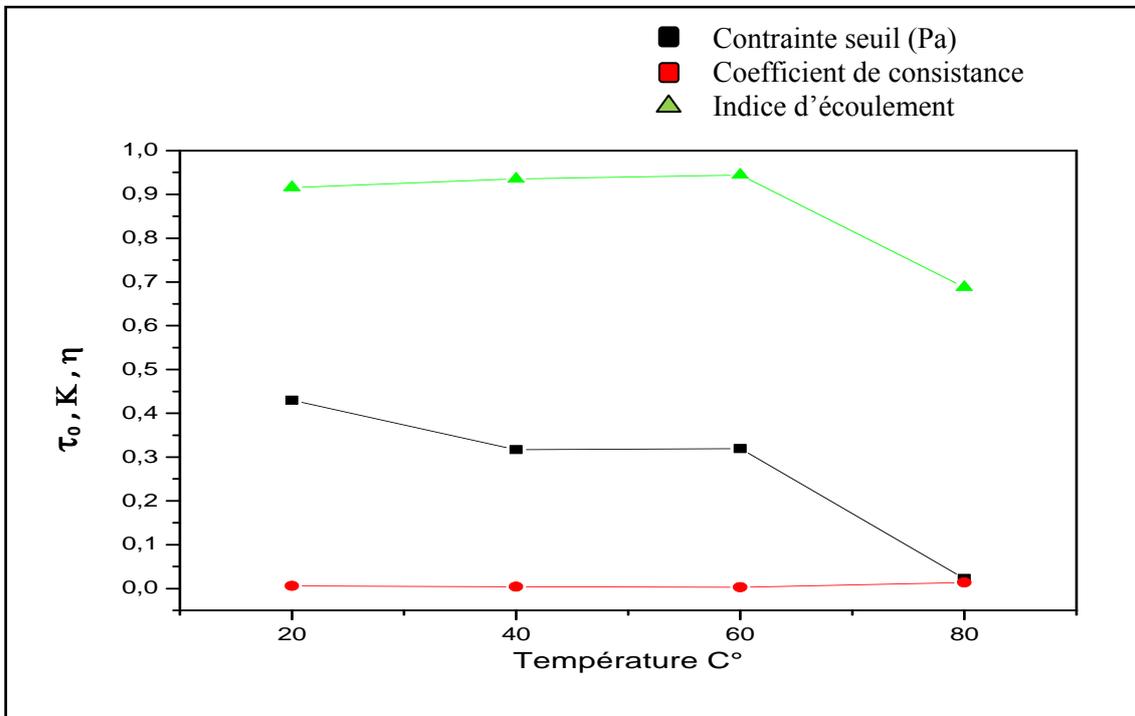


Fig. VIII.3 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d’écoulement en fonction de la température d’une suspension de bentonite 3%.

Dans le cas des suspensions argileuses, la contrainte seuil est toujours liée à la formation d'un état du gel résultant des différents types d'associations entre particules. La contrainte seuil comme étant la contrainte minimale qu'il faut appliquer pour que la suspension commence à s'écouler d'une manière clairement observée. Le gel dû aux interactions bord-face est renforcé par la diminution du pH qui accentue la différence de potentiel entre les bords et les faces des feuillets. Donc, le gel dû aux interactions face-face est renforcé par tous les paramètres favorisant la contraction des doubles couches électriques, augmentant ainsi l'épaisseur des particules et ce, tant que le nombre d'unités structurales est suffisant pour obtenir un réseau tridimensionnel.[2],[3]

Pour des températures plus élevées, on a observé une diminution de la viscosité (**Fig. VIII.2**) en fonction de l'augmentation de la température, et une diminution de la contrainte seuil (**Fig.VIII.3**) (due à la disparition du maximum primaire) qui entraîne une diminution du nombre de liens entre particules .

VIII.2.1.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique :

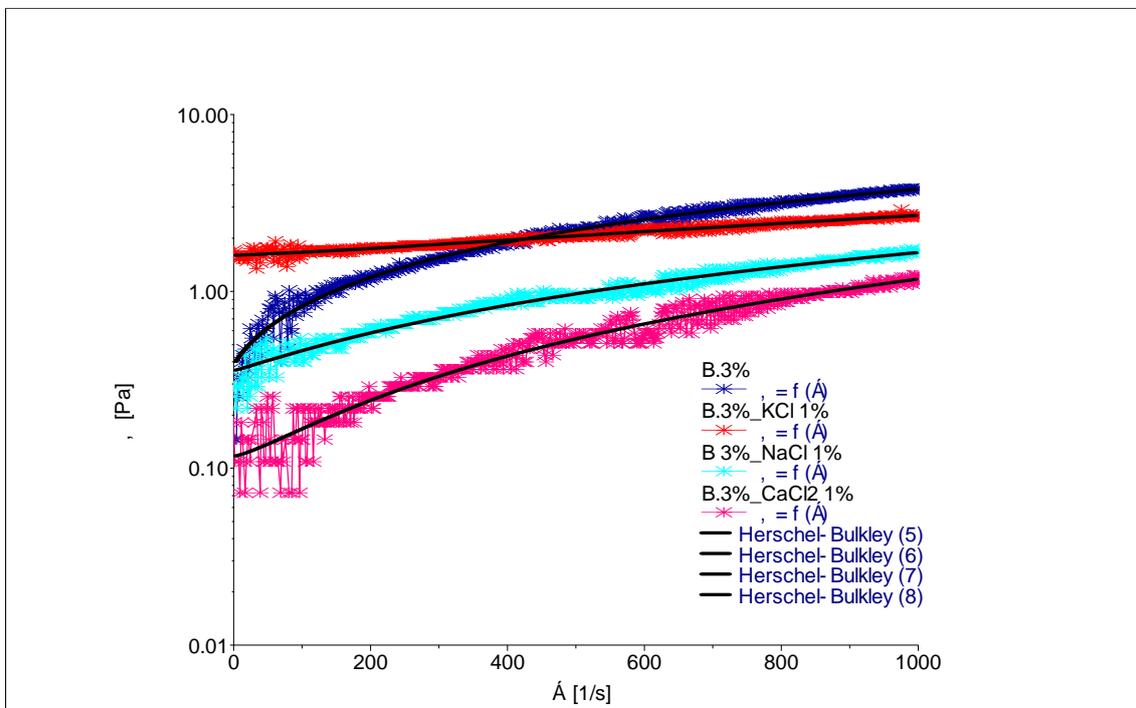


Fig. VIII.4 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

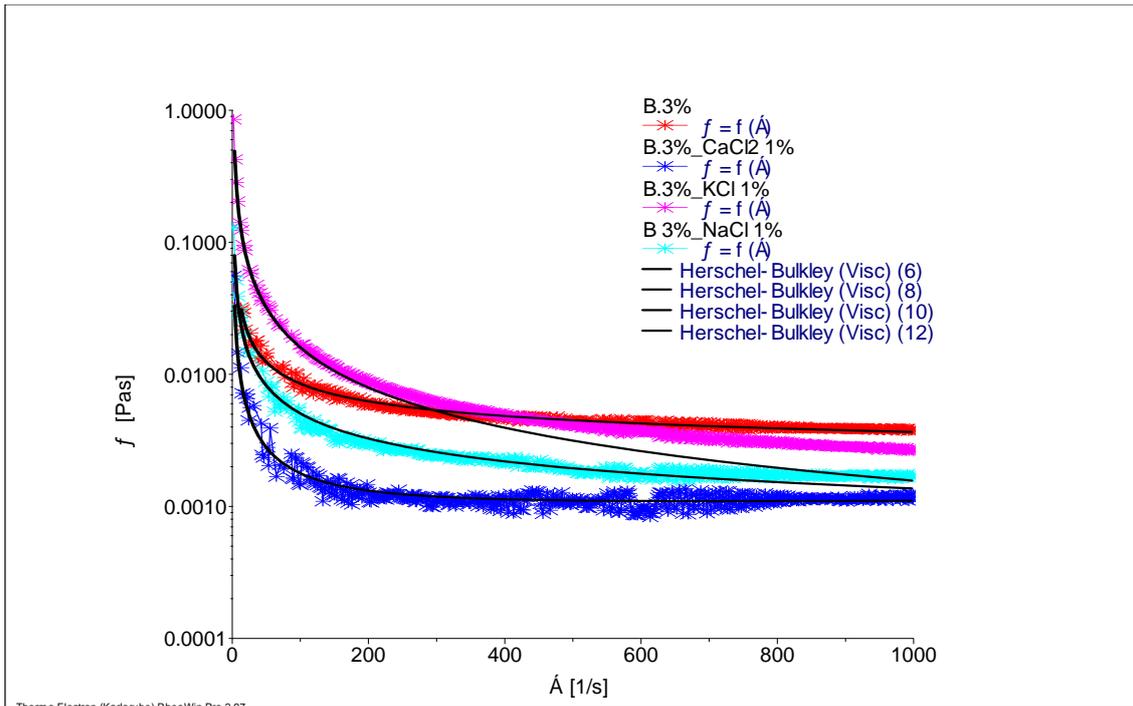


Fig. VIII.5 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

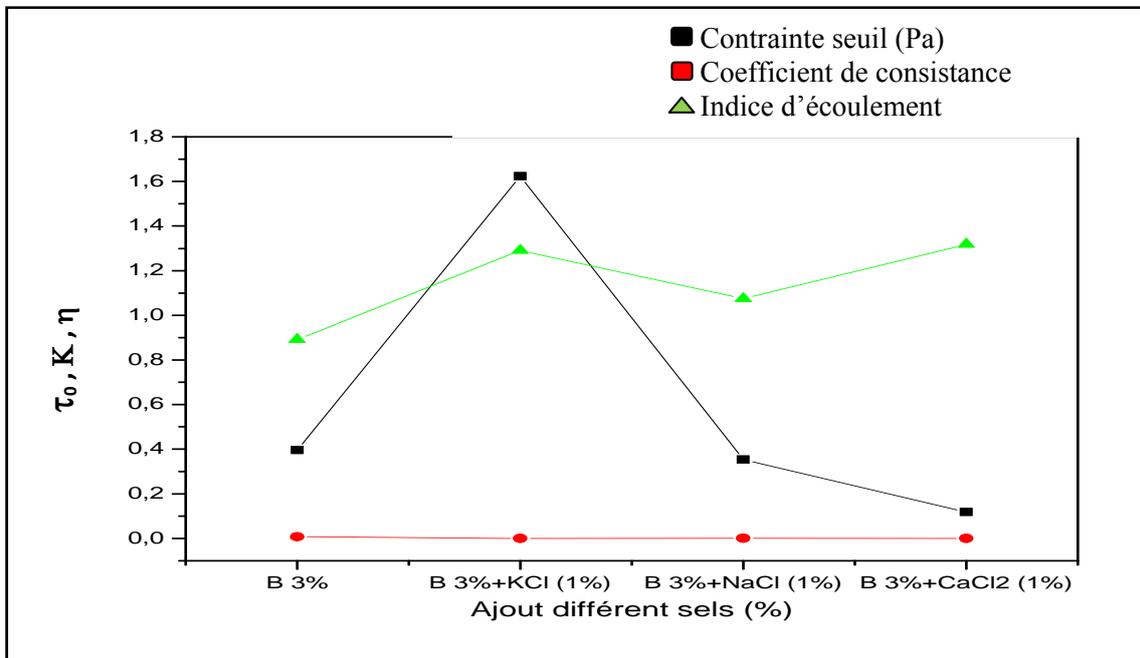


Fig. VIII.6 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différent sels d'une suspension de bentonite 3%.

Nous présentons sur la **Fig. VIII.4** et **Fig. VIII.5** l'effet de l'ajout de KCl, NaCl et CaCl₂ sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de référence.

Les figures montrent que la présence de KCl (1%), augmente la viscosité apparente et la contrainte seuil du (bentonite 3%). Par contre, le NaCl (1%) et CaCl₂ (1%), diminuent la viscosité et la contrainte seuil du mélange.

En effet, d'après la littérature, on note que l'augmentation de la contrainte seuil est liée à l'évolution de l'agrégation des particules argileuses. Cette agrégation est causée par la diminution des forces répulsives due à la compression de la double couche électrique. Lorsqu'on ajoute une 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 [3].

Lorsqu'on ajoute une concentration de NaCl ou CaCl₂, les particules se dispersent dans le système (défloculation), ce phénomène vient de la pénétration des cations Na⁺ et Ca²⁺ qui se localisent entre les feuillets de la bentonite provoquant la dispersion sous l'effet des forces répulsives. Par conséquent, la viscosité et la contrainte seuil du mélange diminuent.

On remarque aussi que le coefficient de consistance (K) reste presque constant dans les suspensions (**Fig. VIII.6**), et le comportement rhéologique des suspensions est proche du modèle de Herschel-Bulkley.

VIII.2.1.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique :

Certaines bentonites ont tendance à libérer des particules colloïdales qui ne peuvent être retirés de la dispersion, même par ultracentrifugation. Il est bien connu que le détachement de particules colloïdales de bentonites dépend de la quantité de Na⁺ échangeable, le pH et de la force ionique. [38]

L'ajout de NaOH augmente la quantité de Na⁺ dans la suspension de bentonite ce qui influe sur les particules colloïdales et le PH.

Dans la **Fig. VIII.7** et **Fig. VIII.8**, on remarque que l'ajout de NaOH (0.5%, 1% et 2%) fait diminuer la viscosité apparente de la suspension de bentonite. Cette diminution est due à l'augmentation de la quantité de Na⁺ dans la solution. Dans la littérature (S.Kaufhold, R.Dohrmann) ont montré que Na⁺ et le pH sont liés, et la (**Fig. VIII.9**) illustre l'effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3%.

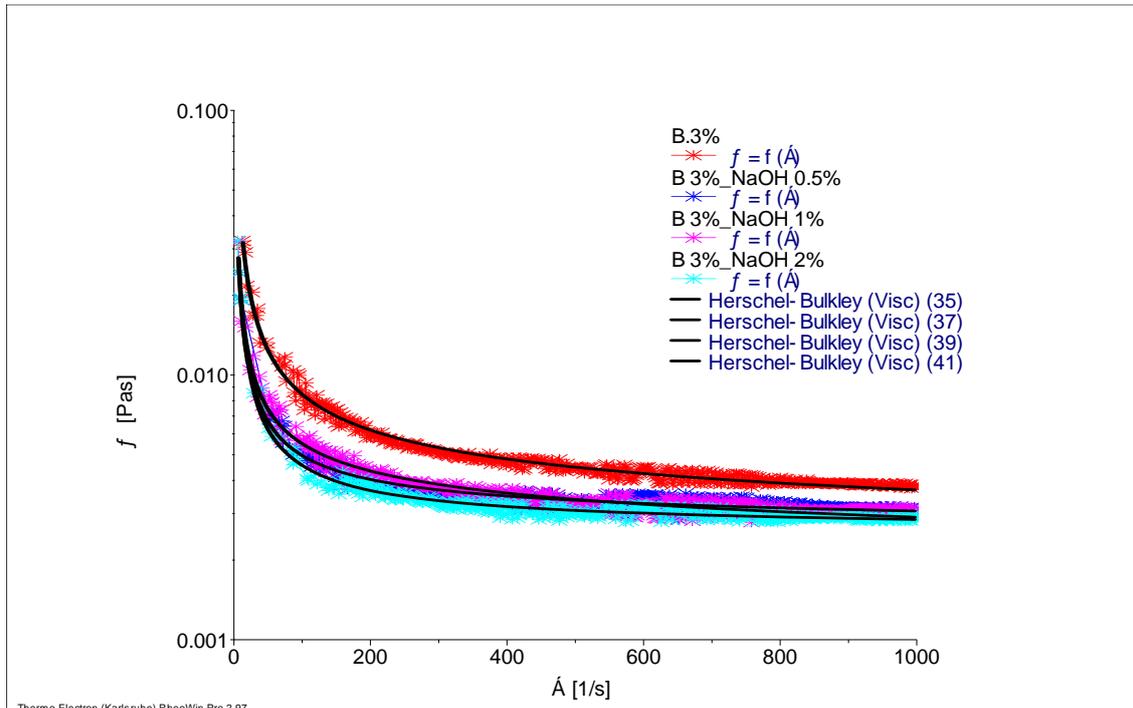


Fig. VIII.7 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

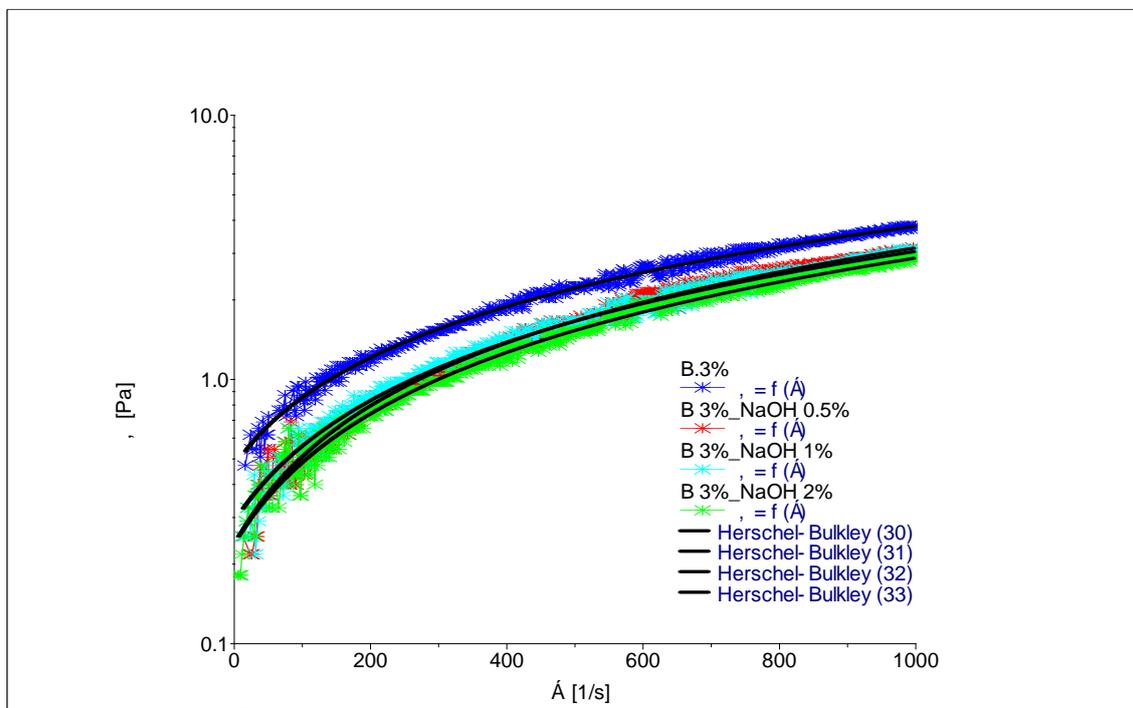


Fig. VIII.8 : Effet de l'alcalinité sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

La modélisation des courbes d'écoulements a révélé que l'ajout de NaOH n'influe pas sur le modèle rhéologique de la bentonite qui reste toujours proche du modèle de Herschel Bulkley.

Aussi, le coefficient de consistance (K) et l'indice d'écoulement (n) restent stables en fonction de la concentration de NaOH dans les suspensions, (**Fig. VIII.10**).

Tableau VIII.1 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3% .

T°= 27°c	NaOH %	PH
Bentonite 3%	0	8,7
Bentonite 3%	0,5	12,6
Bentonite 3%	1	12,92
Bentonite 3%	2	13,16

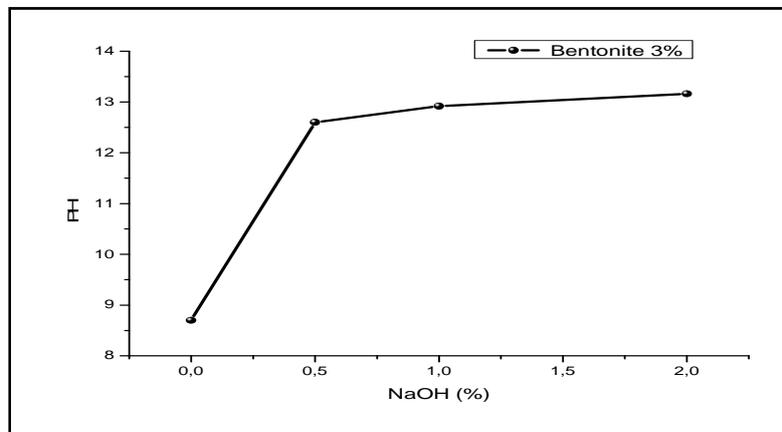


Fig. VIII.9 : Effet de l'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3%.

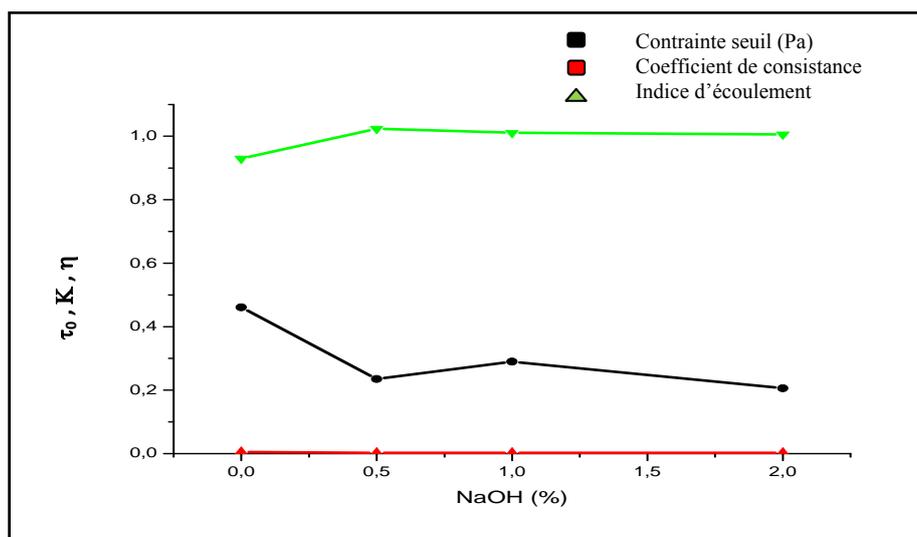


Fig. VIII.10 : Effet de l'alcalinité sur la contrainte de seuil, le coefficient de consistance et l'indice d'écoulement de la suspension de bentonite 3%.

VIII.2.1.4. Effet de concentration de la bentonite sur le potentiel zêta :

La détermination du potentiel de zêta (ξ) est très importante dans l'étude de la chimie colloïdale et d'interface. Puisque c'est un potentiel dans la double couche diffuse (DDL), il peut être mesuré par l'expérience; simultanément, le potentiel zêta est étroitement associé à la stabilité des suspensions colloïdales aussi bien que le gonflement des matériaux pleins dans les systèmes aqueux et ainsi de suite. Le potentiel zêta est le potentiel à la face de cisaillement.

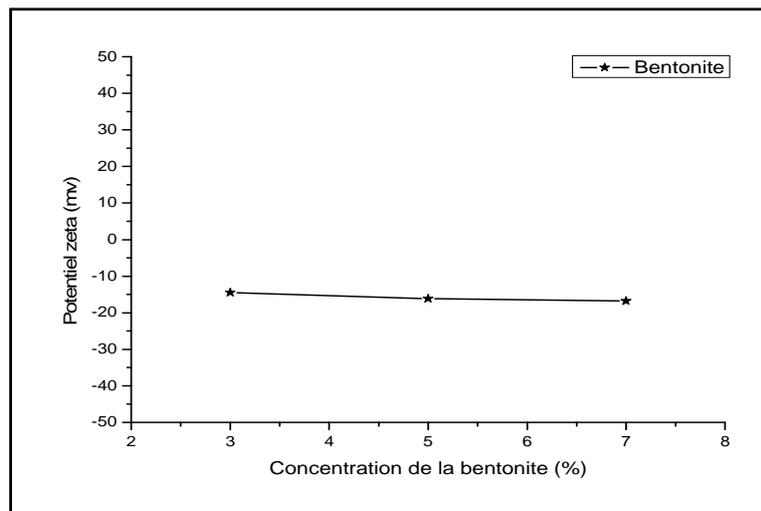


Fig. VIII.11 : Effet de la concentration de la bentonite sur le potentiel zêta.

Le zétamètre Zetasizer de Malvern Instruments permet de mesurer les paramètres fondamentaux connus pour affecter la stabilité - tels que le potentiel zêta, la taille des particules,...etc.

La figure **VIII.11** montre les résultats de potentiel zêta appliqués sur les différentes concentrations de la bentonite (3%,5% et 7 %). Ces résultats montrent que la différence de concentration de la bentonite dans la suspension bentonitique n'influe pas vraiment sur la valeur de potentiel zêta. Le potentiel zêta reste presque stable en fonction du changement de concentration .

La signification du potentiel zêta est que sa valeur peut être liée à la stabilité des dispersions colloïdales. Le potentiel zêta indique le degré de répulsion entre les particules adjacentes et pareillement chargées dans une dispersion. Pour les molécules et les particules qui sont assez petites, et assez faibles densités rester en suspension, un potentiel zêta élevé confèrera une stabilité, c.-à-d. la solution ou la dispersion résistera à l'agrégation. Quand le potentiel est bas, l'attraction excède la répulsion et la dispersion se cassera et floclera. Ainsi, des colloïdes avec un potentiel zêta élevé (négatif ou positif) sont électriquement stabilisés tandis que les

colloïdes avec de potentiels zêta bas tendent à coaguler ou flocculer. Le tableau suivant classe le comportement de la stabilité du colloïde selon le potentiel zêta: [42].

Tableau VIII.2 : Comportement de stabilité du colloïde en fonction de potentiel zêta :

Potentiel de Zeta (mv)	Stabilité de la suspension colloïdale
de 0 à ± 5	Coagulation ou floculation rapide
de ± 10 à ± 30	Instabilité naissante
de ± 30 à ± 40	Stabilité modérée
de ± 40 à ± 60	Bonne stabilité
plus que ± 61	Excellente stabilité

D'après le tableau **VIII.2**, les suspensions bentonitique (3%,5% et 7%) de la figure **VIII.11** sont faiblement stables. Cette instabilité naissante est dû aux forces gravitaires des particules de la bentonite qui sont plus fortes que les forces électrostatiques, dont le phénomène de la décantation est apparaît dans la suspension bentonitique.

VIII.3. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des polymères :

L'étude expérimentale du comportement rhéologique des mélanges (bentonite – polymère) a nécessité un travail préliminaire pour étudier le comportement rhéologique et physico-chimique du système (Eau – polymère). Il s'agit du carboxyméthylcellulose de sodium (CMC), le xanthane et le polyanionique cellulose (PAC R), utilisés souvent comme des additifs dans les boues de forage à base d'eau.

VIII.3.1. Etude de la suspension de CMC :

VIII.3.1.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de CMC :

La préparation des solutions de CMC a été réalisée en utilisant de l'eau distillée à température ambiante. Le polymère est dissout sous agitation magnétique durant 24 heures. Les solutions caractérisées sont à 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1% de CMC. Tous les essais rhéologiques sur les solutions de CMC, ont été effectués après une agitation magnétique pendant 5 min pour assurer une bonne homogénéisation des solutions .

La (**Fig. VIII.12**) montre les courbes d'écoulement des solutions de CMC à différentes concentrations. On observe que le comportement rhéologique de la solution aqueuse de polymère est très sensible à la concentration.

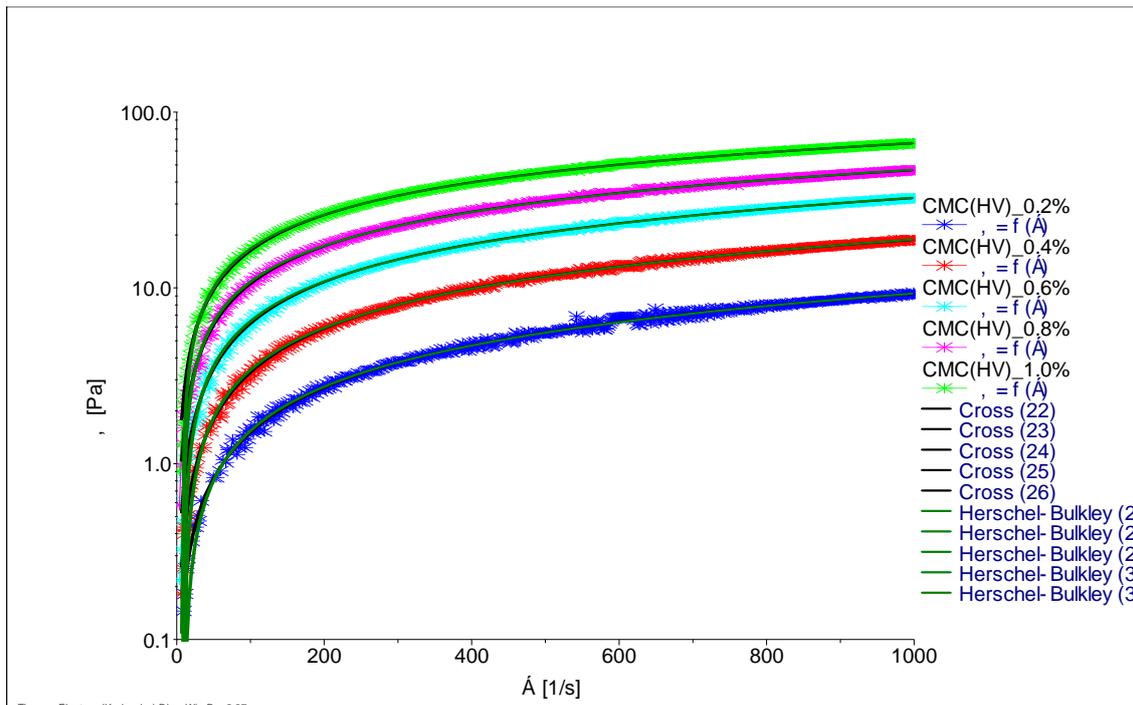


Fig. VIII.12 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

D'après la modélisation effectuée, on a obtenu deux modèles rhéologiques identiques (Cross et Herschel-Bulkley) qui représentent le comportement rhéologique de CMC à différentes concentrations (**Fig. VIII.12**). En échelle logarithmique, nous avons remarqué qu'à faible vitesse de cisaillement, le comportement rhéologique de CMC est proche du modèle de « Cross » (**Fig. VIII.13**).

