
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P)



Ecole Doctorale Sciences de l'Eau et Développement Durable

Option Science de l'Eau

Laboratoire de Sciences de l'Eau et Développement Durable

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en sciences de l'eau

Présenté par :

M. Mohamed BOUKERROU

Ingénieur d'état en Hydraulique de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème :

**AMELIORATION DES PERFORMANCES
DES BOUES DE FORAGE**

Soutenu devant le jury le 30/06/2012

Président

Mr. A. BALI

Professeur (ENP)

Directrice de mémoire :

Mme. . R. MITICHE-KETTAB

Maitre de conférences A (ENP)

Examineurs

Mlle. S. BENMAMAR

Maitre de conférences A (ENP)

Mr .M.OULD HAMOU

Maitre de conférences A (ENP)

ENP. Alger 2012

10, Avenue Hassen Badi El-Harrach, Alger



Dédicaces

A

Mes chers parents et à toute ma famille

mes frères et soeurs

et à tous mes amis

Mohamed





Remerciement

Je remercie d'abord dieu tout puissant qui m'a guide et me donne le courage et l'espoir de terminer mes études.

Je remercie vivement mes parents, ma famille,

Je remercie vivement ma promotrice R. MITICHE-KETTAB qui m'a suivi avec patience pendant la durée de mon travail.

Je remercie également tous mes professeurs :

Mr. BALI de m'avoir aidé et présidé ce jury

Mlle BENMAMAR Saadia de m'avoir examiné et honoré ce jury

Mr OULD HAMOU de m'avoir examiné et honoré ce jury

Je remercie encore Mr SAIDI mon encadreur au sein de SONATRACH division forage de HASSI MESSAOUD et à travers lui tout le personnel de la société.

Je remercie encore Mr ARROUSSI mon encadreur au sein de CRD et à travers lui tout le personnel de la société.

Je remercie encore Mr carlos.diaz.morales et les deux directeurs de laboratoires Mr Ali ABBAS et Mr SADDOUKI et à travers eus tout le personnel de la société BASP (HALLIBURTON).

Tous enseignaient de département d'hydraulique et le personnel de L'ENP.

En fin, Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur support moral et intellectuel pour accomplir à bien ce mémoire, ils ont grandement facilité mon travail et à leur tête Abdellah et halim.

BOUKERROU Mohamed



الملخص:

إن عملية الحفر لمختلف الطبقات الجيولوجية، تتم عموماً بواسطة مميغات الحفر ذات الطابع الزيتي (مميع زيتي) مستحلب معكوس... الخ). على المستوى البيئي، أثناء عملية الحفر، هناك فقدان لكميات معتبرة للمميغات الزيتية على مستوى الطبقات الجيولوجية، وهذا يعتبر عنصر كبير للتلوث وتعتبر أيضاً المستنقعات المتواجدة على مستوى الحقول البترولية خطر للبيئة. لهدف معالجة هذا المشكل الإيكولوجي و التقليل من أثاره السلبية، يوصى استعمال المميغات الحفرية ذات الطابع المائي في مختلف الحقول الحفرية البترولية. إن هذا النوع من المميغات، يحتوي على بوليميرات مختلفة، أملاح و بنتونيت. هذه المكونات الأساسية تشكل عدة مركبات نظامية منها (طين- بوليمير و طين- ماء). الهدف الأساسي من هذا العمل هو دراسة تأثير البوليميرات و الأملاح على الطابع الريولوجي لهذه المميغات المائية. لأجل معرفة الطابع الريولوجي لهذه المميغات المعقدة، أنجزت دراسة مميزة على مختلف المعلمات البنتونينية و على المميغات المختلطة (بنتونيت- بوليمير). هذه الدراسة الريولوجية، أنجزت على مستوى مخبر مركز البحث والتطوير (CRD) بحاسي مسعود و ذلك بجهاز (Thermo HAAR VT 550 و Rhéomètre FANN 266). سمحت لنا هذه الدراسة بمعاينة التأثير الريولوجي عند إضافة البوليميرات و الأملاح للمعلقات البنتونينية. إن النتائج تحصلنا عليها تم تصحيحها بمساعدة برنامج (Rheowin DATA Manager) و المنحنيات كانت عموماً متماثلة تطبيقياً إلى النماذج Cross و Herschel-Bulkley. **الكلمات المفتاحية:** المميغات الحفرية، قوانين الطابع الريولوجي، البوليميرات.

Résumé :

Actuellement, pour le forage des différentes formations géologiques, on utilise généralement des boues à base d'huile (boue à l'huile, émulsion inverse,...etc.).

Sur le plan environnemental, en plus des pertes de circulation des fluides pendant et après le forage, le bournier représente une grande source de pollution et de danger. Afin de remédier à ce problème écologique et réduire ses effets néfastes, l'utilisation des boues de forage à base d'eau est recommandée et tend à se généraliser sur les différents sites pétroliers.

Ce type de boue contient différents polymères, des sels et de la bentonite. Ces principaux constituants forment des systèmes (argile-polymère, argile-eau) par des interactions argile-fluide.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout de différents polymères et des sels sur le comportement rhéologique de ces boues. Pour connaître le comportement de ces fluides complexes, une étude de caractérisation a été effectuée sur des suspensions de bentonite et de mélanges boueux (bentonite - polymères). Elle nous a permis d'analyser l'influence des polymères et des sels sur le comportement rhéologique des suspensions bentonitiques. Les résultats obtenus sont satisfaisants; la modélisation des rhéogrammes a montré un comportement rhéologique proche des modèles de Herschel-Bulkley ou de Cross.

Mots clés : fluides de forage, loi de comportement, polymères,

Abstract:

Currently, for the drilling of the various geological formations, generally uses muds of drilling based-oil (mud with oil, inverse emulsion... etc).

On the environmental level, in addition to the losses of circulation of the fluids during and after drilling, the slough, a great source of pollution and danger represents. In order to cure this ecological problem has and to reduce these harmful effects, the use of muds of drilling based-water is recommended tends to spread on the various oil sites.

This type of mud contains various polymers, of salts and bentonite. These principal components form systems (clay-polymer, clay-water) by interactions clay-fluid.

The objective of this work is to study the influence of the addition of various polymers and salts on the rheological behavior of these muds.

To know the rheological behavior of these complex fluids, a study of characterization was effected on suspensions of bentonite and the mixture muddy (bentonite - polymer). The rheological study of this work was affected within laboratory CRD and BASP of Hassi messaoud using a viscometer of the type Rhéomètre FANN 266 and Thermo HAAKE VT 550. This study enabled us to analyze the influence of the addition of polymers and salts on the rheological behavior of the bentonitic suspensions. The results obtained showed that the modeling of the curves of flows is practically close to the models of Herschel-Bulkley and Cross.

Key words: Drilling fluids, Behavior low, polymers,

SOMMAIRE

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Liste des symboles	XI
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.1.4. 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
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
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.4.3. L'échange cationique.....	31
IV.5. Formation et utilisations de la bentonite.....	31
IV.5.1. La cristalochimie de la bentonite.....	33
IV.5.2. Les formes d'organisation des feuillets.....	35
Chapitre V : Caractéristiques physico-chimiques des polymères.....	38
V.1. Introduction.....	38
V.2. Structure fondamentale des polymères.....	38

V.3. Les fonctions et les caractéristiques principales des polymères dans les fluides de forage.....	41
V.3.1. Viscosifiants.....	42
V.3.2. Déflocculants	44
V.3.3. Flocculants	45
V.3.4. Surfactants	45
V.3.5. Additifs de filtrat	46
V.4. Polymères utilisés dans les fluides de forage	46
V.4.1. Carboxyméthyl cellulose (CMC)	49
V.4.2. Hydroxyéthyl cellulose (HEC)	50
V.4.3. Polysaccharides microbiens – Gomme de xanthane	51
V.4.4. Gommages naturelles – GUAR	52
V.4.5. Polymères synthétiques	52
V.4.6. Emulsifiants d’huile dans l’eau	54
V.4.7. Emulsifiants d’eau dans l’huile	54
V.4.8. Agents moussants	54
V.4.9. Antimoussants	54
V.4.10. Détergents de boue	54
V.4.11. Lubrifiants	55
V.4.12. Inhibiteur de corrosion	55
<i>Pourquoi utiliser des fluides de forage synthétiques ?</i>	55
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.3.2. 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.6.5. Interaction polymère-polymère	62

VI.7. Zétamétrie	62
VI.7.1. Rappel sur les colloïdes	64
VI.7.2. Potentiel zêta	65
Partie expérimentale	68
Chapitre VII : Matériaux et appareillages.....	68
VII.1. Introduction.....	68
VII.2. Matériaux et appareillages.....	68
VII.2.1. Mode opératoire	70
VII.2.2. Caractérisation des matériaux	70
VII.2.2.1. La bentonite	70
Chapitre VIII : Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions de fluide de forage.....	77
VIII.1. Introduction	77
VIII.2. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des argiles.....	77
VIII.2.1. Etude rhéologique et physico-chimique de suspension bentonitique.....	77
VIII.3. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions des polymères	89
VIII.3.1. Etude de la suspension de CMC	89
VIII.3.2. Etude de la suspension de PAC R	96
VIII.3.3. Etude de la suspension de xanthane.....	103
VIII.4. Etude rhéologique et physico-chimique des Suspensions des mélanges.....	109
VIII.4.1. Etude de la suspension du mélange (xanthane – CMC).....	109
VIII.4.2. Etude de la suspension du mélange (xanthane – PAC R).....	111
VIII.4.3. Comparaison rhéologique entre le mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R)	112
VIII.4.4. Etude de la suspension du mélange (bentonite – PAC R)	114
VIII.4.5. Etude de la suspension du mélange (bentonite – xanthane).....	118
VIII.4.6. Etude de la suspension du mélange (bentonite – xanthane-PAC R).....	123
IX . Conclusion générale.....	126
Références.....	129
ANNEXES.....	132

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Classification des phyllosilicates.	22
Tableau IV.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et peaver, 1988).	24
Tableau IV.3 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux (MOREL)	27
Tableau V.1 : Groupes polaires.	35
Tableau V.2 : Résumé des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales.	36
Tableau V.3 : Types et fonctions des polymères dans les fluides de forage.	40
Tableau VII.1 : Composition chimique de la bentonite locale.....	64
Tableau VII.2 : Résultats de test de conformité des bentonites.	68
Tableau VII.3 : Capacité d'échange cationique (CEC) des bentonites.	69
Tableau VIII.1 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3%.....	73
Tableau VIII.2 : Comportement de stabilité du colloïde en fonction de potentiel zêta.	73
Tableau VIII.3 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3%.	80
Tableau VIII.4 : Comportement de stabilité du colloïde en fonction de potentiel zêta.....	82

LISTE DES FIGURES

Partie bibliographique

Fig. II.1 : Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.	8
Fig.III.1 : Contrainte relative de différents types de la matière en fonction de temps de relaxation.	11
Fig.III.2 : Différents types de cisaillement.	12
Fig.III.3: Profil de viscosité typique pour une dispersion ou solution de polymère.	17
Fig.III.4: Viscosité en fonction de taux du cisaillement de différents paramètres «C» et «m».	17
Fig. IV.1 : Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).....	20
Fig. IV.2 : Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988)	20
Fig. IV.3 : l'agencement des tétraédrites et des octaèdres (Moore et Reynolds 1989)	21
Fig. IV.4 : Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995)	25
Fig. IV.5 : Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).	26
Fig. IV.6 : Représentation de la structure cristalline d'une smectite hydratée et représentation simplifiée des tétraèdres et octaèdres par Sandrine PAUMIER.....	29
Fig. IV.7 : Formes d'organisations supposées 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.	30
Fig. IV.8 : Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de bentonite (smectite) de l'état sec aux suspensions diluées puis concentrées proposée par PAUMIER.	32
Fig. V.1 : Effet de concentration sur la viscosité d'un polymère soluble à l'eau et à poids moléculaire faible et élevé.	37
Fig. V.2 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible poids moléculaire et le rôle de floculation des polymères à haut poids moléculaire.....	38

Fig. VI.1 : Energie d'interaction totale en fonction de la distance interparticulaire.	49
Fig. VI.2 : Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), flocculé (B) et coagulé (C) [Yang et al. (1997)]......	50
Fig. VI.3 : Double couche électrique.	51
Fig. VI.4 : Schéma de la double couche électrique.....	52
Fig. VI.5 : Schéma illustrant les origines des forces d'attraction Van der Waals.	52
Fig. VI.6 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale stable.	53
Fig. VI.7 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale instable manifestant une floculation à un niveau élevé d'électrolytes.....	54
Fig. VI.8 : Schéma représente les mécanismes d'adsorption les polymères sur les argiles.	56
Fig. VI.9 : Diagramme de la position de la face de cisaillement dans une double couche diffuse.....	57

Partie expérimentale

Fig. VII.1 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale (Maghnia).	65
Fig. VII.2 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale (Mostaganem).	66
Fig. VII.3 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite d'importation (Aquagel).	67
Fig. VIII.1 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite pour différentes concentrations.....	72
Fig. VIII.2 : Effet de la concentration en bentonite sur la viscosité apparente, viscosité plastique et la yield point.	72
Fig. VIII.3 : Effet de la concentration en bentonite sur le pH en fonction du temps de vieillissement.....	73
Fig. VIII.4 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.	74
Fig. VIII.5 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.	75
Fig. VIII.6 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de la température d'une suspension de bentonite 3%.	75
Fig. VIII.7 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents sels.	76
Fig. VIII.8 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents sels.	77
Fig. VIII.9 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différents sels d'une suspension de bentonite 3%.....	77
Fig. VIII.10 : Effet de la d'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.	79
Fig. VIII.11 : Effet de la d'alcalinité sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.....	79
Fig. VIII.12 : Effet de la d'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3%.	80

Fig. VIII.13 : 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%.....	80
Fig. VIII.14 : Effet de la concentration de la bentonite sur le potentiel zêta.	81
Fig. VIII.15 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.....	83
Fig. VIII.16 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.	84
Fig. VIII.17 : Effet de la concentration de CMC sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.....	84
Fig. VIII.18 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.	85
Fig. VIII.19 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement à l'échelle logarithmique.	86
Fig. VIII.20 : Effet de la température sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.	86
Fig. VIII.21 : Effet du sel sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.	88
Fig. VIII.22 : Effet du sel sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.	88
Fig. VIII.23 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de CMC.	89
Fig. VIII.24 : Effet de la concentration de PAC R sur la contrainte de cisaillement de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.	90
Fig. VIII.25 : Effet de la concentration de PAC R sur la viscosité de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.	91
Fig. VIII.26 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.	91
Fig. VIII.27 : Effet de la température sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.	92
Fig. VIII.28 : Effet de l'ajout des sels sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.	93

Fig. VIII.29 : Effet de l'ajout des sels sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.	93
Fig. VIII.30 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de PAC R.	94
Fig. VIII.31 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de polymère.	94
Fig. VIII.32 : L'état de CMC et de PAC R lors d'hydratation , dans le cas (Eau –polymère).	95
Fig. VIII.33 : (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.	95
Fig. VIII.34 : Effet de la concentration de xanthane sur la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.	96
Fig. VIII.35 : Effet de la concentration de xanthane sur la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.	97
Fig. VIII.36 : Effet de la température sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.	98
Fig. VIII.37 : Evolution de la contrainte de cisaillement de différentes concentrations de xanthane sur la température en fonction de taux de cisaillement.	98
Fig. VIII.38 : Evolution de la viscosité apparente de différentes concentrations de xanthane sur la température en fonction de taux de cisaillement.	99
Fig. VIII.39 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.	100
Fig. VIII.40: Effet des sels sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.	100
Fig. VIII.41 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de Xanthane.	101
Fig. VIII.42 : Effet de l'ajout de CMC sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.	102
Fig. VIII.43 : Effet de l'ajout de CMC sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.	103
Fig. VIII.44 : Effet de l'ajout de PAC R sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.	103
Fig. VIII.45 : Effet de l'ajout de PAC R sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.	104

Fig. VIII.46 : Comparaison entre la contrainte de cisaillement de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	105
Fig. VIII.47 : Comparaison entre la viscosité de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	105
Fig. VIII.48 : Comparaison entre le potentiel zêta de (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R).	106
Fig. VIII.49 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	107
Fig. VIII.50 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.....	107
Fig. VIII.51 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	109
Fig. VIII.52 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	109
Fig. VIII.53 : Effet de NaOH sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.	110
Fig. VIII.54 : Influence de l'ajout de PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite.	110
Fig. VIII.55 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	112
Fig. VIII.56 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	112
Fig. VIII.57 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	113
Fig. VIII.58 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	113
Fig. VIII.59 : Effet de NaOH sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	114
Fig. VIII.60 : Effet de NaOH sur la viscosité apparente de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.	114
Fig. VIII.61 : Potentiel zêta en fonction de (Bentonite – CMC), (bentonite – PAC R) et (bentonite – xanthane).	115

Fig. VIII.62: Influence de l'ajout du xanthane – PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%).....	116
Fig. VIII.63: Influence de l'ajout du xanthane – PAC R sur la viscosité de la suspension de bentonite (3%).....	117
Fig. VIII.64 : Potentiel zêta en fonction de (bentonite – xanthane – PAC R).	118

Liste des symboles

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

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. [SAFI, B., (2002)]

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 rotative 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 baser 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. [SAFI, B., (2002)], [SLIMANI, S., (2002)], [PAUMIER, S., (2006)]

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.[
ABEND, S. & LAGALY, G]

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).

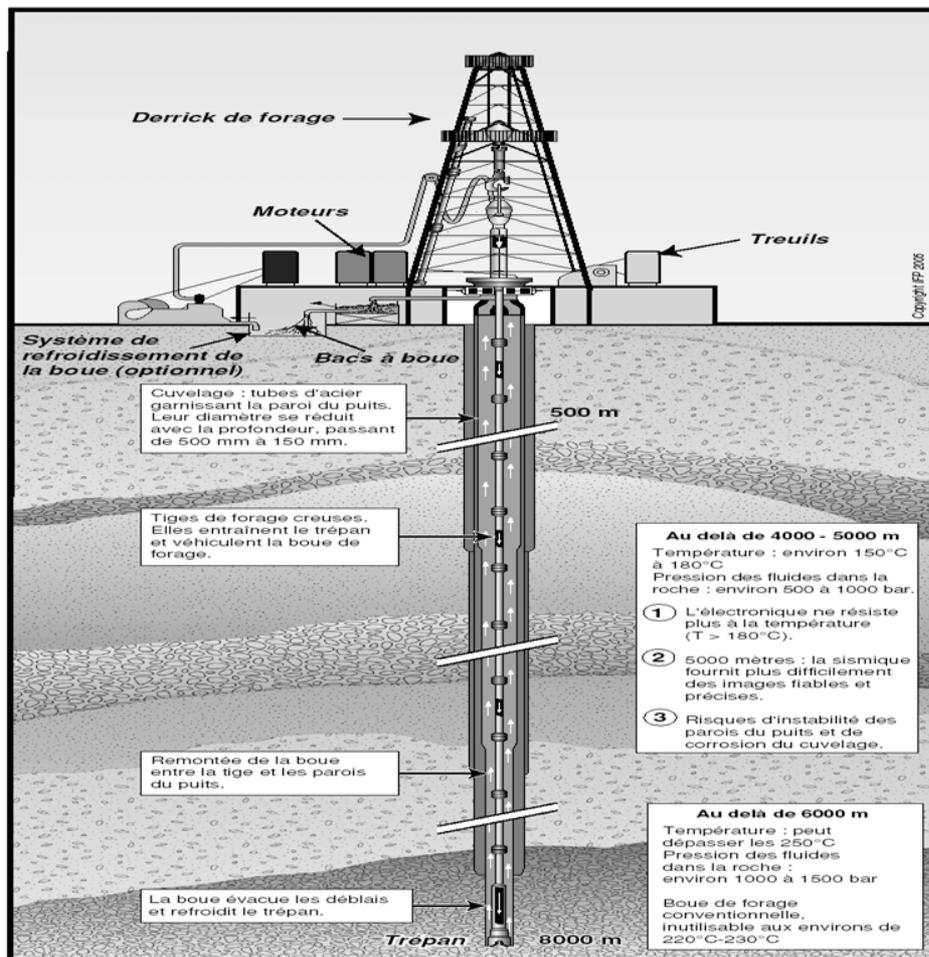


Fig. II.1 : Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.

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. [SAFI, B., (2002)], [SLIMANI,S.,(2002).]

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.

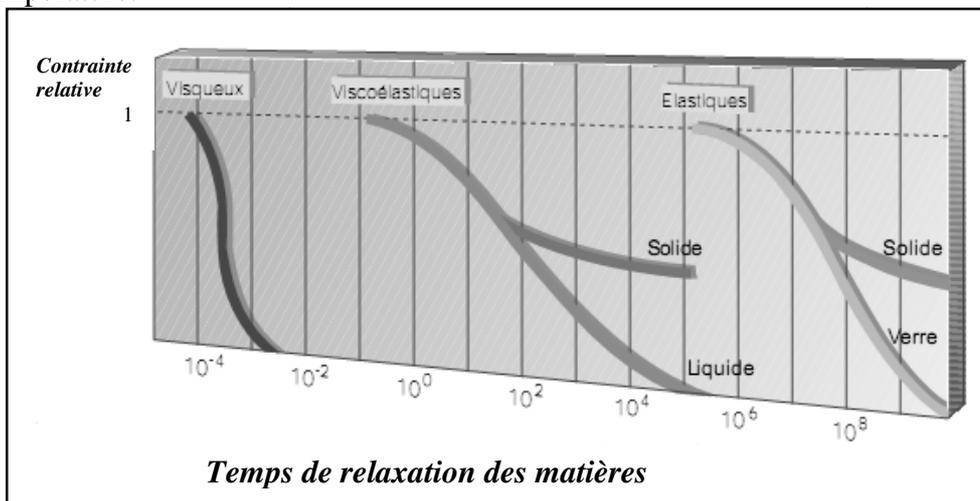


Fig.III.1 : Contrainte relative de différents types de la matière en fonction de temps de relaxation.