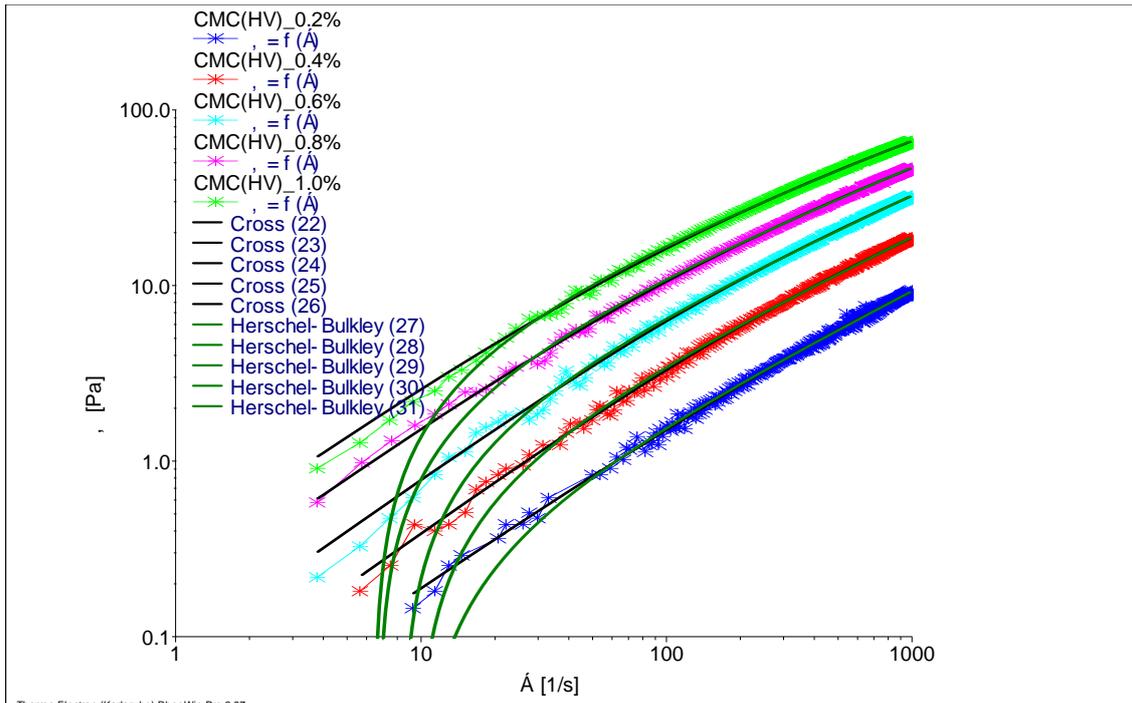


Fig. VIII.13 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

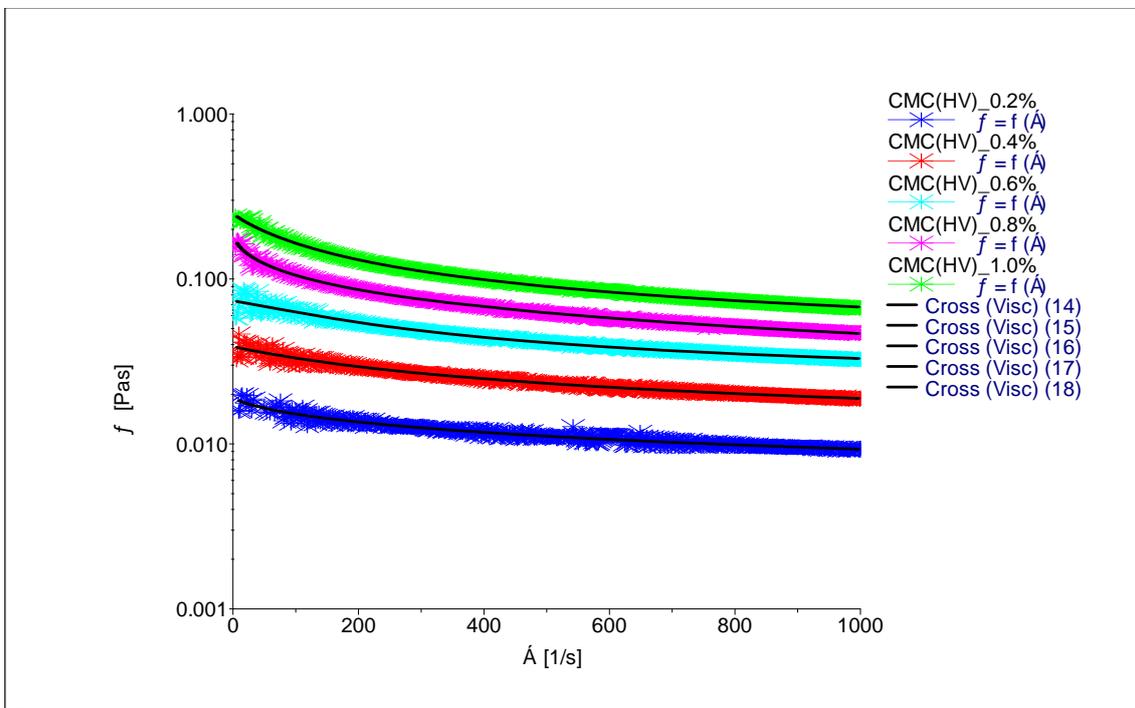


Fig. VIII.14 : Effet de la concentration de CMC sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.

VIII.3.1.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de CMC :

Dans notre cas, nous travaillons avec les fluides non newtoniens; autrement, la variation devrait être linéaire. La viscosité apparente augmente avec la concentration de CMC (**Fig. VIII.14**) et la viscosité diminue quand la température augmente (**Fig. VIII.17**).

Cette diminution de la viscosité est due à l'étirement des chaînes hélicoïdales du polymère sous l'effet de la température; cette dernière va allonger les chaînes de polymère qui vont circuler librement dans la suspension, donc la viscosité diminue.

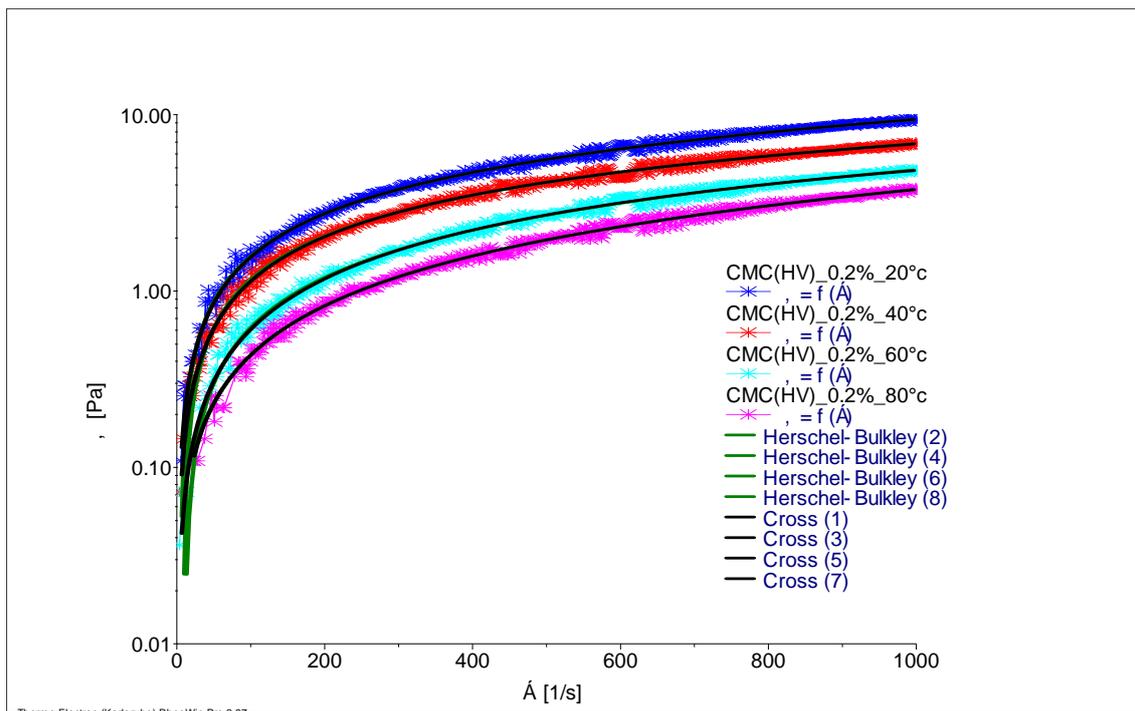


Fig. VIII.15 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

D'après les courbes de (**Fig. VIII.16 et Fig. VIII.17**), On a constaté que la température diminue la viscosité et le comportement rhéologique de CMC reste stable et peut être représenté toujours le modèle du Cross :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (C \dot{\gamma})^m} \dots\dots\dots (11)$$

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

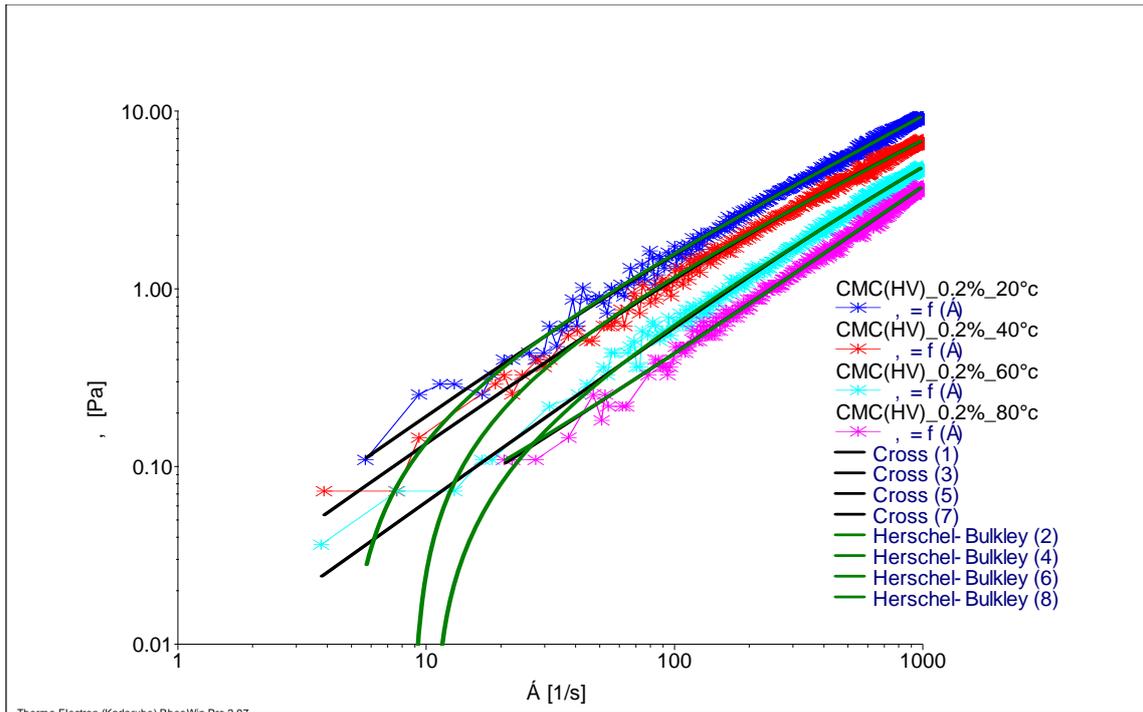


Fig. VIII.16 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

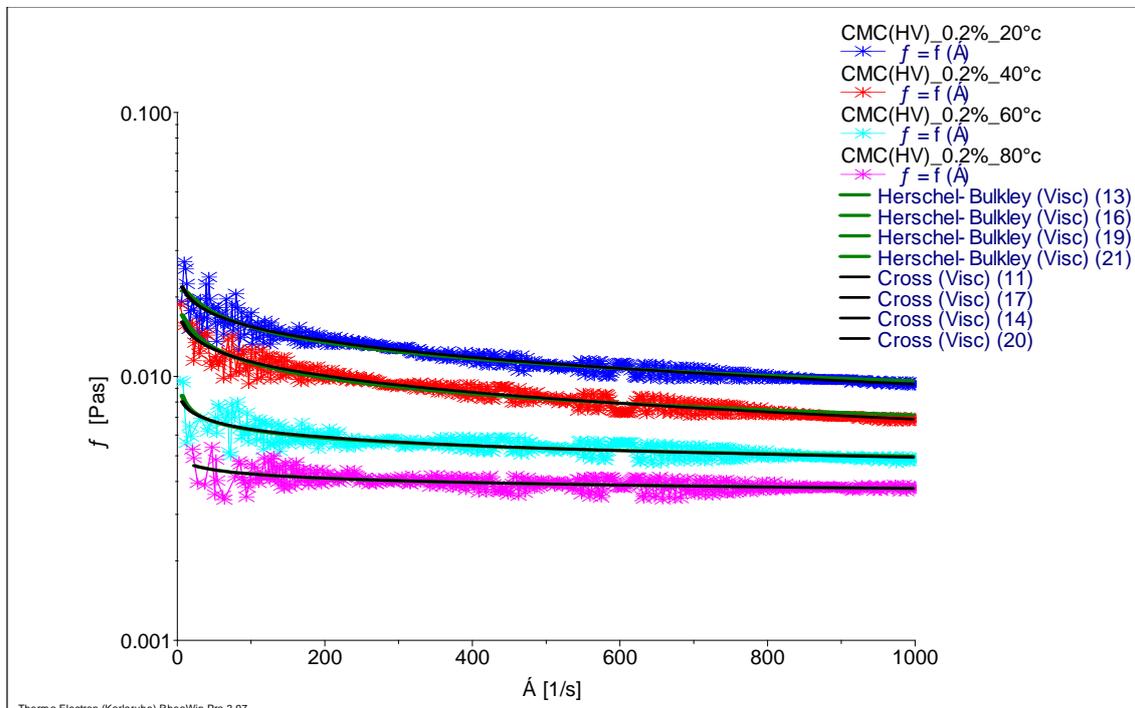


Fig. VIII.17 : Effet de la température sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

VIII.3.1.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique du CMC:

Dans cette étape, nous avons étudié l'influence des différents types de sels (monovalents et bivalents) sur le comportement rhéologique de CMC. La préparation des solutions du CMC (0,4%) + sel est effectué selon le protocole suivant :

- Préparer une solution saline (eau distillée avec un sel de 1%).
- Agitation magnétique de la solution pendant 10 min pour assurer la dissolution complète du sel.
- Ajouter une concentration de 0,4% de CMC dans la solution saline.
- Agiter la solution par agitation magnétique pendant 24^h pour assurer une bonne hydratation du polymère.

L'hydratation d'un polymère s'effectue par l'adsorption de molécules d'eau sur les chaînes et la pénétration dans le volume provoquant l'écartement des chaînes hélicoïdales, donc le polymère se gonfle.

En présence du sel, des cations vont se fixer sur les groupes chargés du polymère provoquant une répulsion entre les chaînes et une déshydratation. Cette déshydratation peut provoquer, dans certaines conditions, une précipitation du polymère, comme conséquence directe, la chute de la viscosité de la solution de polymère qui est observée.[5]

Dans les courbes (**Fig. VIII.18** et **Fig. VIII.19**), nous remarquons que les sels diminuent la viscosité apparente de la suspension. L'ajout des sels monovalents (NaCl et KCl) à la suspension du CMC donne un même comportement rhéologique (même valeurs de la viscosité apparente), et l'ajout du sel bivalent (CaCl₂) donne une viscosité faible par rapport aux autres viscosités (**Fig. VIII.19**). Cette différence de viscosité est due à la présence des cations Na⁺, K⁺ et Ca²⁺ dans les solutions qui sont susceptibles de se fixer sur les groupes chargés du polymère, va provoquer, une déshydratation des chaînes. Aussi le cation Ca²⁺ permet de créer un pont entre deux chaînes du polymère, et sa grandeur éloigne les chaînes entre elles qui, dans certaines conditions, conduit à une précipitation du polymère et une chute directe de la viscosité.[33]

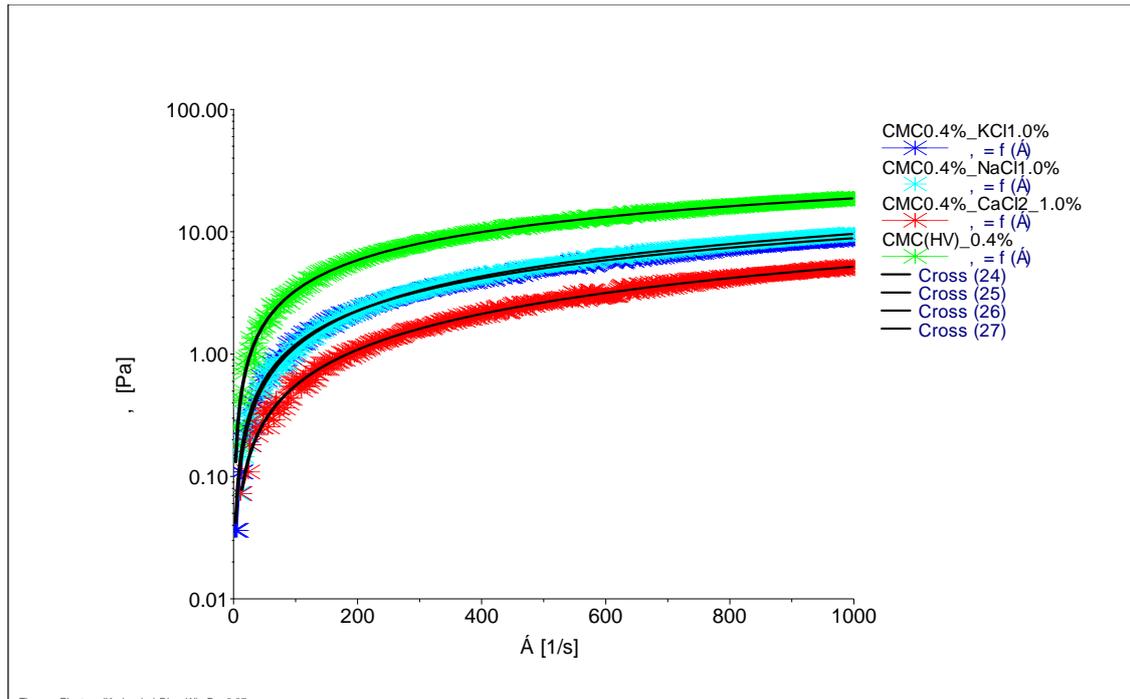


Fig. VIII.18 : Effet du sel sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

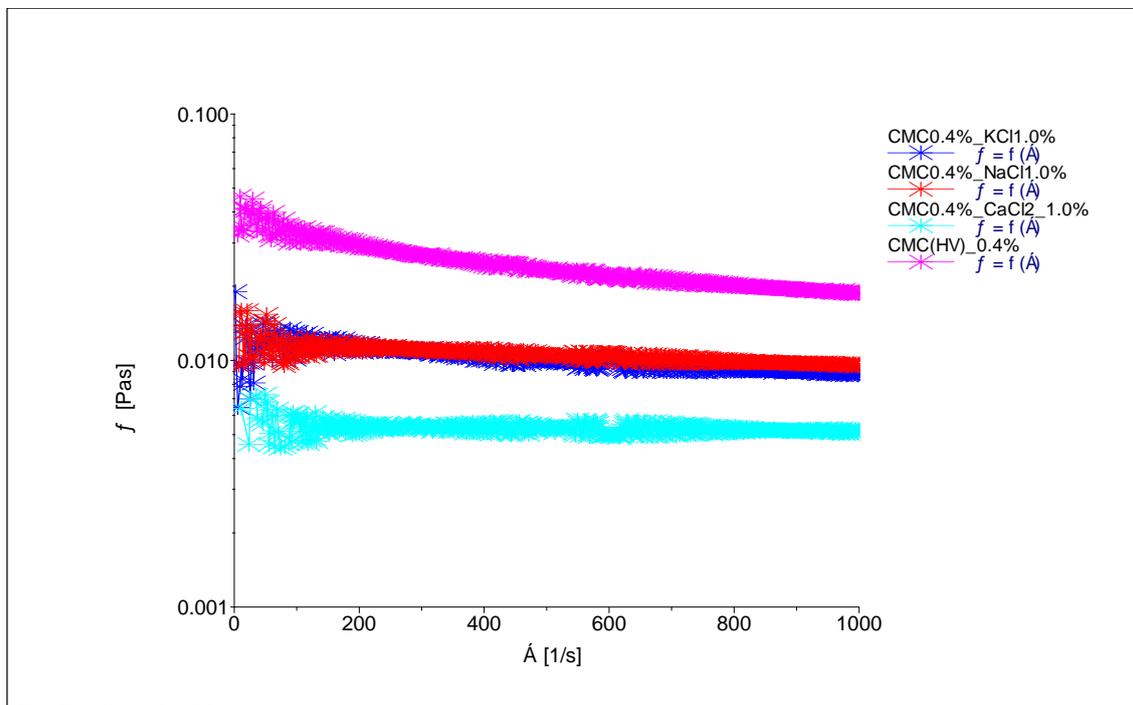


Fig. VIII.19 : Effet du sel sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

VIII.3.1.4. Effet de la concentration sur le potentiel zêta de CMC :

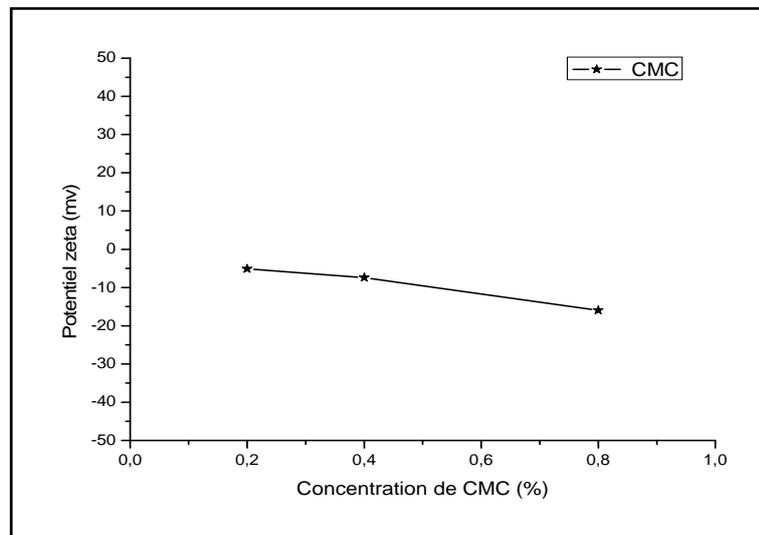


Fig. VIII.20 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de CMC.

Les résultats obtenus (Fig. VIII.20) montrent que la concentration du polymère CMC (0,2%, 0,4% et 0,8%) dans la suspension (Eau-Polymère) augmente le potentiel zêta.

Le CMC est un polymère anionique du groupe carboxylique ($R-COO^-Na^+$), l'hydratation libère les cations (Na^+), et les groupes carboxyliques du CMC deviennent anioniques ($R-COO^-$). Donc, plus on augmente la concentration du CMC dans la solution, plus la répulsion entre les chaînes anioniques devient plus importante. Par conséquent, le potentiel zêta augmente en fonction de la concentration du CMC, ce qui donne des suspensions moyennement stables.

VIII.3.2. Etude de la suspension de PAC R :

VIII.3.2.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de PAC R :

De même que pour les solutions de CMC, les courbes d'écoulement des solutions à base de PAC R (**Fig. VIII.19**) montrent un caractère pseudoplastique. Ce caractère rhéofluidifiant obéit au modèle rhéologique d'une loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration du PAC et diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. [39]

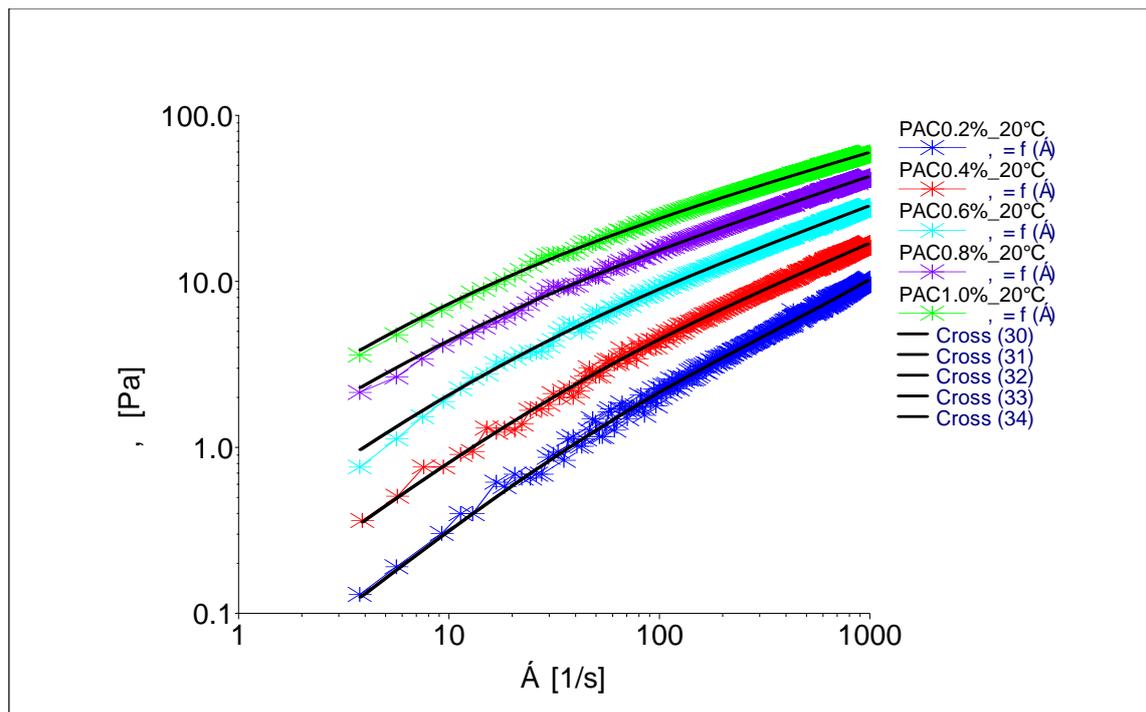


Fig. VIII.21 : Effet de la concentration de PAC R sur la contrainte de cisaillement de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.

L'augmentation de la viscosité avec la concentration en PAC R (**Fig. VIII.22**) peut être expliquée par le fait que les groupes carboxy dans la molécule du PAC R assurent une bonne dispersion dans l'eau, aboutissant à l'augmentation des frictions entre les particules (Senthil et al., 2003). De plus, la répulsion mutuelle entre les charges (sites négatifs créés le long de la chaîne du polymère par dissociation de l'ion Na^+ du PAC R) permet aux chaînes de polymères enroulées aléatoirement de s'allonger linéairement et, de ce fait, la viscosité augmente (Senthil et al., 2003). [39]

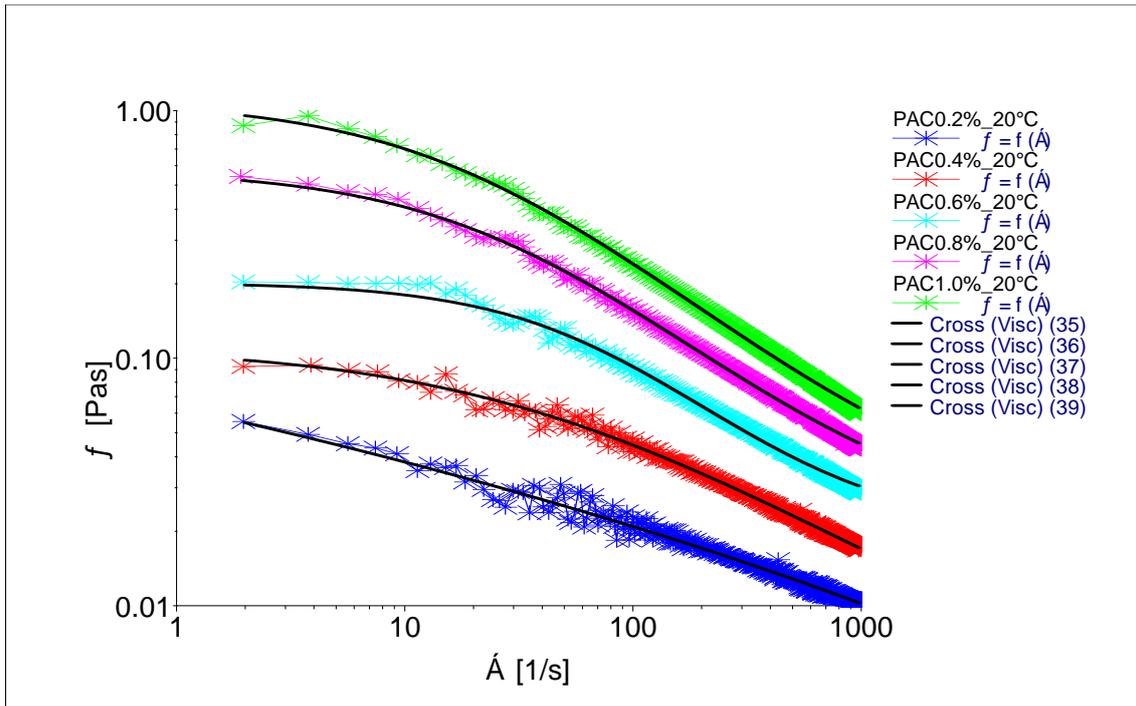


Fig. VIII.22 : Effet de la concentration de PAC R sur la viscosité de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.3.2.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de PAC R :

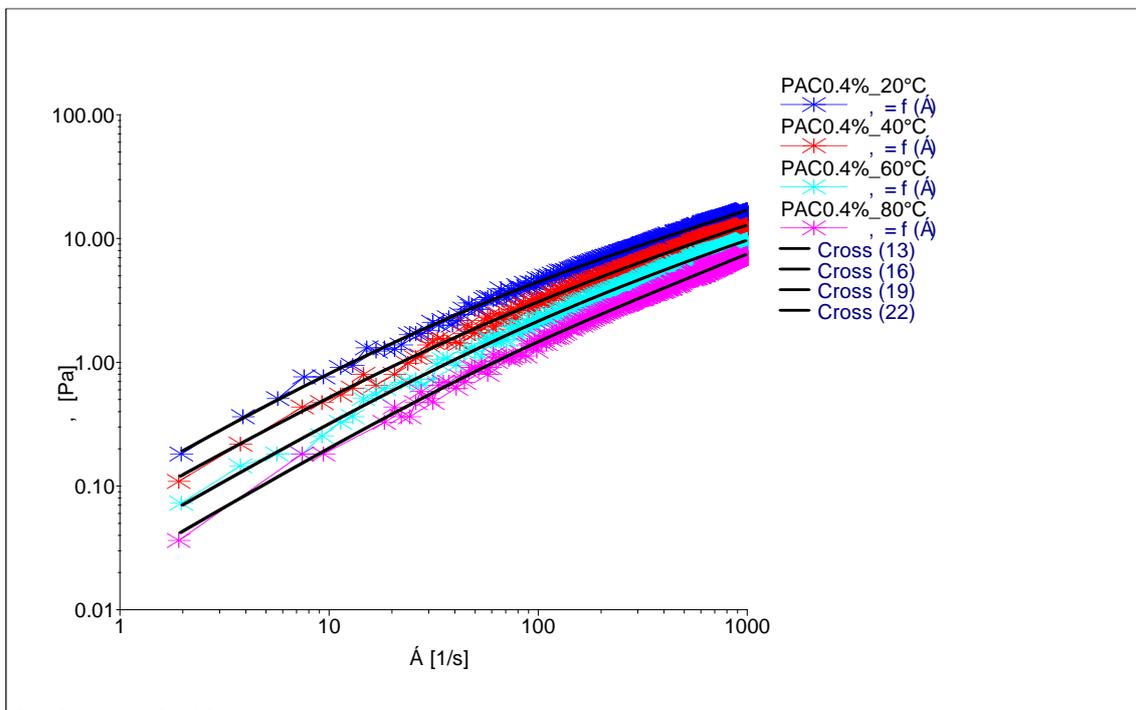


Fig. VIII.23 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

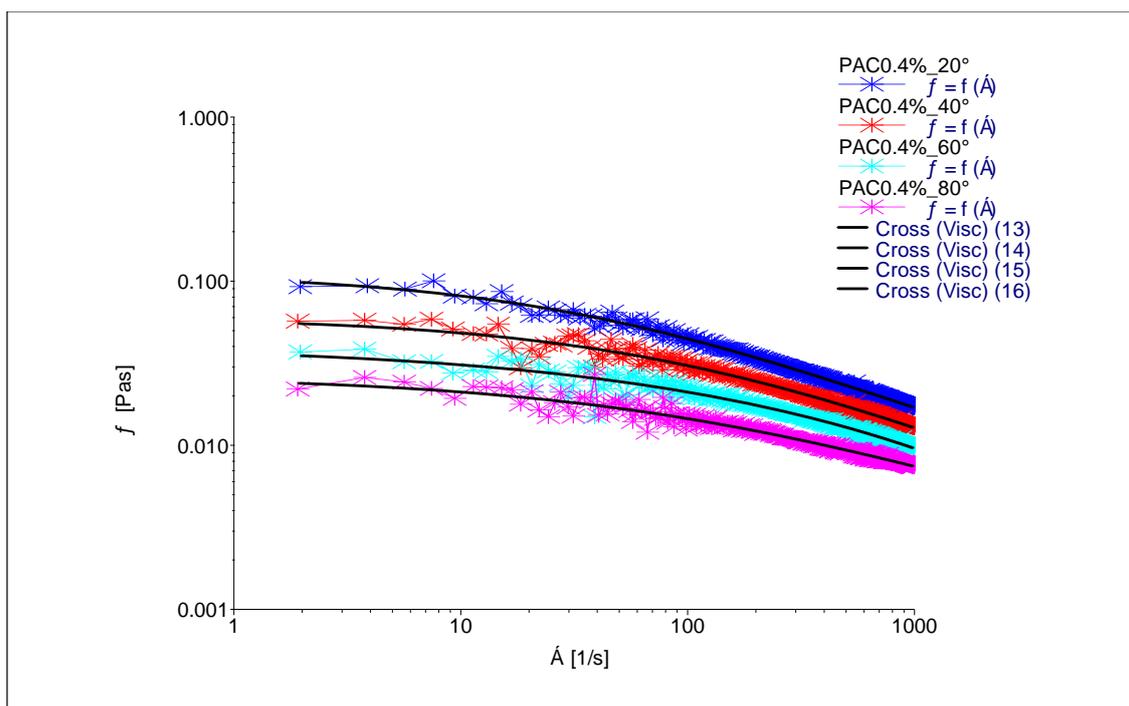


Fig. VIII.24 : Effet de la température sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

L'augmentation de la température de 20 C° à 80 C° a évolué le système (eau – PAC R) d'un état visqueux à un état dilué (**Fig. VIII.23**). L'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension de PAC R (**Fig. VIII.24**).

VIII.3.2.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique de PAC R :

La même tendance est observée pour le comportement rhéologique des solutions de PAC R sous l'effet des sels. Généralement, l'ajout des sels influe sur la viscosité de la suspension du PAC R (**Fig. VIII.25**). Le PAC R est particulièrement sensible aux cations divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et monovalents (K^+ , Na^+) qui vont réagir avec les groupes anioniques de PAC R (**Fig. VIII.26**).

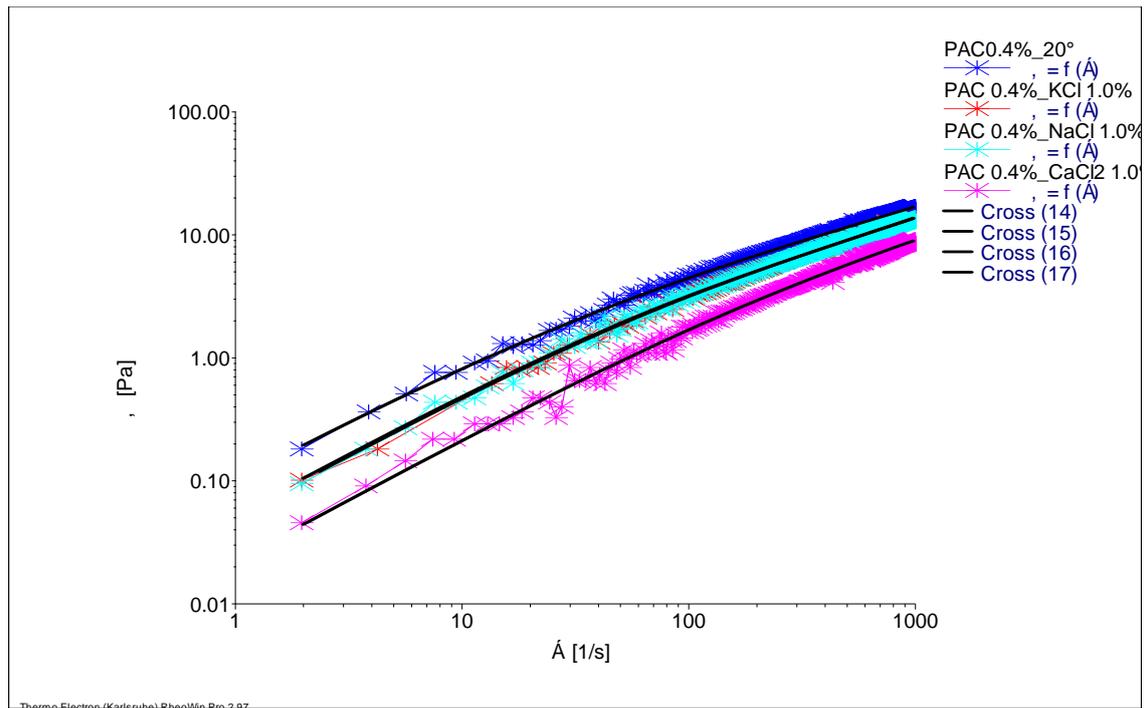


Fig. VIII.25 : Effet de l'ajout des sels sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

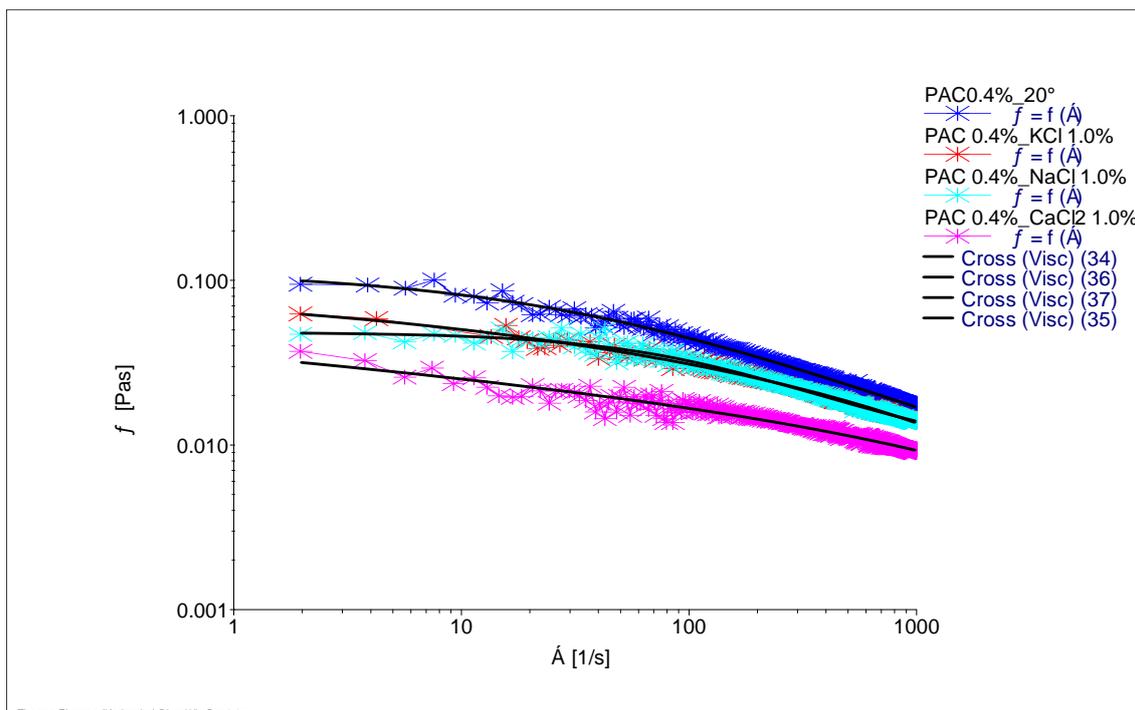
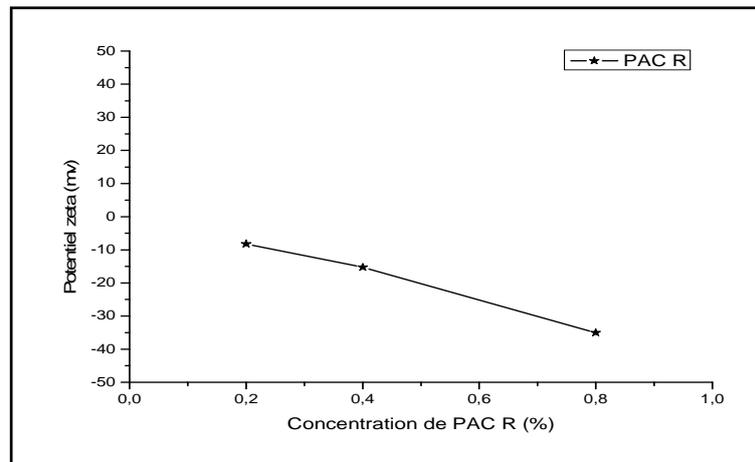
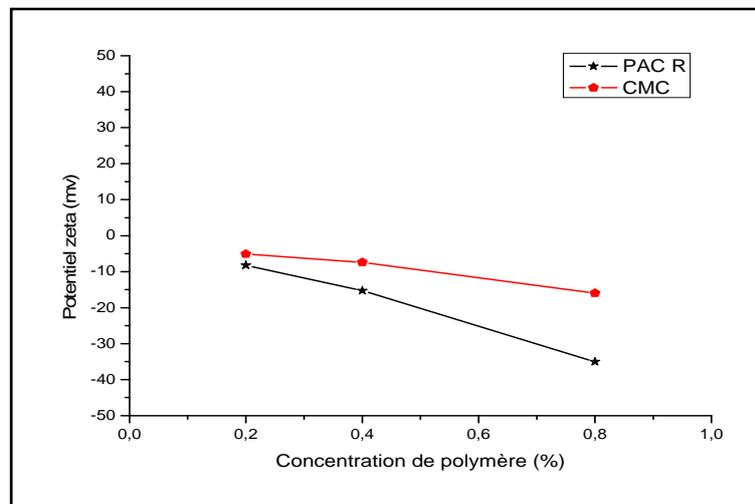


Fig. VIII.26 : Effet de l'ajout des sels sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.3.2.4. Effet de la concentration de PAC R sur le potentiel zêta :**Fig. VIII.27 :** Potentiel zêta en fonction de la concentration de PAC R.

On remarque dans la (Fig. VIII.27) que le potentiel zêta augmente en fonction de la concentration de PAC R (0.2%, 0.4% et 0.8%). Cette augmentation est due à la manifestation des groupes carboxyliques de polyanionique cellulose (PAC R) au phénomène de la répulsion dans la suspension qui donnent une stabilité colloïdale.

**Fig. VIII.28 :** Potentiel zêta en fonction de la concentration de polymère.

Dans (Fig. VIII.28), nous avons remarqué que dans la même plage de concentration, le potentiel zêta de PAC R est plus élevé par rapport au CMC.

Dans la structure de PAC R, il ya énormément des groupes anioniques (Fig. VIII.29), ces groupes provoquent une répulsion entre les chaînes de polymère. Donc, il existe des forces de répulsion électrostatiques, dues à la charge de surface de polymère, ces forces sont également supérieur à leurs forces de gravité, donc les polymères restent en suspension. C'est pour cette

raison que le PAC R garde sa stabilité colloïdale. Par contre, le CMC ayant une faible quantité de groupes anioniques par rapport au PAC R, les forces de répulsion électrostatiques sont moins faibles, et la force de gravité provoque l'instabilité colloïdale de CMC dans la solution.

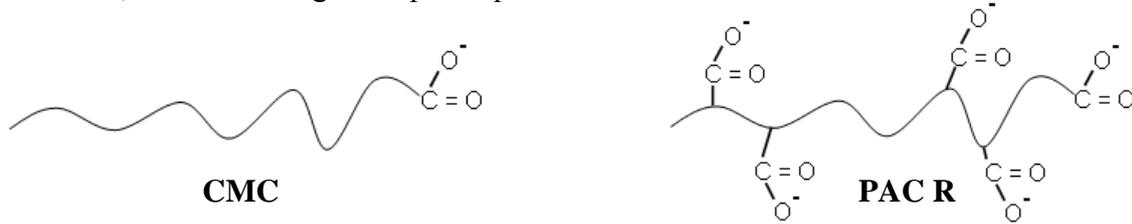


Fig. VIII.29 : Etat du CMC et du PAC R lors de l'hydratation, dans le cas (Eau-polymère).

VIII.3.2.5. Comparaison entre le comportement rhéologique de CMC et de PAC R :

Dans la (Fig. VIII.30), le rhéogramme (a) représente l'augmentation de la viscosité en fonction de la concentration des suspensions de CMC et de PAC R, le rhéogramme (Fig. VIII.30. b) représente la diminution de la viscosité en fonction de la température des suspensions CMC et de PAC R. Dans les mêmes conditions et mêmes concentrations, le PAC R donne des viscosités élevées par rapport à celles du CMC. Aussi, on remarque que, plus on augmente la concentration, plus la différence de la viscosité entre les deux polymères augmente (Fig. VIII.30. a). Cette différence de viscosité est liée à la structure de chaque polymère. Le PAC R qui est un polymère cellulosique de type carboxyméthylcellulose ayant une conformation de pelote flexible. Il est à noter que le degré de substitution constitue un paramètre clef dans la définition de la flexibilité de la CMC. En augmentant le degré de substitution, la flexibilité du polymère augmente aussi [Feret (1992)].

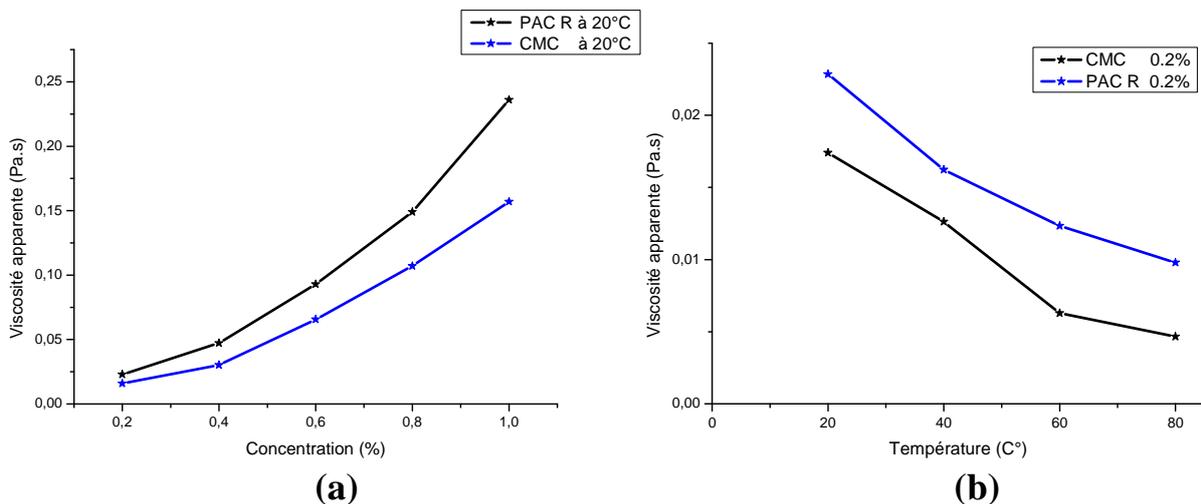


Fig. VIII.30 : (a) Effet de la concentration sur la viscosité de CMC et PAC R, (b) Effet de la température sur la viscosité de la suspension de CMC et PAC R.

VIII.3.3.1. Effet de la concentration sur le comportement rhéologique de Xanthane :

La variation de la viscosité des dispersions aqueuses de xanthane a été examinée en fonction du taux de cisaillement. La viscosité apparente, bien que se diminuant avec l'augmentation de contrainte de cisaillement, et augmente avec la concentration. D'après les rhéogrammes des figures (Fig.VIII.31) et (Fig. VIII.32), toutes les solutions montrent un écoulement non Newtonien, déjà observé (Kayacier et Dogan, 2006).

Les propriétés caractéristiques de la gomme xanthane en solution aqueuse relèvent de la rhéologie. Au-dessous d'une certaine contrainte de cisaillement, les bâtonnets rigides de gomme xanthane sont stabilisés par des interactions faibles. Il en résulte un enchevêtrement d'autant plus important que la concentration en gomme est élevée. Les bâtonnets emprisonnant l'eau ne peuvent pivoter, figeant le liquide qui prend l'aspect d'un pseudogel. On parle de seuil d'écoulement, qui correspond à la contrainte de cisaillement minimale nécessaire pour obtenir un début d'écoulement. La contrainte de seuil est visible à faible concentrations (0.1%, 0.25%, 0.5% et 1%) (Fig. VIII.31) .[40]

Les courbes d'écoulements du xanthane sont proches du model de Herschel-Bulkley.

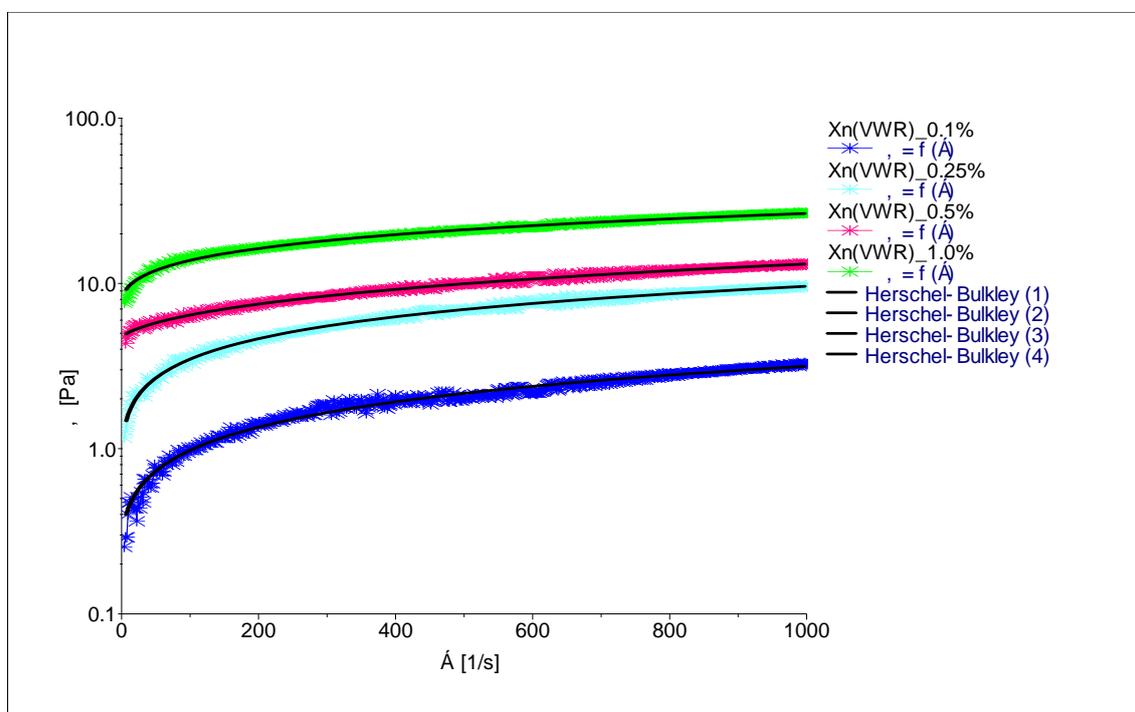


Fig. VIII.31 : Effet de la concentration de xanthane sur la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

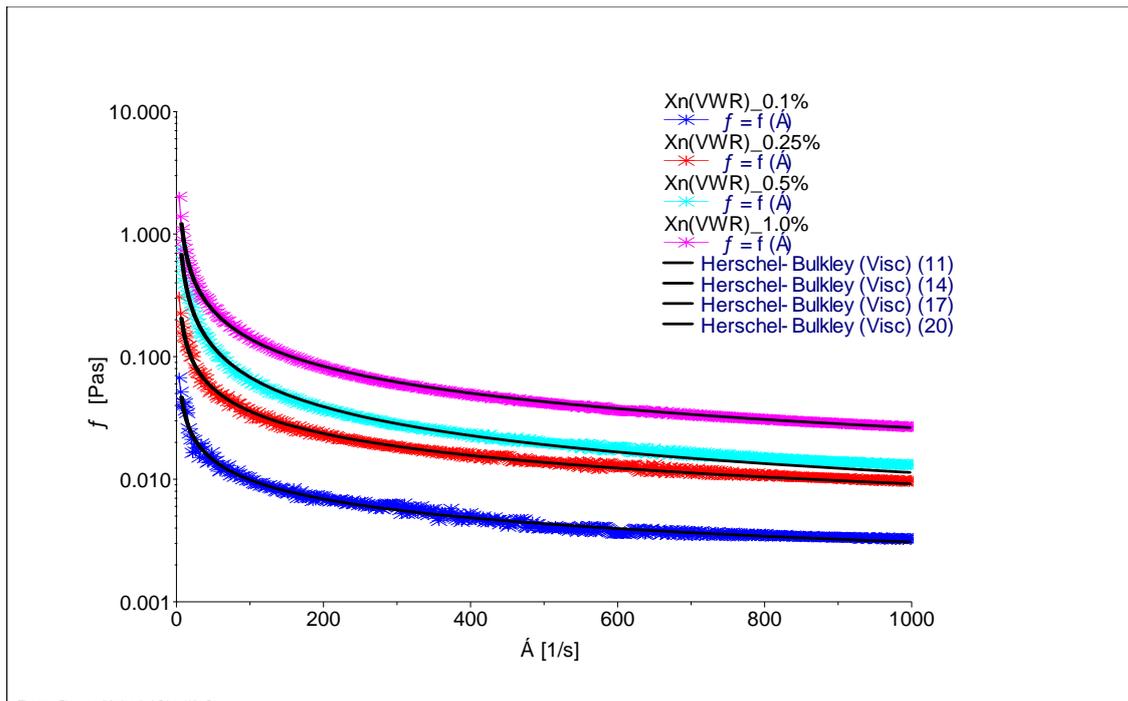


Fig. VIII.32 : Effet de la concentration de xanthane sur la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.

La viscosité apparente diminue rapidement lorsque la contrainte de cisaillement augmente, c'est-à-dire que le rapport contrainte de cisaillement/vitesse de déformation du fluide diminue. La gomme xanthane en solution a un comportement pseudoplastique d'autant plus important que la concentration en gomme augmente. Par contre, la pseudoplasticité ne dépend pas du taux des groupes acétyles et pyruvyles. Les bâtonnets rigides s'orientent instantanément dans le sens du cisaillement et cet alignement est d'autant plus marqué que le cisaillement augmente. De ce fait, le polysaccharide s'oppose de moins en moins à l'écoulement du fluide. Cette propriété est parfaitement et instantanément réversible.

Dans les figures ci-dessous, on remarque que la température n'influe pas sur les propriétés rhéologiques du xanthane (**Fig. VIII 33**). Cette propriété due à l'enchevêtrement de chaînes principales et ramifications du xanthane, donne une certaine stabilité au niveau des bâtonnets rigides par des interactions faibles.

Si on augmente la concentration du xanthane, on remarque que la suspension devient de plus en plus stable en fonction de la température. (**Fig. VIII.34, VIII.35**). plus la concentration est élevée, plus l'enchevêtrement devient plus important.

VIII.3.3.2. Effet de la température sur le comportement rhéologique de Xanthane :

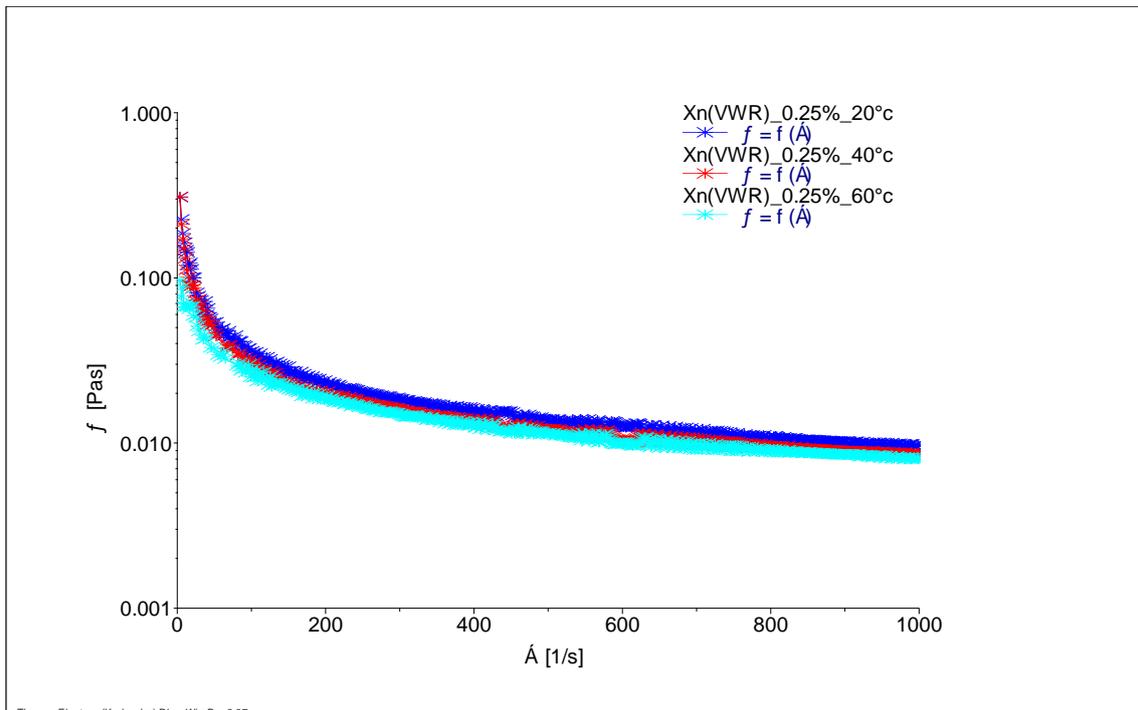


Fig. VIII.33 : Effet de la température sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

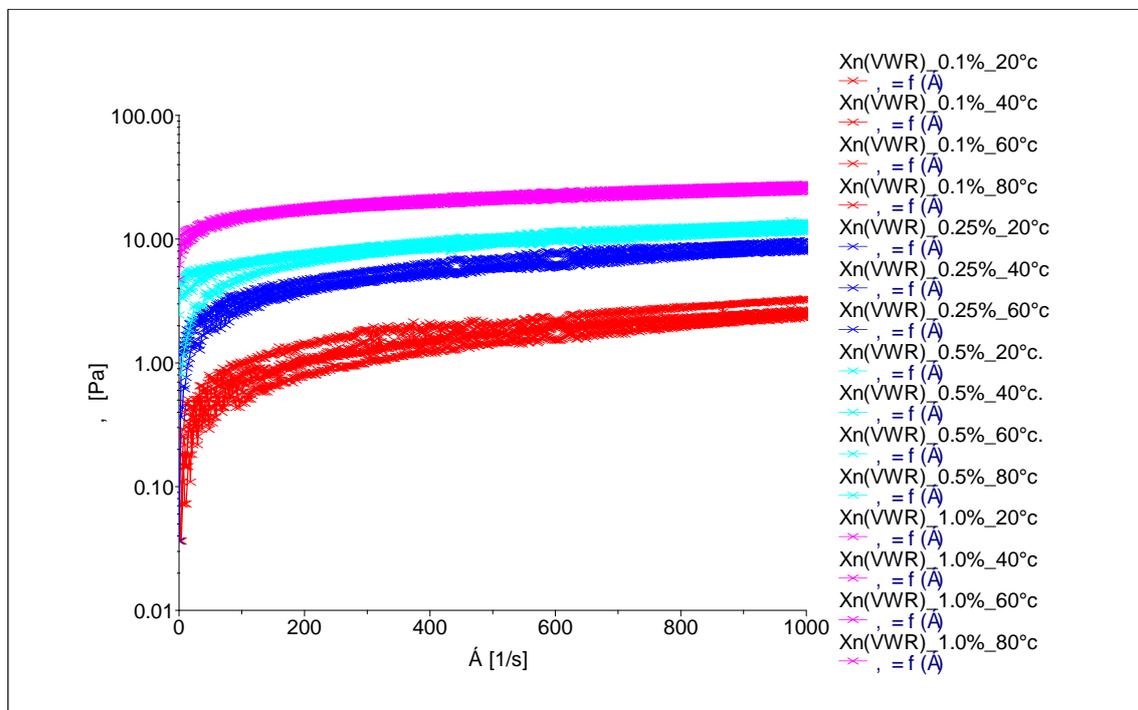


Fig. VIII.34 : Evolution de la contrainte de cisaillement de différentes concentrations du xanthane sur la température en fonction de taux de cisaillement.

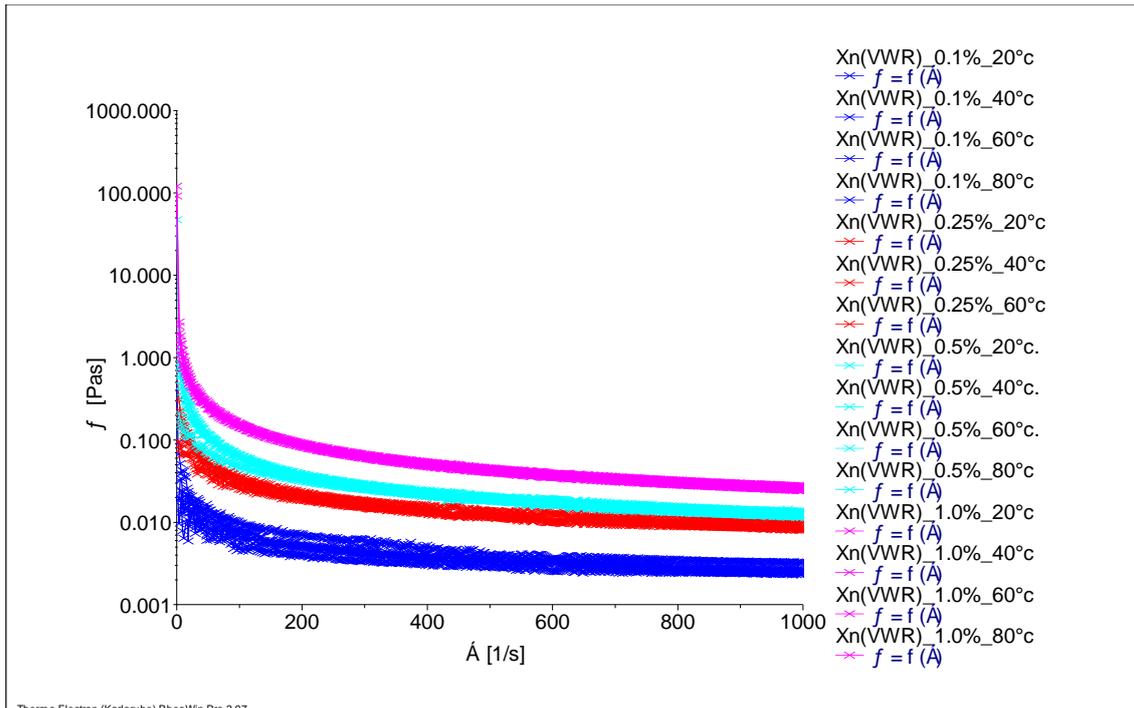


Fig. VIII.35 : Evolution de la viscosité apparente de différentes concentrations du xanthane sur la température, en fonction du taux de cisaillement.

Les propriétés rhéologiques de la gomme xanthane ne sont pas altérées par un cisaillement prolongé.

La gomme xanthane est compatible avec les sels monovalents. La viscosité et la pseudoplasticité d'une solution de gomme augmentent légèrement avec la concentration en sels jusqu'à un optimum de 0,1 % de ces derniers. Certains grades spéciaux sont nécessaires pour assurer la compatibilité de la gomme avec les cations trivalents. La gomme xanthane, polymère anionique, sera compatible avec les ingrédients anioniques ou non ioniques, mais pas avec la plupart des cationiques. Avec ces derniers, on observera la formation de gels. Elle conserve ses propriétés en présence des acides organiques les plus couramment utilisés (acétique, lactique, citrique et tartrique). La gomme se dissout facilement dans les solutions acides, à condition d'incorporer l'acide en dernier. [40]

VIII.3.3.3. Effet des sels sur le comportement rhéologique de Xanthane :

Dans notre travail, on a étudié l'effet des sels sur le comportement rhéologique des polymères. Les figures (Fig. VIII.36, VIII.37) montrent que les sels n'influent pas sur le comportement rhéologique du xanthane (reste stable).