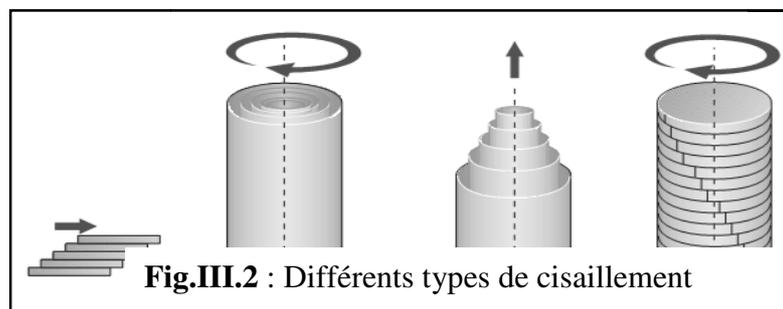
A l'inverse, on décrit habituellement les solides comme étant des matières élastiques. Une matière élastique parfaite emmagasine toute l'énergie de déformation imposée et revient par conséquent complètement à son état dès que l'on relâche la contrainte. Ainsi, on peut dire d'un fluide visqueux qu'il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



On définit la contrainte de cisaillement comme étant

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

Avec F : Force (N) et A : Surface (m^2)

et le taux de cisaillement comme étant

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

et la viscosité apparente d'un fluide comme étant

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

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 [Philippe, j.p., (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) et $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1}).

III.6.2. Modèle Bingham

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

avec τ_0 : contrainte seuil (Pa) et μ_∞ : viscosité infinie (Pa.s).

III.6.3. 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 et n : paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 et pouvant être considéré comme une indice de structure.

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. 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.

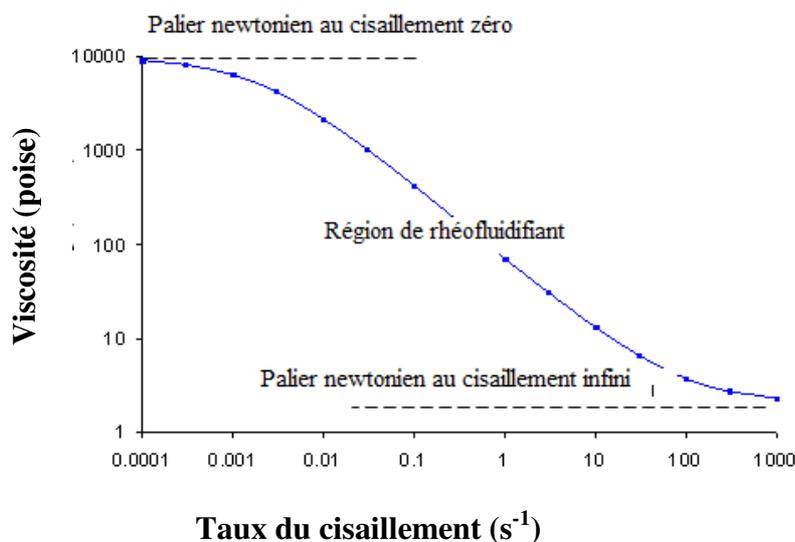


Fig.III.3: Profil de viscosité typique pour une dispersion ou solution de polymère.

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

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

Avec η_0 : La viscosité au cisaillement zéro ; η_{∞} est la Viscosité à l'infini de cisaillement ; "m" est connu sous le nom (Cross) constante de taux et "C" est connu comme le constant du temps de Cross (ou parfois de la consistance).

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.

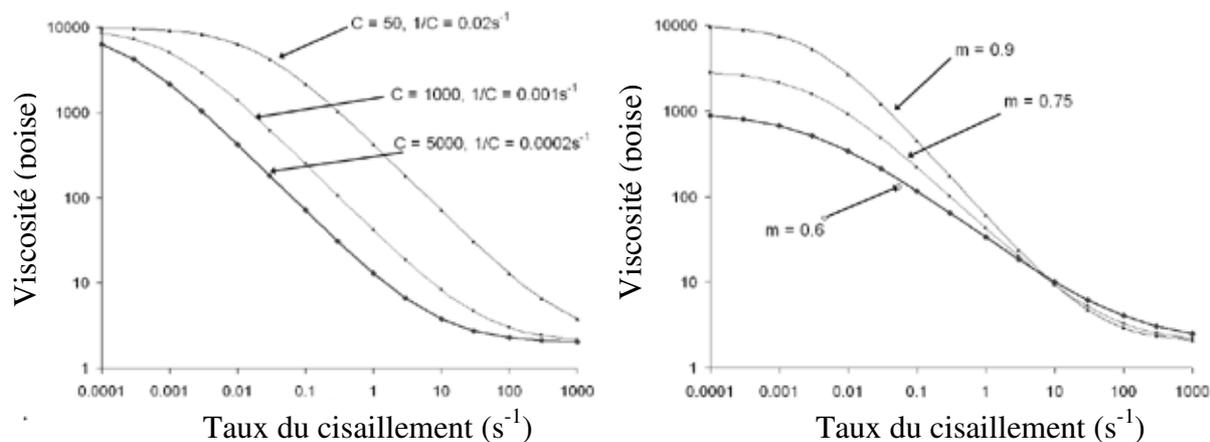


Fig.III.4: Viscosité en fonction de taux du cisaillement de différents paramètres «C» et de «m».

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 μm 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 les quelles 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. [KHERFELLAH, N.; BEKKOUR, S.; & BENHADID, K., (2005)], [KHODJA, M. & KHODJA, S., (1999)]

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. [PAUMIER, S., (2006)]

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 :

IV.2.1 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.

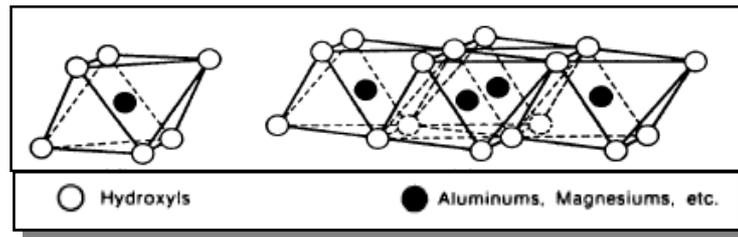


Fig. IV.1 : Structure laminaire des unités octaédriques [Eslinger et Peaver 1988].

IV.2.2 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 $\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_4$.

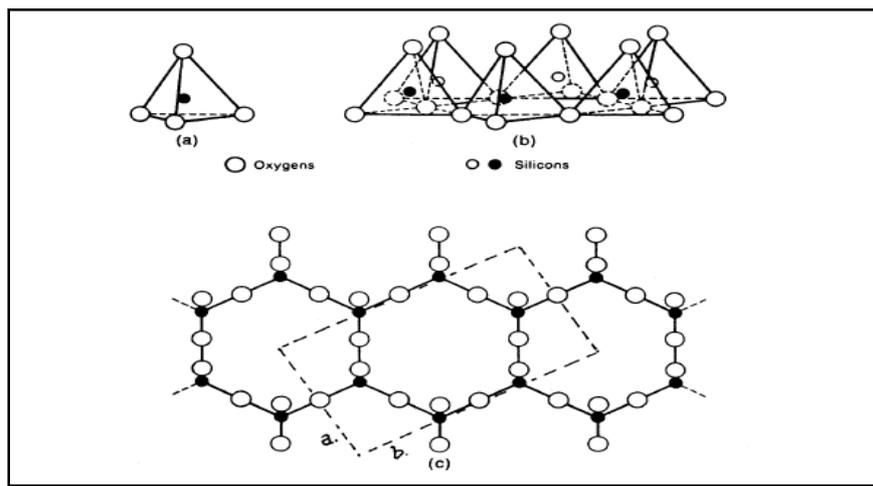


Fig. IV.2 : Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988).

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. [PAUMIER, S., (2006)]

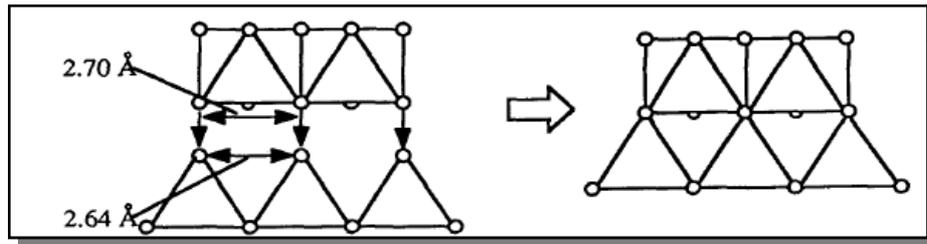


Fig. IV.3 : l'agencement des tétraédrites et des octaèdres [Moore et Reynolds 1989]

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	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $4H_2O$
		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	Vermiculites	vermiculite dioctaédrique	vermiculite dioctaédrique	$(Al,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
		vermiculite trioctaédrique	vermiculite	$(Mg,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
	micas	Micas dioctaédrique	muscovite	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
		Micas trioctaédrique	phlogopite	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
		chlorite dioctaédrique	sudoite	$Al_4Si,Al_4O_{10}(OH)_8$
2/1/1	chlorite	chlorite trioctaédrique	espèces différentes	$(Mg,Fe...)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$

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

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 μm).

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

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=14Å°)

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 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.

IV.3.4. Chlorites (2/1, d=14Å°)

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.

IV.3.5. Vermiculite (2/1, d=12Å°)

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. [SHEN, Z., (2004).]

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.

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. 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

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. IV.4). 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.

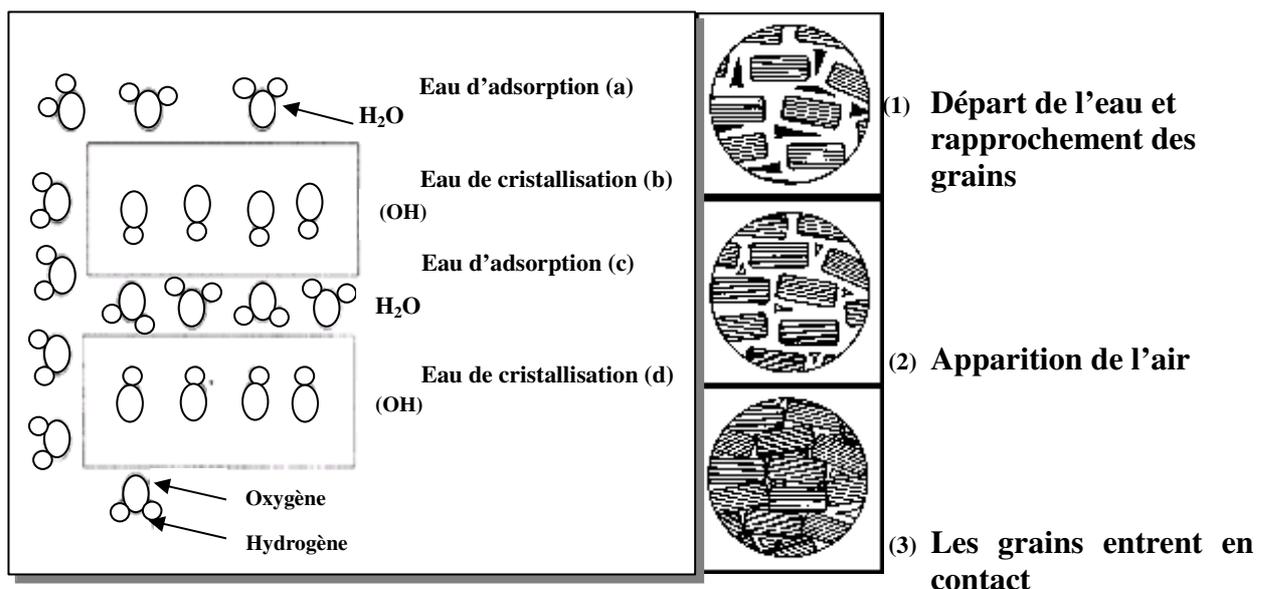


Fig. IV.4 : Localisation de l'eau dans les particules argileuses (Velde, 1995).

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^{2+} 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 (-).

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. IV.5).[BOUSSAK, H., (2008)]

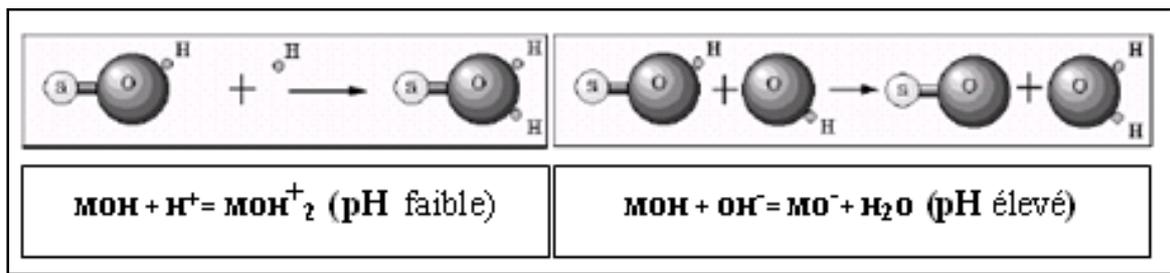


Fig. IV.5 : Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

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. [BESQ, A; MALFOY; C. PANTET, A; MONNET, P. & RIGHI, D., (2003)]

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 [DDANI, M.; MEUNIER, A.; ZAHRAOUI, M.; BEAUFORT, D.; EL WARTITI, M.; FONTAINE, C.; BOUKILI, B. & EL MAHI, B., (2005)]. 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 [BERGAYA, F. & LAGALY, G., (2001)], [MURRAY, H.H., (2001)], [MEUNIER, A., (2003)]. En particulier, les smectites contenues dans les bentonites confèrent des propriétés adsorbantes, d'étanchéité, de transport ou de liant largement utilisées dans la construction [BESQ, A; MALFOY; C. PANTET, A; MONNET, P. & RIGHI, D., (2003)], [MALFOY, C.; DDANI, M.; PANTET, A. & MONNET, P., (2006)], l'industrie chimique [PERMIEN, T. & LAGALY, G., (1995)] [LAGALY, G. & ZIESMER, S., (2003)] et l'ingénierie environnementale [DIDIER, G. & COMEAGA, L., (1988)], [COUSSOT, P., (1992)].

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. [PAUMIER, S., (2006)]

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 [KHERFELLAH, N.; BEKKOUR, S.; & BENHADID, K., (2005)].

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 Å, ce groupe réunit de nombreux minéraux (talca, mica, illite, smectite).

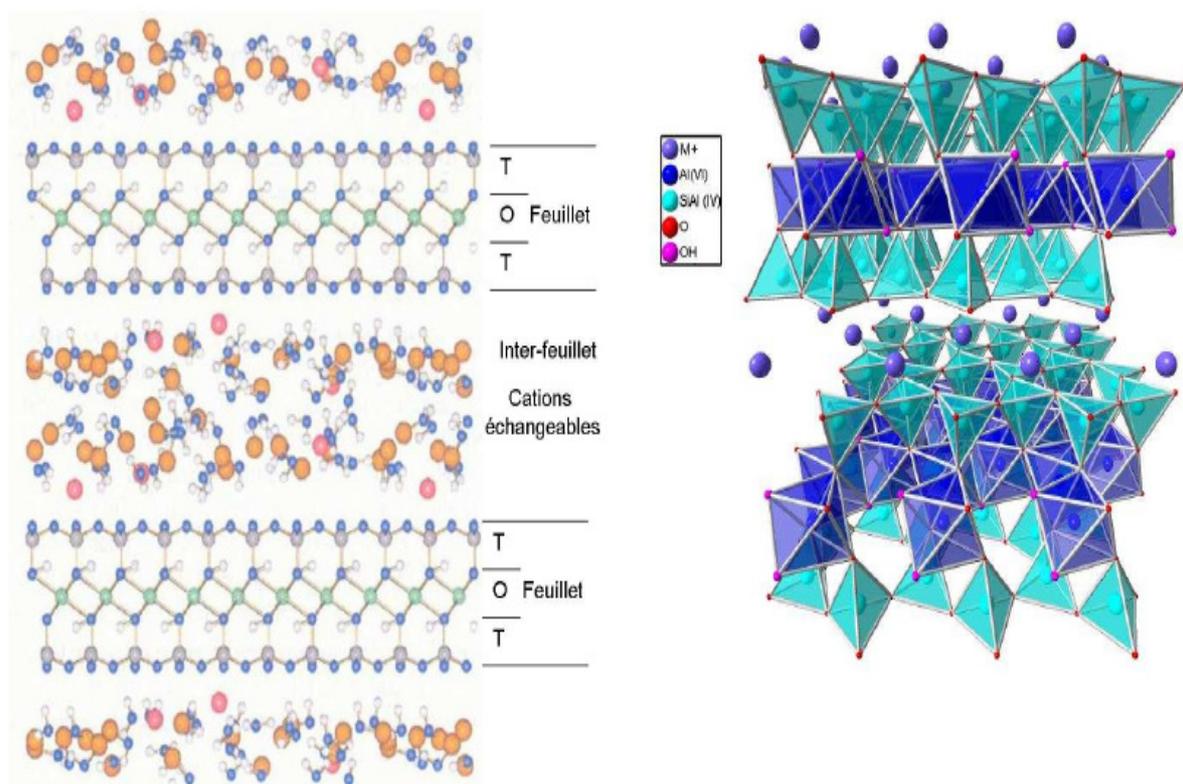


Fig. IV.6 : Représentation de la structure cristalline d'une smectite hydratée et représentation simplifiée des tétraèdres et octaèdres [PAUMIER, S., (2006)].

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 suspensé et le cortège d'échange.

IV.5.2. Les formes d'organisation des feuillets

Les feuillets dispersés dans la suspension (Fig. IV.7, 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 [WEISS, A. & FRANCK, R., (1961)] :

- 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).

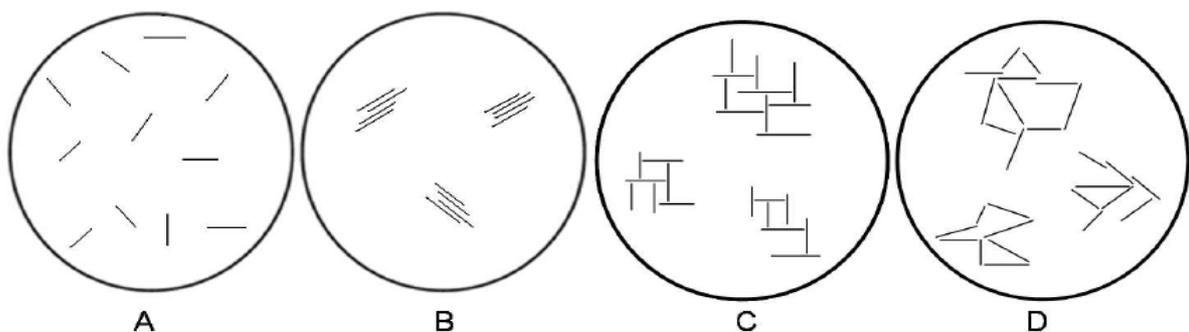


Fig. IV.7 : Formes d'organisations supposées des feuillets de montmorillonite en suspension selon la théorie de Van Olphen: A. dispersion, B. association face/face, C. association bord/face, D. association bord/bord. [VAN OLPHEN, H., (1977)]

- 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.7 ,cas B),

– soit la création d'une structuration extensive dans la suspension par recouvrement partiel tel que le modèle en bandes. [WEISS, A. & FRANCK, R., (1961)]

La flexibilité de la structure obtenue pourrait permettre l'obtention d'un réseau tridimensionnel. Plusieurs auteurs [BRANDENBURG, U & LAGALY, G., (1988)], [KHANDAL, R.K. & TADROS, T.F., (1988)], [VALI, H. & BACHMANN, L., (1988)], [LAGALY, G., (1989)] confirment cette interprétation, Abend et Lagaly [ABEND, S. & LAGALY, G., (2000)] 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 poraux intra-particulaires, interparticulaires et inter-agrégats. [TOURET, O.; PONS, C.H.; TESSIER, D., & TARDY, Y., (1990)]

- 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 [NORRISH, K., (1954)]. 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.

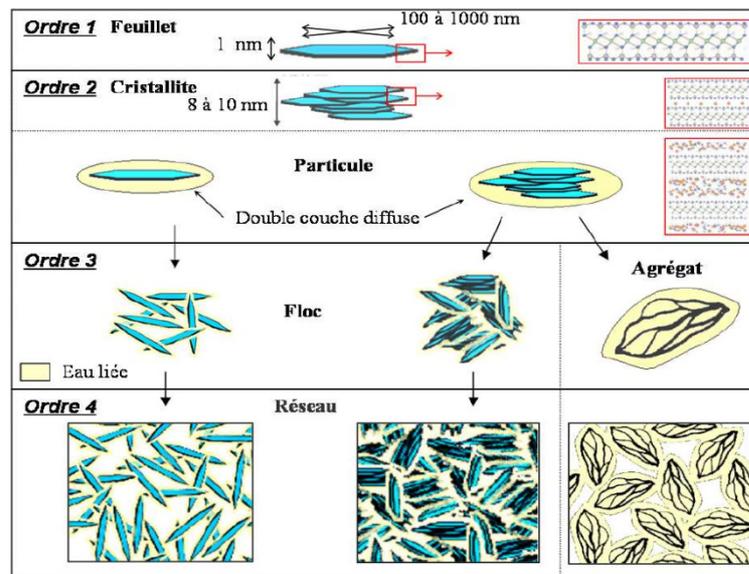


Fig. IV.8 : Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de bentonite (smectite) de l'état sec aux suspensions diluées puis concentrées. [PAUMIER, S., (2006)]

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.8).