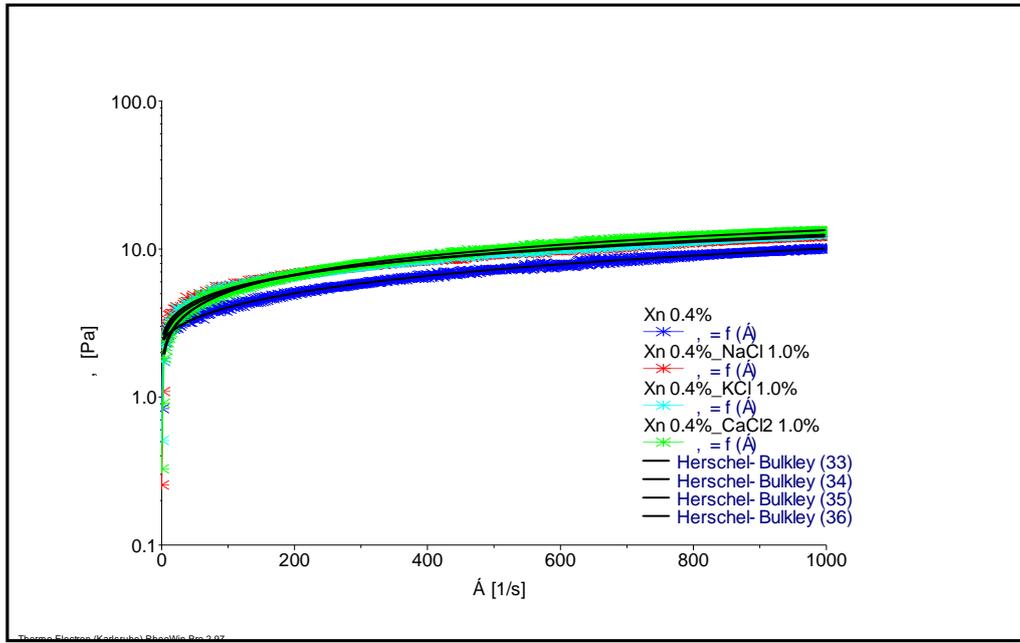


Fig. VIII.36 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

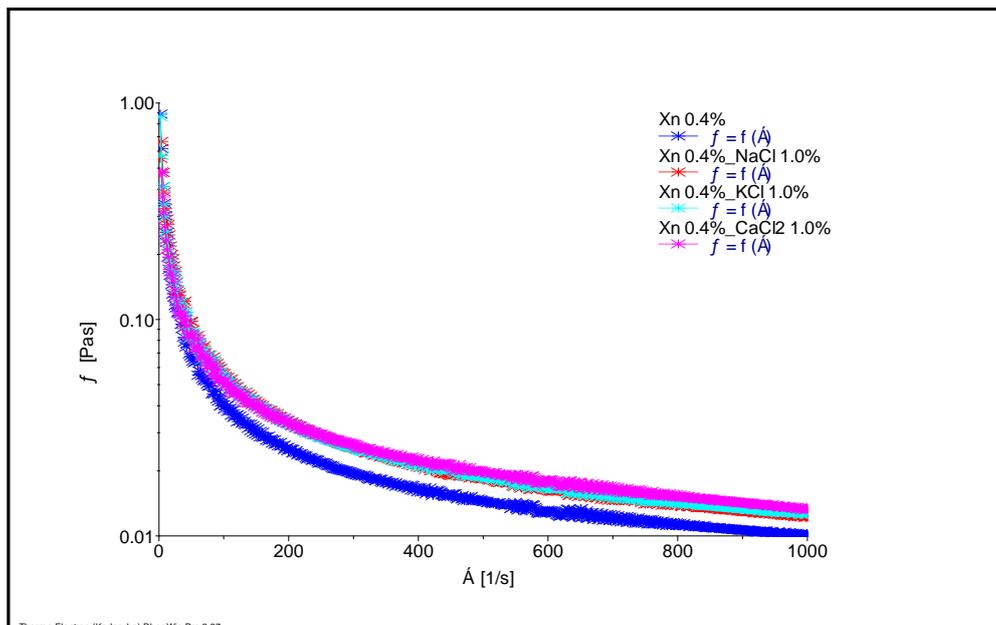
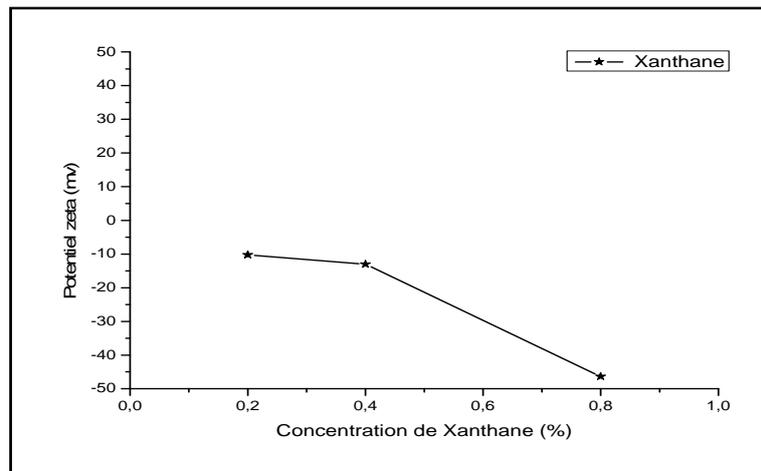


Fig. VIII.37: Effet des sels sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.3.3.4. Effet de la concentration sur le potentiel zêta de Xanthane :**Fig. VIII.38 :** Potentiel zêta en fonction de la concentration de Xanthane.

Les essais zétamétriques effectués sur les solutions de xanthane (Fig. VIII.38) donnent des bonnes solutions colloïdales en fonction de la concentration. Deux phénomènes participent dans cette stabilité colloïdale, un phénomène physique et d'autre chimique :

- Les propriétés caractéristiques de la gomme xanthane en solution aqueuse relèvent de la rhéologie. Au-dessous d'une certaine contrainte de cisaillement, les bâtonnets rigides de xanthane sont stabilisés par des interactions faibles. Il en résulte un enchevêtrement d'autant plus important que la concentration en xanthane est élevée. Les bâtonnets emprisonnant l'eau ne peuvent pivoter, figeant le liquide qui prend l'aspect d'un pseudogel, d'une part.
- D'autre part, le xanthane est un polymère constitué d'une unité pentasaccharidique branchée, acétylée et pyruvylée. Deux groupements carboxyliques confèrent à la gomme xanthane un caractère anionique. Cette unité est décrite sur la Fig. V.9 (voir le chapitre V). Ce caractère anionique manifeste à la répulsion entre les chaînes de xanthane enchevêtrés qui rassure une bonne suspension colloïdale.

VIII.4. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions mélangés :

Lorsque les polymères sont de même nature, on aura plutôt des répulsions par effet stérique. Les polymères se repoussent et s'excluent mutuellement de l'espace qu'ils remplissent. Dans le cas contraire, les interactions sont essentiellement attractives et les polymères s'attirent mutuellement et s'attachent entre eux. Ces deux cas d'attraction résument le fait que certains polysaccharides se comportent comme des épaississants s'ils sont seuls et comme des gélifiants s'ils sont associés à un autre type de polysaccharides [De Gennes (1979)].

Dans cette partie, nous avons étudié le comportement rhéologique de la suspension d'un polymère combiné avec un autre polymère. D'abord, nous avons combiné un polymère de gomme xanthane avec un carboxyméthylcellulose (CMC) à différentes concentrations (**Fig. VIII.39**). Par la suite, on a effectué une autre combinaison de xanthane avec polyanionique cellulose (PAC R) (**Fig. VIII.41**), afin de réaliser une comparaison entre les deux combinaisons (**Fig. VIII.43**).

VIII.4.1. Etude de la suspension du mélange (xanthane – CMC) :

Dans la figure VIII.39, nous avons représenté deux modèles, de Herschel-Bulkley et de Cross appliqués aux mesures expérimentales obtenues. On remarque que la viscosité à cisaillement nul (η_0) et la viscosité à l'infini (η_∞), augmentent relativement avec la concentration du CMC dans le mélange.

On observe aussi qu'à faible vitesse de cisaillement, la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente de la suspension du mélange (xanthane – CMC) peuvent être corrélées par le modèle du Cross. Dès qu'on dépasse les faibles vitesses de cisaillement (environ 30 s^{-1}) le modèle de Herschel-Bulkley commence à apparaître en superposition avec le modèle de Cross (**Fig. VIII.39 et VIII.40**).

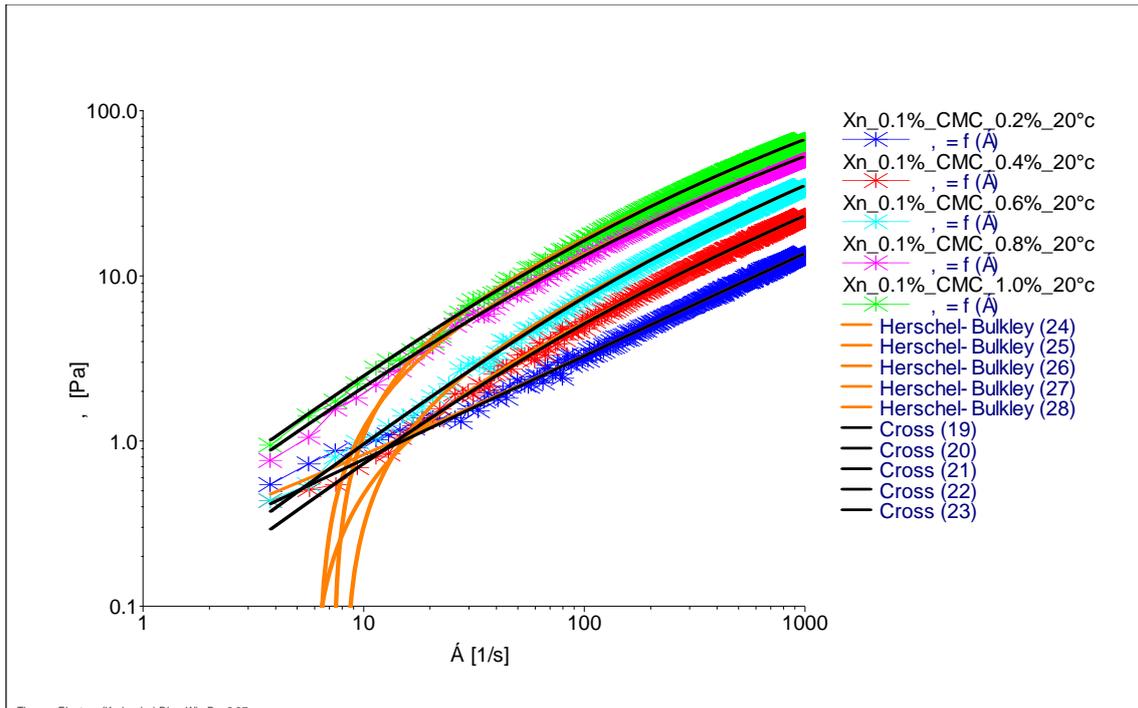


Fig. VIII.39 : Effet de l'ajout de CMC sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

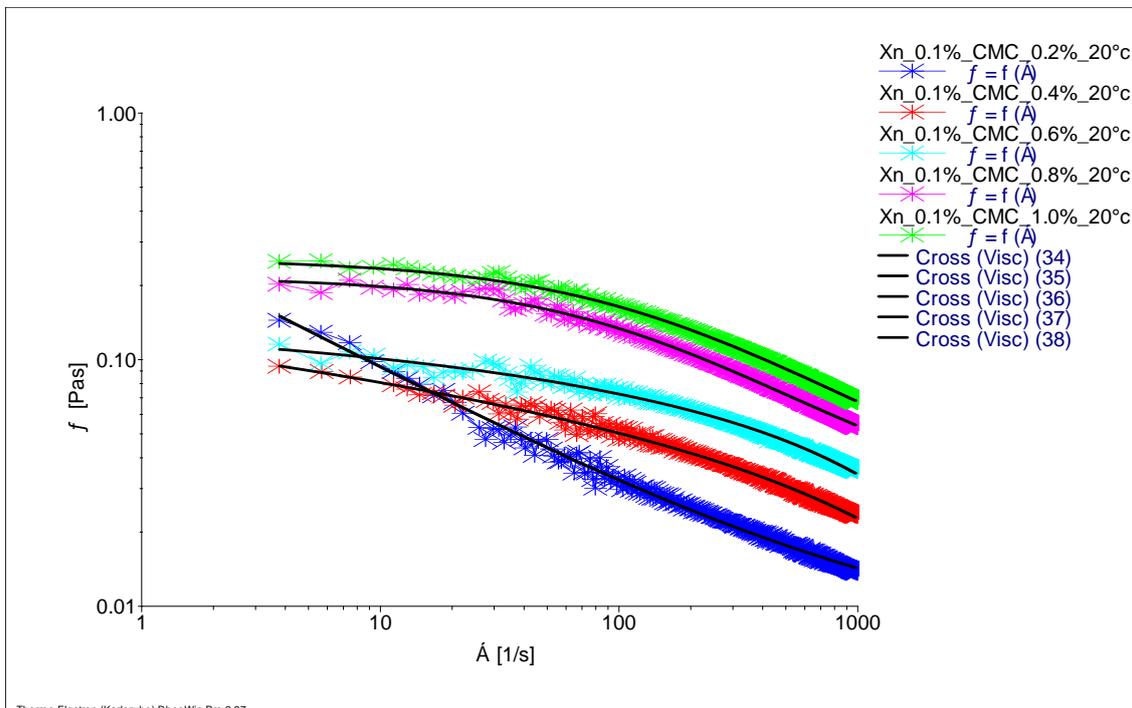


Fig. VIII.40 : Effet de l'ajout de CMC sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.4.2. Etude de la suspension du mélange (Xanthane – PAC R) :

Dans ce mélange (xanthane – PAC R), on remarque que le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley est le plus proche à décrire dans ce type des mélanges (**Fig. VIII.39**).

On remarque aussi qu'à faible vitesse de cisaillement, l'écart de la viscosité entre chaque concentration est très importante (**Fig. VIII.40**), cet écart va se diminuer en fonction de la vitesse de cisaillement.

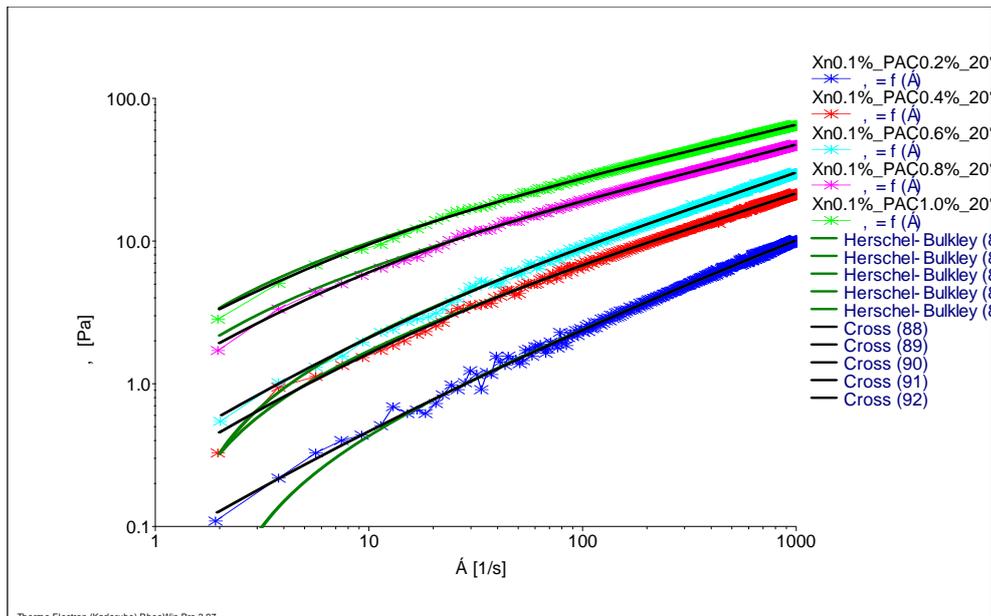


Fig. VIII.41 : Effet de l'ajout de PAC R sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

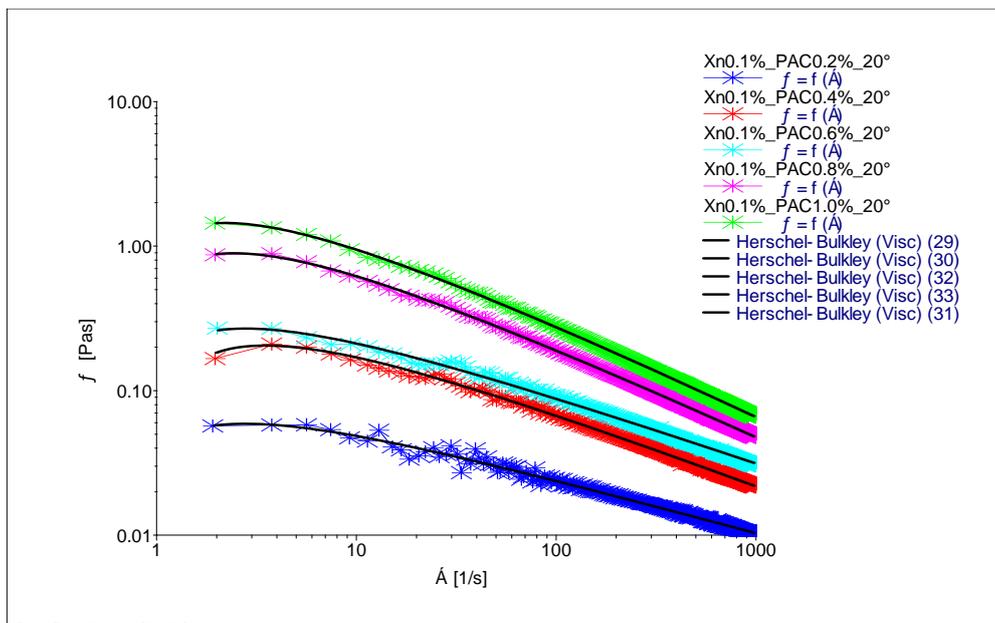


Fig. VIII.42 : Effet de l'ajout de PAC R sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.4.3. Comparaison rhéologique entre le mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) :

Si on fait une comparaison entre les deux mélanges de xanthane – CMC et de xanthane – PAC R avec les mêmes concentrations et les mêmes conditions (**Fig. VIII.43**), on remarque que :

- Xanthane – PAC R est le plus visqueux à faible vitesse de cisaillement, cela due à l'enchevêtrement des grandes chaînes de PAC R avec les ramifications du xanthane. Donc, le facteur qui fait la différence de viscosité entre les deux mélanges est la structure macromoléculaire de PAC R et de CMC. Sachant que la PAC R est un polymère très long et très grand par rapport au CMC.
- Aussi, avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement, on remarque que la viscosité de xanthane – PAC R rapproche à la viscosité de (xanthane – CMC) (**Fig. VIII.44**). ce rapprochement dû à la manifestation des contraintes de cisaillement qui sont très importantes provoquent les chaînes du polymère de s'orienter vers le sens d'écoulement, donc la viscosité du mélange va diminuer.
- Le système (xanthane – CMC) a décrit un modèle rhéologique proche au modèle de Cross.
- Le système (xanthane – PAC R) a décrit un modèle rhéologique proche au modèle de Herschel- Bulkley.

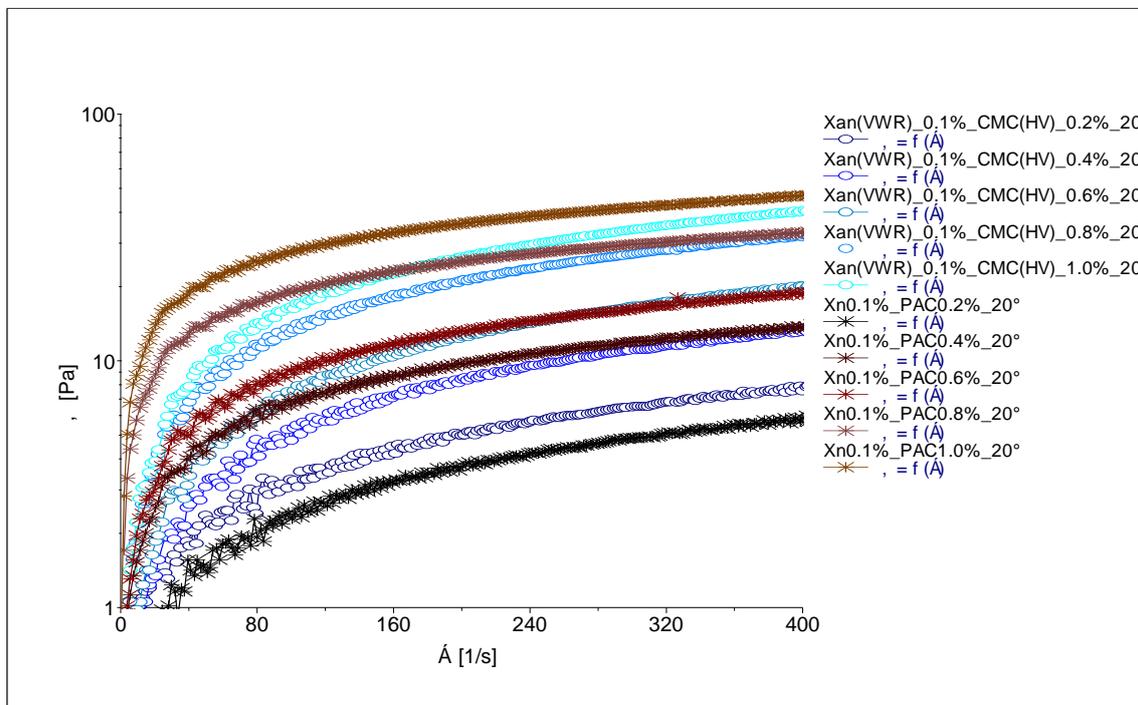


Fig. VIII.43 : Comparaison entre la contrainte de cisaillement de mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction du taux de cisaillement.

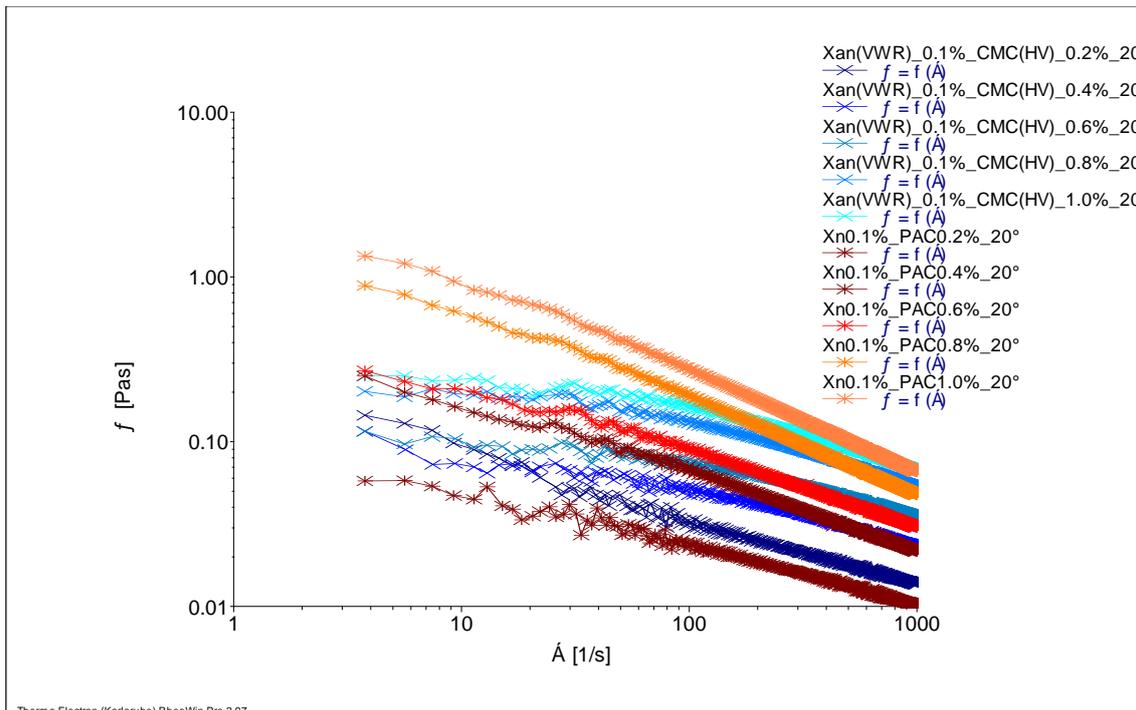


Fig. VIII.44 : Comparaison entre la viscosité apparente du mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

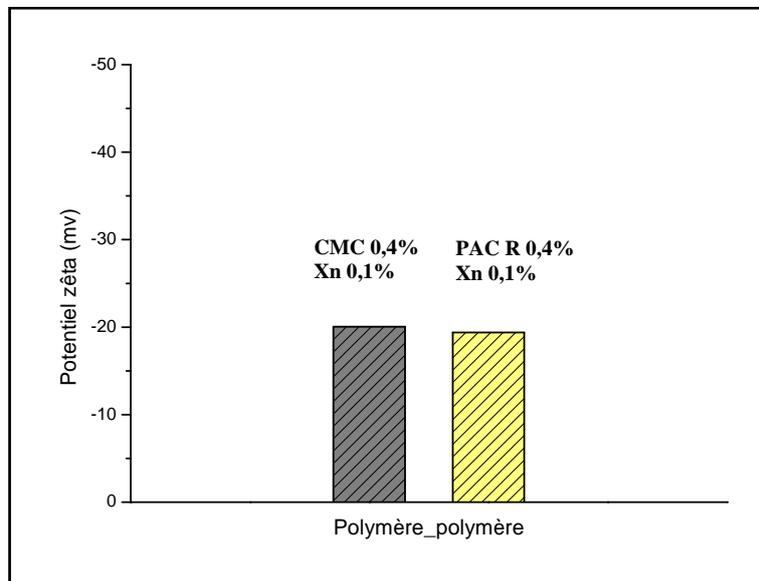


Fig. VIII.45 : Comparaison entre le potentiel zéta du mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R).

Dans l’histogramme (Fig.VIII.45), on remarque que les mélanges (polymère – polymère) ou (Viscosifiant – contrôle de filtrat) donnent la même stabilité colloïdale. Donc, on peut

constater que le PAC R et le CMC (contrôle de filtrat) manifestent dans la stabilité colloïdale des mélanges à la présence de xanthane (Viscosifiant) dans les boues de forage à base d'eau.

VIII.4.4. Etude de la suspension du mélange (bentonite – PAC R) :

Pour étudier l'effet de l'ajout de polymère sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique, nous avons fixé la concentration de bentonite à 3%. Cette concentration moyenne, souvent utilisée dans les formulations des boues de forage, permet de mettre en évidence l'effet de chaque additif sur la suspension de bentonite (3%). Nous commençons ci-dessous par l'étude rhéologique et physico-chimique du mélange (bentonite – contrôle de filtrat) utilisant le polymère PAC R (0.4%).

VIII.4.4.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R) :

Le comportement rhéologique de ces mélanges peut être décrit par le modèle de Cross. Le modèle de Herschel-Bulkley donne aussi une reproduction satisfaisante des courbes, notamment pour la suspension d'argile sans polymère (**Fig. VIII.46**), et bien évidemment, on remarque que la viscosité apparente du mélange (bentonite – PAC R) diminue sous l'effet de température en fonction du taux de cisaillement (**Fig. VIII.47**).

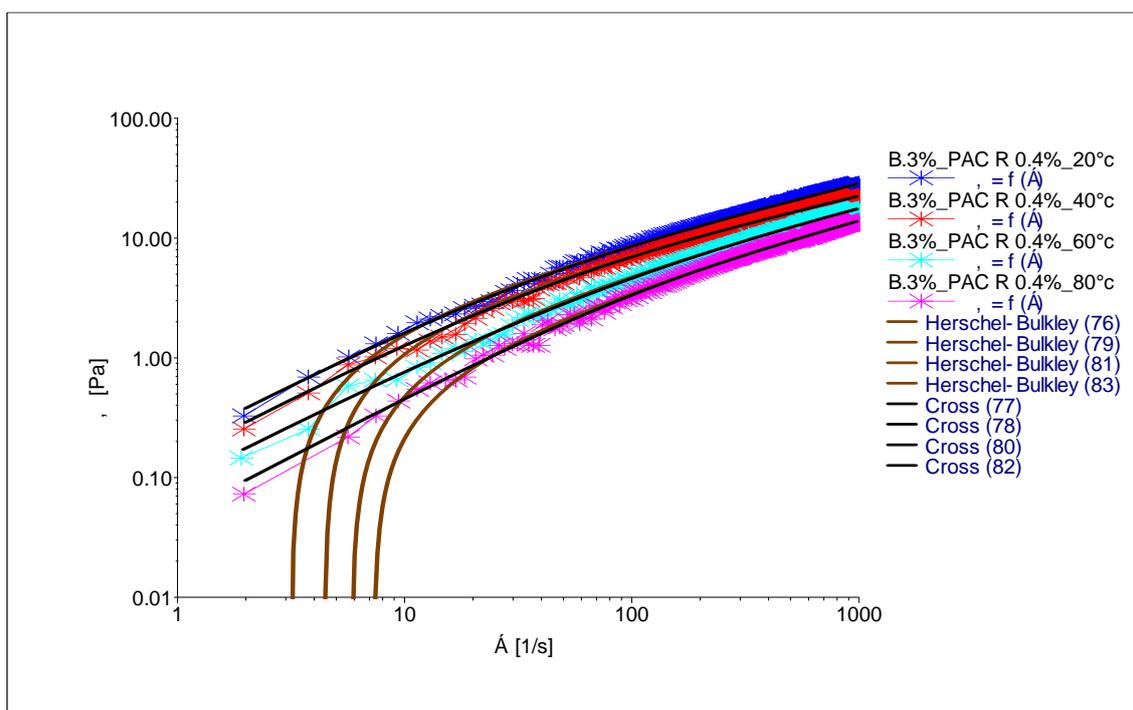


Fig. VIII.46 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

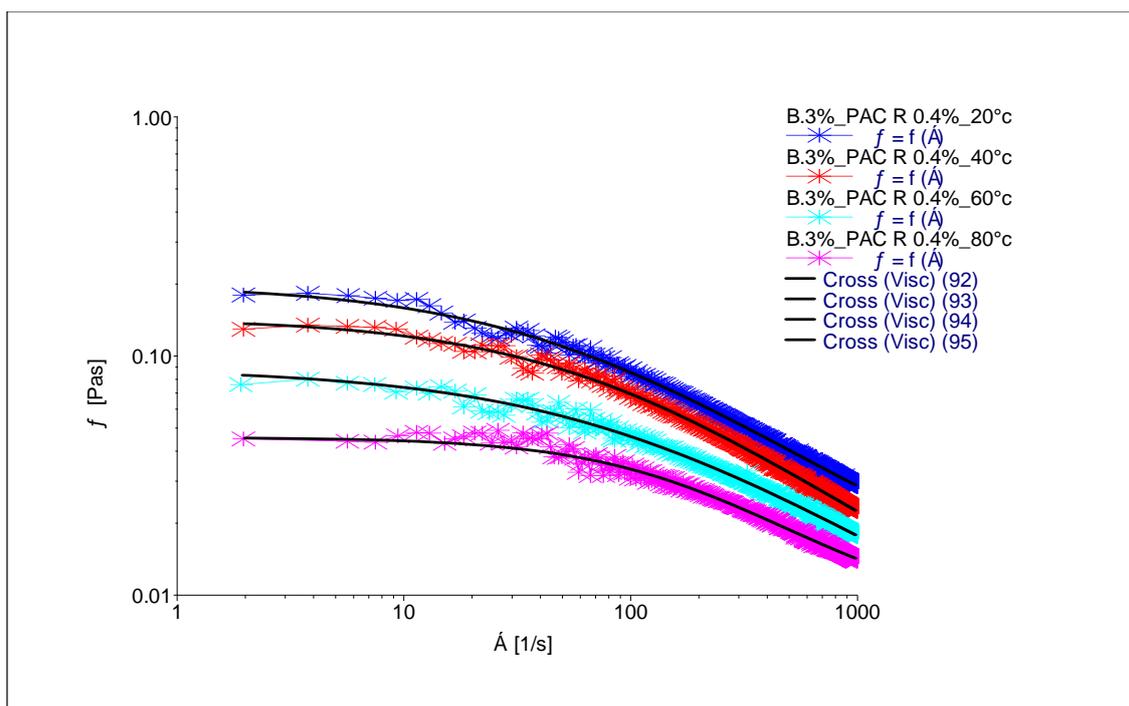


Fig. VIII.47 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

On remarque sur la (**Fig. VIII.48**) l'évolution de la contrainte sous l'effet de différents sels (NaCl , KCl et CaCl_2) sur le mélange bentonite-PAC R. Ce dernier garde toujours le même comportement rhéologique que le modèle du Cross. Aussi, les sels influent sur la viscosité du mélange par une diminution de la viscosité apparente (**Fig. VIII.49**). Si on remarque bien sur le rhéogramme de la viscosité, une chute de la viscosité importante se produit avec l'ajout de sel CaCl_2 . Cette chute de la viscosité par rapport aux autres est due à la manifestation de cation Ca^{++} à la suspension du mélange (bentonite – PAC R) par le phénomène de défloculation. Ce phénomène provoque une diminution de la viscosité.

Dans le cas de l'ajout de NaOH dans le mélange du bentonite – PAC R, deux facteurs influent sur la viscosité apparente de la suspension, le PH et la présence des cations Na^+ (**Fig. VIII.50**). C'est le même phénomène qu'on a vu déjà dans la suspension bentonitique (voir la **Fig. VIII.7**).

L'effet de l'ajout de PAC R sur les propriétés rhéologiques de la suspension de bentonite (3%) est montré dans la (**Fig. VIII.51**). On observe que la viscosité apparente du mélange (Bentonite-PAC R) augmente avec l'ajout PAC R. On remarque que la viscosité apparente de (PAC R 0,4%) est presque la même par comparaison avec celle du (B 0,3%_PAC R 0,2%) malgré que la concentration du polymère ne sont pas la même. On explique ce phénomène par le système d'adsorption de polymère sur l'argile. La puissance et le site de l'adsorption sont

fonctions du caractère chimique du polymère. En général, les polymères à charge négative peuvent être adsorbés sur les sites cationiques créés sur les bords. La plupart des polymères utilisés dans les fluides de forage appartiennent à ce groupe. L'adsorption est plus importante pour les substances à poids moléculaire élevé.