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 :

- **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.

- **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 ioniques.
- (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-ionique 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 ⁺

- **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. 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.

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 gélation	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.1 donne la relation entre la concentration et la viscosité pour deux polymères de poids moléculaires différents.

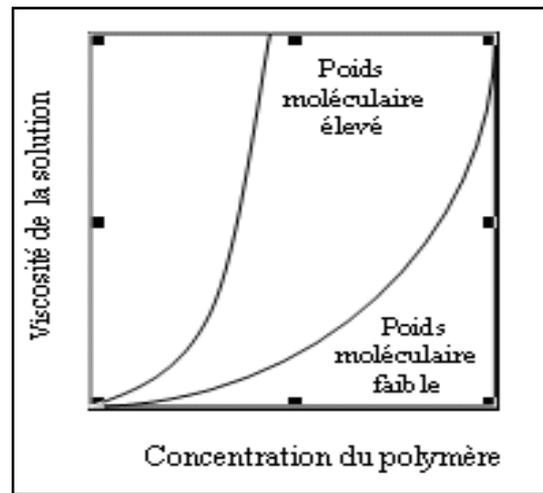


Fig. V.1 : Viscosité en fonction de la concentration de différents poids moléculaire de polymère soluble dans l'eau.

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.2 . 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.

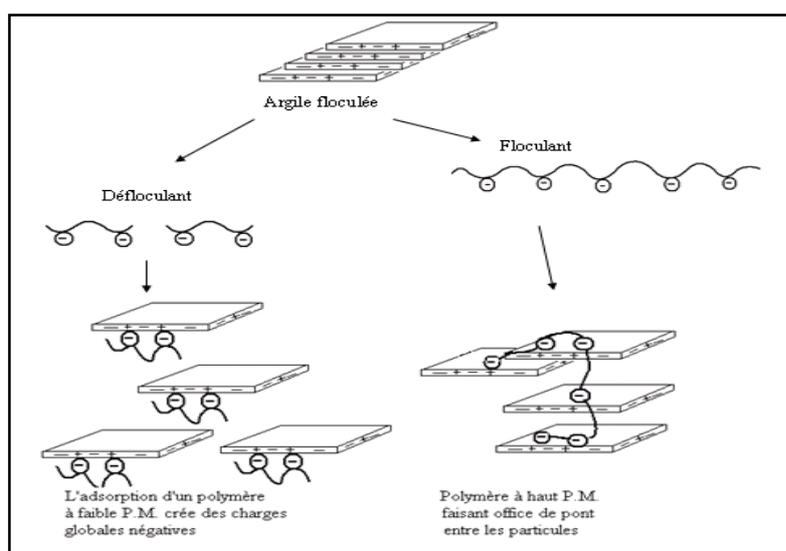


Fig. V.2 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible poids moléculaire et le rôle de floculation des polymères à haut poids moléculaire.

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.2 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.

V.3.5. Additifs de filtrat

Les additifs polymères peuvent affecter le filtrat, essentiellement, par trois mécanismes différents. Un cake déflocculé va se tasser pour former un cake plus mince et plus imperméable de façon à ce que les polymères qui agissent comme déflocculants, 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 élevés 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.

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.

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.3 : Types et fonctions des polymères dans les fluides de forage.

Types de polymères	Description	Exemples	Fonctions
Ether de carboxyméthyl 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'hydroxyéthyl 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 -COO ⁻ on ionique ou anionique	Maïs, pomme de terre, tapioca etc...avec modifications chimiques variables.	Contrôle du filtrat dans les solutions salées.
Polysaccharide à gommes bactériennes	Polysaccharide structure complexe ramifiée – quelques groupes anioniques. Poids moléculaire élevé	Gommes Xanthan	Viscosifiant surtout dans l'eau salée et là où des propriétés de suspension sont nécessaires
Gommes 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 causticisée	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 $\text{CH}_2=\text{CH COOH}$	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-$ $\text{O-Na} \quad \text{O-Na}$	Faible poids moléculaire < 1.000 fluidifiant Floculant à haut P.M.
Polymère vinyle	Co-polymère d'acide acrylique et acrylamide avec rapports différents	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{O}}{\text{CH}}-$ $\text{O-Na}^+ \quad \text{NH}_2$	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

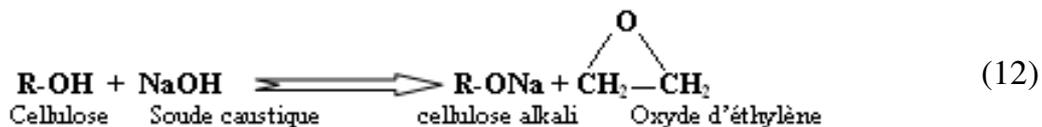
V.4.1. Carboxyméthyl cellulose (CMC)

Dans le cas des CMC, un groupe carboxyméthyl (-CH₂COOH) est fixé à un atome de carbone par une liaison éther. 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.

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 :



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. 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.

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.

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.

V.4.5.1 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.

V.4.5.2 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.

V.4.5.3 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 éthxylatés à longues chaînes, peuvent être utilisés dans ce but.[PAUMIER, S., (2006)]

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.).[FOURAR, K., (2006)]

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 :

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

$$K = \sqrt{\frac{2e^2 \rho z^2}{\epsilon_0 k_B T}} \quad (14)$$

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.

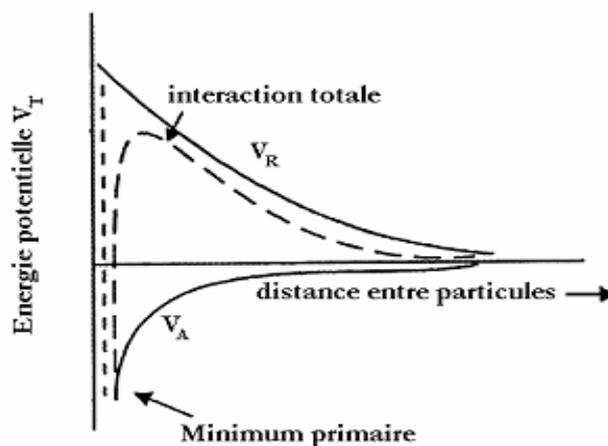


Fig. VI.1 : Energie d'interaction totale en fonction de la distance interparticulaire.

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 matériau 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.

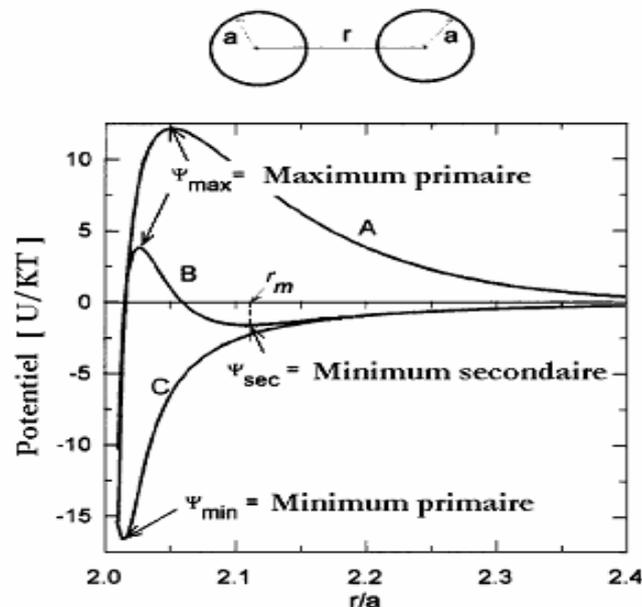


Fig. VI.2 : Schématisation de l'évolution du potentiel d'interaction en fonction de la distance interparticulaire pour des dispersions : stable (A), floculé (B) et coagulé (C) [Yang et al. (1997)].

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 attiré 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 opposés 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. [PAUMIER, S., (2006)]

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.

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

Où ϕ : Potentiel entre le noyau et la couche fixe et ξ Potentiel Zêta.

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

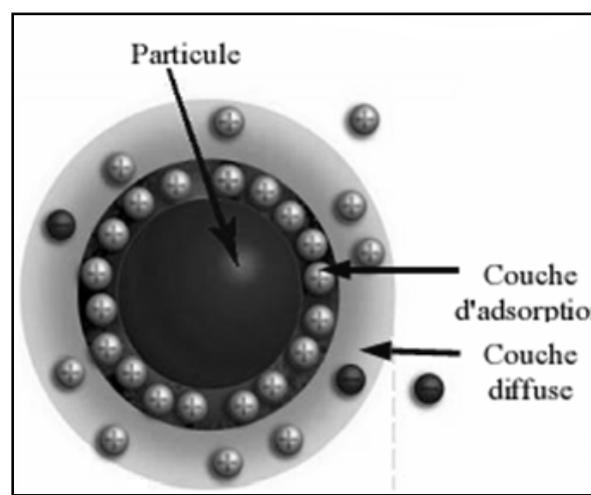


Fig. VI.3 : Double couche électrique

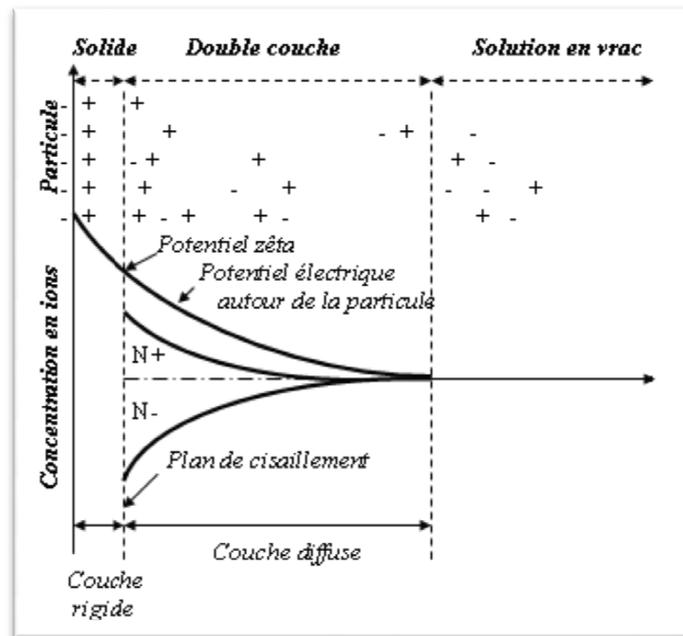


Fig. VI.4 : Schéma de la double couche électrique.

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.

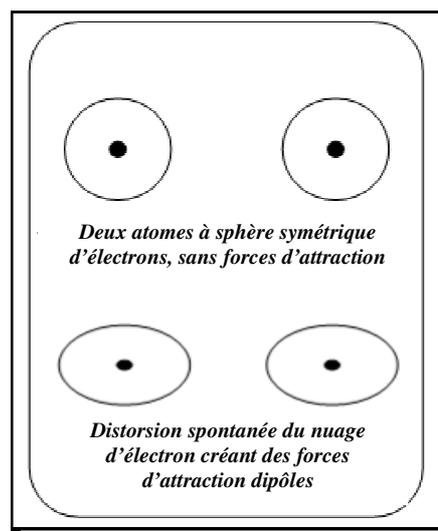


Fig. VI.5 : Schéma illustrant les origines des forces d'attraction Van der Waals.

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.

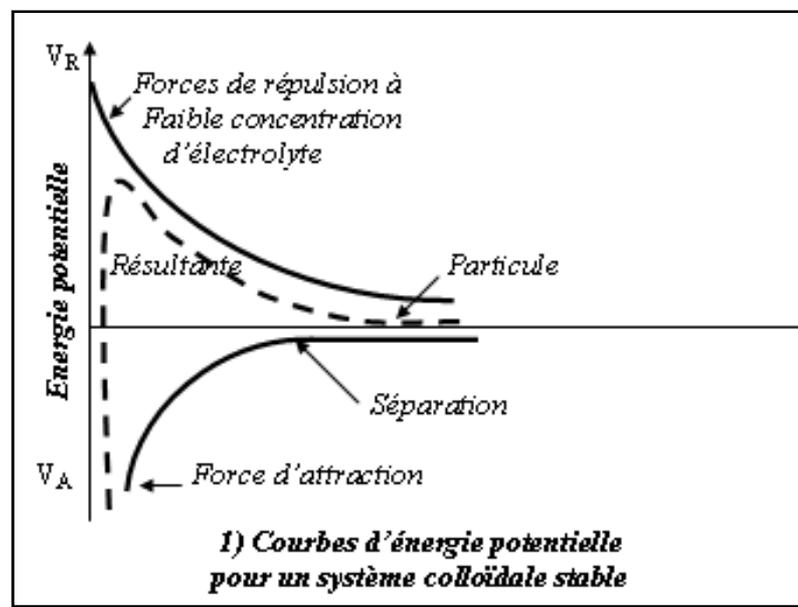


Fig. VI.6 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdale stable.

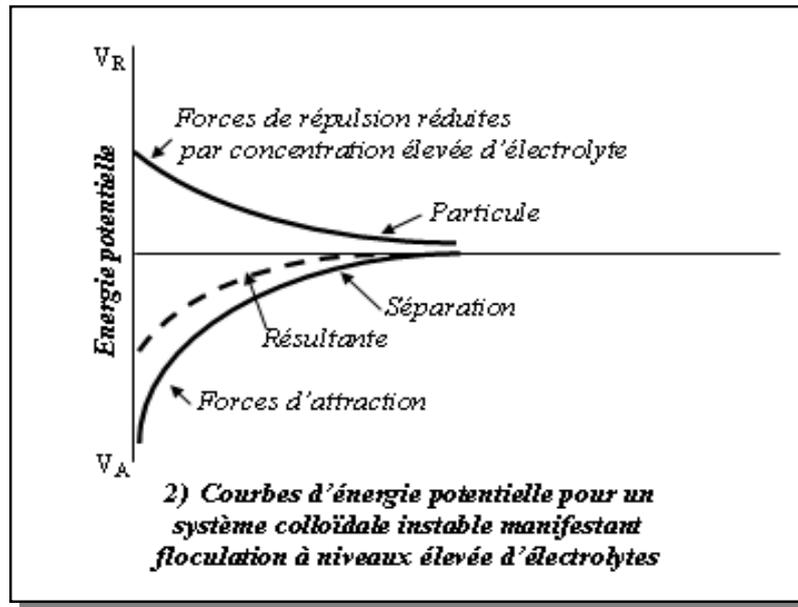


Fig. VI.7 : Courbes d'énergie potentielle pour un système colloïdal instable manifestant une floculation à un niveau élevé d'électrolytes.

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 floculants. 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)]. [BENCHABANE, A., (2006)]

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.

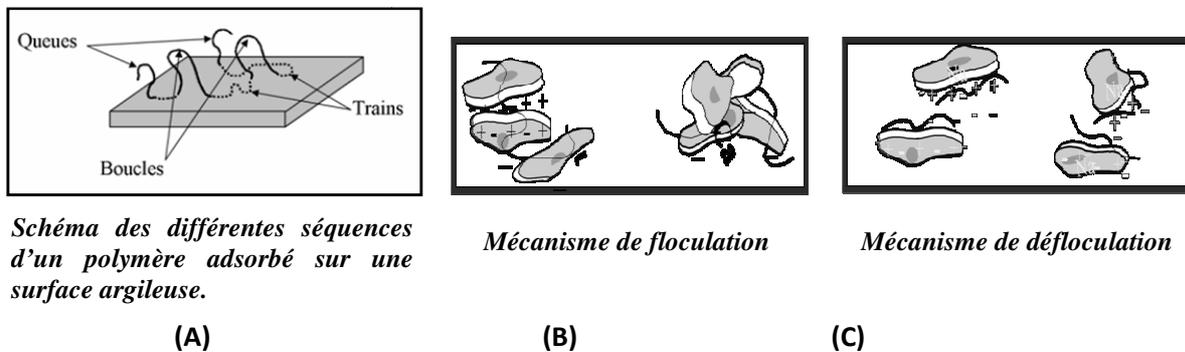


Schéma des différentes séquences d'un polymère adsorbé sur une surface argileuse.

Fig. VI.8 : Schéma représentant les mécanismes d'adsorption les 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 élevés que les polymères plus courts ou à poids moléculaire faible. [PAUMIER, S., (2006)]

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 entres eux. Ces deux cas d'attraction résumant 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 [BENCHABANE, A., (2006)]

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 \AA , de la surface des particules colloïdales. [DELGADO, A.V., (2005)]

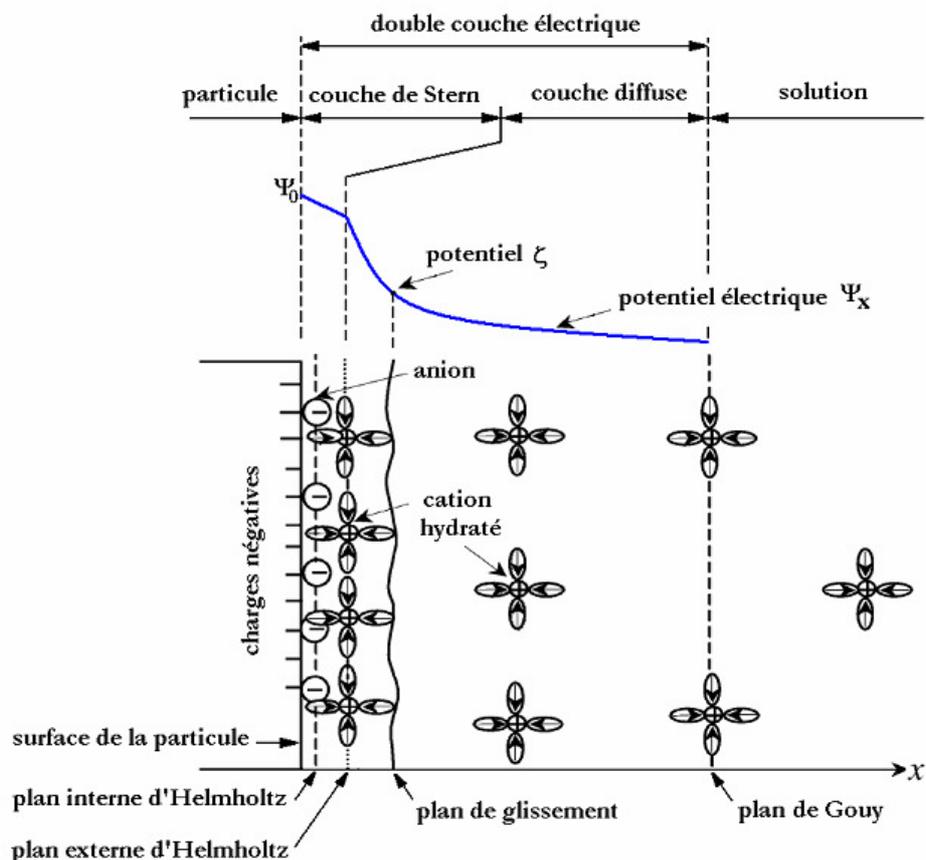


Fig. VI.9 : Diagramme de la position de la face de cisaillement dans une double couche diffuse Suivant [Güven et Pollastro, (1992) ; Li et al. (2003)].

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 zêtamétrie permet également de caractériser la stabilité de suspensions colloïdales en fonction de différents paramètres (pH, concentration en ions ou en tensioactifs). [SHEN, Z., (2004)]

Il est ainsi possible de caractériser le comportement de certains ions en contact avec une surface chargée (adsorption spécifique ou interaction purement électrostatique). [TERRISSE, H. (2001)]

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 floculant (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 ($\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n$). Les modèles de Bingham et d'Ostwald ont été les plus utilisés dans le passé car ils donnent lieu à des formules de calcul des pertes de charge assez simples. Actuellement, c'est le modèle d'Herschel-Bulkley qui s'impose, car il 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. Tous les essais ont été effectués au sein du laboratoire CRD de HASSI MESSAOUD et aux laboratoires de la société Baroid de Services aux Puits (BASP) à Hassi Messaoud.

VII.2. Matériaux et appareillages

La bentonite qu'on a choisie est l'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 avons utilisé au début un Rhéomètre FANN 266 à vitesse variable (voir Photo n°1 dans l'annexe A) pour des concentrations en bentonite de 3% et 6% puis nous avons refait quelques tests avec un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550 » (voir Photo n°2 dans l'annexe A) qui nous a permis d'obtenir des graphes de variation de viscosité et vitesse de cisaillement aussi précis que le premier pour des concentrations en

bentonite de 3%. Des interprétations de résultats ont abouti à des conclusions et recommandations.

Ces viscosimètres sont de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique. La détermination de la viscosité, de la contrainte seuil et de la thixotropie. La technique la plus utilisée avec le dernier 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) a pour but de maintenir la température à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Nous avons choisi le système couette de notre viscosimètre en utilisant la géométrie NV. Cette dernière a 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 de 9 cm^3 . Ce viscosimètre est recommandé pour les fluides de faible viscosité (2 - 2000 m.pas) et de taux du cisaillement compris entre ($27\text{-}27000 \text{ s}^{-1}$). Tous les résultats sont montrés dans l'affichage numérique intégré de LED ou dans le Rheowin-logiciel facultatif de HAAKE.