On remarque aussi que le comportement rhéologique de la suspension du mélange (Bentonite-PAC R) est proche au modèle de Cross ; ce comportement rhéologique est le même que celui de PAC R seul (voir **Fig. VIII.22**). Donc, on peut conclure que le comportement rhéologique du PAC R domine celui de la bentonite (**Fig. VIII.51**).

VIII.4.4.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R) :

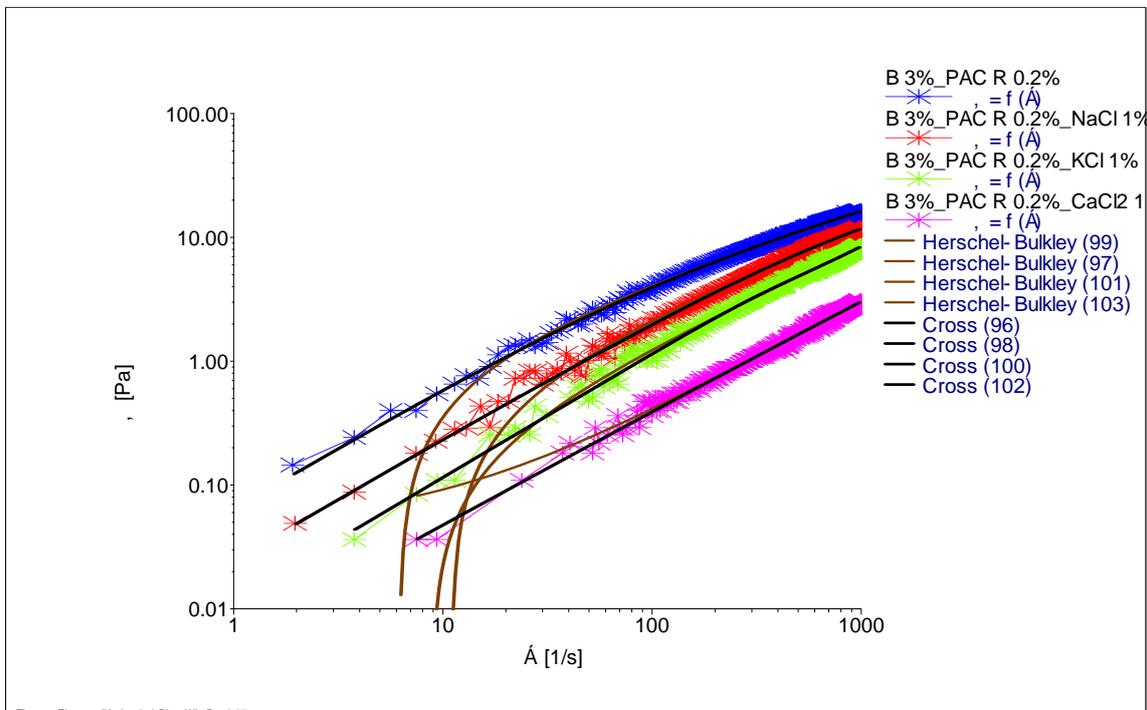


Fig. VIII.48 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

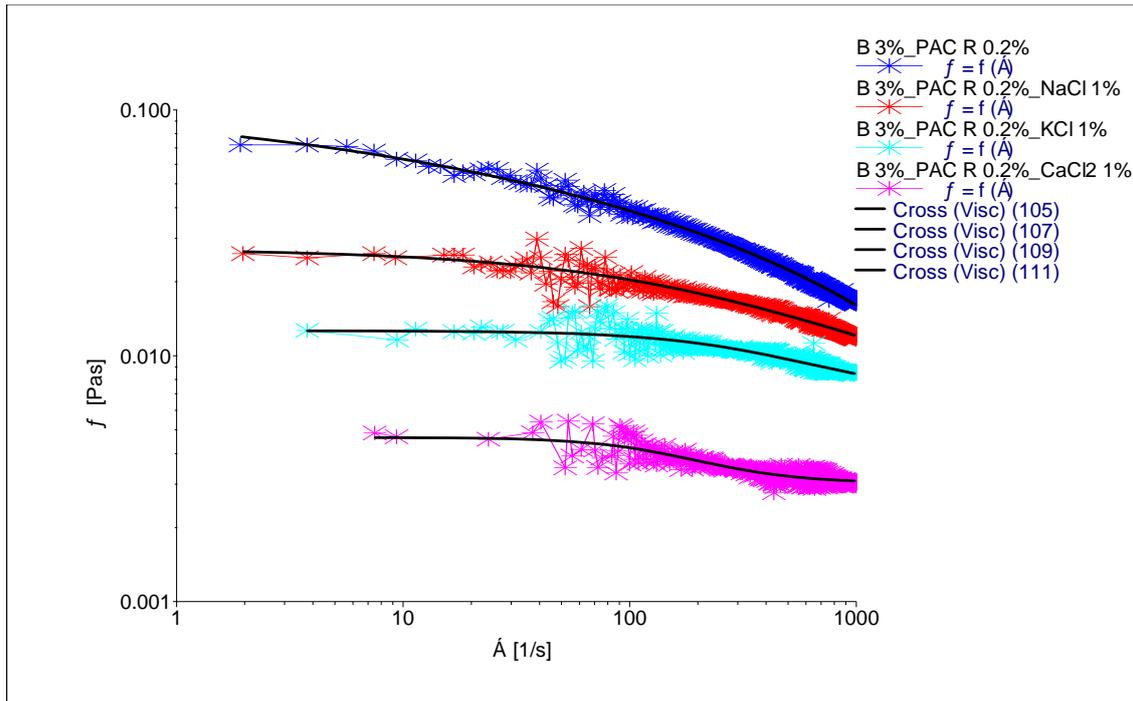


Fig. VIII.49 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.4.4.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de (bentonite – PAC R):

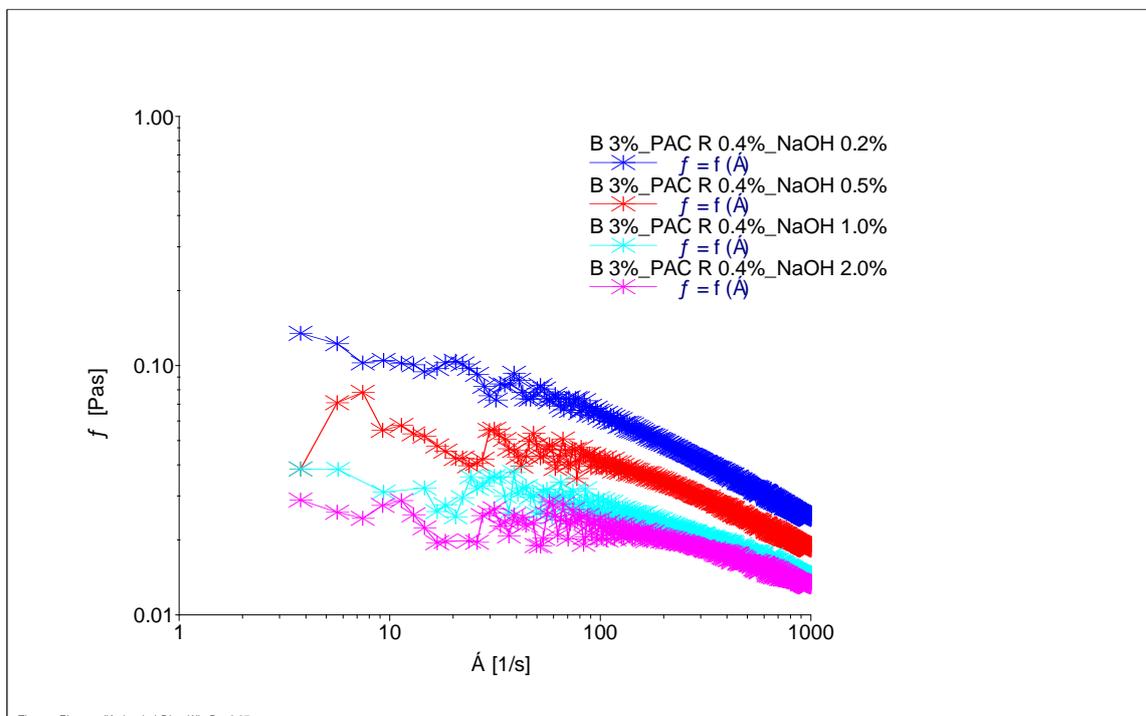


Fig. VIII.50 : Effet de NaOH sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

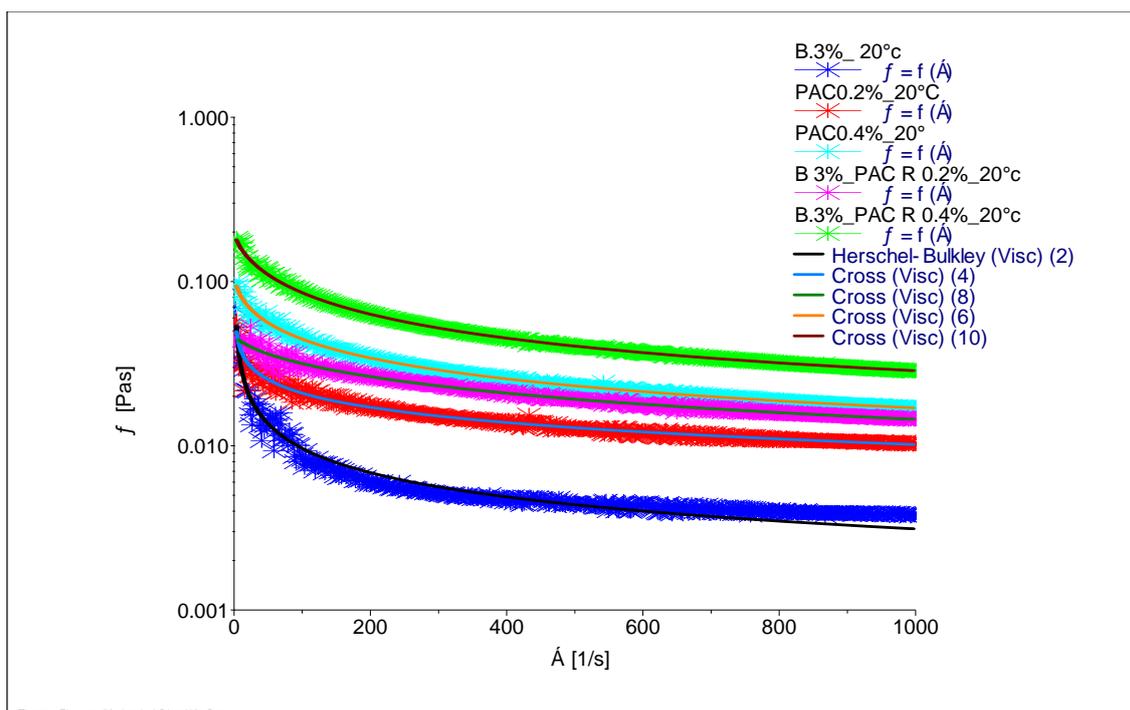


Fig. VIII.51 : Influence de l'ajout du PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%).

VIII.4.5. Etude de la suspension du mélange (bentonite – xanthane) :

Vu les propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la bentonite et du xanthane (voir Chapitre IV et V), et dans le cas où un mélange de (bentonite-xanthane) est réalisé, les propriétés rhéologique de ce dernier sont différentes par rapport à celles de bentonite et du xanthane. D'où, l'ajout du xanthane dans la suspension de bentonite influe sur la viscosité apparente de mélange. Aussi, il donne une meilleure stabilité à la suspension du mélange :

- La viscosité du mélange est pratiquement résistante à la température (**Fig. VIII.52, VIII.53**).
- Les sels n'influent pas sur les propriétés rhéologique de mélange (**Fig. VIII.54, VIII.55**).
- L'alcalinité n'influe pas aussi sur les propriétés rhéologiques de mélange (**Fig. VIII.56, VIII.57**).

Du point de vue physique, dans le cas d'une suspension de bentonite – xanthane, la structure de xanthane (ramifiée) et leur poids moléculaire, créent, avec la bentonite, un réseau tridimensionnel enchevêtré par l'adsorption des chaînes de xanthane sur les molécules de la bentonite.

Du point de vue chimique, en générale, les polymères s'adsorbent par interactions de type Van Der Waals, électrostatiques, hydrophobes ou par la création de liaisons hydrogène [Israelachvili (1992) , Tadros (2003)]. L'adsorption des polymères sur les surfaces d'argile conduit généralement à un système stable ou à une floculation par ponts, ce qui a des conséquences sur la rhéologie et la stabilité du système [Chang et al. (1992)].[41]

Par conséquent, le comportement rhéologique du polymère en solution prime sur celui de l'argile en suspension : c'est le polymère qui gouverne le comportement macroscopique de l'ensemble[41].

VIII.4.5.1. Effet de la température sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane) :

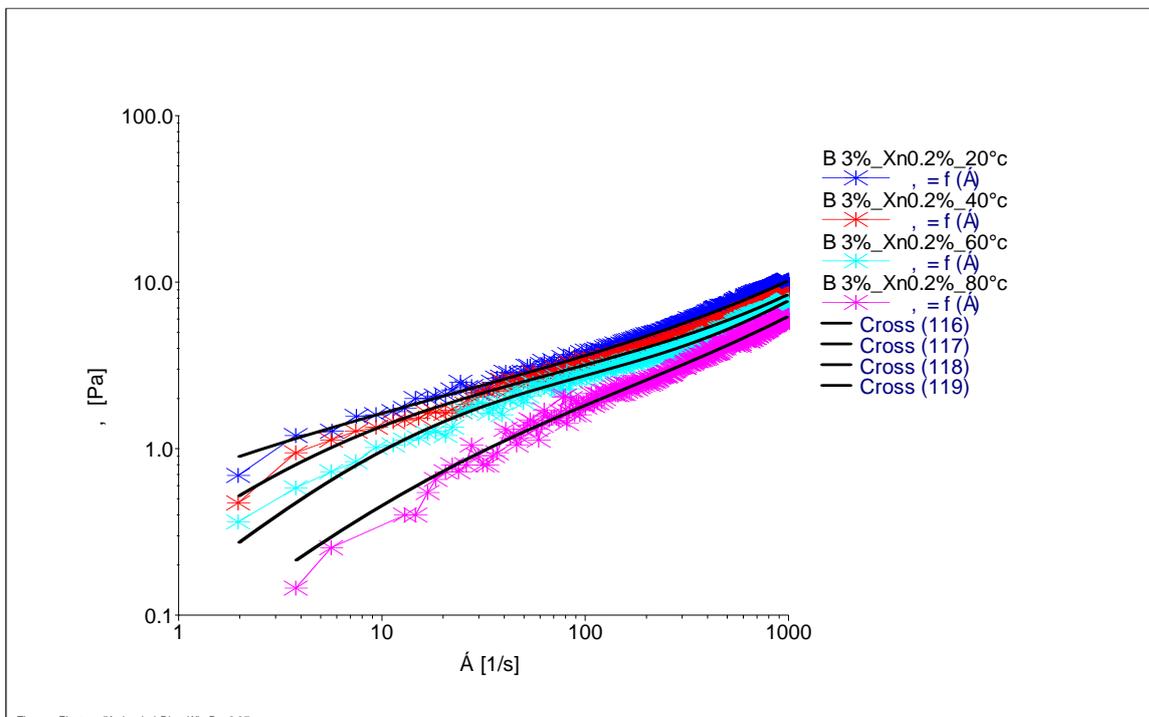


Fig. VIII.52 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

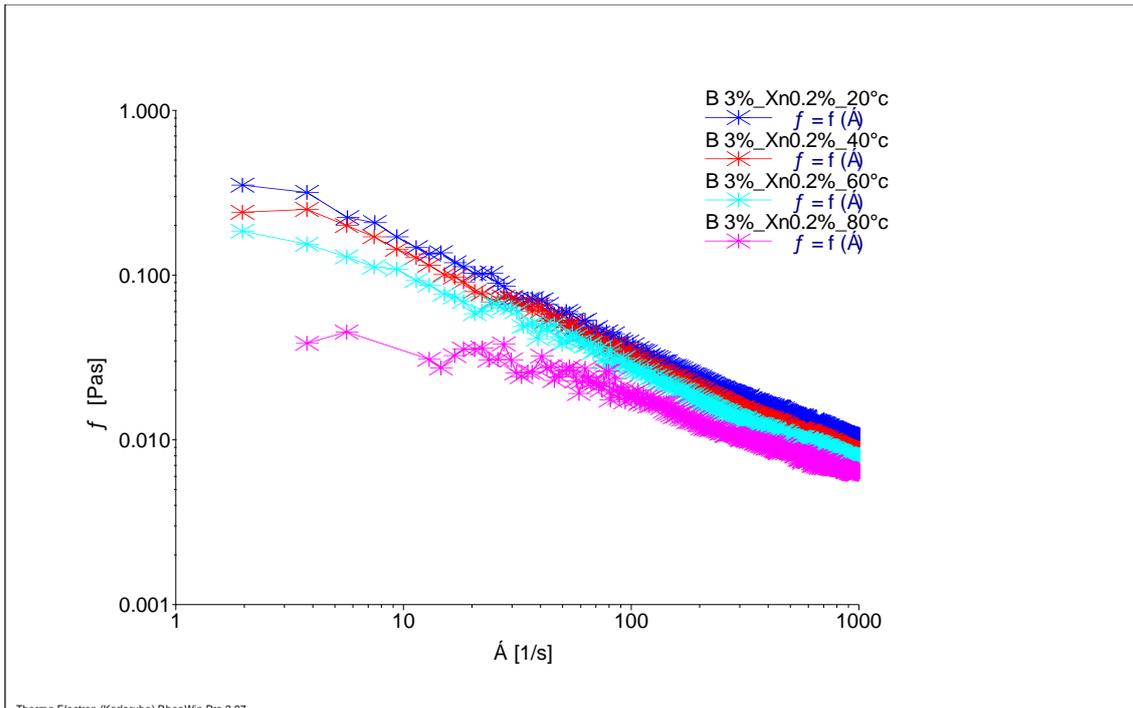


Fig. VIII.53 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.4.5.2. Effet des sels sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane) :

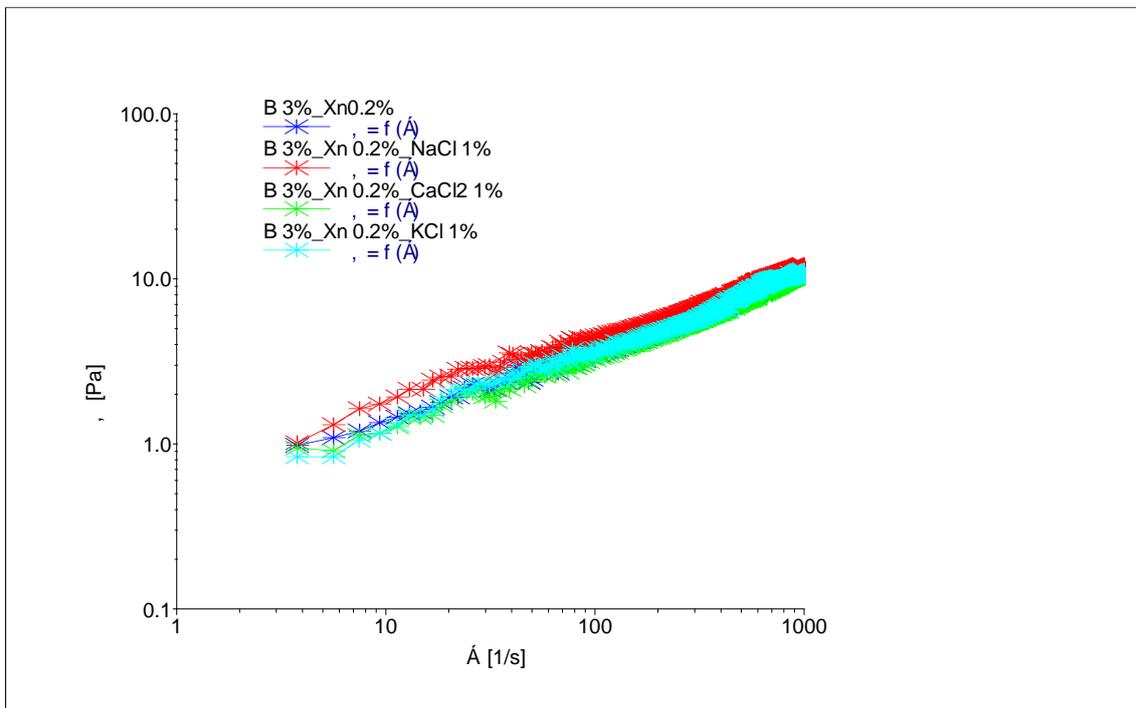


Fig. VIII.54 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

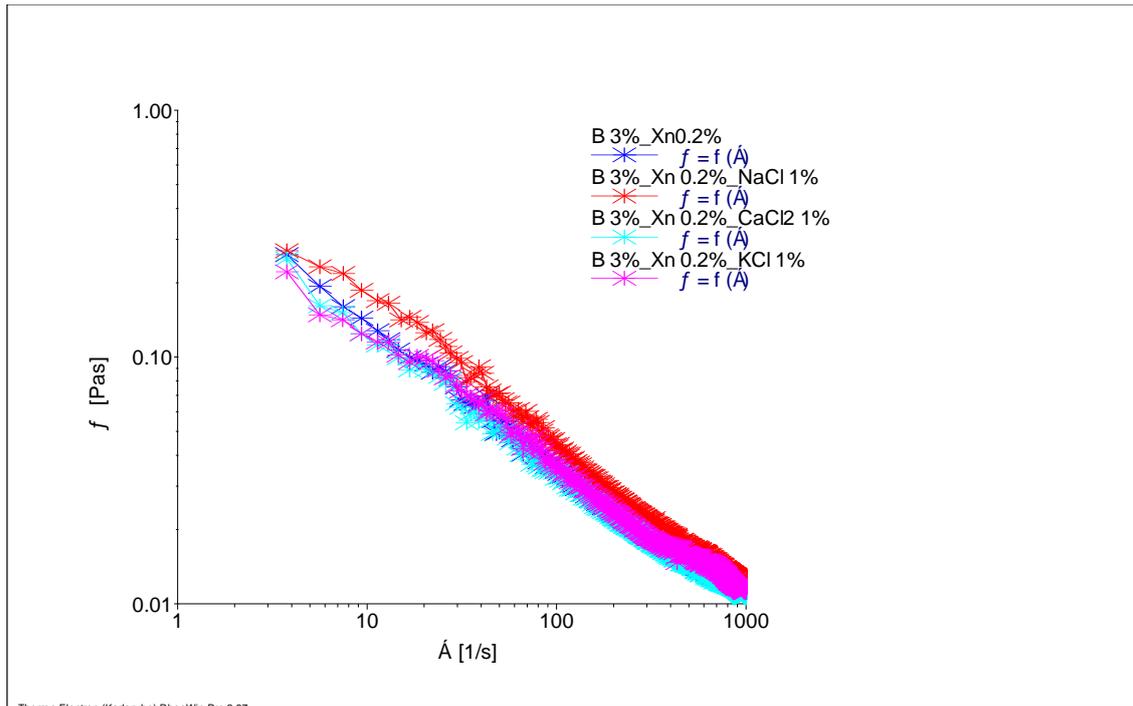


Fig. VIII.55 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.4.5.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de (bentonite – xanthane) :

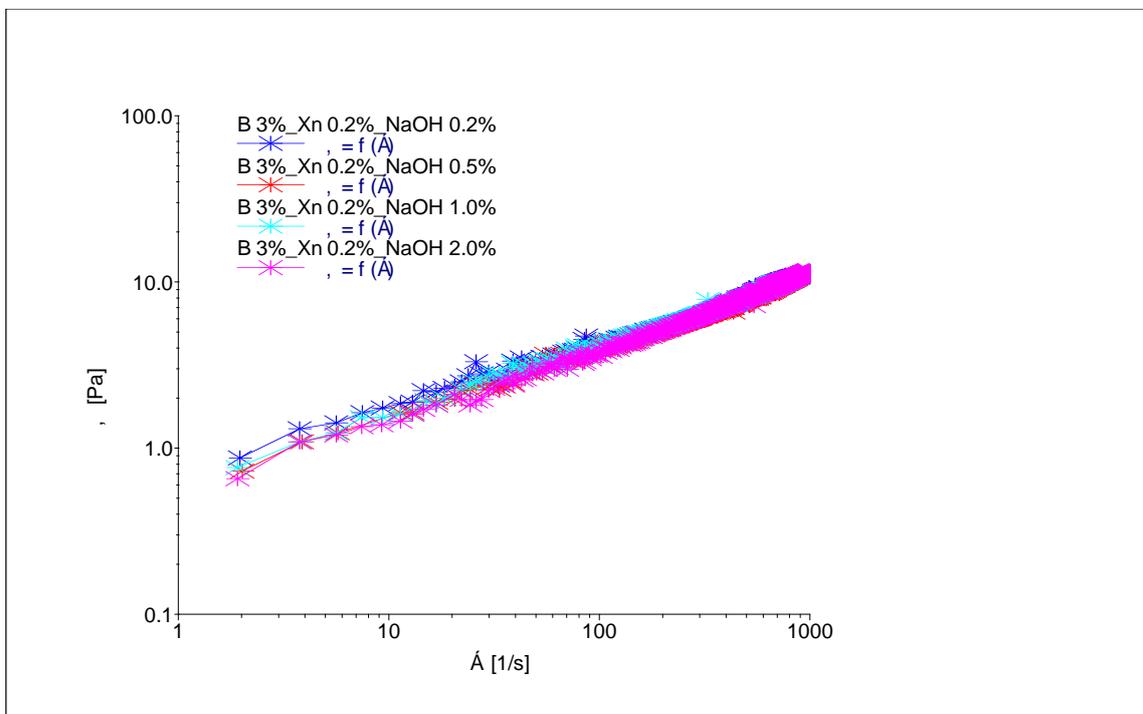


Fig. VIII.56 : Effet de NaOH sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

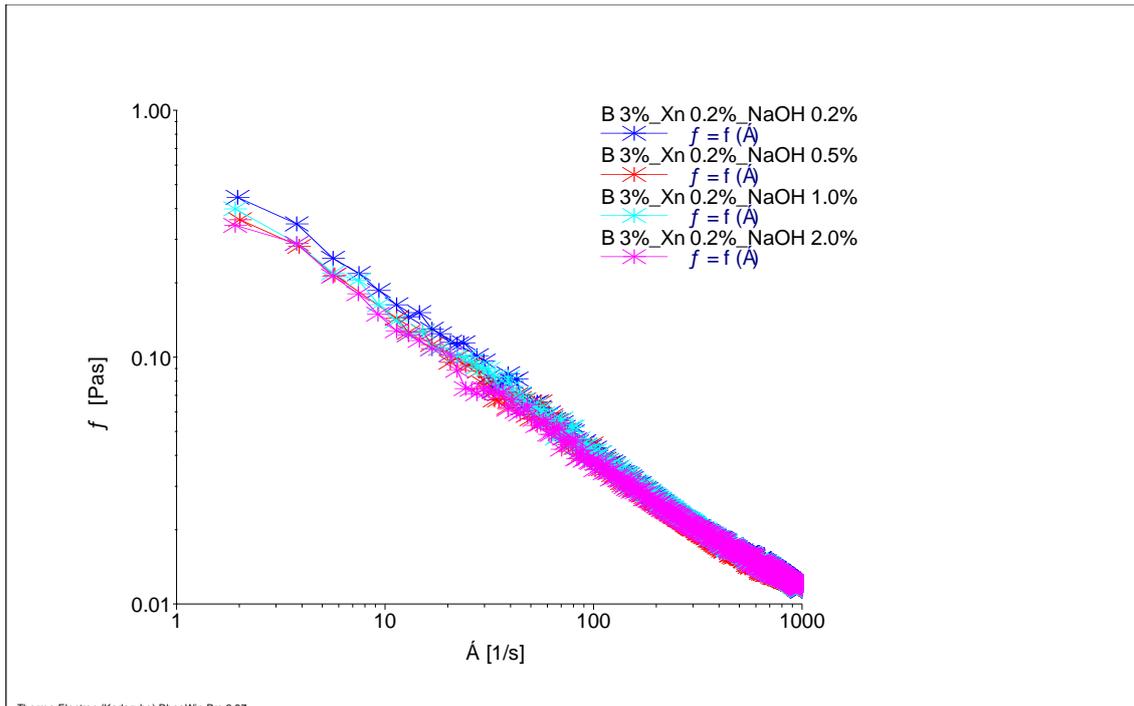


Fig. VIII.57 : Effet de NaOH sur la viscosité apparente de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

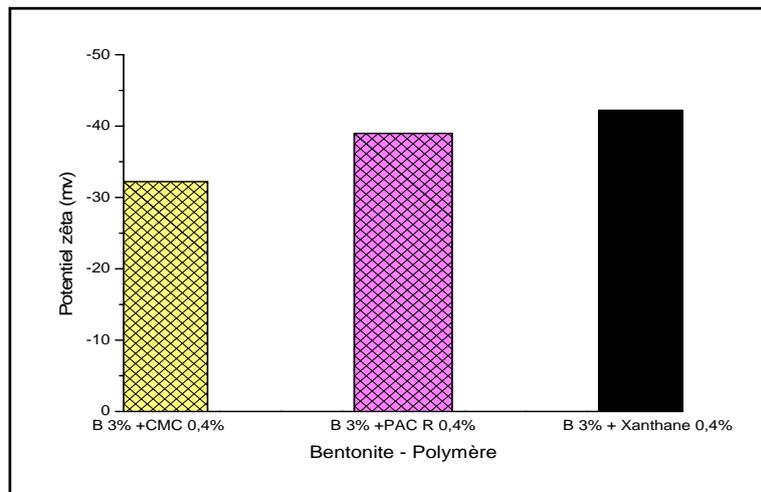


Fig. VIII.58 : Potentiel zéta en fonction de (Bentonite – CMC), (bentonite – PAC R) et (bentonite – xanthane).

Les résultats qui représente dans l'histogramme (Fig. VIII.58) montrent que le mélange (bentonite – polymère) dans le domaine de fluide de forage donne des suspensions stable.

On constate que le potentiel zéta dans le mélange (bentonite – viscosifiant) est élevé par rapport au celui dans le mélange (bentonite – contrôle de filtrat), dont le mélange (bentonite – viscosifiant) donne meilleure suspension colloïdale par rapport au (bentonite – contrôle filtrat)

Aussi, la suspension (bentonite – PAC R) meilleure et plus stable par rapport à la suspension de mélange (bentonite – CMC) de même concentration.

Conclusion générale :

Notre travail est principalement consacré à l'étude du comportement rhéologique, physico-chimique et zétamétrique des suspensions de fluide de forage à base d'eau, en précisant l'effet de chaque contaminant (Température, sels et alcalinité) sur le comportement rhéologique de ces suspensions.

La partie expérimentale a été entamée par une analyse granulométrique de bentonite. Nous avons remarqué que la taille moyenne des particules analysées est de 88,85 μm et la surface spécifique est de 0,188 m^2/g . Ces résultats assurent la bonne qualité granulométrique de la bentonite et permettent d'utiliser cette poudre dans les systèmes colloïdaux.

Ensuite, une étude rhéologique sur la suspension de la bentonite a été effectuée en vue de comprendre le comportement rhéologique de la bentonite à une concentration de 3%, sous l'effet de température, des sels et de l'alcalinité. Ces trois facteurs ont montré que l'augmentation de température diminue la viscosité apparente et la contrainte seuil de la suspension bentonitique, la présence des sels (KCl, NaCl et CaCl_2) de concentration (1%) dans la suspension, a montré que KCl (1%) augmente la viscosité apparente de (bentonite 3%), tandis que NaCl et CaCl_2 diminuent la viscosité de même suspension (bentonite 3%). Il a été établi que l'ajout du KCl a provoqué l'agrégation du système colloïdal, et l'ajout du NaCl et CaCl_2 ont produit un milieu plus dispersé. Le troisième facteur (l'alcalinité) a montré que la concentration de NaOH (0.5%, 1% et 2%) fait diminuer la viscosité apparente de la suspension de bentonite en fonction de la quantité de Na^+ dans la solution. Les tests zétamétriques ont montré que les suspensions de bentonite (3%, 5% et 7%) sont faiblement stables.

La modélisation des courbes d'écoulements de la suspension bentonitique a révélé que l'effet de trois facteurs déjà cités n'a pas influé sur le modèle rhéologique de la bentonite qui reste toujours proche au modèle de Herschel Bulkley.