Les systèmes Zetasizer de Malvern Instruments (voire Photo n°3 dans l'annexe A), permettent une mesure scientifique et objective faisant 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.

Nous avons aussi utilisé un filtre presse API (voire Photo n°4 dans l'annexe A) pour la mesure de filtrat et un densimètre à boue pour mesurer la densité (voir Photo n°5 dans l'annexe A).

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 :

- Pour 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 1/2 heure à l'aide d'un mixeur Hamilton Beach (voire Photo n°6 dans l'annexe A).

- Pour 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 1/2 heure 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 soumis à une agitation magnétique, puis on ajoute la quantité voulue du mélange dans cette eau salée. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 1/2 heure.

Notons qu'avant chaque test rhéologique, le mélange est agité pendant 10 minutes.

VII.2.2. Caractérisation des matériaux

VII.2.2.1. La bentonite

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Bouhrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes.

Les trois bentonites qu'on a utilisé, deux sont locale et issue du gisement de Maghnia, de Mostaganem (bentonite locale) et l'autre est une bentonite d'importation. La montmorillonite est le minéral argileux prépondérant dans ces trois types de bentonite.

L'analyse granulométrique a été effectuée au laboratoire de la société Baroid de Services aux Puits (BASP) avec un granulomètre du type Le BECKMAN COULTER LS (voir Photo n°8 dans l'annexe A).

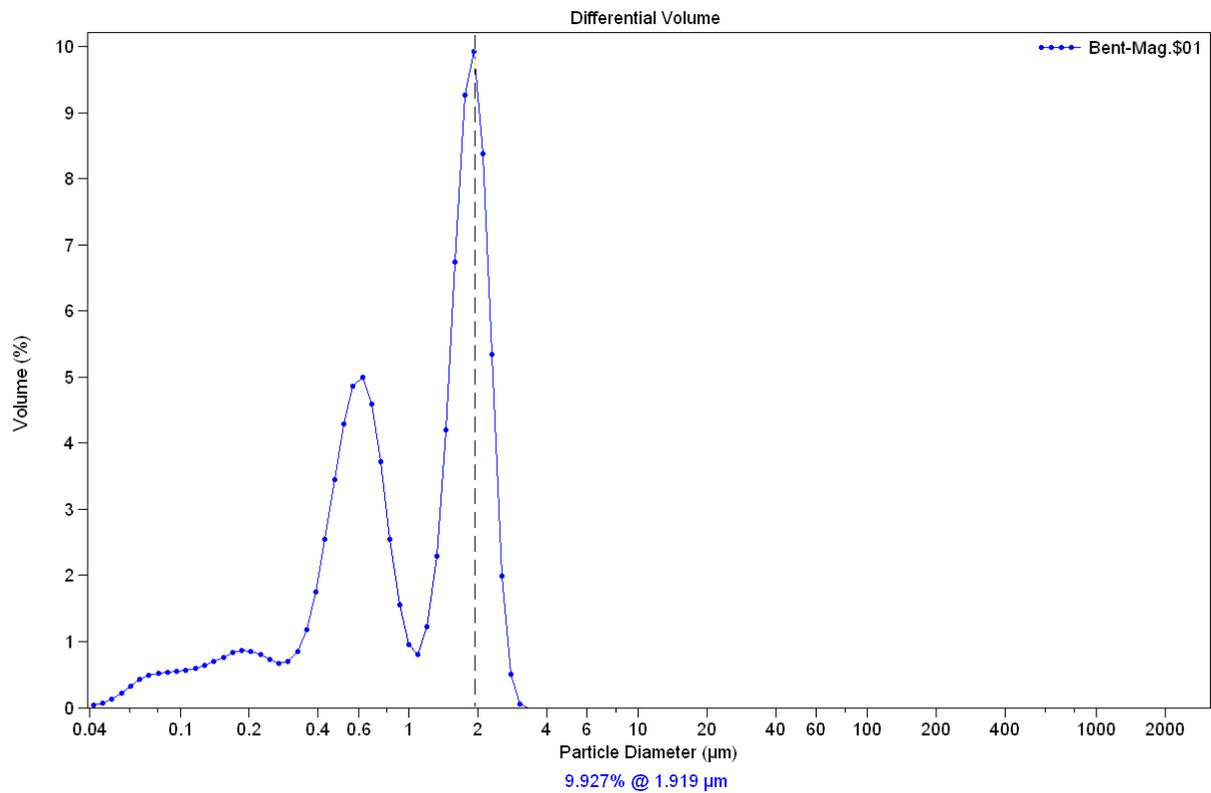
Cette analyse nous a permis d'avoir la conformité des bentonites en se basant sur la granulométrie des particules qui est relative à leur suspension et à leur hydratation.

D'après l'analyse qu'on a effectuée, nous avons trouvé que le diamètre le plus fréquent dans une distribution des particules de la bentonite est de (1,919 μm , 2,107 μm et 3,059 μm) et la surface spécifique est de (0,188 m^2/g , 0,166 m^2/g et 0,154 m^2/g) pour Maghnia, mostaganem et Aquagel successivement (Fig. VII.1, Fig. VII.2 et Fig. VII.3).

Ces résultats montrent que la granulométrie la plus fine est celle de la bentonite de Maghnia par rapport à celle de Mostaghanem (bentonites locales) et la bentonite de Mostaghanem est fine que celle d'importation (Aquagel). Ces résultats permettent d'utiliser ces poudres dans les systèmes colloïdaux.

Tableau VII.1 : Composition chimique de la bentonite:

% Poids	SiO ₂	TiO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O+	H ₂ O-	P ₂ O ₅	SO ₃
MAG	58,89	ND	17,37	3,32	ND	0,07	3,37	1,06	1,32	1,3	4,46	8,26	0,05	0,68
MOST	65,5	ND	13,85	2,91	0,7	0,03	2,27	1,86	2,22	0,97	3,27	6,06	0,06	0,02
AQUAGEL	64,3	ND	19,80	4,04	2,06	ND	2,03	0,73	2,81	0,44	1,44	2,11	ND	ND



Volume Statistics (Arithmetic) Bent-Mag.\$01

Calculations from 0.0400 µm to 2000 µm

Volume: 100%

Mean: 1.187 µm

Median: 1.141 µm

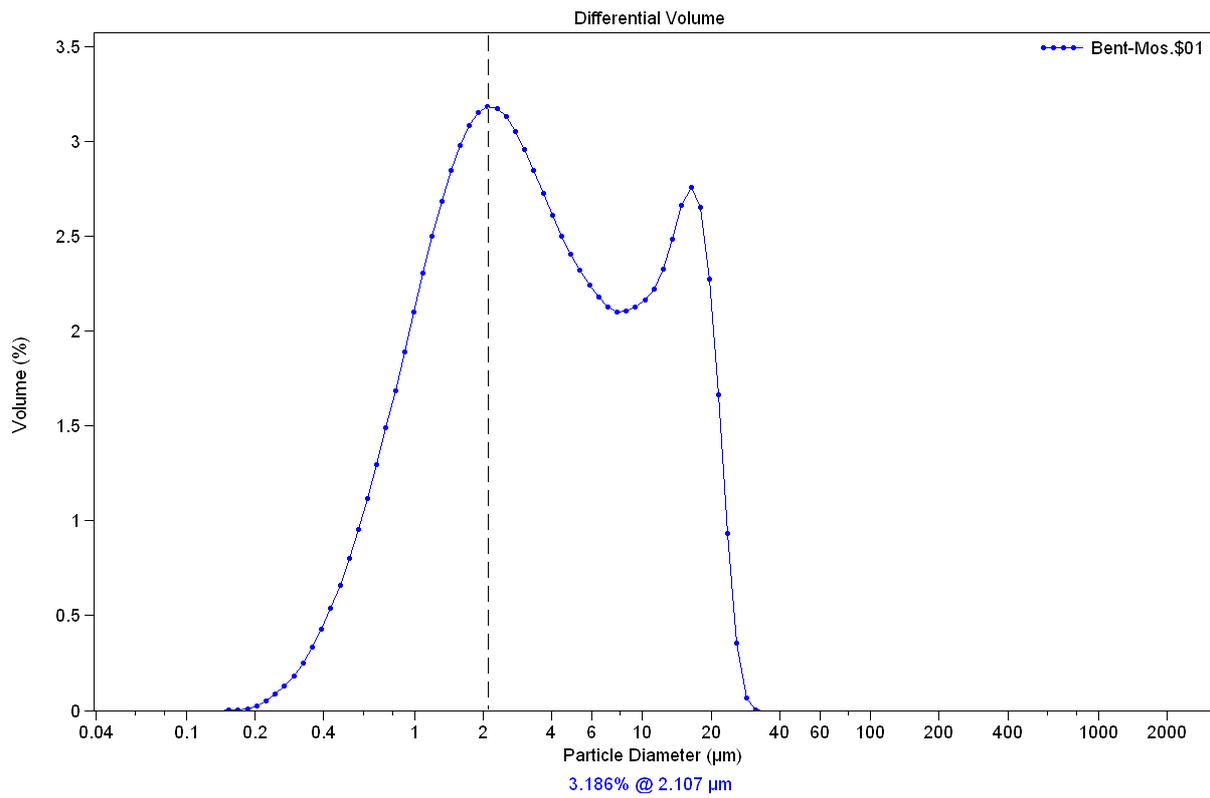
Mean/Median Ratio: 1.041

Mode: 1.919 µm

% >	10	25	50	75	90
µm	2.158	1.853	1.141	0.533	0.239

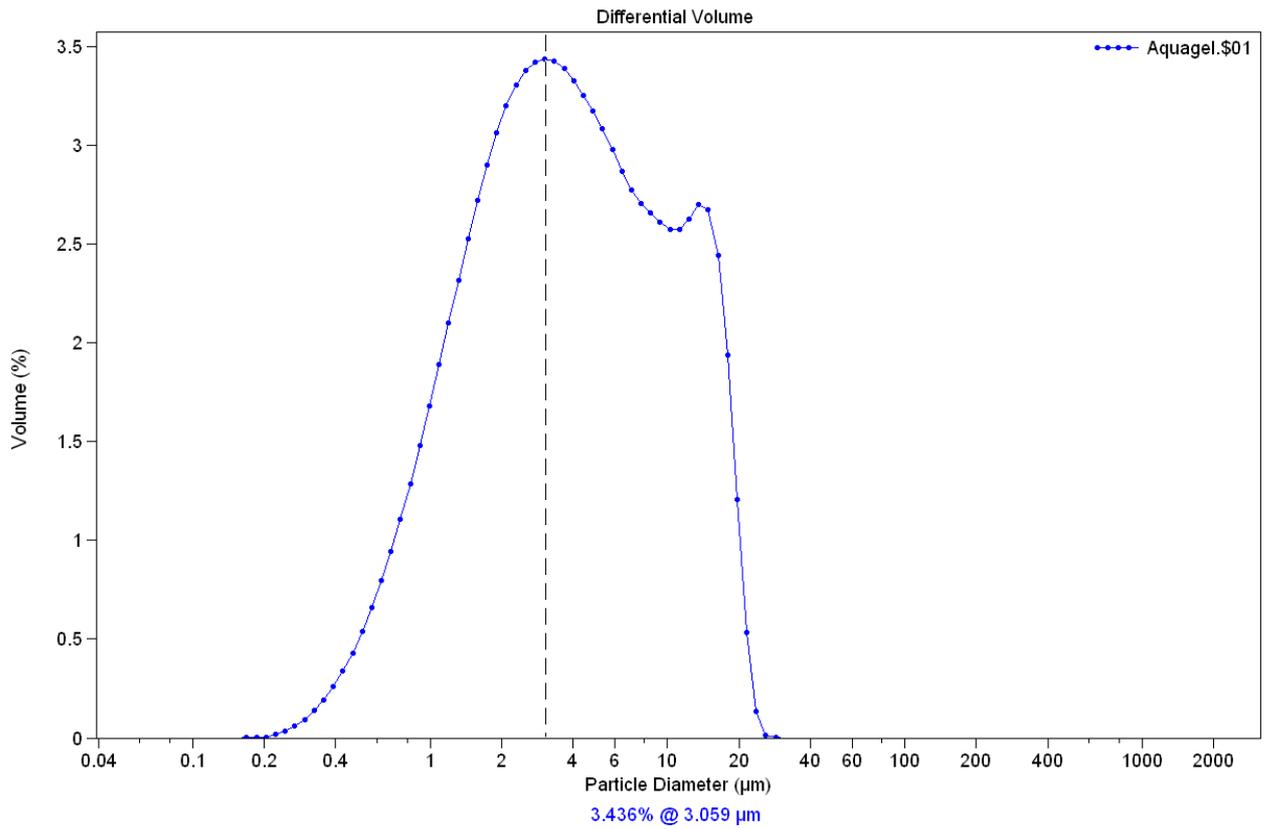
Save Close

Fig. VII.1 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale (Maghnia).



Volume Statistics (Arithmetic) Bent-Mos.\$01						
Calculations from 0.0400 µm to 2000 µm					Save	Close
Volume:	100%					
Mean:	5.987 µm					
Median:	3.304 µm					
Mean/Median Ratio:	1.812					
Mode:	2.107 µm					
% >	10	25	50	75	90	
µm	16.05	8.835	3.304	1.551	0.866	

Fig. VII.2 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite locale (Mostaganem).



Volume Statistics (Arithmetic) Aquagel.\$01					
Calculations from 0.0400 µm to 2000 µm					
Volume:	100%				
Mean:	5.635 µm				
Median:	3.747 µm				
Mean/Median Ratio:	1.504				
Mode:	3.059 µm				
% >	10	25	50	75	90
µm	13.76	8.064	3.747	1.859	1.043

Fig. VII.3 : Graphe de la distribution granulométrique des particules de la bentonite d'importation (Aquagel).

VII.2.2.2. Test de conformité de la bentonite

Le test de conformité est effectué selon la norme API 13A SEC 4. Sur une suspension de 22.5 g de bentonite dissoute dans 350 ml d'eau distillée et vieillie durant 24 heures à T= 16° C. Les essais exigés sont :

- Le volume du filtrat pendant 30 mn sous une pression de 7 bars.
- La viscosité plastique (VP).
- La yield value (YV).
- Le rapport (YV/VP).

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau VII.2

Tableau VII.2 : Résultats de test de conformité des bentonites.

<i>Caractéristiques</i>	<i>Spécifications</i>	<i>Résultats obtenus</i>		
		<i>Maghnia</i>	<i>Mostaganem</i>	<i>Aquagel</i>
Lecture à 600 rpm	30, minimum	34	20	32
Refus au tamis 200 mesh (voie humide)	4.0 % en poids, maximum	6,14	5,73	0,84
Yv / Vp	3.0 maximum	6	4,6	1,2
Volume du filtrat	15 cm ³ maximum	24,6	23	14
Humidité %	10.0 % en poids, maximum	8,5	6,1	4,8

Compte tenu des résultats obtenus, on peut conclure que les deux bentonites locales ne sont pas conformes aux spécifications de la norme API.

VII.2.2.2. Capacité d'échange cationique de la bentonite (CEC)

Les argiles, très répandues dans la nature se rencontrent fréquemment dans les réservoirs pétroliers. Elles tendent à réagir avec les fluides circulant dans le gisement, compliquant l'interprétation des mesures sur puits et affectant l'efficacité de la récupération de l'huile. Certaines de ces interactions peuvent être quantifiées notamment par la mesure de la Capacité d'Echange de Cations (CEC).

Tableau VII.3 : Capacité d'échange cationique (CEC) des bentonites.

Type de bentonite	surface spécifique (m ² /g)	CEC (meq)
Maghnia	0,188	27
Mostaganem	0,166	8,4
AQUAGEL	0,154	4

La CEC nous a montré que toutes les fractions de bentonite locale ont une CEC élevée à celle de l'Aquagel (traité) ; On en déduit ces fractions sont réactives. En compara les CEC des différents fractions, on observe que la fraction la plus grosse possède la CEC la plus faible, cela est lié à la diminution de la surface spécifique présentée par cette fraction.

On constate que plus la fraction de bentonite est fine plus elle donne une contrainte de cisaillement élevée, ceci peut être expliqué par le fait que plus les particules sont petites plus elles ont une surface de contact grande et plus elles sont aptes à être imbibées d'eau ce qui favorise le gonflement et augmente la viscosité.

Suite aux résultats obtenus, nous avons décidé de poursuivre la suite les essais d'étude rhéologique et physico-chimique des suspensions de fluide de forage avec une bentonite locale (Maghnia) qui serait plus conforme par rapport à la bentonite de Mostaganem.

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 [PAUMIER, S., (2006)].

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 solides. 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 solides. 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

La viscosité est une propriété qui peut être modifiée en changeant l'équilibre entre la répulsion et l'attraction. Dans beaucoup de cas, la performance d'une suspension peut être améliorée par la maîtrise de l'effet du comportement colloïdal sur les propriétés tel que la viscosité, l'arrangement et la dimension effective des particules.

La charge des particules peut être contrôlée en modifiant la nature du liquide de la suspension. Les modifications incluent le changement du pH du liquide ou le changement de l'espèce ionique en solution. Une autre technique plus directe est d'employer des agents tensio-actifs ou des polymères défloculants qui s'adsorbent directement sur la surface du colloïde et changent ses caractéristiques.

Pour la bentonite une fois dispersée dans l'eau, les colloïdes ont des charges négatives sur leurs faces dues à leur substitution isomorphique. Les charges négatives en excès sont compensées par des cations tels que le Na^+ et Ca^{2+} . Lorsque les particules de bentonite sont en suspension dans l'eau l'hydratation des cations compensateurs présents sur les surfaces des feuillets provoquent une diminution de l'attraction électrostatique.

La suspension de bentonite délivre un caractère basique, ce qui est bien clair sur la figure (VIII.1), mais ce caractère aura tendance à diminuer avec le temps de vieillissement mais reste toujours dans le domaine basique pour se stabiliser aux environs d'un pH de 8 pour une concentration de 3% et de 9,5 pour 6%.

Pour étudier l'effet de concentration de la bentonite sur le comportement rhéologique de 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 (de 1% à 10%).

Les Figures. VIII.2 et VIII.3 montrent que l'accroissement de la concentration de la bentonite augmente les caractéristiques rhéologiques (Viscosité apparente, Viscosité plastique la yield pointe). Pour différentes concentrations par exemple, le passage de la concentration de 3% à 6 % fait croître la viscosité apparente d'environ un facteur de 3,8 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 600 s^{-1} .

Le comportement rhéologique de la suspension bentonitique à différentes concentrations peut être décrit par le modèle d'Herschel-Bulkley.

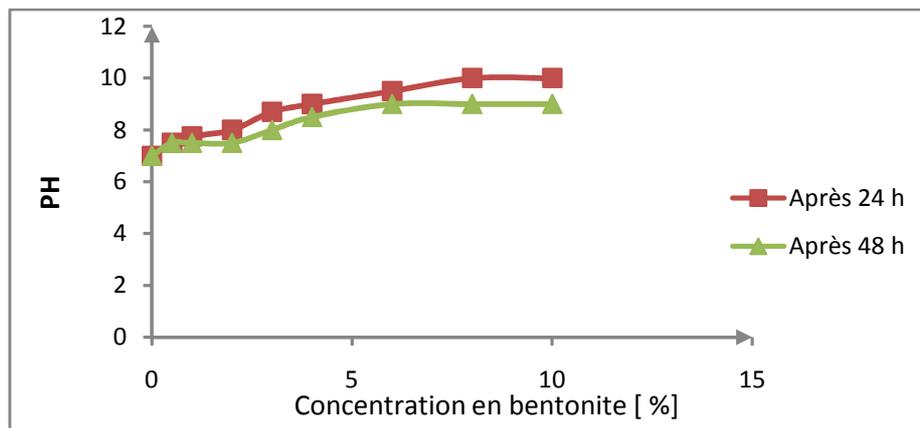


Fig. VIII.1 : Effet de la concentration en bentonite sur le pH en fonction du temps de vieillissement

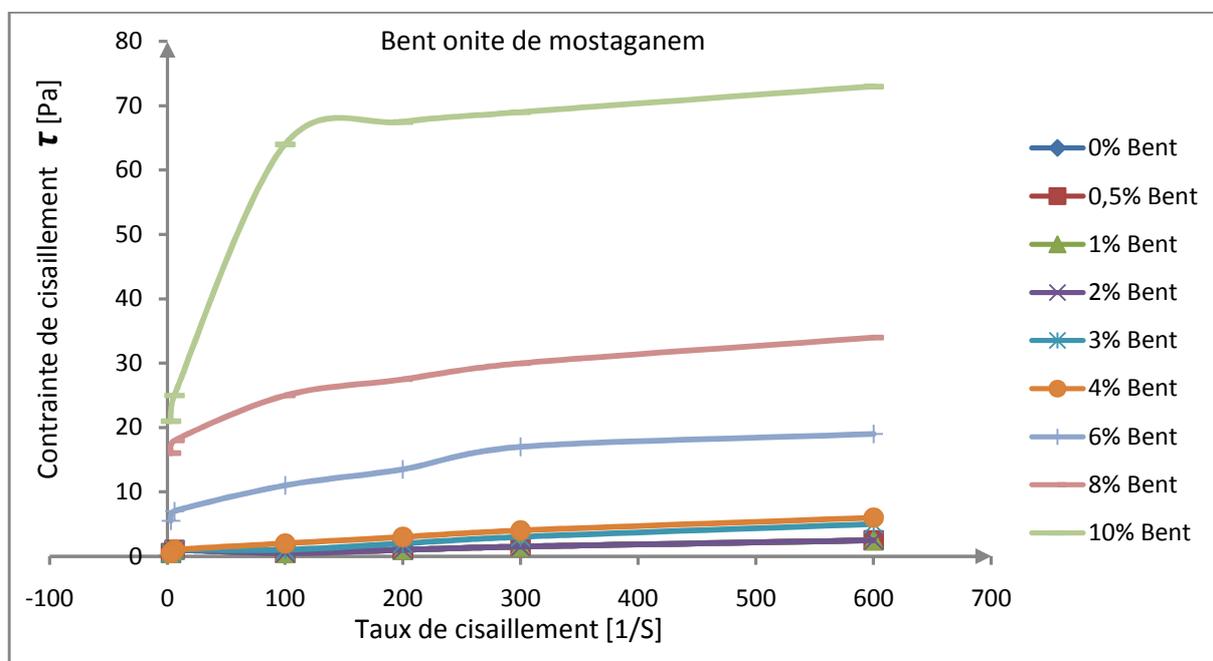


Fig. VIII.2 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite pour différentes concentrations.

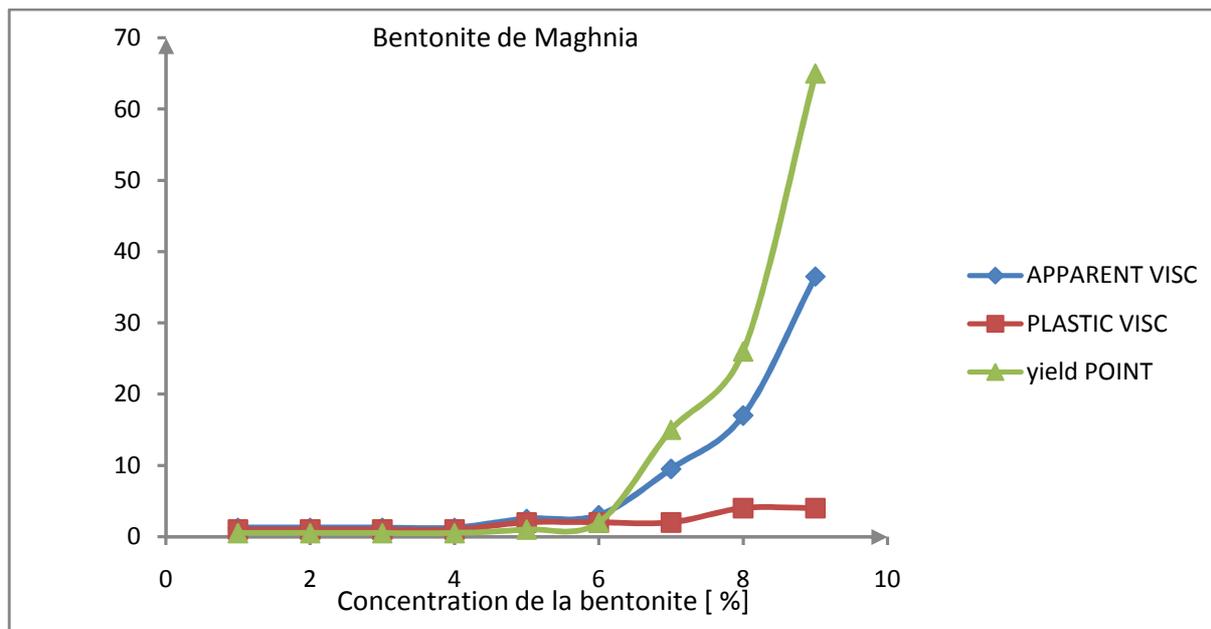


Fig. VIII.3 : Effet de la concentration en bentonite sur la viscosité apparente, viscosité plastique et la yield point.

Les exigences de forage concernant les yeild value pour chaque phase de forage dans le champ de Hassi messaoud et ain Amenass (Tiguentourine) sont données dans les tableaux Tableau VIII.1 et VIII.2.

Tableau VIII.1 : Capacité d'échange cationique (CEC) des bentonites.

HMD	26"	16"	12 ¼"	8 ½"	6"
Yield value	40 - 60	18 - 24	14 - 18	10 -- 14	10 -- 12
Viscosite plastique	ALAP	ALAP	ALAP	ALAP	ALAP
filtrat	NC	< 10	< 10	< 10	< 5

Tableau VIII.2 : Capacité d'échange cationique (CEC) des bentonites.

Champs de Tiguentourine	24"	17 ½"	12 ¼"	8 ½"
Yield value	40 – 55 (≤ 35 Before running 18 5/8 casing)	28 – 35 (≤ 17 Before running 13 3/8 casing)	22 – 28 (≤ 15 Before running 9 5/8 casing)	12 – 22 (≤ 12 Before clean up)
Viscosite plastique	ALAP	ALAP	ALAP	ALAP
filtrat	NC	< 10	< 6	< 4

Nous avons choisi les concentrations de bentonite de (3 %) et (6 %) avec les quelles nous allons par la suite étudier l'effet des différents paramètres sur les caractéristiques rhéologiques en essayant à la fin de trouver une formulation satisfaisant les conditions : $15 < \text{Yield value} < 25$, $10 < \text{PV} < 20$, $\text{filtrat} < 10$.

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

Pour étudier l'effet de la température sur le comportement rhéologique de la suspension, nous avons représenté l'évolution de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour des solutions de bentonite de 3% et 6%.

Les Figures VIII.4 et VIII.5 montrent que l'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension bentonitique, par exemple le passage de la température de 20 °C à 80 °C fait décroître 2,18 fois la viscosité apparente lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 100 s^{-1} .

Le comportement rhéologique de la suspension bentonite aux deux concentrations et à différentes températures peut être décrit par le modèle d'Herschel-Bulkley.

NB : Au FANN 266, les résultats des graphes ne sont pas aussi précis que le Thermo HAAKE VT 550, mais on remarque le même comportement rhéologique pour les deux concentrations en bentonite; C'est cette précision que nous avons représenté quelques résultats de 3% pour l'interprétation et les autres résultats sont représentés dans l'annexe B.

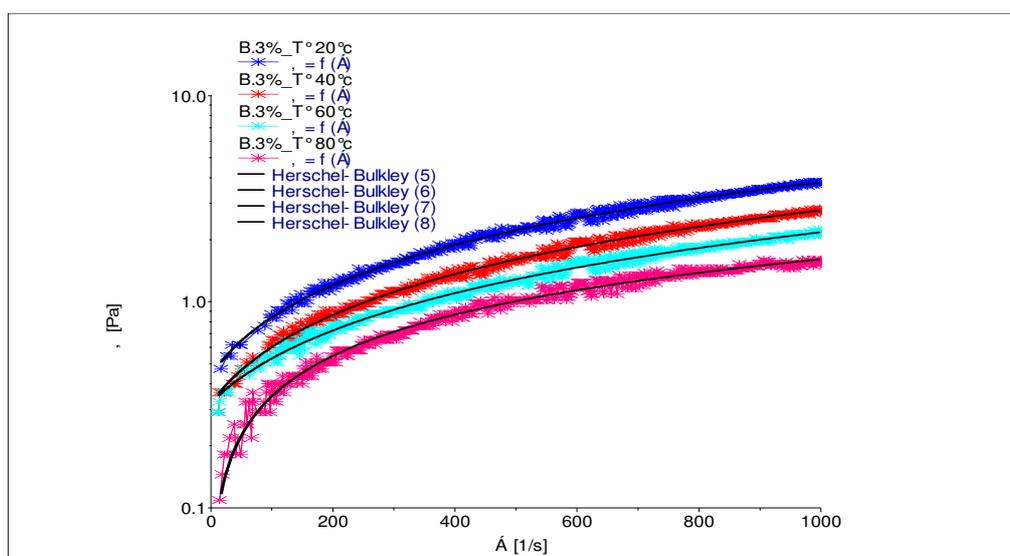


Fig. VIII.4 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

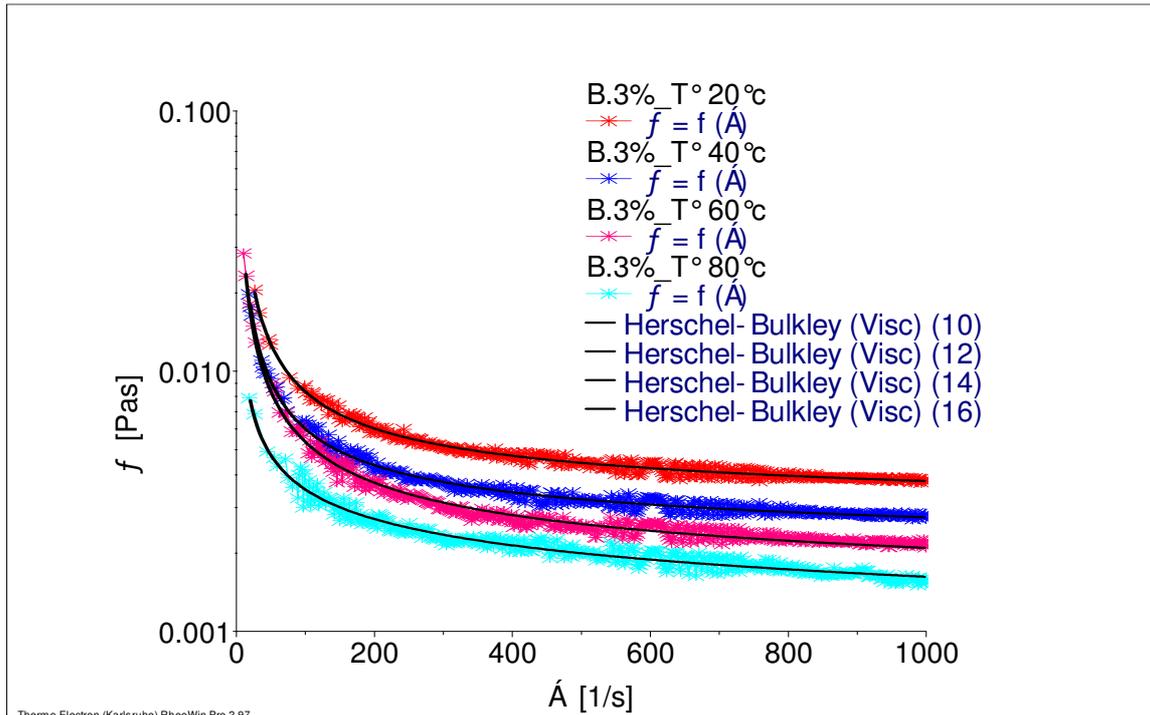


Fig. VIII.5 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

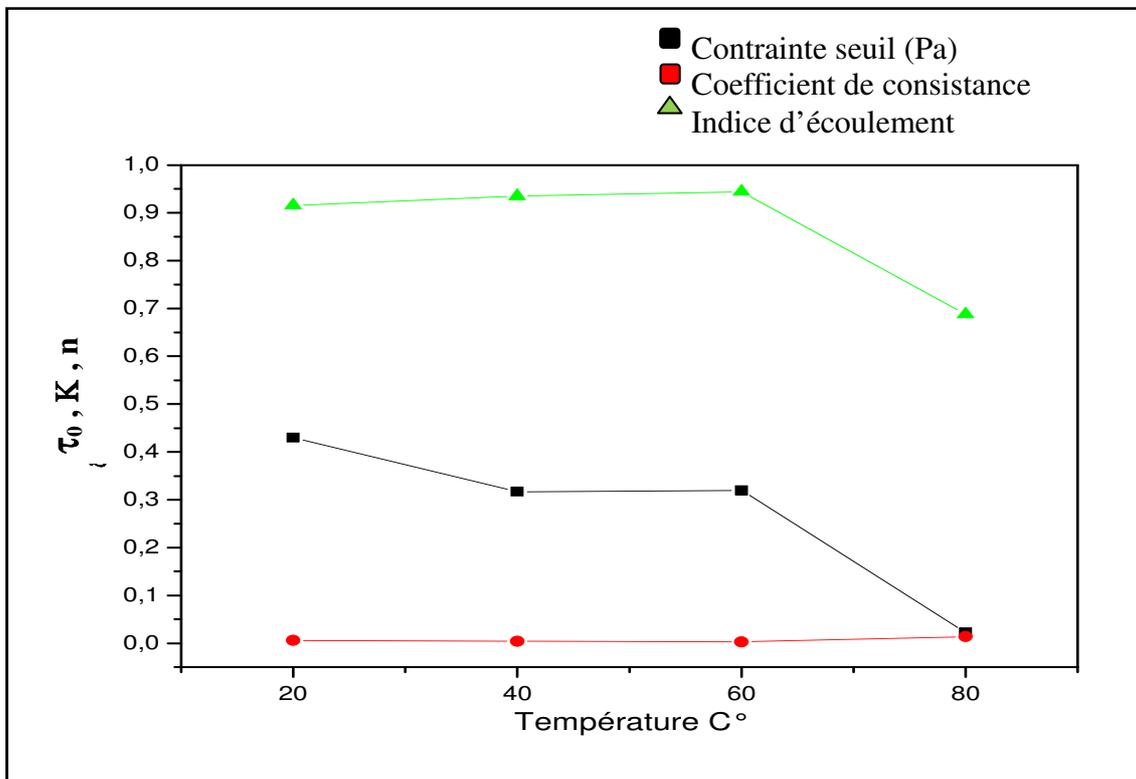


Fig. VIII.6 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de la température d'une suspension de bentonite 3%.

Dans le cas des suspensions argileuses, la contrainte seuil est toujours liée à la formation d'un gel résultant des différentes associations entre particules. La contrainte seuil est 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. [BOUSSAK, H., (2008)], [SAFI, B., (2002)]

Pour des températures plus élevées, on a observé une diminution de la viscosité (Fig. VIII.5) en fonction de l'augmentation de la température, et une diminution de la contrainte seuil (Fig.VIII.6) (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

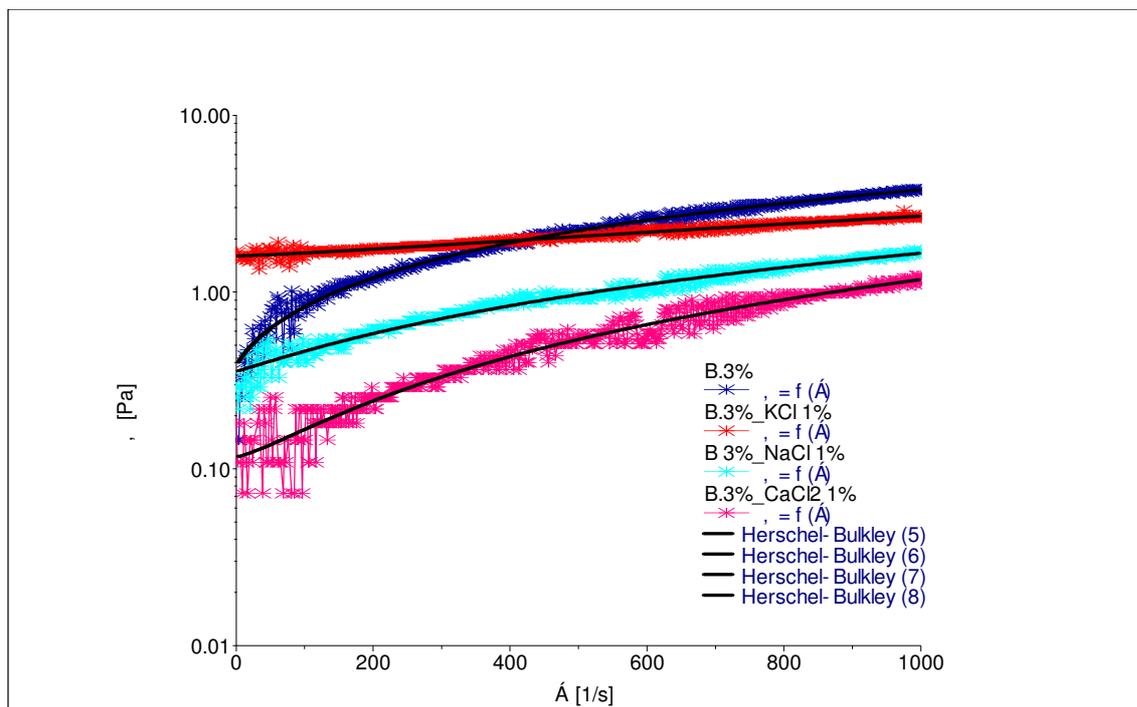


Fig. VIII.7 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

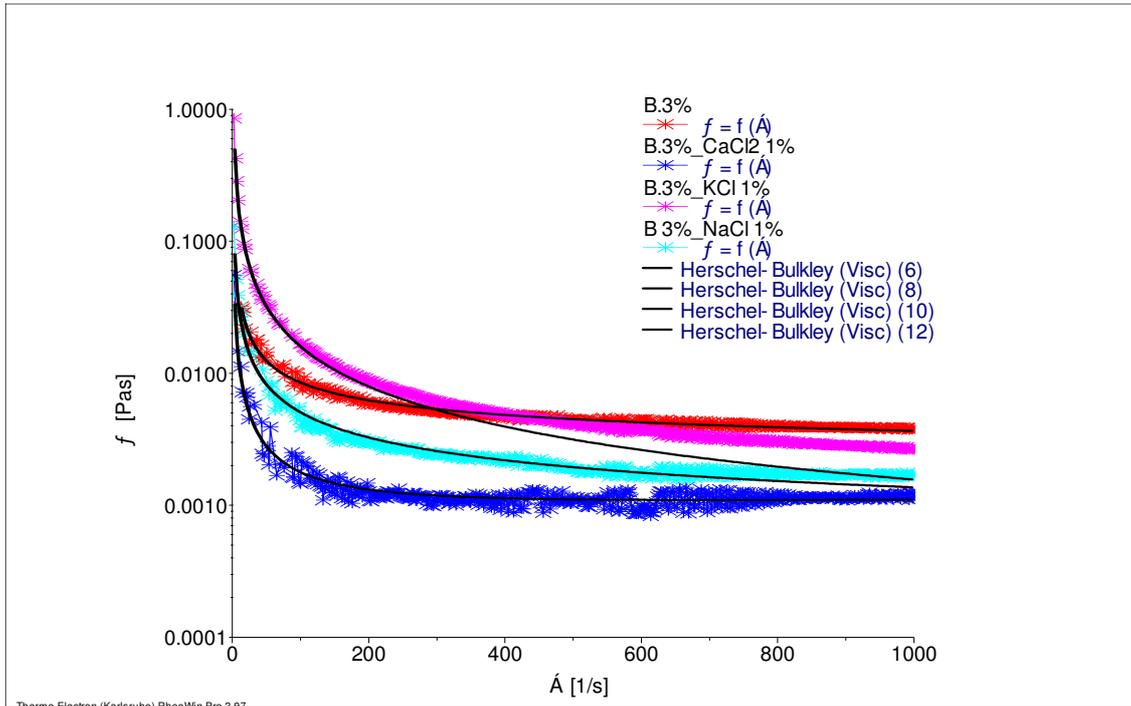


Fig. VIII.8 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

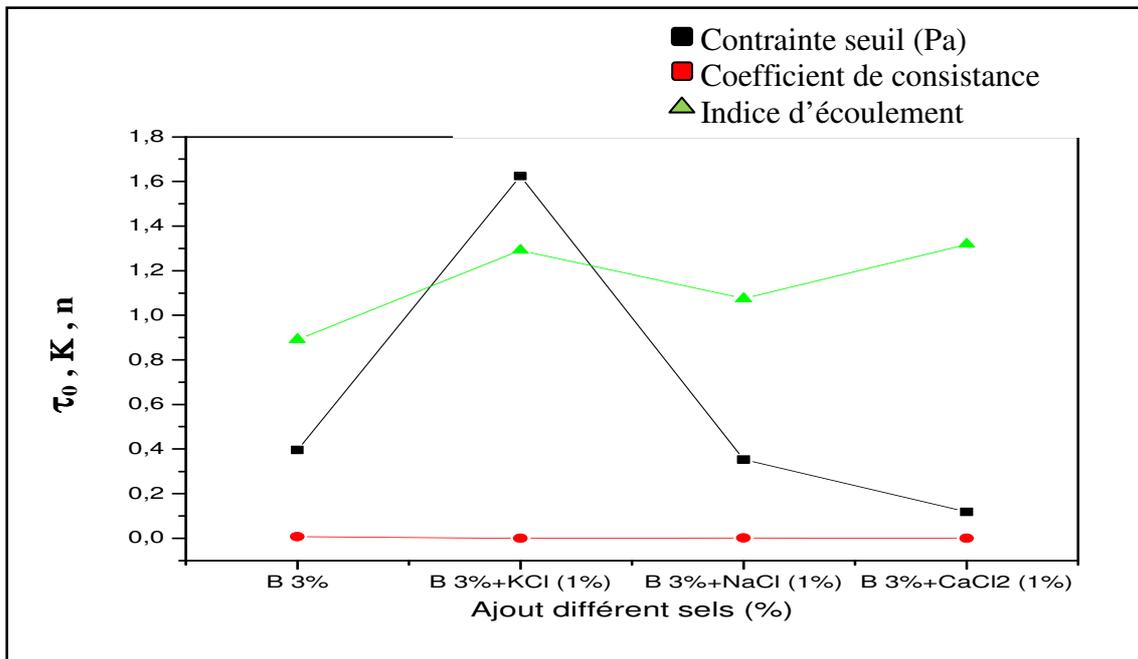


Fig. VIII.9 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différents sels d'une suspension de bentonite 3%.