Aussi, une étude rhéologique et physico-chimique sur le système (Eau- polymère) a été effectué dans le but de connaître plus précisément le comportement rhéologique des suspensions polymériques à base de CMC, PAC R et xanthane.

Le système (Eau – CMC) de différentes concentrations (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% et 1%) a révélé un comportement rhéofluidifiant proche de modèle de Herschel Bulkley, et identique au modèle de Cross à faible vitesse de cisaillement . L'effet de la température (20°, 40°, 60° et

80°) et des sels (KCl 1%, NaCl 1% et CaCl₂ 1%) sur le comportement rhéologique du CMC (0.2% et 0.4%) respectivement ont diminué la viscosité apparente et gardé leur même aspect rhéofluidifiant et le même modèle de Cross.

Le système (Eau – PAC R) de différents concentrations (0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% et 1%) a donné le même comportement rhéofluidifiant et a mieux décrit le modèle de Cross. L'effet des facteurs (température et sels) sur le comportement rhéologique de suspension PAC R 0.4% ont pris la même tendance rhéologique que celle du CMC et on a observé une diminution de la viscosité apparente.

Les tests zétamétriques effectués sur les suspensions de CMC et de PAC R de différentes concentrations (0.2%, 0.4%, 0.8%) et dans les mêmes conditions (Température de 20°C) ont donné le potentiel zêta de PAC R le plus élevé par rapport au celui de CMC (-35 mv pour 0.8% de PAC R) et (-16 mv pour 0.8% de CMC); ceci, a confirmé que la suspension de PAC R est la plus stable.

Le système (Eau – xanthane) a été examiné en fonction du taux de cisaillement; la contrainte de seuil est visible à faible concentrations (0.1%, 0.25%, 0.5% et 1%), tandis que le comportement rhéologique de xanthane a un aspect pseudoplastique. L'effet des contaminants (température et sels) sur le comportement rhéologique de xanthane a montré que la température et les sels n'ont pas d'influence sur leur contrainte et leur viscosité apparente. Les échantillons testés de xanthane (0.2%, 0.4%, 0.8%) ont donné des résultats zétamétriques très satisfaisants (-53 mv pour 0.8% de xanthane) et des bonnes stabilités colloïdales.

Dans le système des mélanges, nous avons étudié deux types de mélanges (polymère – polymère) et (bentonite – polymère). Le but de cet étude est d'essayer de faire un balayage sur tous les systèmes colloïdaux qui peuvent exister dans les suspensions de fluide de forage à base d'eau, afin d'établir une corrélation avec les systèmes colloïdaux précédents .

Le système (polymère – polymère) a été choisi selon les règles de formulation d'une boue. Généralement, les formulations des fluides de forage à base d'eau contiennent au minimum un polymère viscosifiant et un polymère contrôle de filtrat. Cette règle nous a permis de choisir deux systèmes (viscosifiant – contrôle de filtrat) :

Le premier système (xanthane – CMC) a révélé une augmentation de la viscosité apparente en fonction de différentes concentrations de CMC, un comportement rhéologique rhéofluidifiant et un modèle rhéologique identique au celui de Cross.

Le deuxième système (xanthane – PAC R) a donné le même comportement rhéologique rhéofluidifiant et d'écrit le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley. Nous avons terminé l'étude du système (polymère – polymère) par la comparaison entre les deux systèmes (viscosifiant – contrôle de filtrat) dans mêmes conditions. Les résultats obtenus ont montré une différence de comportement rhéologique entre ces deux systèmes : Le système (xanthane – PAC R) est relativement plus visqueux par rapport au système (xanthane – CMC), et les tests zétamétriques ont confirmé la bonne stabilité colloïdale de ces deux systèmes.

Concernant le système du mélange étudié (bentonite – polymère), nous avons choisi deux types de polymères pour les systèmes (bentonite – contrôle de filtrat) et (bentonite – viscosifiant). Les résultats rhéologiques et physico-chimiques obtenus dans le système (bentonite – PAC R) ont montré :

- Un comportement rhéologique proche du modèle de Cross.
- L'augmentation de la température diminue la contrainte de seuil et la viscosité apparente.
- Les sels étudiés (NaCl, KCl et CaCl₂) diminuent la viscosité apparente de ce mélange. Cette diminution est plus importante avec le sel bivalent que les deux autres sels monovalents.
- Concernant l'alcalinité, une augmentation de NaOH diminue la viscosité apparente du système.

Pour le système (bentonite – xanthane) :

- L'augmentation de la température diminue la contrainte de seuil et la viscosité apparente de façon plus faible que dans le système (bentonite – PAC R).
- Les sels (NaCl, KCl et CaCl₂) ainsi que l'alcalinité n'ont aucun effet remarquable sur la contrainte de seuil et la viscosité apparente de ce système.

Les essais zétamétriques ont montré que les mélanges (bentonite – polymère) sont des suspensions stables. Par ailleurs, le potentiel zêta du mélange (bentonite – viscosifiant) est plus élevé par rapport à celui du mélange (bentonite – contrôle de filtrat).

Finalement, l'étude détaillée de ces systèmes ouvre des perspectives pour la mise au point de formulations de boues destinées à être utilisées dans des zones appropriées (argileuses, sableuses, salifères,....etc).

Références :

- [1] : PAUMIER Sandrine, Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile – eau pour des suspensions de smectites. Thèse, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers , France 2006.
- [2] : Mme BOUSSAK Hassina ; Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique. Thèse Magistère (2008).
- [3] : SAFI Brahim, Mémoire de magistère, Contribution à l'étude de l'amélioration des propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la boue salée saturée alourdie lors du forage de la phase 8 ^{1/2}. Université M'hamed Bougara Boumerdes. 2002
- [4] : Slimani Slimane, Rheological study of polymer based drilling muds: effects of polymer type, its content, temperature & salinity. Thèse, Ecole d'ingénieur de boumerdes. plastics & rubber engineering department, IAP 2002.
- [5] : Fourar Karim, Thèse magistère. Etude du comportement rhéologique et de filtration des fluides de forage à base de biopolymères. Université M'hamed Bougara Boumerdes. 2006
- [6] : Z-G. Shen *et al.* Dispersion of nanosized aqueous suspensions of barium titanate with ammonium polyacrylate, *Journal of Colloid and Interface Science*, 275, 158-164 (2004).
- [7] : H. Terrisse *et al.* Zeta potential study of Calcium Silicate Hydrates interacting with alkaline cations, *Journal of Colloid and Interface Science*, 244, 58-65 (2001).
- [8] F. Bergaya and G. Lagaly. Surface modification of clay minerals. *Applied clay science*, 19 : 1–3, 2001.
- [9] S. Abend and G. Lagaly. Sol–gel transitions of sodium montmorillonite dispersions. *Applied Clay Science*, 16 : 201–227, 2000.
- [10] A. Besq, C. Malfoy, A. Pantet, P. Monnet, and D. Righi. Physicochemical characterization and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, 23 : 275–286, 2003.
- [11] U. Brandenburg and G. Lagaly. Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions. *Applied Clay Science*, 3 : 263–279, 1988.
- [12] Sandrine PAUMIER, Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile–eau pour des suspensions de smectites. Thèse, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2006. 9 p.
- [13] P. Coussot. Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble, Etudes du CEMAGREF, série Montagne n° 5, 1992. 415 p.

- [14] M. Ddani, A. Meunier, M. Zahraoui, D. Beaufort, M. El Wartiti, C. Fontaine, B. Boukili, and B. El Mahi. Clay mineralogy and chemical composition of bentonites from the Gourougou volcanic massif (northeast Morocco). *Clays and Clay Minerals*, 53 : 7250–267, 2005.
- [15] G. Didier and L. Comeaga. Hydratation, gonflement, conductivité hydraulique. Influence de produits chimiques. In *Actes du congrès Géo-Bento, étanchéité par géosynthétiques bentonitiques : état de l'art*, pages 74–95. Paris, 1998.
- [16] R.K. Khandal and T.F. Tadros. Application of viscoelastic measurements to the investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 125 : 122–128, 1988.
- [17] N. Kherfella and S. Bekkour, K. et Benhadid. Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation. *Rhéologie*, 7 : 48–54, 2005.
- [18] G. Lagaly. Principles of flow of kaolin and bentonite dispersions. *Applied Clay Science*, 4 : 105–123, 1989.
- [19] G. Lagaly and S. Ziesmer. Colloid chemistry of clay minerals : the coagulation of montmorillonite dispersions. *Colloid and Interface Science*, 100–102 : 105–128, 2003.
- [20] C. Malfoy, M. Ddani, A. Pantet, and P. Monnet. Les bentonites : transfert et échanges. Un matériau aux propriétés évolutives et variables. In *Actes du Colloque National sur les propriétés de transfert dans les matériaux, TRANSFERT 2006*, page 15 p. Lille, 2006.
- [21] A. Meunier. *Argiles*. Géosciences. Editions Scientifiques Gb, 434 p., 2003.
- [22] H-H. Murray. Clays in industry. In Elsevier, editor, *A Clay Odyssey – 12th International Clay Conference*. Bahía Blanca, Argentina, 2001.
- [23] K. Norrish. The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday Society*, 18 : 120–134, 1954.
- [24] T. Permien and G. Lagaly. The rheological and colloidal properties of bentonite dispersions in the presence of organic compounds. V. Bentonite and sodium montmorillonite and surfactants. *Clays and Clay Minerals*, 43 : 229–236, 1995.
- [25] O. Touret, C. H. Pons, Tessier D., and Tardy Y. Etude de la repartition de l'eau dans des argiles saturées Mg^{2+} aux fortes teneurs en eau. *Clay Minerals*, 25 : 217–233, 1990.
- [26] H. Vali and L. Bachmann. Ultrastructure and flow behavior of colloidal smectite dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 126 : 278–291, 1988.
- [27] H. van Olphen. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. Wiley, New York, 1977.
- [28] A. Weiss and R. Franck. Über den bau des gerüst en thixotropen gelen. *Naturforsch*, 10 : 141–143, 1961.

- [29] Khaled Benyounes ; Effet de l'ajout de polyanionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). 18^{ème} Congrès Français de Mécanique (2007).
- [30] Mme BOUSSAK Hassina ; Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique. Thèse Magistère (2008).
- [31] M. AMOURA ; Caractérisation rhéologique de la carboxyméthylcellulose. 19^{ème} Congrès Français de Mécanique (2009).
- [32] Werner-Michael Kulicket; Characterization of aqueous carboxymethylcellulose solutions in terms of their molecular structure and its influence on rheological behaviour. Polymer Vol. 37 No. 13, pp. 2723-2731 1996, Elsevier Science Ltd (1996).
- [33] M. Khodja et M. Khodja-Saber ; Etude comparative du pouvoir inhibiteur des fluides de forage à base d'eau sur le champ de Hassi Messaoud
- [34] AHMED KAYACIER, MAHMUT DOGAN "Rheological properties of some gums-salep mixed solutions", Journal of Food Engineering 72, 261–265, 2006.
- [35] M'BODJ et al. "Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay–water–electrolyte–xanthan", Journal of Colloid and Interface Science 273, 675–684, 2004.
- [36] JASIM AHMED, H.S. RAMASWAMY "Effect of high-hydrostatic pressure and concentration on rheological characteristics of xanthan gum", Food Hydrocolloids 18, 367–373, 2004.
- [37] A SENTHIL KUMAR, VIKAS MAHTO & V P SHARMA "Behaviour of organic polymers on the rheological properties of Indian bentonite-water based drilling fluid system and its effect on formation damage", Indian Journal of Chemical technology, Vol. 10, September 2003, pp. 525-530.
- [38] S.Kaufhold , R.Dohrmann " Detachment of colloidal particles from bentonites in water " AppliedClayScience39, 2008.
- [39] KHODJA Mohamed, "LES FLUIDES DE FORAGE : ETUDE DES PERFORMANCES ET CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES". École doctorale : Science des Procédés Institut National Polytechnique de Toulouse .Thèse 2008 France.
- [40] Jean-Luc SIMON, "Gomme xanthane : agent viscosant et stabilisant". Techniques de l'Ingénieur.
- [41] Adel Benchabane, " Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères." Thèse 2006.
- [42] Potentiel de Zeta des colloïdes en eau et eaux résiduaires », de l'ASTM D standard 4187-82, de la société américaine pour examiner et du Materials, 1985.
- [43] A. V. DELGADO, " MEASUREMENT AND INTERPRETATION OF ELECTROKINETIC PHENOMENA". Pure Appl.Chem., Vol.77, No.10, pp.1753–1805, 2005.

ANNEXES

Comportement rhéologique des fluides de forage à base d'eau, en présence d'un inhibiteur de gonflement.

A. Gueciouer ^{1)*}, A. Benmounah¹⁾, R. Kheribet¹⁾, M. Samar¹⁾.

¹⁾ Laboratoire des matériaux minéraux et composites (LMMC), Université de Boumerdès, Algérie.
E-mail* : guezak@yahoo.fr

Résumé: L'objectif de ce travail sera mis au point de formulations de fluides de forage à base d'eau optimisées avec ajout d'inhibiteur de gonflement Pour le forage d'une phase 8" 3/8.

Pour ce, nous avons d'abord élaboré différents systèmes à base de chlorure de potassium (KCl) et de polymère (PHPA) qui diminueront le gonflement des argiles tout en respectant les exigences environnementales. Ensuite, nous avons étudié le comportement rhéologique (viscosité plastique et yield-value) de chaque élément de la formulation en les soumettant aux effets de la température, de la salinité et de l'alcalinité, avant d'aboutir enfin à la formulation finale qui sera soumise à des tests standards, selon les normes API.

Les résultats obtenus montrent une diminution significative du gonflement et la formulation retenue présente des caractéristiques physico-chimiques satisfaisantes ainsi qu'un comportement rhéologique rhéofluidifiant proche du modèle de Hershel Bulkley.

Mots clés: Rhéologie, yield value, polymère, inhibiteur de gonflement, fluides de forage.

Abstract: The objective of this work will be developed of formulations of water based drilling fluids optimized with addition of swelling inhibitor for the phase 8" 3/8.

For this, we initially worked out various systems containing chloride potassium (KCl) and polymer (PHPA) which will decrease the clays swelling while respecting the environmental requirements. Then, we studied the rheological behavior (plastic viscosity and yield value) of each element of the formulation by subjecting them to the effects of the temperature, salinity and alkalinity, before leading finally to the final formulation which will be subjected to standard tests, according to API standards.

The results obtained show a significant reduction in the swelling and the formulation selected present of the satisfactory physicochemical characteristics as well as a shear-thinning rheological behavior near to the model of Hershel Bulkley.

Key words: Rheology, yield value, polymer, swelling inhibitor, drilling fluids.

1. Introduction :

Actuellement, les fluides de forage à base d'huile sont largement utilisés malgré certains inconvénients écologiques engendrés par les huiles, les gas-oils, tensioactifs composant ces fluides ; ceci nécessite donc un traitement des bourniers à la fin du forage.

Afin de minimiser ces problèmes environnementaux, nous avons choisis de substituer ces fluides de forage contenant des éléments nocifs, par des fluides à base d'eau avec ajout de polymère.

Cependant, ce remplacement a montré ses limites. En effet, durant l'opération de forage le fluide a une grande probabilité de rencontrer des phases argileuses gonflante qui vont entraîner la dégradation des paramètres rhéologiques de fluide (augmentation de la viscosité plastique et de la yield-value), et une réduction de la vitesse d'avancement provoquant ainsi un coincement de l'outil et un arrêt de l'opération de forage, et un risque de perte de la boue au niveau des formations traversées.

Pour remédier à ce problème de gonflement, nous proposons un fluide de forage contenant un inhibiteur de gonflement, en occurrence, le système (KCl/PHPA).

2. Matériels et méthodes :

2.1. Matières premières :

Les polymères utilisés ont été choisis selon leurs caractéristiques physico-chimiques et rhéologiques et leurs performances dans les fluides de forage à base d'eau.

Le biopolymère Xanthane et le Polyanionique cellulose de poids moléculaires très élevés (PAC R) ont été sélectionnés comme agents viscosifiants à cause de leur efficacité dans les fluides de forage à base d'eau et leurs stabilité à des températures élevées (jusqu'à 149°C).

Le Polyanionique cellulose de faible poids moléculaires (PAC L) et le Polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA) ont été choisis comme agents de contrôle de filtrat ; ce sont des polymères très efficaces dans l'eau douce et les saumures avec une faible concentration, et un rendement rapide à faible cisaillement.

Afin d'améliorer l'efficacité de ces polymères dans le fluide de forage à base d'eau, nous avons ajouté les constituants suivants :

- KCl, un inhibiteur de l'argile.
- Carbonate de sodium (Na_2CO_3), pour éliminer les cations multivalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...etc.), de la solution.
- Soude caustique (NaOH).
- Sulfite de sodium (Na_2SO_3) : C'est un conservateur pour éviter la dégradation des produits organiques et prolonge la durée de vie du polymère.

- Baryte ($BaSO_4$) : c'est un alourdissant inerte qui sert à contrôler la densité.

2.2. Matériels et appareillages :

Le viscosimètre utilisé est du type FANN 35 : C'est un appareil à cylindres coaxiaux dont le rotor est entraîné à l'aide d'un moteur électrique. Il sert à mesurer la résistance au cisaillement de la boue contenue dans le godet à l'intérieur duquel sont immergés les cylindres, puis à l'aide d'un cadran gradué, il indique la résistance au cisaillement à différentes vitesses de rotation du rotor ($\theta 600, \theta 300, \theta 100, \theta 6$ et $\theta 3$).

A titre d'exemple :

$\theta 600$: Correspond à la lecture 600 (tr/min).

Le filtre-presse standard : C'est un appareil qui exerce pendant 30 minutes une pression de 7 bars sur la boue contenue dans un cylindre normalisé muni d'une surface semi-perméable, puis on note la quantité d'eau qui a traversé la plaque filtrante qui est imperméable aux colloïdes mais perméable aux liquides.

Le pesage est effectué à l'aide d'une balance analytique.

Le mélangeur est du type Hamilton il est utilisé pour mélanger les solutions pendant (15 à 20 minutes). Après 16 heures de repos, ces solutions sont soumis à des tests rhéologiques effectués à l'aide de viscosimètre FANN 35.

Les paramètres rhéologiques mesurés sont calculés comme suit :

La viscosité apparente : $VA \text{ (cps)} = \theta 300$

La viscosité plastique : $VP \text{ (cps)} = \theta 600 - \theta 300$

La yield value: $Yv \text{ (lb/100 ft}^2\text{)} = 2 \times \theta 300 - \theta 600$.

3. Résultats et discussion :

3.1. Propriétés rhéologiques des polymères :

Les propriétés visqueuses d'une solution de polymère sont dues aux interactions (eau/polymère) par l'adsorption des molécules d'eau à la surface du polymère qui forme une enveloppe d'eau autour du polymère et aux interactions (polymère/polymère) par le mécanisme de l'enchevêtrement des chaînes polymériques dans la solution, l'entropie et l'enthalpie du mélange [8].

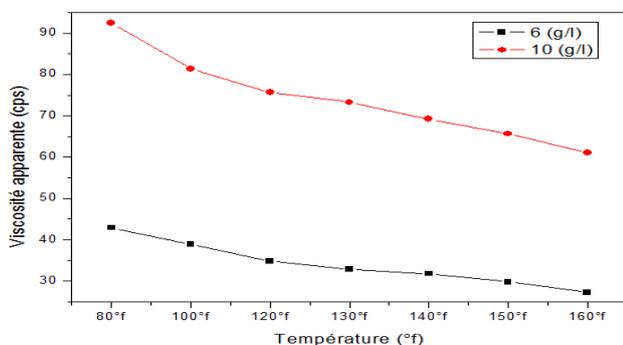


Figure 1 : Variation de la Viscosité apparente de PAC R en fonction de la température.

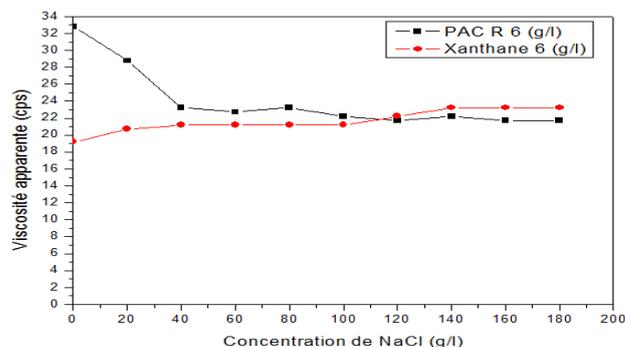


Figure 2 : Influence de la concentration de NaCl sur la Viscosité apparente de PAC R et Xanthane.

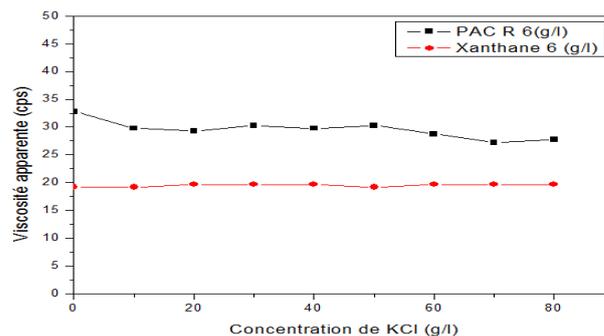


Figure 3 : Influence de la concentration de KCl sur la Viscosité apparente de PAC R et Xanthane.

Au regard des courbes d'écoulements représentés ci-dessus, on constate que :

L'élévation de la température dans la solution provoque une augmentation des distances intermoléculaires, de la solubilité et de l'activité ionique des électrolytes, par conséquent, il en résulte une diminution des frottements au sein du fluide dont la viscosité devient ainsi plus faible [4]. Il est bien connu que les effets de la température ont une influence sur les propriétés rhéologiques du fluide de forage. Ces effets sont en grande partie imprévisibles et peuvent faire diminuer les propriétés rhéologiques. Cependant, il n'existe pas de méthode précise pour déterminer l'ampleur de ces effets.

La (Figure 3) montre que la viscosité apparente de Xanthane est stable en fonction de la concentration du KCl. En effet, au-dessous d'une certaine contrainte de cisaillement, les bâtonnets rigides de gomme xanthane sont stabilisés par des interactions faibles. Il en résulte un enchevêtrement d'autant plus important que la concentration en gomme est élevée. Les bâtonnets emprisonnant l'eau et ayant une rotation faible, vont figer le liquide qui prend l'aspect d'un pseudogel [3].

Du point de vue physique, l'augmentation de la température diminuera la viscosité de la phase liquide et l'augmentation de la pression augmentera la viscosité par une augmentation de densité.

Du point de vue chimique, certains produits polymères ne sont pas stables aux températures élevées ; les hydroxydes réagissent avec des minerais d'argile aux températures au-dessus de 200°F ; les fluides de forage traités par chaux contenu des solides peuvent solidifier au-dessus de 300°F ;

certain diluants et dispersants perdent leur efficacité à températures élevées.

Du point de vue électrochimique, les températures plus élevées augmentent la solubilité du fluide, donc améliorent l'activité ionique de tous les électrolytes.

Si on ajoute une quantité importante de soude (NaOH) dans une solution de polymère, la viscosité va diminuer à cause de la déshydratation du polymère provoquée par la concentration élevée des électrolytes (Na^+ , OH^-). [1]

D'après les résultats de la (Figure 1), l'alcalinité a un effet minime sur le comportement rhéologique du Xanthane par rapport à celui du PAC R à cause de leur structure, leur poids moléculaire et leur enchaînement et ramification. [5]

L'élévation de la température dans la solution provoque une augmentation des distances intermoléculaires, de la solubilité et de l'activité ionique des électrolytes, par conséquent, il en résulte une diminution des frottements au sein du fluide, dont la viscosité devient ainsi plus faible. [4]

La présence des électrolytes dans la solution de polymère provoque un changement d'équilibre entre les forces de répulsion et d'attraction entre les particules, ceci augmente la distance entre les particules dans la solution, provoquant ainsi une diminution de sa viscosité.

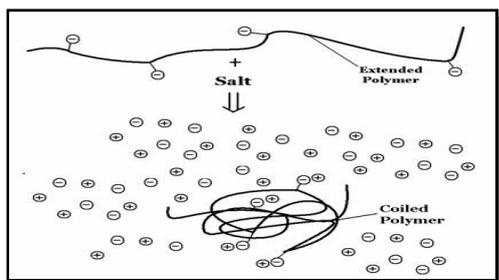


Figure 4 : L'effet de sel sur un polymère anionique.

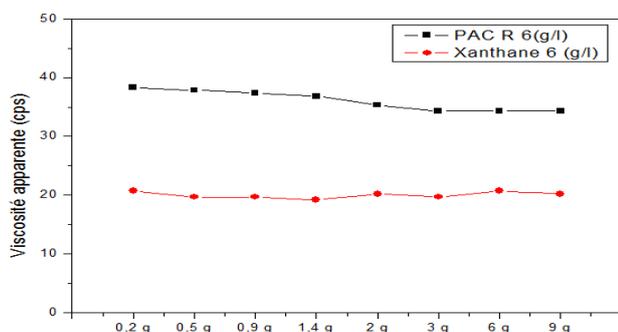


Figure 5 : Influence de l'alcalinité sur la viscosité apparente des polymères.

Les polymères utilisés à l'état solide, la chaîne principale se présente sous forme d'une hélice droite (Figure 8). Les chaînes ramifiées représentent environ 60 % de la masse totale, sont repliées le long de la chaîne cellulosique. Deux groupements carboxyliques confèrent à la gomme xanthane un caractère anionique. Les contre-ions les plus couramment rencontrés sont Na^+ , K^+ et Ca^{2+} .

En réalité, les polymères Polyanionique de cellulose et le xanthane sont des sels qui contiennent des groupes carboxyliques sodiques ($-\text{COO}^-\text{Na}^+$). En présence de l'eau, les polymères s'hydratent et deviennent anioniques, et les

molécules d'eau adsorbées forment une enveloppe épaisse autour du polymère, qui va augmenter la taille et l'allongement du polymère, par conséquent, la viscosité de la solution augmente.

Si on ajoute une quantité importante de soude (NaOH) dans une solution de polymère, la viscosité va diminuer à cause de la déshydratation du polymère provoquée par la concentration élevée des électrolytes (Na^+ , OH^-) qui vont absorber l'eau contenue dans cette solution [1].

L'alcalinité a un effet minime sur le comportement rhéologique du xanthane par rapport à celui du PAC R à cause de leur structure et leur poids moléculaire ainsi que leurs enchaînements et ramifications (Figure 6,7) [5].

Deux types de polyanionique de cellulose ont été utilisés : Le premier est un polyanionique de cellulose à poids moléculaire élevé (PAC-R ou PAC régulier) tandis que le second est un polyanionique de cellulose à faible poids moléculaire (PAC-L) qui est principalement utilisé pour le contrôle du filtrat.

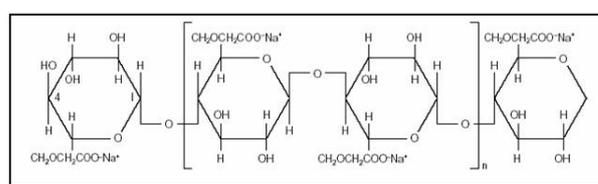


Figure 6 : Structure primaire de PAC R.

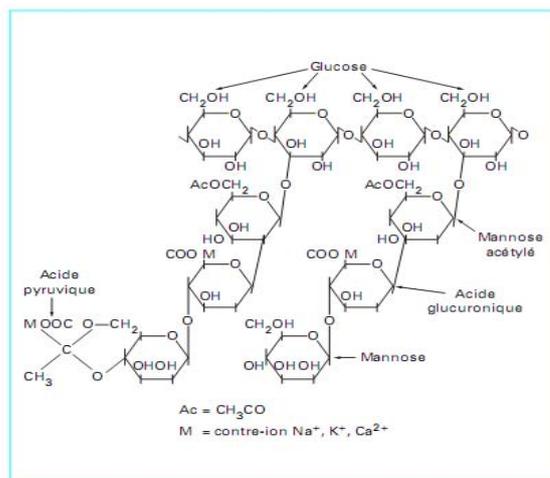


Figure 7 : Structure primaire de l'unité pentasaccharidique de la gomme xanthane.

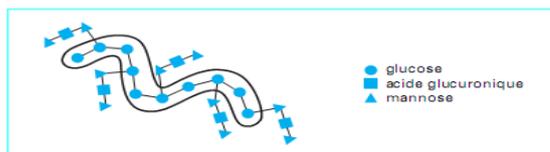


Figure 8 : Structure secondaire de la gomme xanthane à l'état solide.

3.2. Effet du KCl sur le comportement rhéologique des fluides de forage à base d'eau :

Pour connaître l'effet de KCl sur le comportement rhéologique de fluide de forage à base d'eau, on a préparé une formulation destinée pour la phase de forage, « 8" 3/8 » située au champ de Hassi-massaoud (Algérie). C'est une phase très sensible qui contient l'argile, les sels, le sable, le grès, le quartz, la dolomite et l'anhydrite [7];

Pour avoir une bonne simulation de la circulation de la boue dans un puits, on a préparé des formulations déposées pendant 16h dans un hot rolling à 200°F.

Le choix de cette phase exige le respect des paramètres suivants :

- Une densité de 1.5 (g/cm³).
- Une yield-value (YV) inférieure à 20 (lb / 100 ft²).
- Une viscosité plastique (VP) plus faible.
- Un filtrat inférieur à 5 mm.
- Et un pH variant entre 9 et 10,5.

M (g)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
H ₂ O	827,54	824,06	820,6	817,12	827,02	799,4	790,5	780,7
PAC R	3	3	3	3	4	4	4	4
Xanthane	2	2	2	2	2	2	2	2
Na ₂ CO ₃	2	2	2	2	2	2	2	2
NaOH	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
PAC L	4	4	4	4	4	4	4	4
Na ₂ SO ₃	1	1	1	1	1	1	1	1
Baryte	629,96	623,44	616,9	610,38	622,48	622,94	616,42	609,98
KCl	30	40	50	60	30	40	50	60

Tableau 1 : Différentes formulations obtenues par variation de PAC R et de KCl.

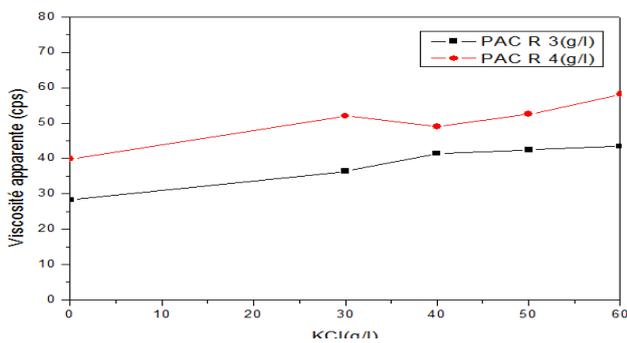


Figure 9 : Influence de KCl sur la Viscosité apparente des formulations.

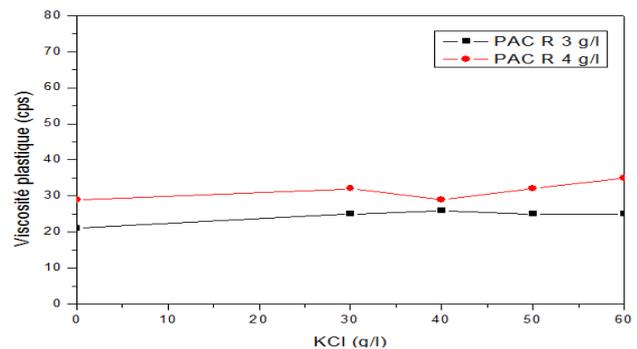


Figure 11: Influence de KCl sur la viscosité plastique des formulations.

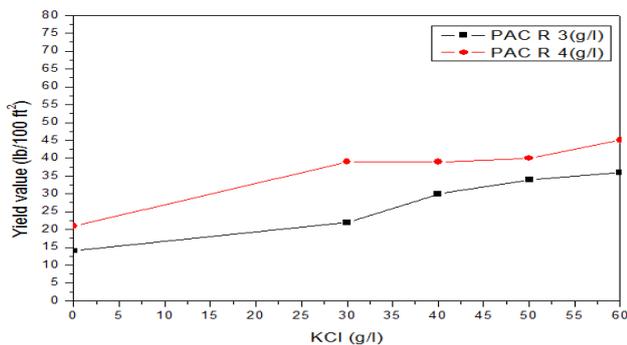


Figure 10: Influence de KCl sur la yield value des formulations.