Nous présentons sur les figures VIII.7 et VIII.8 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 de la (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 [SAFI, B., (2002)].

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.9), 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. [KAUFHOLD, S. & DOHRMANN, R., (2008)]

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 les figures VIII.10 et VIII.11, 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 pH sont liés, et la figure VIII.12 illustre l'effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3% .

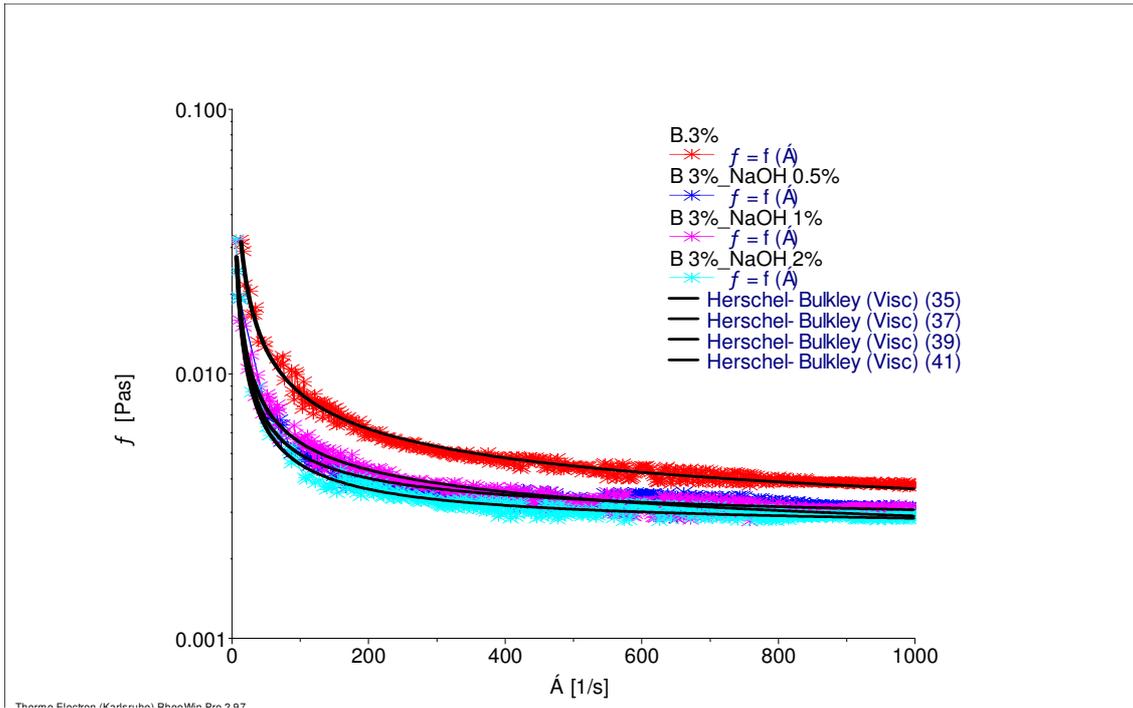


Fig. VIII.10 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

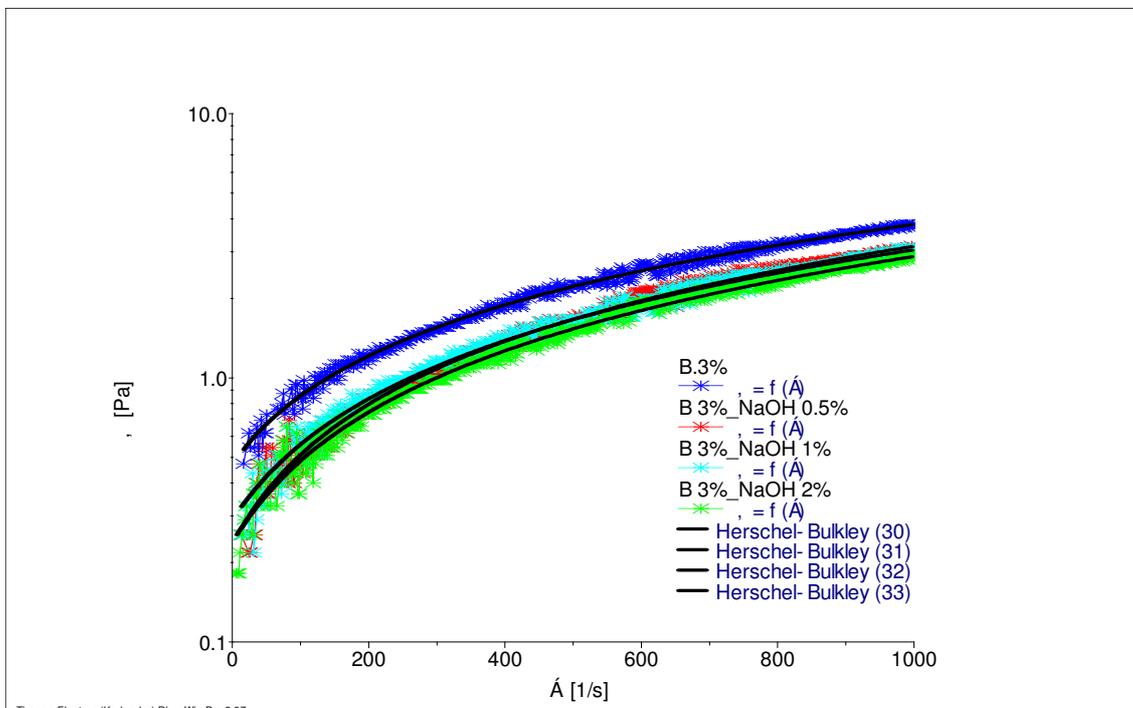


Fig. VIII.11 : Effet de l'alcalinité sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

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.13).

Tableau VIII.3 : 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

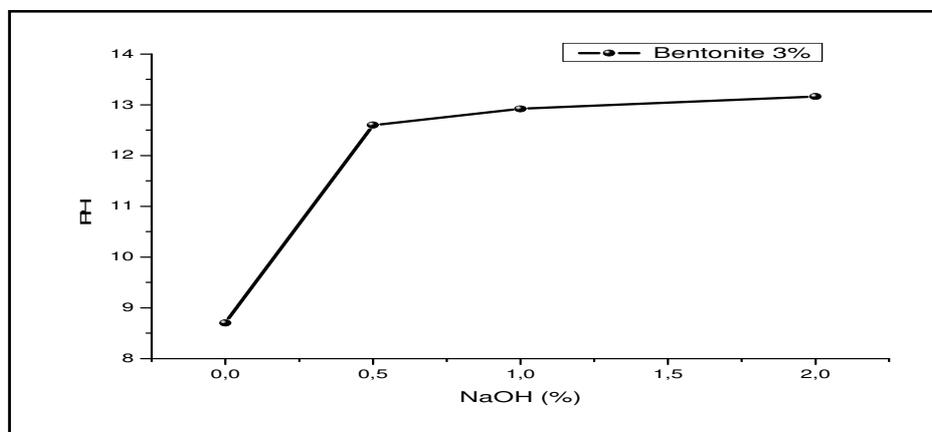


Fig. VIII.12. : a) Effet de l'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3%. B) Effet de la concentration en bentonite sur le PH

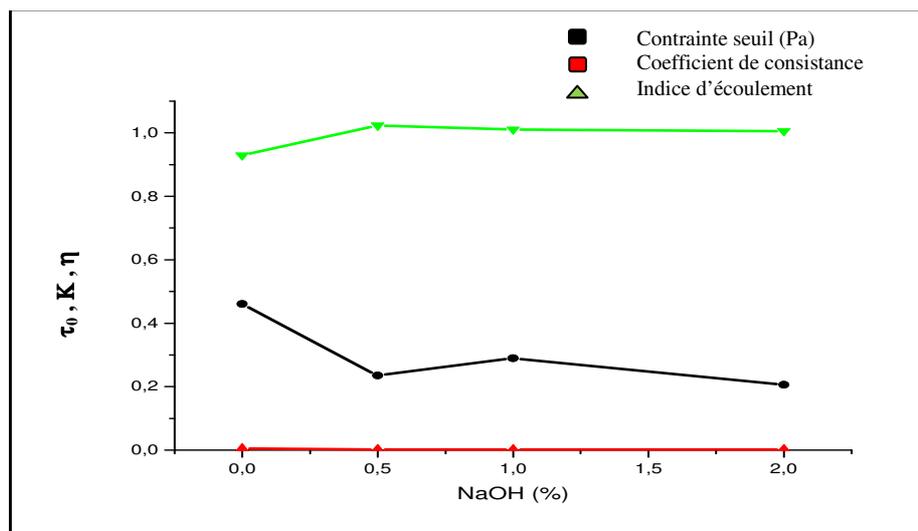


Fig. VIII.13 : Effet de l'alcalinité sur la contrainte de seuil, le coefficient de consistance et l'indice d'écoulement de la suspension de bentonite 3%.

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.

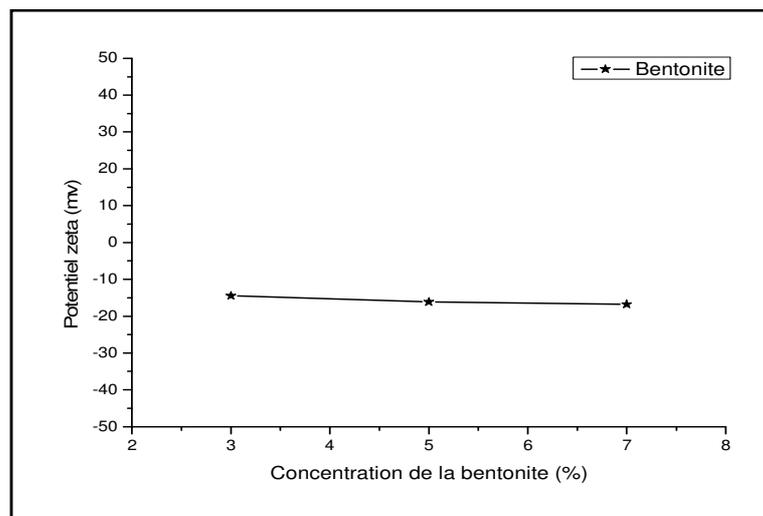


Fig. VIII.14 : Effet de la concentration de la bentonite sur le potentiel zêta.

Le zêtamètre 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.14 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 d'assez faibles densités restées 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.

Tableau VIII.4 : 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.4, les suspensions bentonitique (3%,5% et 7%) de la figure VIII.14 sont faiblement stables. Cette instabilité naissante est dû aux forces gravitaires des particules de la bentonite qui sont plus fortes que les forces électrostatiques et dont le phénomène de la décantation est apparu 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 1/2 heure. 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 Figure VIII.15 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.

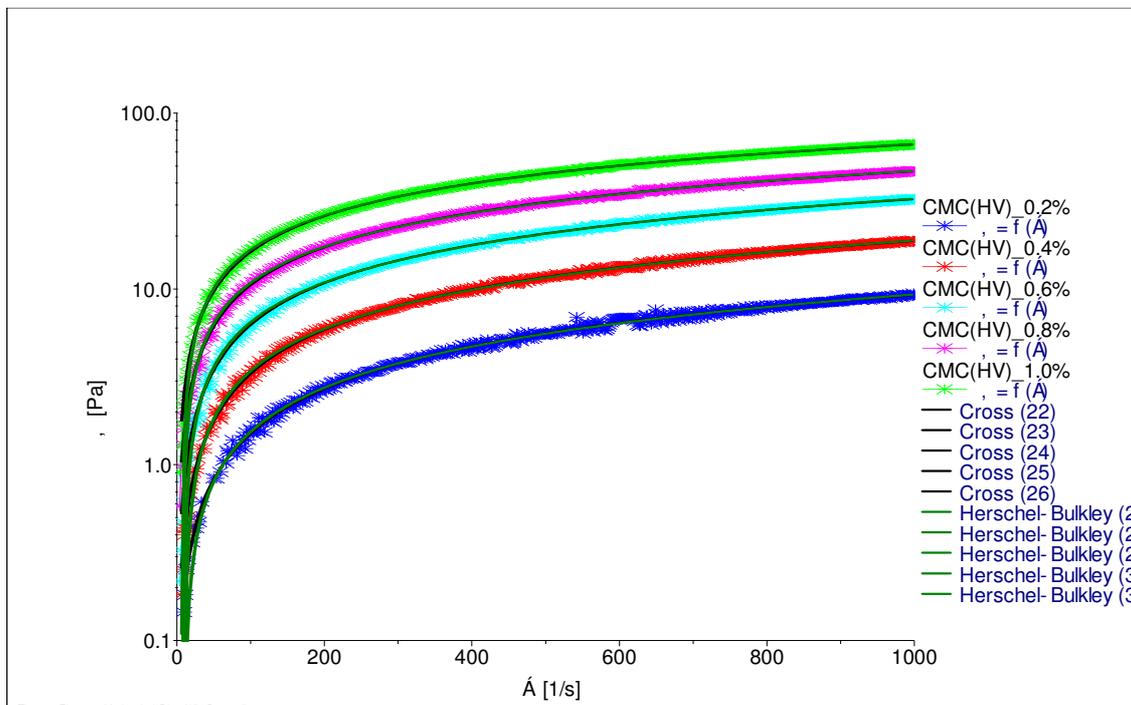


Fig. VIII.15 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

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.15). En échelle logarithmique, nous avons remarqué qu'à faible vitesses de cisaillement, le comportement rhéologique de CMC est proche du modèle de « Cross » (Fig. VIII.16).

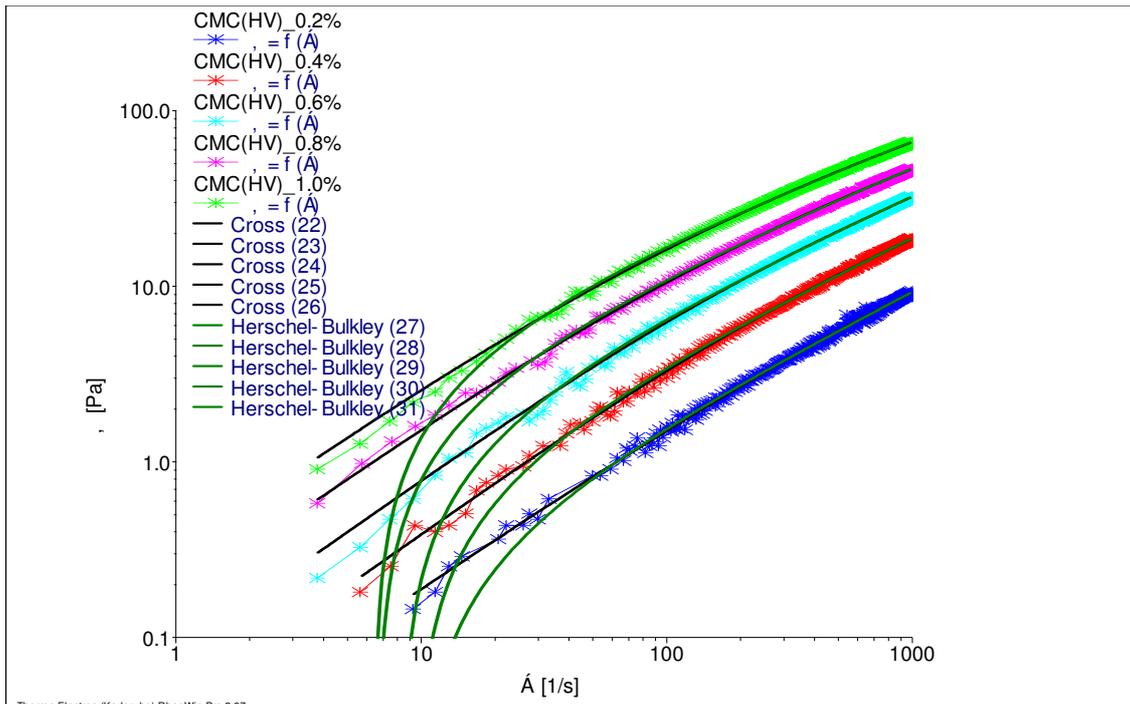


Fig. VIII.16 : Effet de la concentration de CMC sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement.

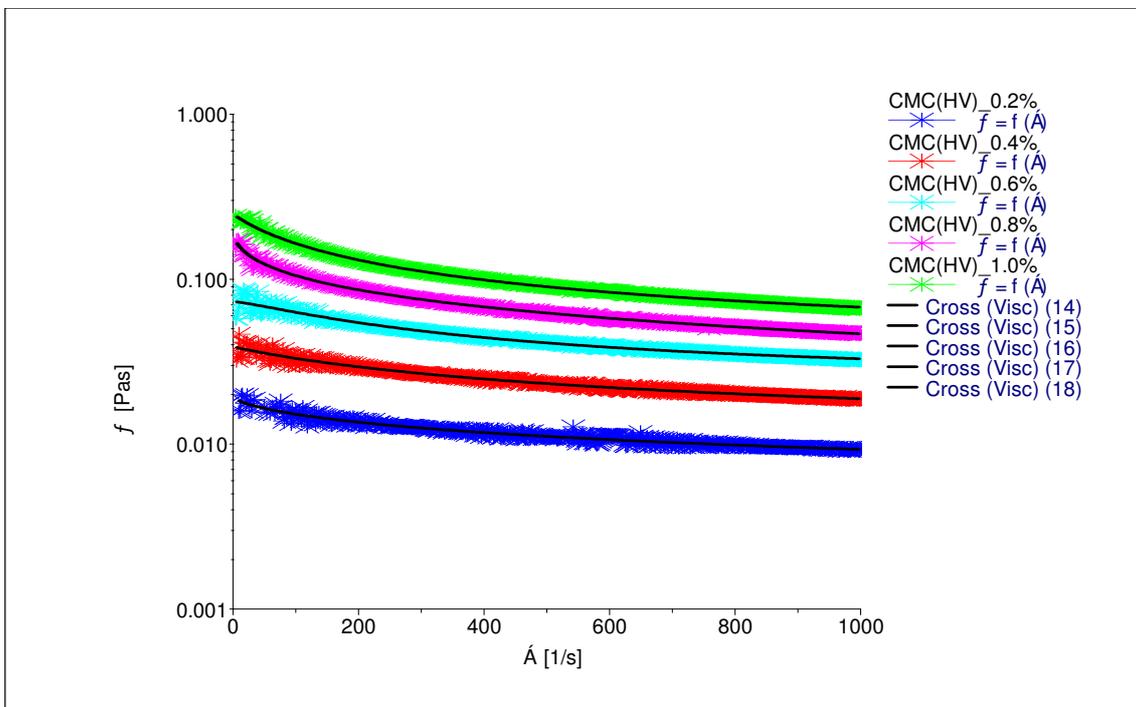


Fig. VIII.17 : Effet de la concentration de CMC sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement.

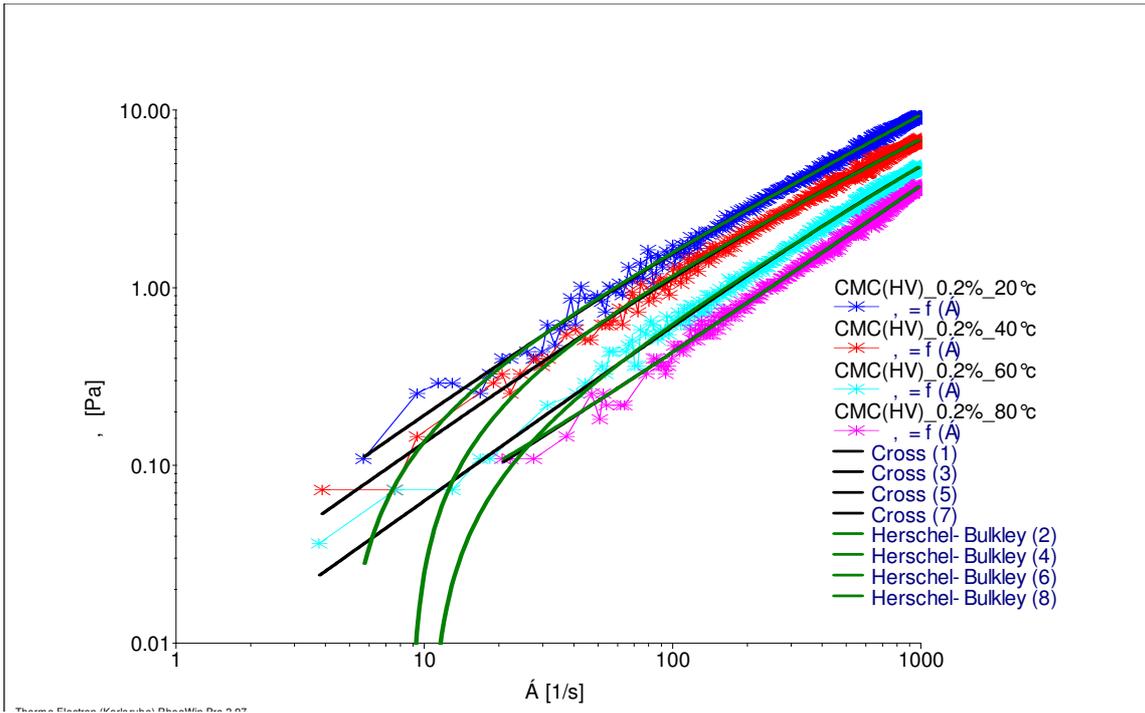


Fig. VIII.19 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

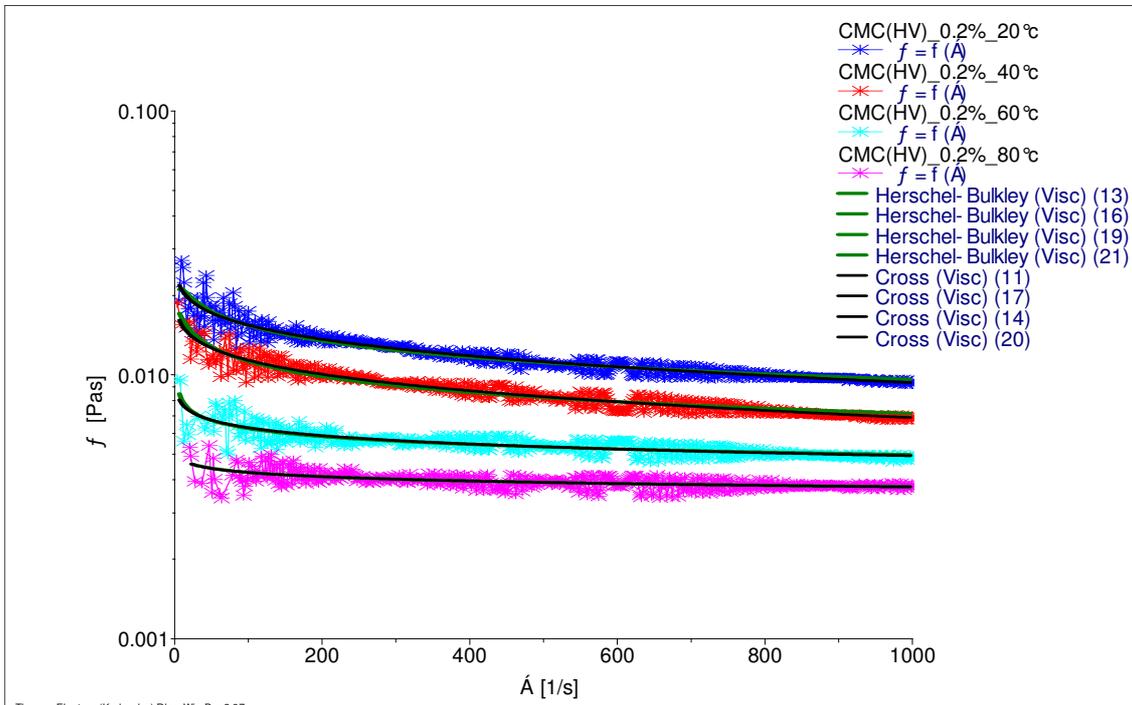


Fig. VIII.20 : Effet de la température sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

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 1/2 heure 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. [FOURAR, K., (2006)]

Dans les figures VIII.21 et. VIII.22, 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 (mêmes valeurs de la viscosité apparente), et l'ajout du sel bivalent (CaCl₂) donne une viscosité faible par rapport aux autres viscosités (Fig. VIII.22). Cette différence de viscosité est due à la présence des cations Na⁺, K⁺ et Ca²⁺ dans les solutions susceptibles de se fixer sur les groupes chargés du polymère, elle 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 entres elles qui, dans certaines conditions, conduit à une précipitation du polymère et une chute directe de la viscosité. [KHODJA, M. & KHODJA, S., (1999)]

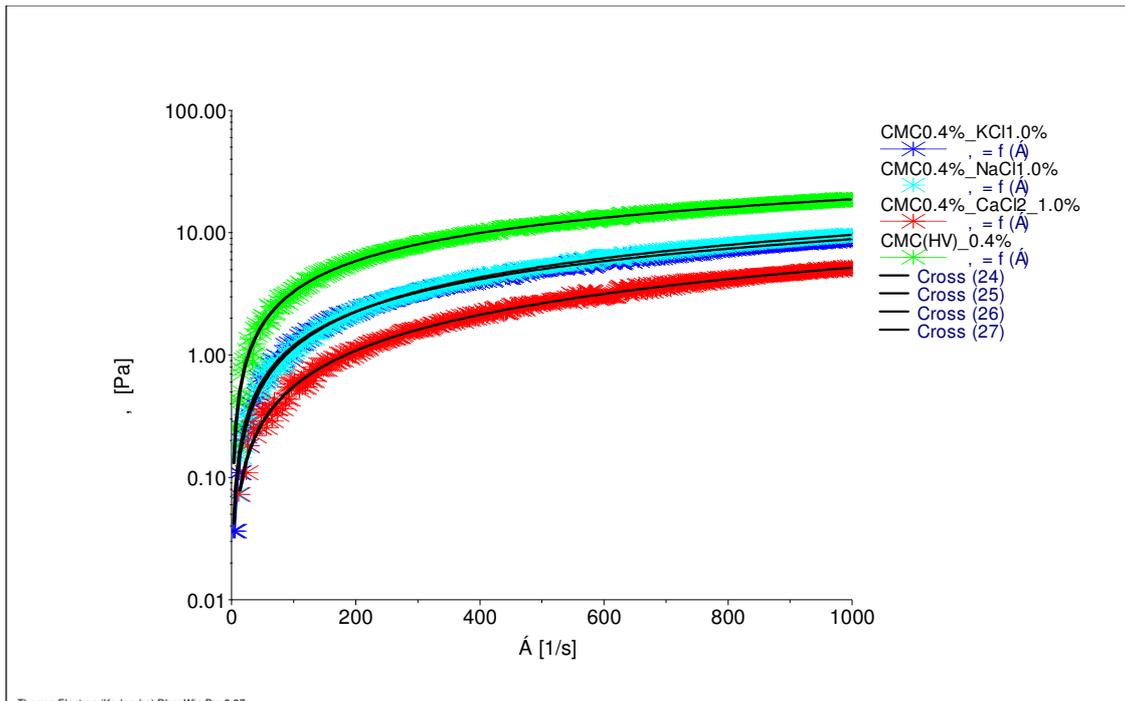


Fig. VIII.21 : Effet du sel sur la contrainte de cisaillement de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

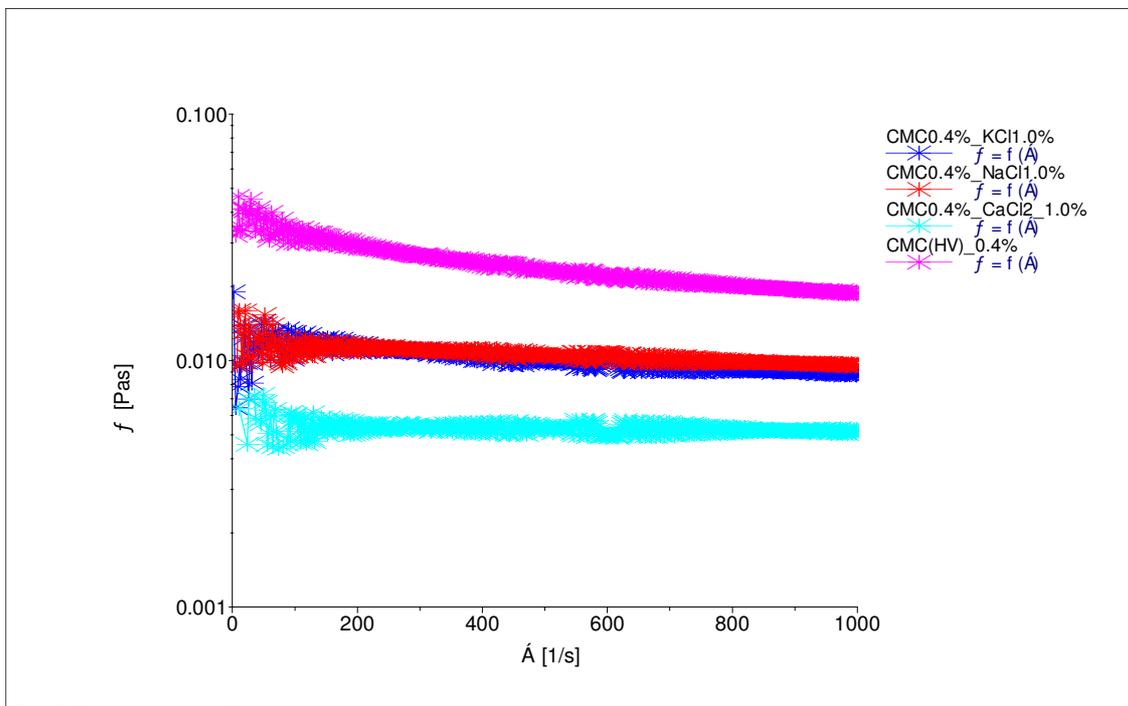


Fig. VIII.22 : Effet du sel sur la viscosité apparente de la suspension de CMC en fonction du taux de cisaillement.

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

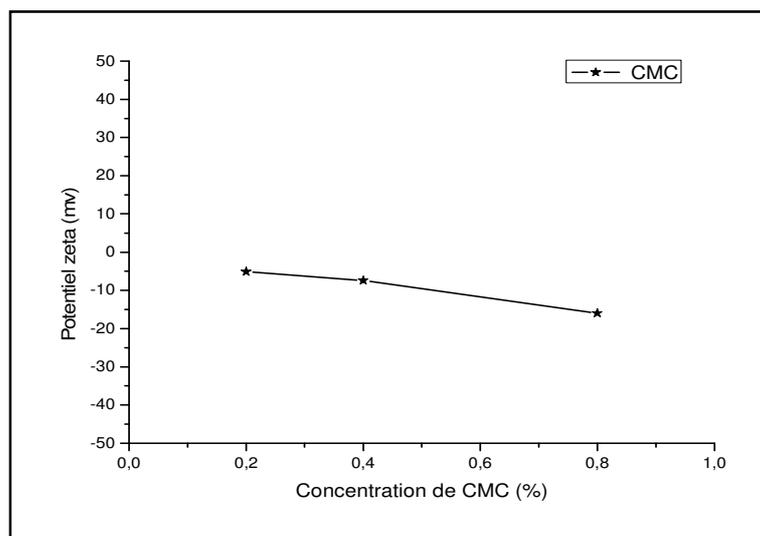


Fig. VIII.23 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de CMC.

Les résultats obtenus (Fig. VIII.23) 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.24) 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. [KHODJA, M., (2008)]

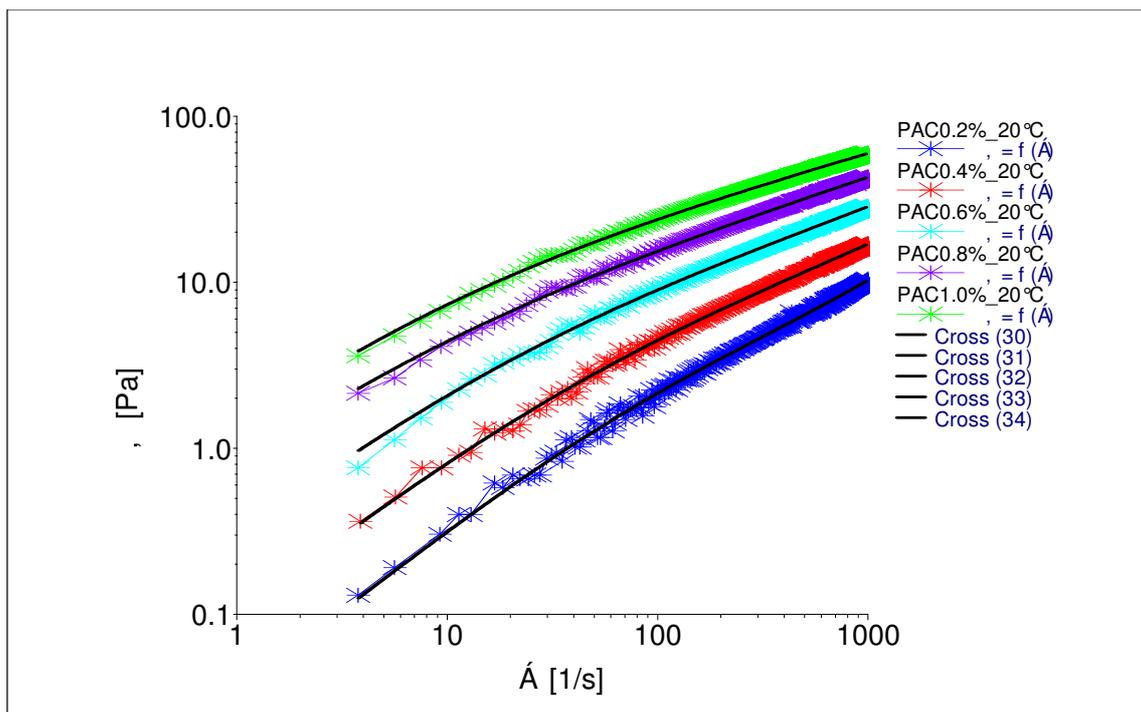


Fig. VIII.24 : Effet de la concentration de PAC R sur la contrainte de cisaillement de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.

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). [KHODJA, M., (2008)]

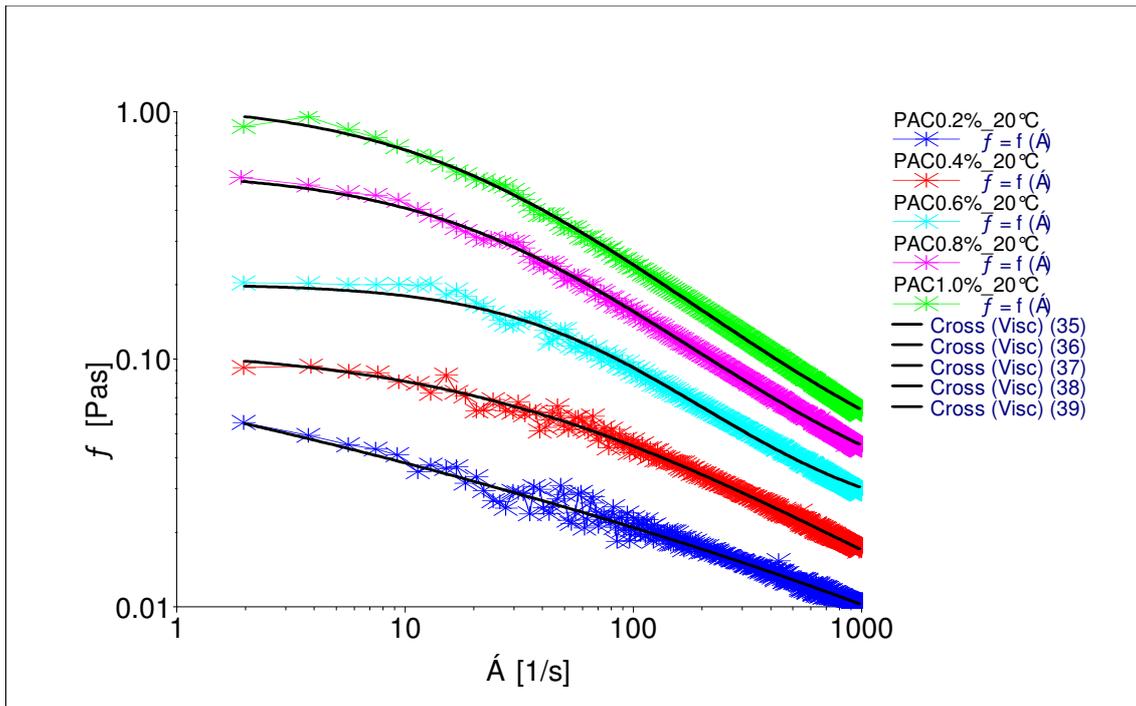


Fig. VIII.25 : Effet de la concentration de PAC R sur la viscosité de la suspension en fonction de la vitesse de cisaillement.

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

Les figures VIII.26 et VIII.27 représentent l'effet de la température sur la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente

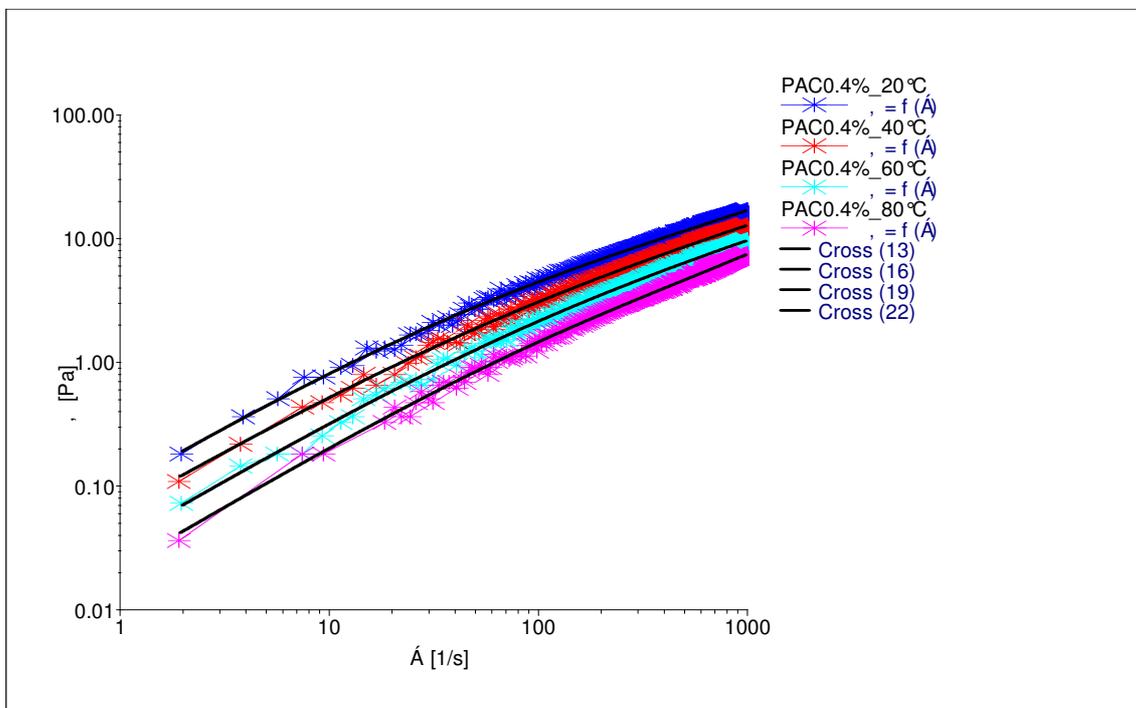


Fig. VIII.26 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

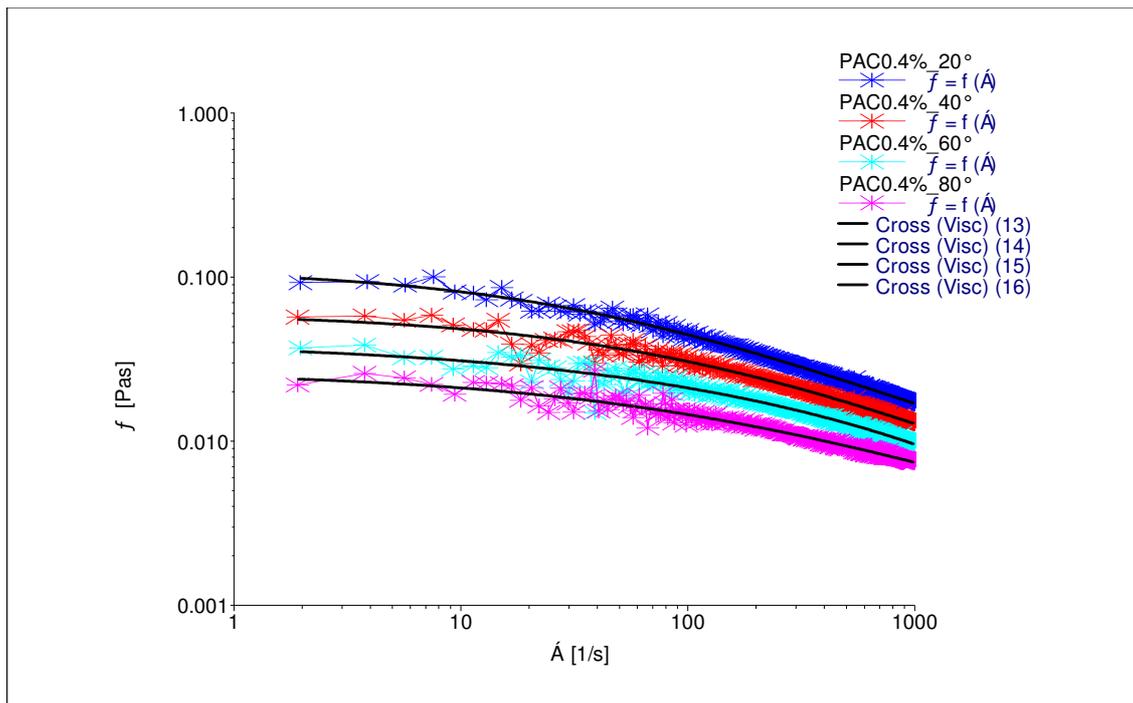


Fig. VIII.27 : Effet de la température sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

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.26). L'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension de PAC R (Fig. VIII.27).

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.28). Le PAC R est particulièrement sensible aux cations divalents (Ca²⁺, Mg²⁺) et monovalents (K⁺, Na⁺) qui vont réagir avec les groupes anioniques de PAC R (Fig. VIII.29).