On remarque que l'ajout de KCl fait augmenter la viscosité apparente, la yield value et la viscosité plastique. Ces accroissements résultent de la diminution de la quantité d'eau libre contenue dans la solution où les cations du sel ionisé sont solvatés par les molécules d'eau libre. Donc, la fluidité de cette solution diminue en fonction de la concentration de KCl, d'une part. D'autre part, la présence de baryte influe sur le comportement rhéologique de la solution. En effet, l'ajout de baryte augmente la viscosité apparente de la solution par l'effet de certaines interactions électriques entre la partie chargée négativement du polymère anionique et les particules de la Baryte. Du point de vue physique, l'ajout de baryte augmente les frottements entre les particules de la boue, donc, la fluidité de la solution devient plus faible, et les paramètres rhéologiques de la boue deviennent plus élevés [2].

3.3. Effet du PHPA sur le comportement rhéologique du fluide de forage à base d'eau.

Le Polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA) est un polymère anionique de haut poids moléculaire ; il a une capacité d'encapsulation et de stabilisation des argiles. Le PHPA joue le rôle de viscosifiant, de réducteur de friction, de floculant et aussi de réducteur de filtrat. Il peut être utilisé dans une large gamme des systèmes à faible et à forte teneur en solide, avec l'eau douce ou l'eau salée [1].

Afin de mieux connaître l'effet du système (KCl/PHPA) sur la boue de forage, il est indispensable d'étudier le cas concernant l'influence de l'ajout de PHPA sur les propriétés rhéologiques des formulations sans KCl. Les tableaux suivants (tableaux 2 et 3) illustrent les formulations préparées à cet effet :

Tableau 2 : Effet du PHPA sur les formulations sans KCl, avec 0,5 (g/l) de PAC R:

M (g/l)	F9	F10	F11	F12
Eau	836,58	834,7	832,8	830,9
PAC R	0,5	0,5	0,5	0,5
Xanthane	1,5	1,5	1,5	1,5
PAC L	6	6	6	6
Soda Ash	2	2	2	2
NaOH	0,5	0,5	0,5	0,5
Sulfite de sodium	1	1	1	1
Baryte	649,92	649,8	649,67	649,5
PHPA	2	4	6	8

Tableau 3 : Effet du PHPA sur les formulations sans KCl, avec 1 g/l de PAC R :

M (g/l)	F13	F14	F15	F16
Eau	836,32	834,45	832,57	830,7
PAC R	1	1	1	1
Xanthane	1,5	1,5	1,5	1,5
PAC L	6	6	6	6
Soda Ash	2	2	2	2
NaOH	0,5	0,5	0,5	0,5
Sulfite de sodium	1	1	1	1
Baryte	649,68	649,55	649,43	649,3
PHPA	2	4	6	8

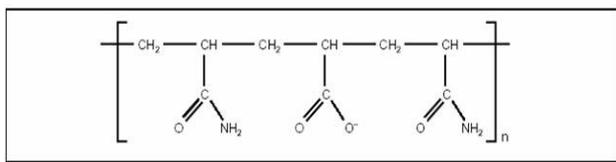


Figure 12: Structure de PHPA

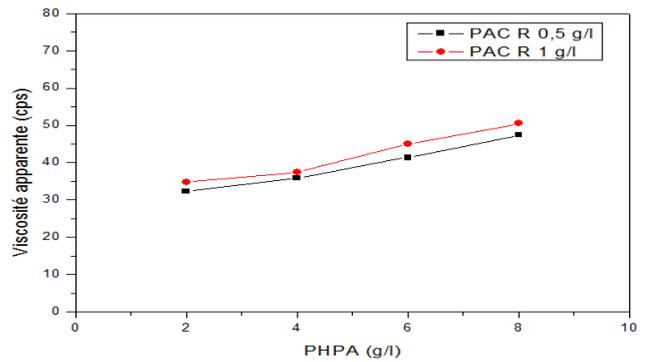


Figure 13: Influence de l'ajout de PHPA sur la viscosité apparente de différentes concentrations des formulations.

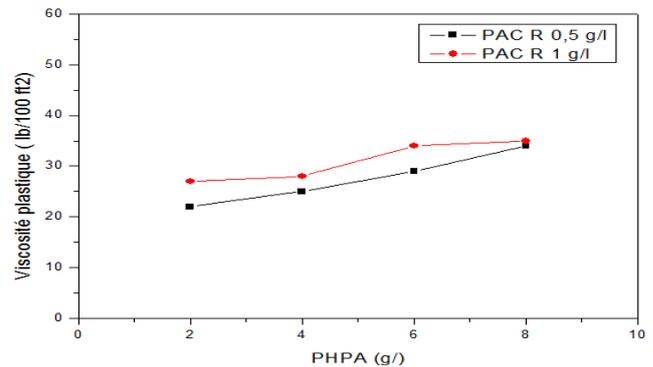


Figure 14: Influence de l'ajout de PHPA sur la viscosité plastique de différentes concentrations des formulations.

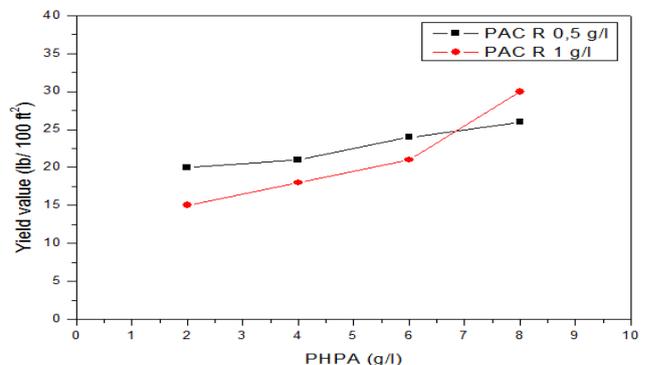


Figure 15: Influence de l'ajout de PHPA sur la yield value de différentes concentrations des formulations.

Dans ces graphes, nous avons remarqué que l'ajout de PHPA fait augmenter la viscosité apparente et la yield value avec l'augmentation de leur concentration. D'après ces résultats, on peut choisir les concentrations de PHPA pour lesquelles la yield-value doit être inférieure à 20 (lb/100ft²) et la viscosité plastique minimale.

3.4. Effet de système (KCl/PHPA) sur le comportement rhéologique des fluides de forage à base d'eau :

Cette partie a pour objectif de mettre en évidence et de comprendre l'influence de certains constituants tels que le xanthane, le PAC R, le PHPA et notamment le système (KCl/PHPA) sur les propriétés rhéologiques.

Pour obtenir la formulation adéquate permettant l'inhibition du gonflement souhaité, on introduit le système (KCl/PHPA) dans les formulations en maintenant toujours les mêmes propriétés rhéologiques.

Tableau 4 : Ajout du système (KCl/PHPA) aux formulations à différentes concentrations de KCl :

Constituants principaux	M (g/l)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
	H ₂ O	827,56	824,09	820,62	817,15	813,67	810,2	806,73
	PAC R	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Xanthane	1	1	1	1	1	1	1
	PAC L	7	7	7	7	7	7	7
	Na ₂ CO ₃	2	2	2	2	2	2	2
	NaOH	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Na ₂ SO ₃	1	1	1	1	1	1	1
	Baryte	636,54	630,01	623,48	616,95	610,43	603,9	597,37
Système (KCl/PHPA)	PHPA	4	4	4	4	4	4	4
	KCl	20	30	40	50	60	70	80

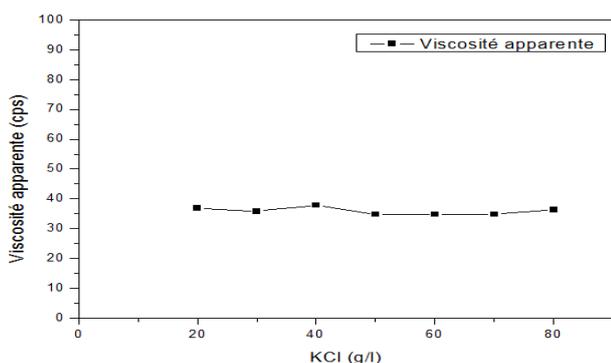


Figure 16: Influence de l'ajout de (KCl/PHPA) sur la viscosité apparente des différentes formulations.

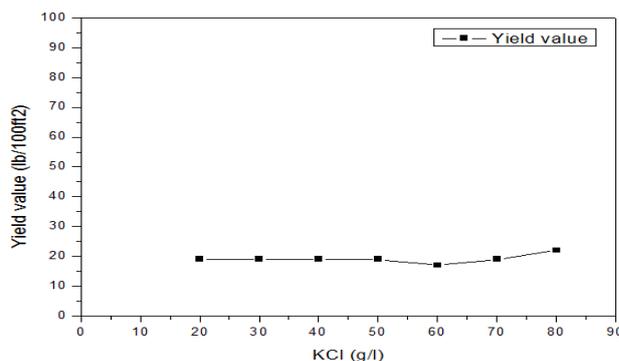


Figure 18: Influence de l'ajout de (KCl/PHPA) sur la yield value des différentes formulations.

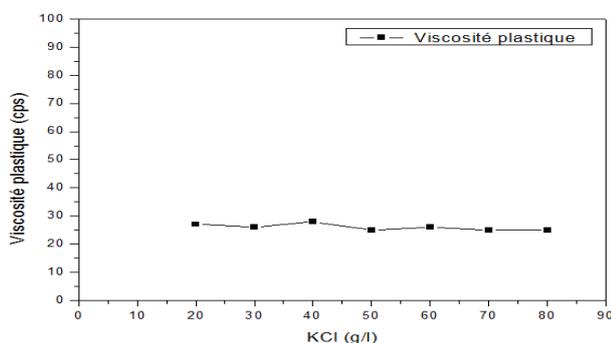


Figure 17: Influence de l'ajout de (KCl/PHPA) sur la viscosité plastique des différentes formulations.

A la lumière des résultats obtenus qui sont satisfaisants, le système (KCl/PHPA) donne une meilleure stabilité de la boue grâce au bon comportement rhéologique du PHPA qui reste stable dans les milieux salés monovalents. [2]

3.5. Test d'inhibition du gonflement de l'argile :

Le test d'inhibition du gonflement est basé sur des essais sur des pastilles de 30 mm de diamètre et de 12 mm d'épaisseur, plongées dans des cellules remplies de boue, soumises à un hot rolling à une température de 93°C pendant 6 heures. Après séchage des pastilles contaminées, on calcule la perte de masse (Δm) de chacune d'elles.

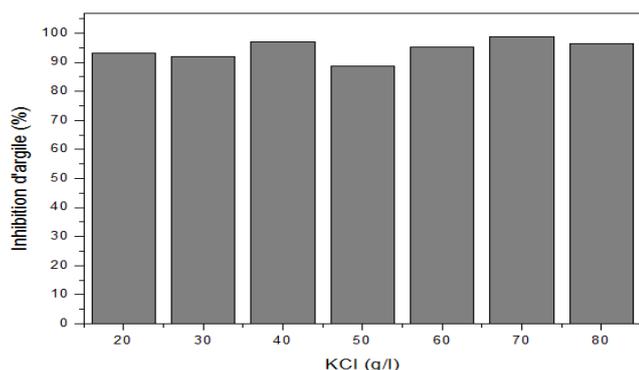


Figure 6: Inhibition du gonflement de l'argile (%) par le système (KCl/PHPA) en fonction de la concentration de KCl.

Le test d'inhibition du gonflement des argiles est basé sur le calcul des pertes de masse, selon la relation suivante :

$$In (\%) = 1 - (M_0 - M_1) / M_0 \quad (1)$$

Où :

In (%) : Pourcentage de l'inhibition du gonflement.

M_0 : Masse initiale de la pastille avant le test.

M_1 : Masse finale de la pastille après le test.

Les valeurs d'inhibition obtenues sont toutes très élevées (supérieures à 85%), ce qui dénote un bon comportement d'inhibition du gonflement de l'argile dans toutes les formulations.

Enfin, toutes les formulations sont soumises à des tests standards API, conformément aux exigences du programme de boue de la phase 8" 3/8 [7] afin d'optimiser les propriétés rhéologiques et physico-chimiques (yield value, viscosité apparente, viscosité plastique, filtrat, et alcalinité).

Tableau 2 : Propriétés rhéologiques de la formulation optimale :

Paramètres rhéologiques	VA (cps)	35,5
	YV (lb/100 ft ²)	19
	VP (cps)	26
	Filtrat API (ml)	4,4
Paramètres chimiques	pH	9,83
	Pf	0,6
	Mf	2,4
	Pb	0,9

Il s'avère que l'utilisation du système KCl /PHPA a permis l'obtention de niveaux très élevés d'inhibition pour différentes concentrations de KCl. Les caractéristiques du polymère PHPA lui permettent d'agir en tant que molécule encapsulant les argiles, avec des effets minimes sur les propriétés rhéologiques du fluide de forage.

L'ajout du chlorure de potassium (KCl) permet de donner un supplément d'ions potassium et concurrencer les ions échangeables présents dans la formation.

4. Conclusion :

Les propriétés rhéologiques des formulations élaborées et optimisées peuvent être contrôlées par les polymères viscosifiants (PAC R et xanthane) ; les résultats obtenus ont confirmé un bon comportement rhéologique dans le milieu agressif.

La réduction du filtrat peut être effectuée par le PAC L.

Le système (PHPA/KCl) a donné des niveaux élevés d'inhibition de gonflement d'argile avec peu d'effets sur les propriétés rhéologiques de fluide de forage à base d'eau.

Vu les performances physico chimiques et rhéologiques développées par le système (KCl/PHPA), ce dernier, peut être recommandé comme fluide de forage pour la phase 8" 3/8 au lieu de la boue à base d'huile utilisée actuellement.

En outre, le système retenu à base de polymère biodégradable, permet une meilleure préservation de l'environnement.

5. Références :

- [1]: A, Benmounah, action des biopolymères sur les propriétés physico-chimiques et rhéologiques des boues bentonitiques (2006).
- [2]: S, Slimani. Rheological study of polymer based drilling muds : Effets of polymer type, its content, temperature & salinity (2002).
- [3]: IDF, International Drilling Fluids Limited 1982. Reprinted 1/1992.
- [4]: Qu Yuanzhi, Polyxyalkyleneamine as shale inhibitor in water-based drilling fluids. (2009).
- [5]: Jean-Luc Simon. Gomme xanthane: agent viscosant et stabilisant. Techniques de l'ingénieur.
- [6]: Yuvaret Viturawong, Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthane mixtures: Effects of molecular weight of xanthane and different salts,(2008) .
- [7]: Hassi Massaoud Field, puits horizontal type medius-MDZ # 573. Geological prognosis/ well blueprint. SONATRACH/BASP.
- [8]: D. R. Paul, Polymer-polymer interactions, Department of Chemical Engineering and Center for Polymer Research The University of Texas . Pure & Appl. Chem., Vol. 67, No. 6, pp. 977-984, (1995).

INFLUENCE DES SELS ET DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES SUSPENSIONS POLYANIONIQUES CELLULOSE (PAC R) - BENTONITE

A.Gueciouer*, A. Benmounah*, R. Kheribet*, M. Samar*, M. Saidi**

* *Laboratoire des matériaux minéraux et composites (LMMC), Université M'hamed Bougara Boumerdes.*

** *Département Génie des matériaux, FSI, Université M'hamed Bougara Boumerdes.*

RESUME : Les systèmes bentonite-polymères sont couramment utilisés dans nombreuses applications industrielles, notamment dans la formulation des fluides de forage. Les propriétés de ces boues argileuses à base d'eau sont largement modifiées par la présence de polymères, de tensioactifs, ou d'électrolytes. Dans la littérature, on trouve de nombreux travaux traitant les systèmes « eau-argile-additif » où l'additif est souvent un polymère non ionique.

Le but principal de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout des différents sels et de la température sur le comportement rhéologique d'une suspension de polyanionique cellulose (PAC R) et de bentonite utilisé couramment dans les fluides de forage à base d'eau. Les tests rhéologiques effectués sur les suspensions ont montré un comportement non-newtonien à un seuil d'écoulement, proche du modèles de Herschel Bulkley et de Cross.

Mots clés : Bentonite, polyanionique cellulose, fluides de forage, rhéologie.

1. INTRODUCTION:

Lorsque la concentration en particules augmente, la probabilité d'interactions particule – particule augmente. Les particules s'organisent en entités de plusieurs particules susceptibles de se déformer ou de s'orienter sous l'effet des forces hydrodynamiques. A ces concentrations, l'observation des structure est impossible par des méthodes directes. Seule la rhéométrie permet de caractériser ces fluides et d'en déduire des hypothèses de structuration. Cependant, les courbes d'écoulement sont complexes, elles révèlent des propriétés mécaniques particulières telles que les seuils d'écoulement, la fluidification et la thixotropie. D'autres types d'essais sont réalisables et permettent de mieux définir ces propriétés. La rhéofluidification est considérée comme la limite entre le domaine dilué et le domaine concentré.

Le comportement rhéofluidifiant traduit la décroissance de la viscosité apparente avec l'augmentation du gradient de vitesse. Ce phénomène peut être dû à l'orientation des entités en suspension, à leur déformation ou leur réorganisation (division en unités plus petites) sous l'effet du cisaillement (ex: polymères, pétroles lourds, suspensions...). Le rhéoépaississement correspond au contraire à une augmentation de la viscosité à mesure que le gradient de vitesse croît. Ce phénomène est lié à la dilatance de l'échantillon ou à des réorganisations associées à un accroissement de la fraction volumique (ex: émulsions de bitume, micelles géantes...).

La loi de puissance proposée par Ostwald de Waele permet de décrire simplement le comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant d'un grand nombre de fluides (1).

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots(1)$$

K et n représentent respectivement, la consistance et l'indice de fluidification du fluide.

Elle permet de définir une viscosité apparente $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K\dot{\gamma}^{n-1}$ qui décroît avec $\dot{\gamma}$ lorsque n est inférieur à 1 (rhéofluidification) et croît avec $\dot{\gamma}$ dans le cas contraire (rhéoépaississement). Le cas du fluide newtonien est retrouvé pour $n = 1$.

Dans le présent travail, nous nous contentons d'étudier un seul type d'additif, il s'agit du polyanionique cellulose (PAC R), un polymère cellulosique de type carboxyméthylcellulose ayant une conformation en pelote flexible, opposée à celle du xanthane qui est un polysaccharide se présentant sous forme

d'une hélice semi-rigide. Après avoir leur comportement rhéologique, on va étudier l'effet de l'ajout de PAC R sur la suspension de la bentonite (10g/l).

Les fluides de forage sont des fluides à seuil rhéofluidifiants. Les modèles rhéologiques les plus utilisés pour les représenter sont donc les modèles de Bingham, d'Ostwald et de Herschel-Bulkley. Dans le passé, ce sont surtout les modèles de Bingham et d'Ostwald qui ont été utilisés car ils donnent lieu à des formules de calcul des pertes de charge assez simples et bien documentées. Actuellement c'est le modèle d'Herschel-Bulkley qui s'impose, car il est plus universel et représente mieux le comportement rhéologique de ce type de fluides.

2. MATERIAUX ET APPAREILLAGES :

La bentonite qu'on a choisie est une argile locale de Maghnia (Algérie), souvent utilisée dans la composition des fluides de forage. Une caractérisation rhéologique des suspensions à base de cette argile a été effectuée mise en évidence de l'effet de l'ajout de polymère polyanionique cellulose (PAC R) et des électrolytes [Chlorure de potassium(KCl), Chlorure de sodium (NaCl), et Chlorure de calcium (CaCl₂)] sur le comportement rhéologique de cette bentonite.

Pour déterminer le comportement rhéologique des différentes suspensions de bentonite et de polymère que nous étudierons, nous utilisons un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550», c'est un viscosimètre de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique, par exemple détermination de la viscosité, de la contrainte seuil et de la thixotropie. La technique la plus utilisée avec ce type de viscosimètre, consiste à imposer une vitesse de cisaillement et calculer la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente. Un régulateur de température de type (HAAKE DC 30) pour but maintenir la température à 20°C ± 1°C et cela pour tout nos essais.

Nous avons choisi le système couette de notre viscosimètre on utilisant la géométrie NV, il s'agit d'un cylindre de rayon/longueur 20.1/60 (mm) et de volume de remplissage 9 (cm³), il est destinée pour les fluides de faible viscosité (2-2000 m.pas) et du taux de cisaillement (27-27000 s⁻¹). Tous les résultats sont montrés dans l'affichage numérique intégré de LED ou dans le Rheowin-logiciel facultatif de HAAKE. Tous les essais sont effectués au sein du laboratoire LMMC/FSI Université M'hamed Bougara Boumerdès.

3. MODE OPERATOIRE :

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

La suspension de la bentonite : Une quantité d'eau distillée, 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.

La suspension d'un mélange de bentonite-polymère : De la même manière, on prépare simultanément une suspension de bentonite on ajoutant le polymère aux concentrations voulues par petites quantités pour éviter le phénomène d'agrégation. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures pour rassurer une bonne homogénéisation du mélange et une bonne hydratation de polymère.

L'effet du sel dans ce travail est effectué par le mode opératoire suivant : on ajoute la concentration voulue du sel à une quantité d'eau distillée soumise à une agitation magnétique, puis on ajoute la quantité voulue du mélange dans cette eau salée. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures.

Notons qu'avant chaque test rhéologique le mélange est agité pendant 5 min.

4. RESULTAT ET DISCUSSION :

4.1. Suspension de la bentonite :

Pour étudier l'effet de la température, nous avons représenté l'évolution de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement pour une solution de bentonite (3%).

L'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension bentonitique (Fig.1). Pour différentes températures par exemple, le passage de la température de 20°C à 80°C fait décroître la viscosité apparente d'environ un facteur de 2,18 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 100 s⁻¹.

Aussi, La (Fig.1) montre que le comportement rhéologique de la bentonite (3%) peut être décrit par le modèle de Herschel-Bulkley (éq. 1) notamment pour les fortes vitesses de cisaillement.

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (2)$$

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

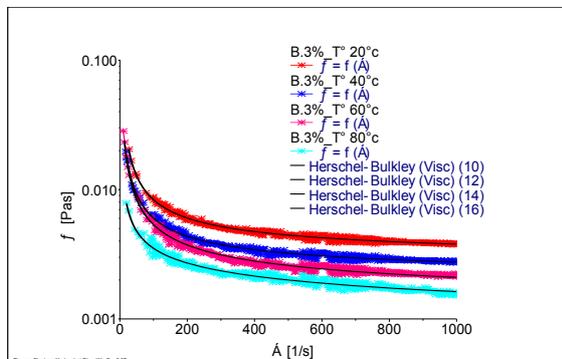


Fig.1 : Effet de la température sur la viscosité apparente d'une suspension de bentonite 3% en fonction du taux de cisaillement.

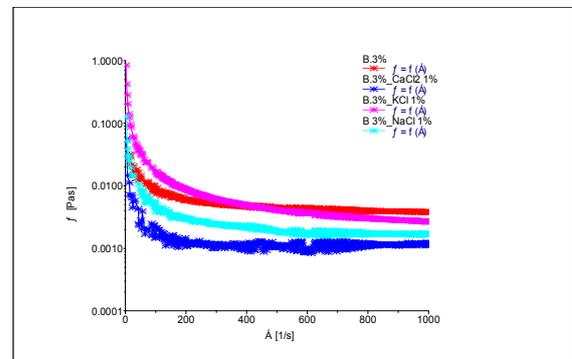


Fig.2 : Effet de des sels sur la viscosité apparente d'une suspension de bentonite 3% en fonction du taux de cisaillement.

La (Fig.2) montre que la présence de KCl (1%), augmente la viscosité et la contrainte seuil du mélange par rapport à la référence bentonite 3%. Par contre, le NaCl (1%) et CaCl₂ (1%), diminuent la viscosité et la contrainte seuil du 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. Cette agrégation est causée par la diminution des forces répulsives due à la compression de la double couche électrique. Lorsqu'on ajoute une 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 [13],[15].

Lorsqu'on ajoute une concentration de NaCl ou CaCl₂, l'agrégation se disperse dans le système (défloculation), ce phénomène vient de la pénétration des cations Na⁺ et Ca²⁺ qui localisent entre les feuillets de la bentonite provoquant la dispersion sous l'effet des forces répulsives. Par conséquent, la viscosité et la contrainte seuil du mélange diminue.

Certaines bentonites ont tendance à libérer des particules colloïdales qui ne peuvent être retirés de la dispersion, même par ultracentrifugation. Il est bien connu que le détachement de particules colloïdales de bentonites dépend de la quantité de Na⁺ échangeable, le pH et force ionique. [14]

L'ajout de NaOH augmente la quantité de Na⁺ dans la suspension de bentonite ce qui influe sur les particules colloïdales et le pH.

Dans la (Fig.3), on remarque que l'ajout de NaOH (0,5%, 1%, 2%) fait diminuer la viscosité apparente de la suspension de bentonite. Cette diminution due à l'augmentation de la quantité de Na^+ dans la solution. (S.Kaufhold , R.Dohrmann) ont montré que Na^+ et le pH sont liés.

Nous présentons sur la figure 4 l'effet des sels sur la suspension de bentonite de référence.

La figure montre que la présence de KCl augmente la viscosité et la contrainte seuil du 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)]. [15]

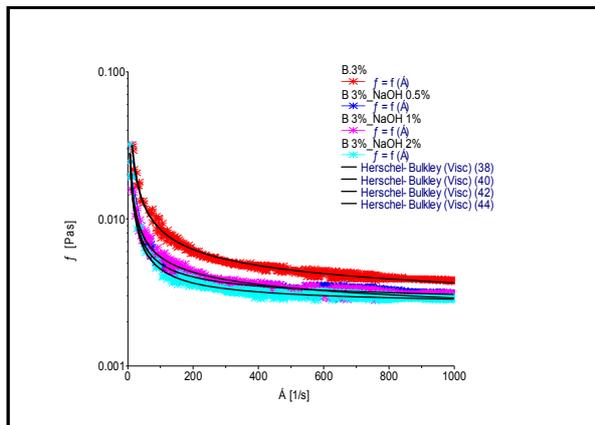


Fig.3 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente d'une suspension de bentonite 3% en fonction du taux de cisaillement.

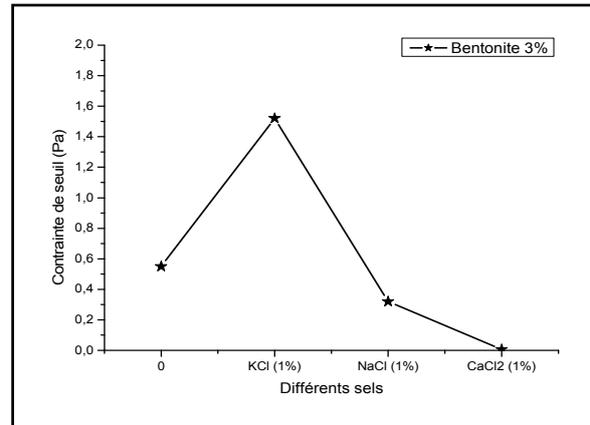


Fig.4 : Effet des sels sur la contrainte de seuil de la suspension de bentonite 3%.

Pour étudier l'effet des additifs (polymère et sel) 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 PAC R sur la suspension de bentonite. Nous commençons ci-dessous par la mise en évidence du comportement des solutions de PAC R seul.

4.2. Suspension du polymère PAC R :

L'augmentation de la viscosité avec la concentration en PAC R (Fig.5) est expliquée par le fait que les groupes carboxy dans la molécule du PAC R assurent une bonne dispersion dans l'eau, aboutissant à l'augmentation des frictions entre les particules (Senthil et al., 2003). De plus, la répulsion mutuelle entre les charges (sites négatifs créés le long de la chaîne du polymère par dissociation de l'ion Na^+ du PAC R) permet aux chaînes de polymères enroulées aléatoirement de s'allonger linéairement, et de ce fait la viscosité augmente (Senthil et al., 2003). [16]

Dans la (Fig.6), l'augmentation de la température de 20 C° à 80 C° fait évoluer le système d'un état concentré à un état dilué dont l'augmentation de la température diminue la viscosité de la suspension de PAC R.

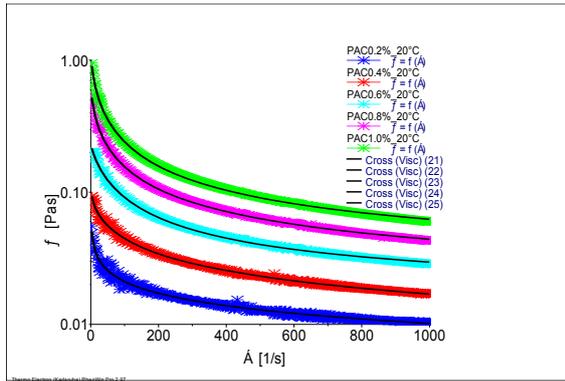


Fig.5 : Effet de la concentration du PAC R sur la viscosité apparente de la suspension en fonction du taux de cisaillement.

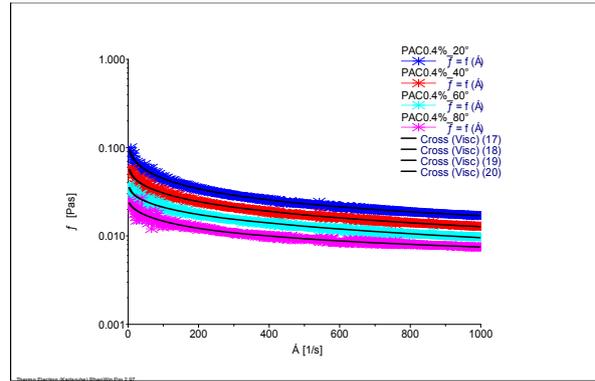


Fig.6 : Effet de la température sur la viscosité apparente du PAC R en fonction du taux de cisaillement.

La même tendance est observée pour le comportement rhéologique des solutions de PAC R sous l'effet des sels. Généralement, l'ajout des sels influe sur la viscosité de la suspension du PAC R (Fig.7), et diminue ainsi la contrainte de seuil de la suspension (Fig.8). Le PAC R est particulièrement sensible aux cations divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et monovalents (K^+ , Na^+).

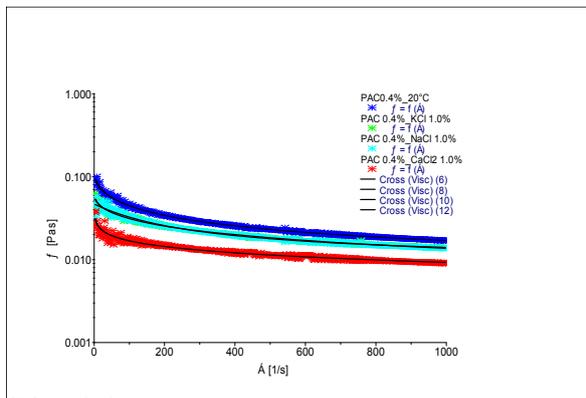


Fig.7 : Effet des sels sur la viscosité apparente du PAC R en fonction du taux de cisaillement.

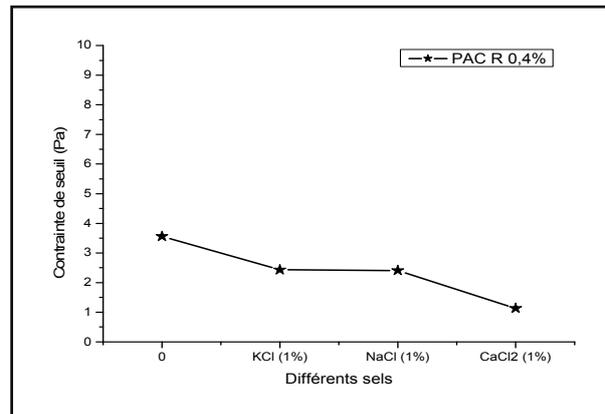


Fig.8 : Effet des sels sur la contrainte seuil de la suspension du PAC R.

4.3. Suspension du mélange (bentonite – PAC R) :

Le comportement rhéologique de ces mélanges peut être décrit par le modèle de Cross :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (C \dot{\gamma})^m} \dots\dots\dots(3)$$

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

Le modèle de Herschel-Bulkley donne aussi une reproduction satisfaisante des courbes, notamment pour la suspension d'argile sans polymère. Bien évidemment, on remarque que la viscosité apparente du mélange (bentonite – PAC R) diminue sous l'effet de température en fonction du taux de cisaillement (Fig.9).

L'effet de l'ajout de différents sels dans le mélange (bentonite – PAC R) est montré dans la figure 10. On observe une diminution de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement. Cette évolution de la viscosité due à l'effet de l'ajout des différents sels (NaCl, KCl et $CaCl_2$) sur le mélange (bentonite – PAC R). Ce dernier, garde leur comportement rhéologique et proche du modèle de

« Cross ». Si on observe bien sur le rhéogramme de la viscosité (Fig.10), on remarque qu'une chute remarquable de la viscosité dans le cas du CaCl_2 . Cette chute de viscosité par rapport aux autres due à la manifestation de cation Ca^{++} à la suspension du mélange (bentonite – PAC R) par le phénomène du défloculation, d'où une descente importante apparaît de la contrainte de seuil en fonction de l'ajout de différents sels (Fig.11). Ce phénomène provoque une diminution de la viscosité.

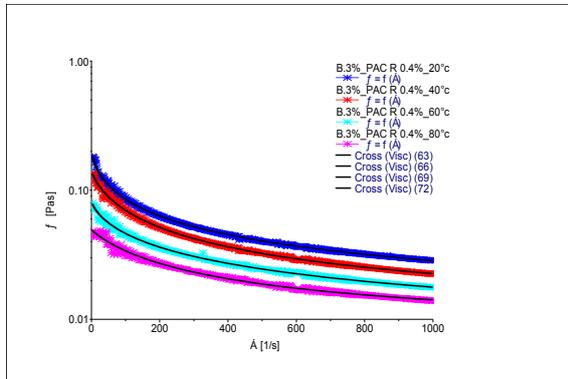


Fig.9 : Effet de la température sur la viscosité apparente du mélange (bentonite - PAC R) en fonction du taux de cisaillement.

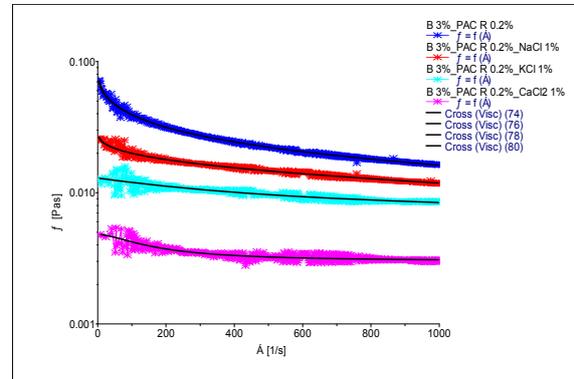


Fig.10 : Effet de l'ajout des sels sur la viscosité apparente du mélange (bentonite - PAC R) en fonction du taux de cisaillement.

Dans le cas de l'ajout de NaOH dans le mélange de (bentonite – PAC R), deux facteurs influent sur la viscosité apparente de la suspension, le PH et la présence des cations Na^+ (Fig.12).

c'est le même phénomène qu'on a vu déjà dans la suspension bentonitique (voir la Fig.3).

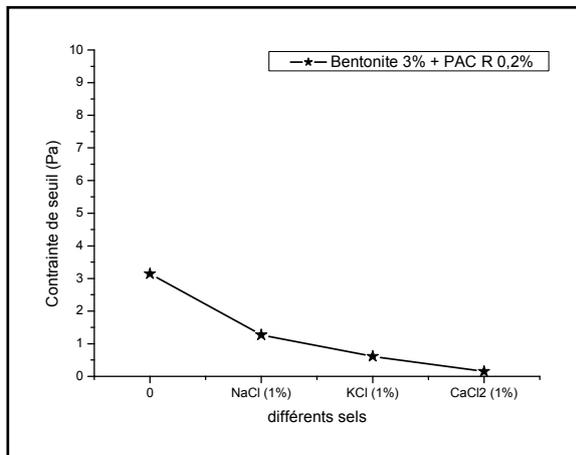


Fig.11 : Effet des sels sur la contrainte seuil du mélange (bentonite – PAC R).

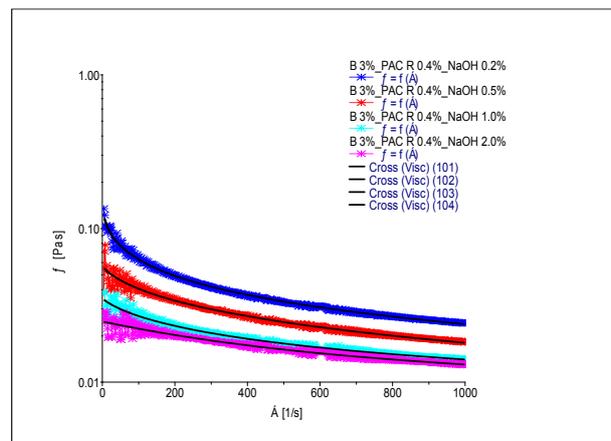


Fig.12 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente du mélange (bentonite – PAC R) en fonction du taux de cisaillement.

5. CONCLUSION :

Nous avons étudié l'effet de l'ajout de polyanionique cellulosique (PAC R) sur le comportement rhéologique d'une suspension de bentonite locale. Il s'agit d'un travail pour la compréhension du comportement rhéologique du système "Bentonite-PAC R".

Les différents tests rhéologiques réalisés dans ce travail ont permis de mettre en évidence le comportement rhéofluidifiant 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. Il a été montré que l'ajout de KCl augmente la viscosité de la suspension de bentonite. 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. Dans le cas du mélange (bentonite – PAC R), l'ajout du PAC R dans la suspension de bentonite de référence (3% d'argile) change considérablement son

comportement rhéologique, il a été reproduit d'une manière satisfaisante par le modèle de Cross. Ce comportement obtenu, est très proche de celui de la solution de PAC R. Ce résultat confirme l'explication rapportée dans la littérature sur la dominance du comportement du polymère dans le mélange bentonite-polymère anionique [Benchabane (2006)] et [Benyounes (2007)].

Références :

- [1] F. Bergaya and G. Lagaly. Surface modification of clay minerals. Applied clay science, 2001.
- [2] S. Abend and G. Lagaly. Sol–gel transitions of sodium montmorillonite dispersions. Applied Clay Science, 16 : 201–227, 2000.
- [3] A. Besq, C. Malfroy, A. Pantet, P. Monnet, and D. Righi. Physicochemical characterization and flow properties of some bentonite muds. Applied Clay Science, 23 : 275–286, 2003.
- [4] U. Brandenburg and G. Lagaly. Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions. Applied Clay Science, 3 : 263–279, 1988.
- [5] Sandrine PAUMIER, Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile–eau pour des suspensions de smectites. Thèse, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2006. 9 p.
- [6] P. Coussot. Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble, Etudes du CEMAGREF, série Montagne n° 5, 1992. 415 p.
- [7] M. Ddani, A. Meunier, M. Zahraoui, D. Beaufort, M. El Wartiti, C. Fontaine, B. Boukili, and B. El Mahi. Clay mineralogy and chemical composition of bentonites from the Gourougou volcanic massif (northeast Morocco). Clays and Clay Minerals, 53 : 250–267, 2005.
- [8] G. Didier and L. Comeaga. Hydratation, gonflement, conductivité hydraulique. Influence de produits chimiques. In Actes du congrès Géo–Bento, étanchéité par géosynthétiques bentonitiques : état de l'art, pages 74–95. Paris, 1998.
- [9] R.K. Khandal and T.F. Tadros. Application of viscoelastic measurements to the investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions. Journal of Colloid and Interface Science, 125 : 122–128, 1988.
- [10] N. Kherfella and S. Bekkour, K. et Benhadid. Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation. Rhéologie, 7 : 48–54, 2005.
- [11] G. Lagaly. Principles of flow of kaolin and bentonite dispersions. Applied Clay Science, 4 : 105–123, 1989.
- [12] G. Lagaly and S. Ziesmer. Colloid chemistry of clay minerals : the coagulation of montmorillonite dispersions. Colloid and Interface Science, 100–102 : 105–128, 2003.
- [13] SAFI Brahim, Mémoire de magistère, Contribution à l'étude de l'amélioration des propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la boue salée saturée alourdie lors du forage de la phase 8^{7/2}. Université M'hamed Bougara Boumerdès. 2002
- [14] S.Kaufhold , R.Dohrmann “ Detachment of colloidal particles from bentonites in water ” AppliedClayScience39, 2008.
- [15] Khaled Benyounes, Adel Benchabane & Abderrahmane Mellak “ Effet de l'ajout de polyanionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie), 2007 “
- [16] KHODJA Mohamed, “LES FLUIDES DE FORAGE : ETUDE DES PERFORMANCES ET CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES”. École doctorale : Science des Procédés Institut National Polytechnique de Toulouse .Thèse 2008 France.

Effet de l'ajout des polymères et des sels sur le comportement rhéologique des fluides de forage à base d'eau.

A. Gueciouer^{1)*}, A. Benmounah¹⁾, R. Kheribet¹⁾, M. Samar¹⁾.

Email* : guezak@yahoo.fr

1) Laboratoire des matériaux minéraux et composites (LMMC), Université M'hamed Bougara Boumerdès, Algérie.

Résumé :

Dans un fluide de forage à base d'eau, généralement, la bentonite joue le rôle d'un composant "viscosifiant", et ce n'est pas le seul élément viscosifiant. Des polymères sont souvent ajoutés au fluide de forage pour lui conférer les propriétés adéquates et lui permettant de remplir de nombreuses fonctions pour un bon déroulement des opérations de forage.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout des polymères (CMC, PAC R et xanthane) et des sels (NaCl, KCl et CaCl₂) sur le comportement rhéologique de fluide de forage, afin d'établir une comparaison du comportement rhéologique des différentes formulations.

Les résultats obtenus montrent que les formulations retenues présentent un comportement rhéologique rhéofluidifiant proche du modèle de Herschel- Bulkley et du modèle de cross.

Mots clés: Rhéologie, polymères, viscosité plastique, yield-value, modèle de Hershel-Bulkley, fluide de forage.

Abstract:

In a water based drilling fluid, generally, the bentonite plays the role of a «viscosifiant» component, and is not the only viscosifiant element. Polymers are often added to the drilling fluid to confer him the adequate properties and enabling him to fill of many functions, of which a good progress of operation of drilling.

The principal objective of this work is to study the influence of the addition of polymers (CMC, CAP R and xanthane) and of salts (NaCl, KCl and CaCl₂) on the rheological behavior of water based drilling fluid, in order to establish a comparison of rheological behavior between various formulations.

The results obtained shows that the formulations selected present a rheological behavior rhéofluidifiant near to the model of Hershel Bulkley.

Key words: Rheology, polymers, plastic viscosity, yield value, model Hershel-Bulkley, drilling fluid.

1. Introduction:

Les fluides de forage sont des fluides à seuil rhéofluidifiants. Les modèles rhéologiques les plus utilisés pour les représenter sont donc les modèles de Bingham, d'Ostwald et d'Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$). Dans le passé, ce sont surtout les modèles de Bingham et d'Ostwald qui ont été utilisés car ils donnent lieu à des formules de calcul des pertes de charge assez simples et bien documentées. Actuellement c'est le modèle d'Herschel-Bulkley qui s'impose, car il est plus universel et représente mieux le comportement rhéologique de ce type de fluides.

Notre travail est principalement consacré pour étudier l'effet de l'ajout de différents polymères et des sels sur le comportement rhéologique d'une boue à base de bentonite.

2. Matériaux et appareillages :

La bentonite qu'on a choisie est une argile locale de Maghnia (Algérie), souvent utilisée dans la composition des fluides de forage. Une caractérisation rhéologique des suspensions à base de cette argile a été effectuée mise en évidence de l'effet de l'ajout des polymères [carboxyméthylcellulose de sodium

(CMC), polyanionique cellulose (PAC R), et xanthane] et des électrolytes [chlorure de potassium(KCl), chlorure de sodium (NaCl), et chlorure de calcium (CaCl₂)] sur le comportement rhéologique de cette bentonite. Ainsi, ce travail servira de base pour une étude comparative de comportement rhéologique du système "bentonite-CMC" et " bentonite-PAC R".

Pour déterminer le comportement rhéologique des différentes suspensions de bentonite et de polymère que nous étudierons, nous utilisons un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550», c'est un viscosimètre de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique, par exemple détermination de la viscosité, de la contrainte seuil et de la thixotropie. La technique la plus utilisée avec ce type de viscosimètre, consiste à imposer une vitesse de cisaillement et calculer la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente. Un régulateur de température de type (HAAKE DC 30) pour but maintenir la température à 20°C ± 1°C et cela pour tout nos essais.

Nous avons choisi le système couette de notre viscosimètre on utilisant la géométrie NV, il s'agit d'un cylindre de rayon/longueur 20.1/60 (mm) et de volume de remplissage 9 (cm³), il est destinée pour les fluides de faible viscosité (2 - 2000 m.pas) et de taux du cisaillement (27-27000 s⁻¹). Tous les résultats sont montrés dans l'affichage numérique intégré de LED ou dans le Rheowin-logiciel facultatif de HAAKE. Tous les essais sont effectués au sein du laboratoire LMMC/FSI Université M'hamed Bougara Boumerdès.

3. Mode opératoire :

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

La suspension de la bentonite : Une quantité d'eau distillée, préalablement déterminée, est soumis 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.

La suspension d'un mélange de bentonite-polymère : De la même manière, on prépare simultanément une suspension de bentonite on ajoutant le polymère aux concentrations voulues par petites quantités pour éviter le phénomène d'agrégation. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures pour rassurer une bonne homogénéisation du mélange et une bonne hydratation de polymère.

L'effet du sel dans ce travail est effectué par le mode opératoire suivant : on ajoute la concentration voulue du sel à une quantité d'eau distillée soumis à une agitation magnétique, puis on ajoute la quantité voulue du mélange dans cette eau salée. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures.

Notons qu'avant chaque test rhéologique le mélange est agité pendant 1 heure.

4. Résultat et discussion :

4.1. Suspension bentonitique :

Pour étudier l'effet de la température, nous avons représenté l'évolution de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement pour une solution de bentonite (3%).

L'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension bentonitique (Fig.2). Pour différentes températures par exemple, le passage de la température de 20°C à 80°C fait décroître la viscosité apparente d'environ un facteur de 2,18 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 100 s⁻¹.

La Figure 1 montre que le comportement rhéologique de la bentonite (3%) peut être décrit par le modèle de Herschel-Bulkley (éq. 1) notamment pour les fortes vitesses de cisaillement.

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

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

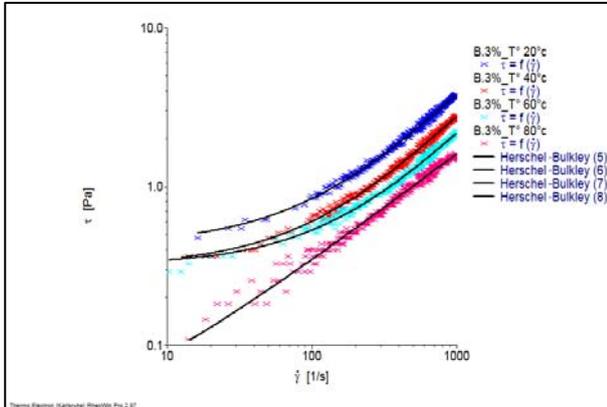


Fig.1 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

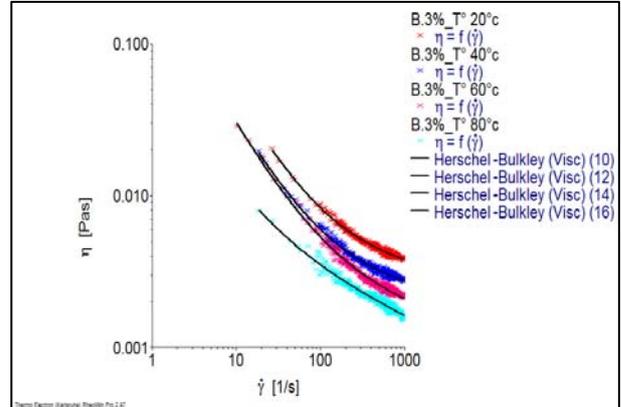


Fig.2 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

Pour étudier l'effet des additifs (polymères et sel) 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 et PAC R seul.

4.2. Suspension polymérique :

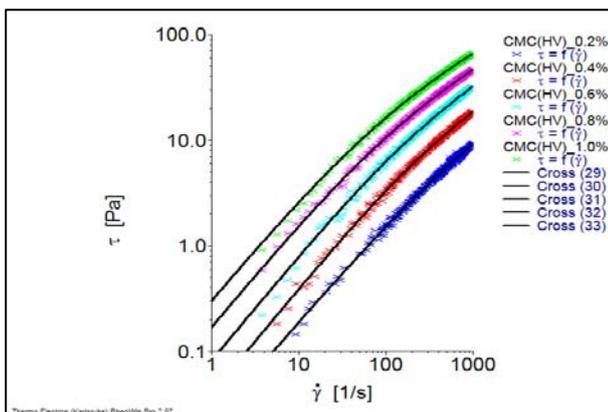


Fig.3 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de CMC à différents concentrations.

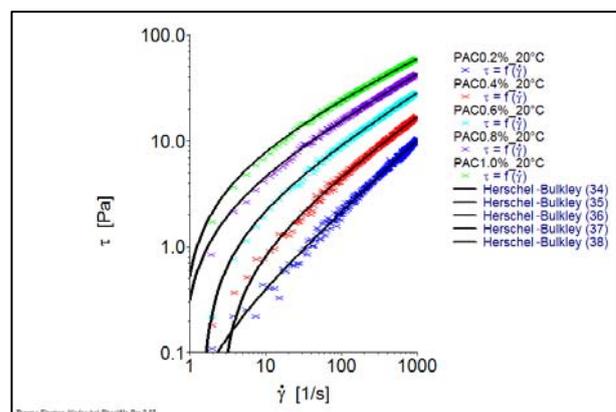


Fig.4 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de PAC R à différents concentrations.

Les propriétés rhéologiques de la suspension de CMC sont montrées dans la figure 3. On observe une augmentation de la viscosité apparente en fonction de la concentration de CMC. A cisaillement égal, et pour la même concentration de polymère, la viscosité apparente de PAC R (Fig.4), reste presque identique à celle de CMC notamment pour les fortes vitesses de cisaillement.

On remarque également sur la Fig.3, le comportement rhéologique de la solution de CMC peut être décrit d'une manière satisfaisante par le modèle de Cross :

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

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

Les courbes d'écoulements des solutions de PAC R et de xanthane montrent un comportement proche de modèle Herschel-Buckley (Fig. 4 et 5). A partir des résultats obtenus, nous pouvons constater que le PAC R et le xanthane présentent un comportement rhéologique stable, contrairement aux suspensions de bentonite qui présentent des fluctuations dans les courbes d'écoulement.[2]

Le caractère rhéofluidifiant et l'absence de la contrainte seuil sur les solutions de CMC moins de 0,6% (Fig. 2) est principalement effectué par la dissolution de sa masse molaire (une hydrosolubilité plus rapide et meilleure à cause de leurs groupes ioniques) et sa flexibilité. [4]

4.3. Suspension du mélange :

4.3.1. Suspension polymère-polymère :

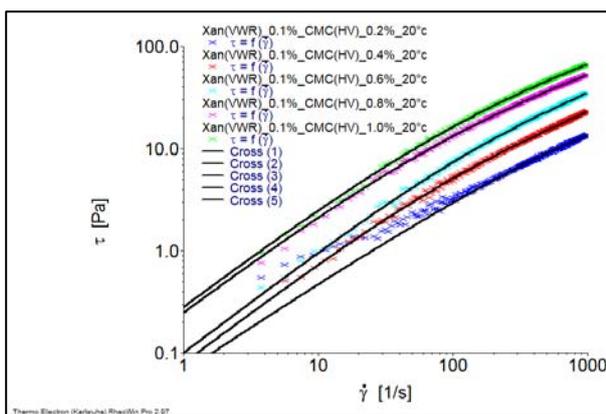


Fig.5 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de PAC R à différents concentrations.

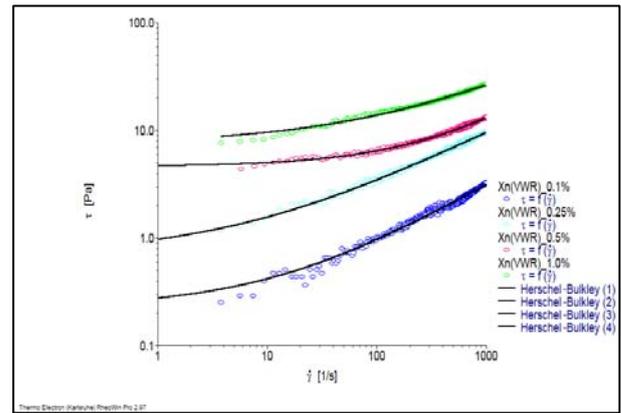


Fig.5 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de xanthane à

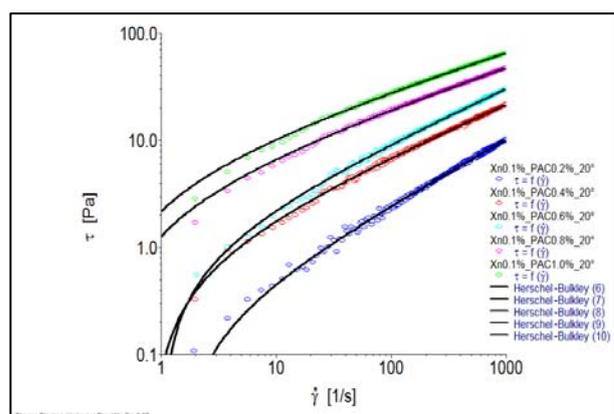


Fig.6 : Contrainte en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de PAC R à différents concentrations.

A faible concentration de xanthane, le comportement rhéologique du CMC et du PAC R dominant celle du xanthane dans les suspensions polymère-polymère (Fig. 5 et 6) :

- La suspension (xanthane-CMC) : proche au modèle de cross;
- La suspension (xanthane-PAC R) proche au modèle d’Herschel-Bulkley.

4.3.2. Suspension bentonite-polymère :

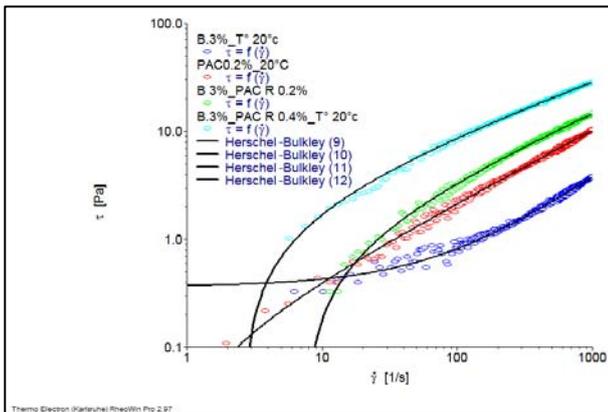


Fig.7 : Influence de l’ajout de PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite.

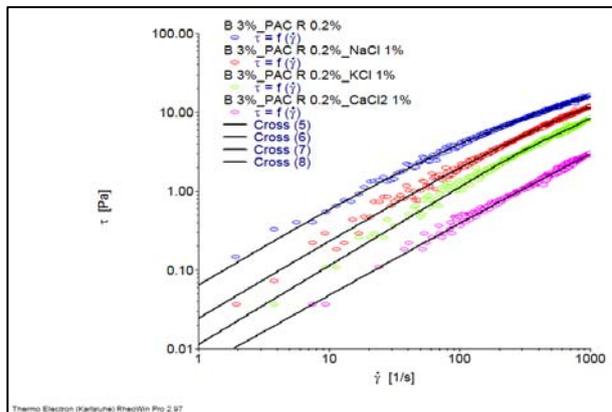


Fig.8 : Influence des sels sur le comportement rhéologique de la suspension (B3%_PAC R 0.2%).

Le PAC R à un comportement pseudoplastique et la bentonite à un comportement viscoplastique. Il sera donc intéressant de proposer et de prouver le modèle le plus efficace telle que la loi d’Herschel-Bulkley et la loi de Cross. [2]

L’effet de l’ajout de PAC R sur les propriétés rhéologiques de la suspension de bentonite (3%) est montré dans la Fig.7. On observe une augmentation de la viscosité apparente en fonction de la concentration de PAC R, et pour la même concentration de polymère (PAC R 0.2%), la viscosité apparente du mélange (Bentonite-PAC R) reste toujours supérieure à la viscosité de la solution de PAC R (Fig.7). Aussi la suspension du mélange (Bentonite-PAC R) garde toujours le même modèle (Herschel-Bulkley) que les suspensions de bentonite et de PAC R.

On remarque également sur la (Fig.8) l’évolution de la contrainte et de la viscosité sous l’effet de différents sels (NaCl, KCl et CaCl₂) sur le mélange bentonite-PAC R. Ce dernier, à faible taux du cisaillement, leur comportement rhéologique change du modèle d’Herschel-Bulkley au modèle de Cross à cause de l’effet du sel.

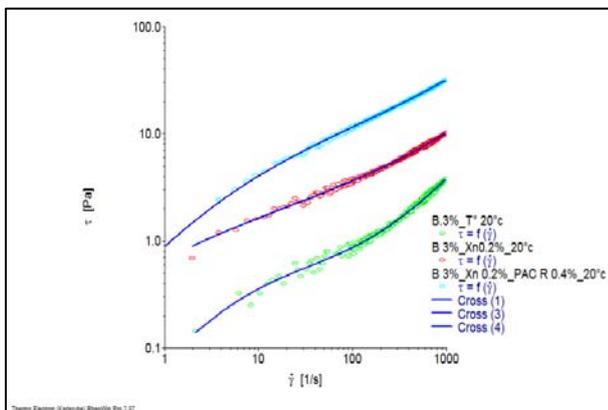


Fig.9 : Effet de l’ajout de xanthane sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite.

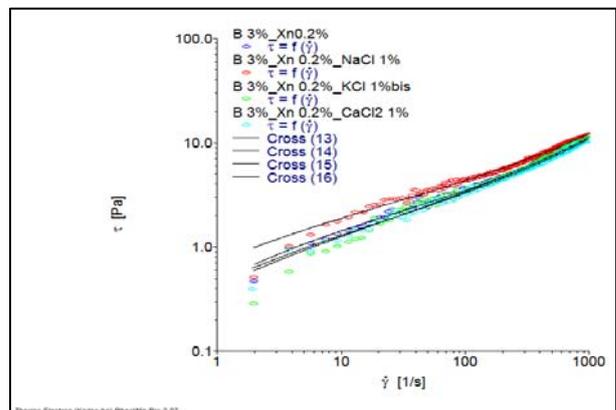


Fig.10 : Effet de sels sur le comportement rhéologique de la suspension (B3%-xanthane 0.2%).

Dans le cas du mélange (bentonite-xanthane), l'ajout du xanthane augmente la viscosité apparente de la suspension de bentonite (Fig.9), ainsi que l'ajout des sels n'influe pas sur le comportement rhéologique de mélange (Fig.10).

Par conséquent, les sels influent sur le comportement rhéologique des mélanges (bentonite-PAC R) et n'influent pas sur les mélanges (bentonite-xanthane).

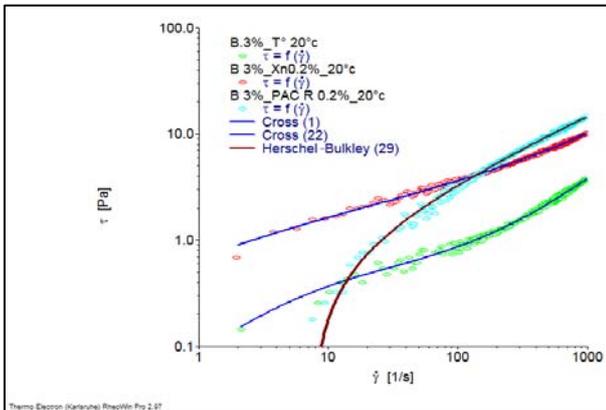


Fig.11 : Effets des ajouts des polymères (Xn et PAC R) sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique.

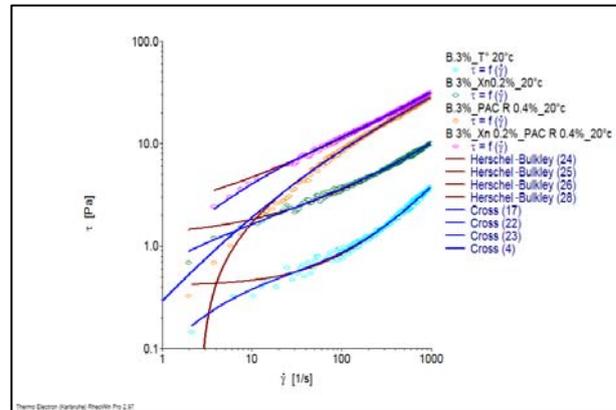


Fig.12 : Influence de la vitesse de cisaillement sur la nature des modèles rhéologiques (obtenus par modélisation) des différents types

La Fig.11, montre l'effet de l'ajout de différents polymères sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique. On remarque qu'à faible taux du cisaillement, le passage de la concentration du xanthane de 0% à 0.2% fait croître la viscosité apparente d'environ 5,02 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 20 s^{-1} et environ 2,64 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 1000 s^{-1} .

L'ajout du xanthane à 0,2% sous une vitesse du cisaillement de 20 s^{-1} fait augmenter la viscosité de 5 fois par rapport à la viscosité de la bentonite (0% du xanthane). Cependant, sous une vitesse de cisaillement de 1000 s^{-1} , cette viscosité augmente seulement de deux fois par rapport à la viscosité de la bentonite : ceci peut s'expliquer par le fait que l'élévation de la vitesse de cisaillement diminue l'enchevêtrement des chaînes de xanthane et les oriente principalement dans le sens de l'écoulement. Donc, ces chaînes vont entraver moins l'écoulement, d'où la diminution du facteur (de 5 à 2 fois) d'augmentation de la viscosité.

La modélisation par le logiciel Rheowin Data Manager a montré qu'à faible vitesse de cisaillement ($< 100 \text{ s}^{-1}$), les fluides ont un comportement similaire à celui du modèle de cross, tandis qu'à haute vitesse de cisaillement ($> 100 \text{ s}^{-1}$) (Fig.12), les fluides ont un comportement proche des modèles, de cross et de Herschel-Bulkley.

5. Conclusion :

- L'augmentation de température fait diminuer la viscosité apparente de la bentonite dont le comportement rhéologique est proche du modèle d'Herschel-Bulkley.
- La viscosité apparente des polymères (CMC, xanthane et PAC R) augmente avec l'augmentation de la concentration de ceux-ci.

- Les comportements rhéologiques de CMC, de PAC R et de xanthane sont respectivement proche des modèles de cross pour le premier et d'Herschel-Bulkley pour les deux derniers.
- L'ajout de CMC à différentes concentrations (0.2 à 1%) au xanthane (0.1%) donne un comportement rhéologique proche de celui de modèle de cross.
- L'ajout de PAC R à différentes concentrations (0.2 à 1%) au xanthane (0.1%) donne un comportement rhéologique proche de celui de modèle d'Herschel-Bulkley.
- L'ajout de PAC R à la bentonite fait augmenter la viscosité apparente. Le comportement du mélange est proche de celui de modèle d'Herschel-Bulkley.
- L'ajout de xanthane à la bentonite fait augmenter la viscosité apparente. Le comportement du mélange est proche de celui de modèle de cross.
- L'effet des sels (NaCl, KCl et CaCl₂) sur le mélange (bentonite – PAC R) fait diminuer la viscosité apparente. Cependant, l'effet de ces sels sur le mélange (bentonite – xanthane) est pratiquement inexistant sur le comportement rhéologique (la viscosité apparente et la contrainte de cisaillement).
- A faibles vitesses de cisaillement, l'ajout de xanthane à la bentonite fait accroître la viscosité apparente de 5 fois par rapport à la viscosité de la suspension bentonitique. Mais, cette élévation n'est que de deux fois, à des vitesses de cisaillement élevées.
- A faibles vitesses de cisaillement, le comportement des mélanges (bentonite – polymère(s)) est proche de modèle de cross, tandis qu'à vitesses de cisaillement élevées, le comportement rhéologiques de ces mêmes mélanges devient proche du modèle d'Herschel-Bulkley.

6. Bibliographie :

- [1] : Khaled Benyounes ; Effet de l'ajout de polyanionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). 18^{ème} Congrès Français de Mécanique (2007).
- [2] : Mme BOUSSAK Hassina ; Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique. Thèse Magistère (2008).
- [3] : M. AMOURA ; Caractérisation rhéologique de la carboxyméthylcellulose. 19^{ème} Congrès Français de Mécanique (2009).
- [4] : Werner-Michael Kulicket; Characterization of aqueous carboxymethylcellulose solutions in terms of their molecular structure and its influence on rheological behaviour. Polymer Vol. 37 No. 13, pp. 2723-2731 1996, Elsevier Science Ltd (1996).