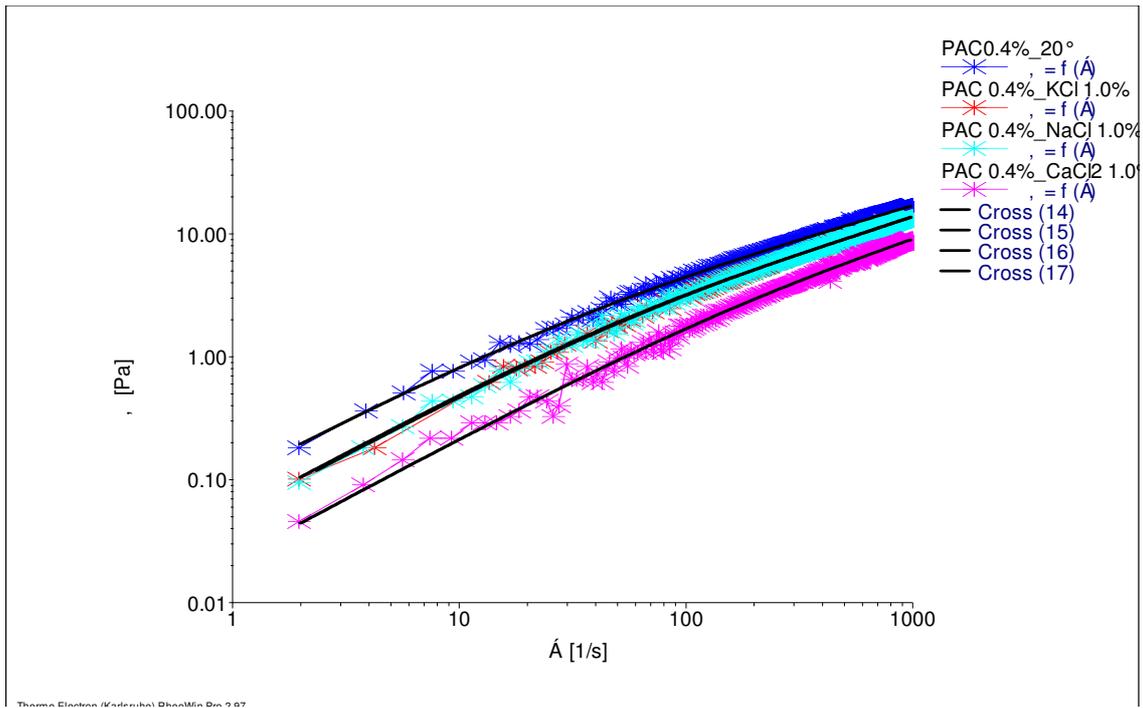


Fig. VIII.28 : Effet de l'ajout des sels sur la contrainte de cisaillement de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

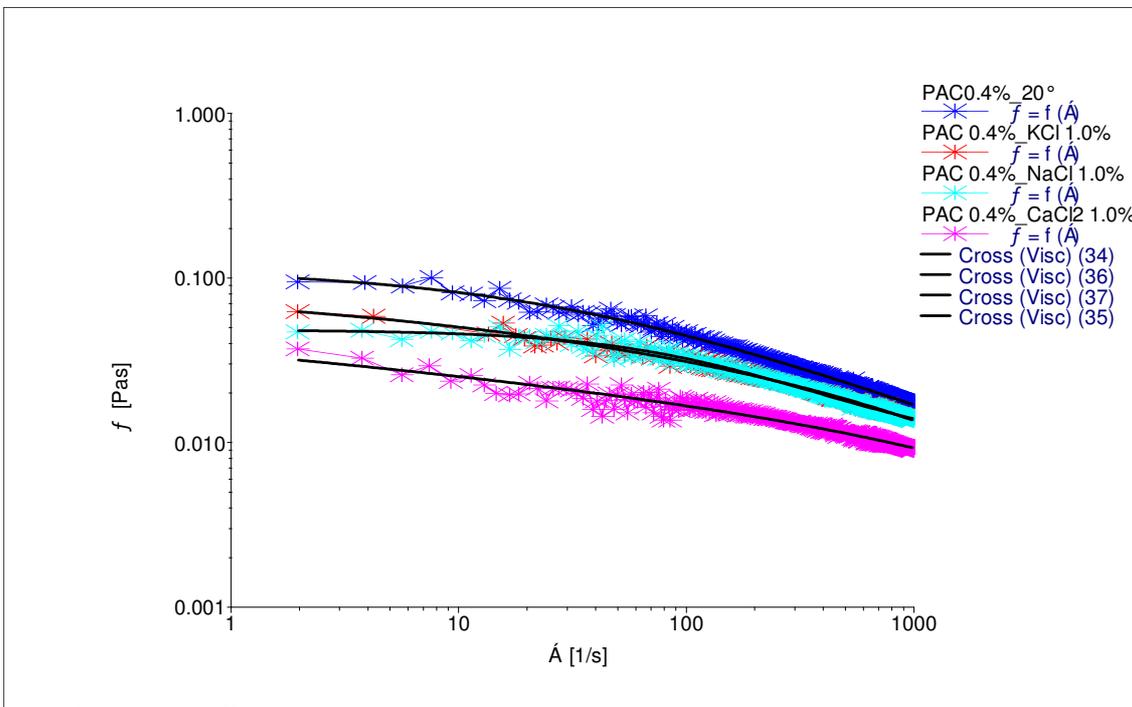


Fig. VIII.29 : Effet de l'ajout des sels sur la viscosité de la suspension de PAC R en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.3.2.4. Effet de la concentration de PAC R sur le potentiel zêta

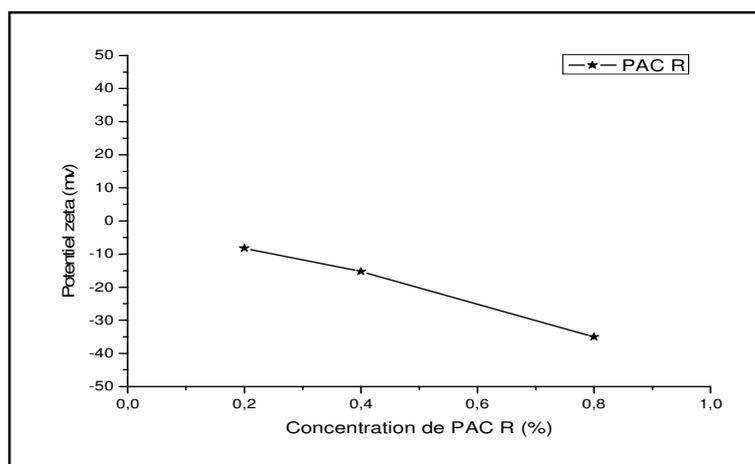


Fig. VIII.30 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de PAC R.

On remarque dans la figure VIII.30 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.

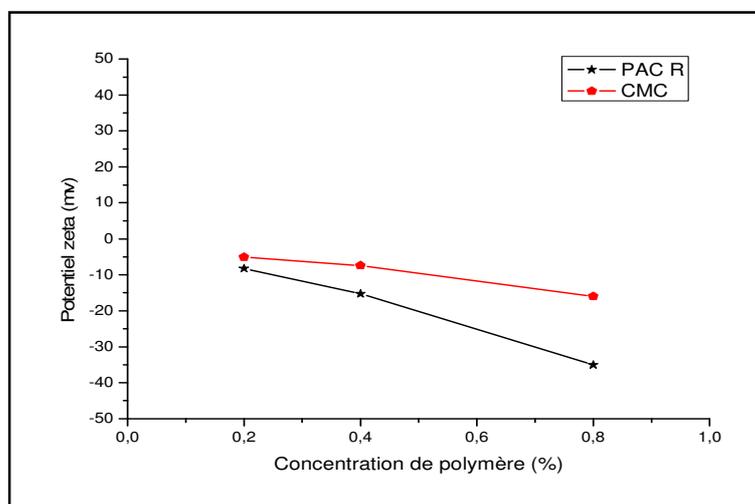


Fig. VIII.31 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de polymère.

Dans la figure VIII.31, nous avons remarqué que dans la même plage de concentration, le potentiel zêta de PAC R est plus élevé que celui de CMC.

Dans la structure de PAC R, il ya énormément des groupes anioniques (Fig. VIII.32), 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.32 : Etat du CMC et du PAC R lors de l'hydratation, dans le cas (Eau – polymère).

La figure (VIII.33. a) représente l'augmentation de la viscosité en fonction de la concentration des suspensions de CMC et de PAC R, La figure (VIII.33. 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.33. 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)].

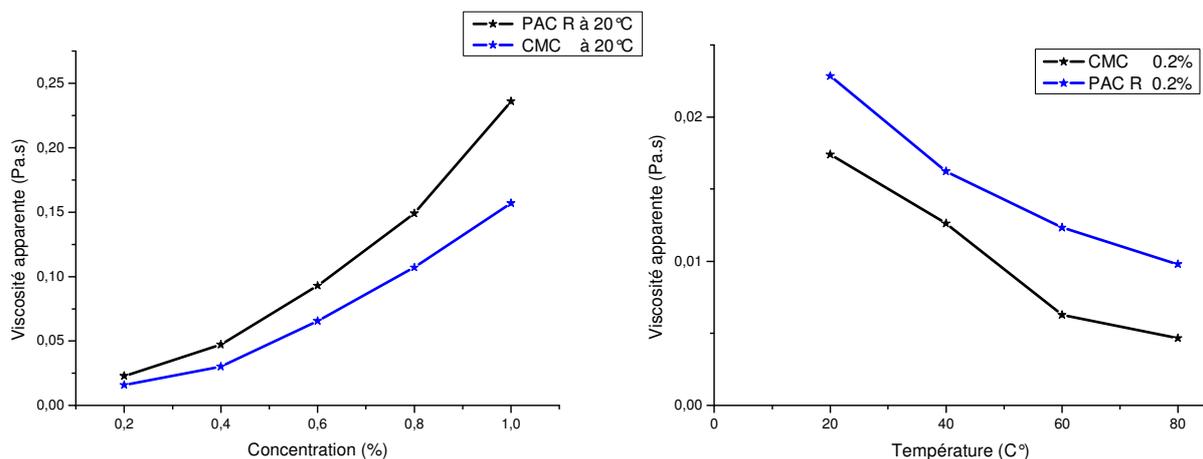


Fig. VIII.33 : (a) Effet de la concentration sur la viscosité de CMC et PAC R, (b) Effet de la température sur la viscosité de la suspension de CMC et PAC R.

VIII.3.3. Etude de la suspension de xanthane

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 diminuant avec l'augmentation de contrainte de cisaillement augmente avec la concentration. D'après les rhéogrammes des figures VIII.34 et VIII.35, 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 faibles concentrations (0.1%, 0.25%, 0.5% et 1%) (Fig. VIII.31). [SIMON, j., (2008)]

Les courbes d'écoulement du xanthane sont proches du modèle de Herschel-Bulkley.

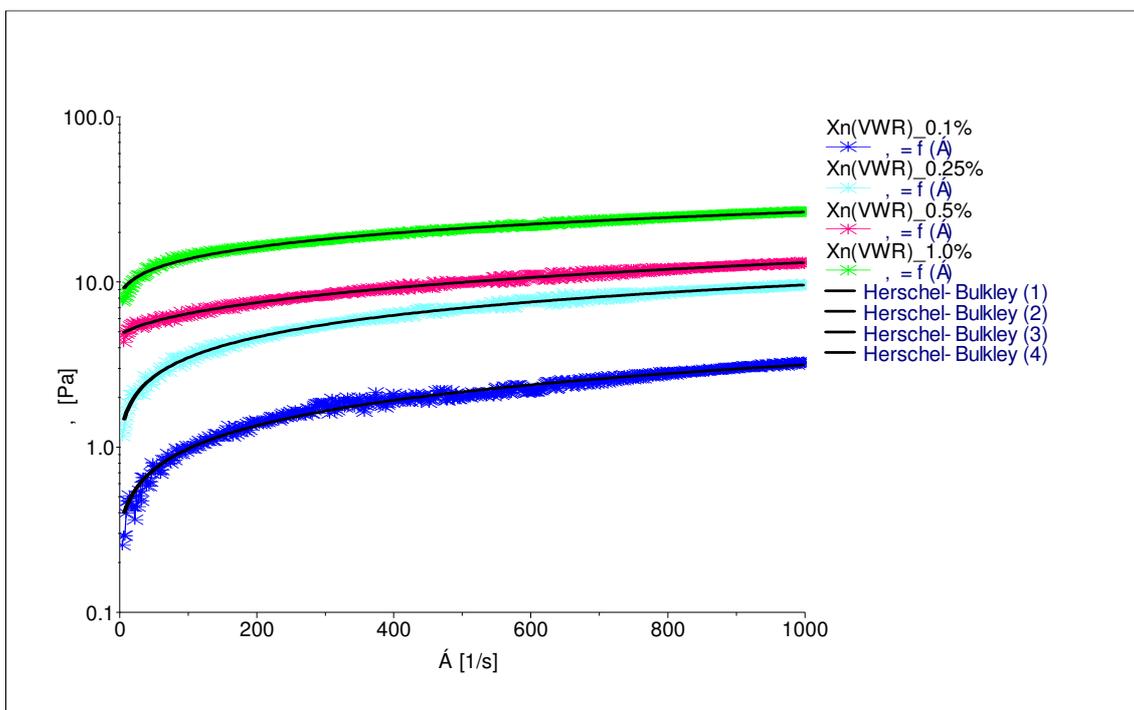


Fig. VIII.34 : Effet de la concentration de xanthane sur la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement.

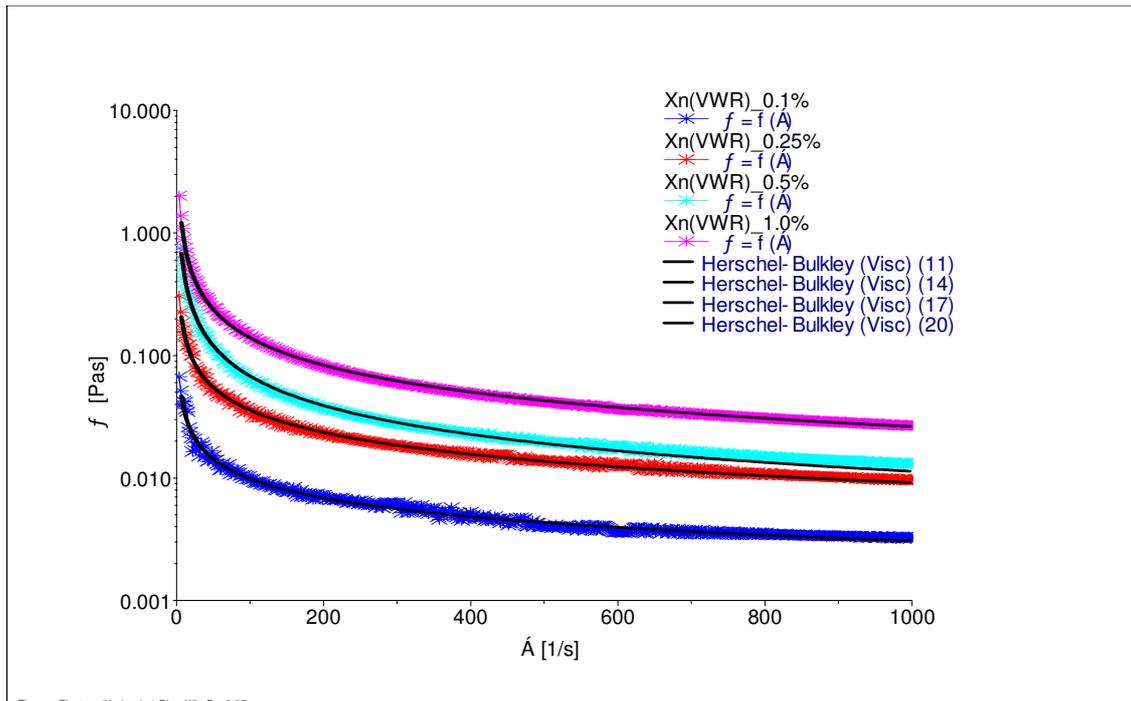


Fig. VIII.35 : Effet de la concentration de xanthane sur la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.

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 36). 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.37, VIII.38). 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

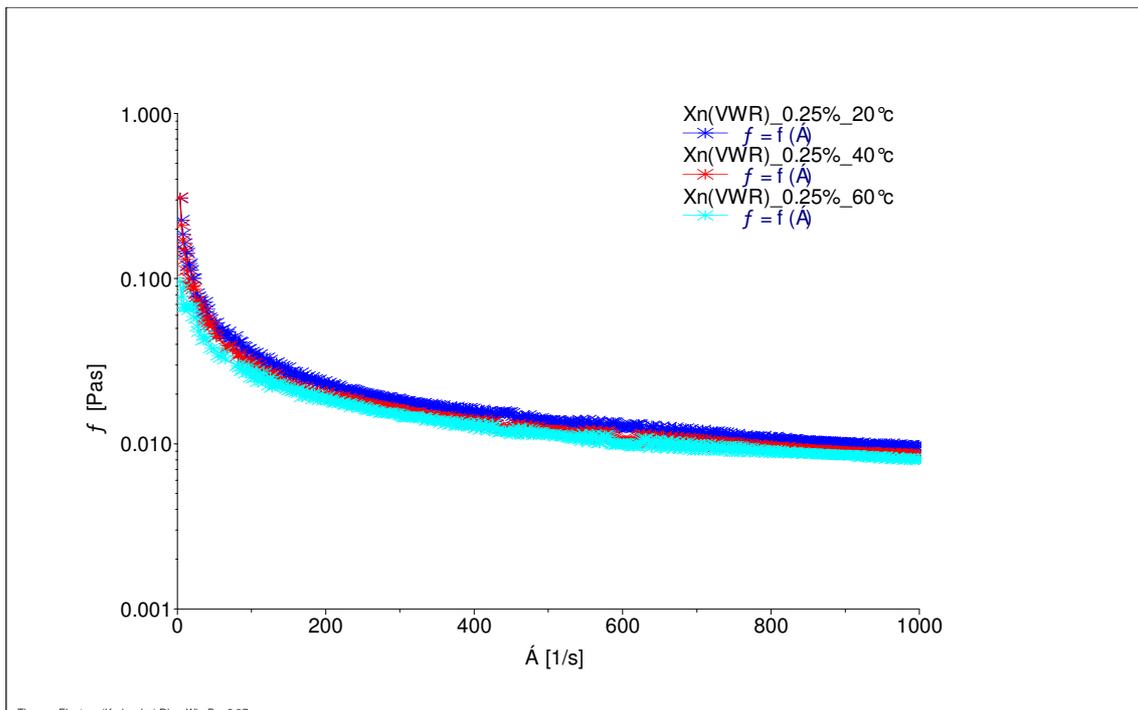


Fig. VIII.36 : Effet de la température sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

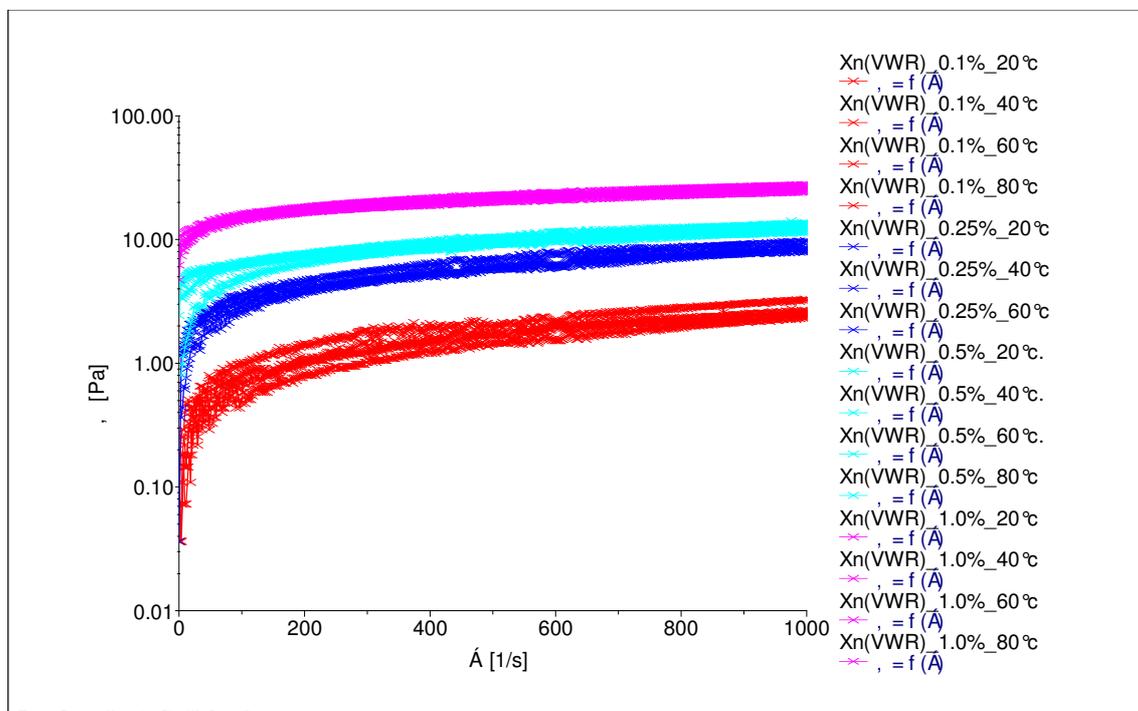


Fig. VIII.37 : Evolution de la contrainte de cisaillement de différentes concentrations du xanthane sur la température en fonction de taux de cisaillement.

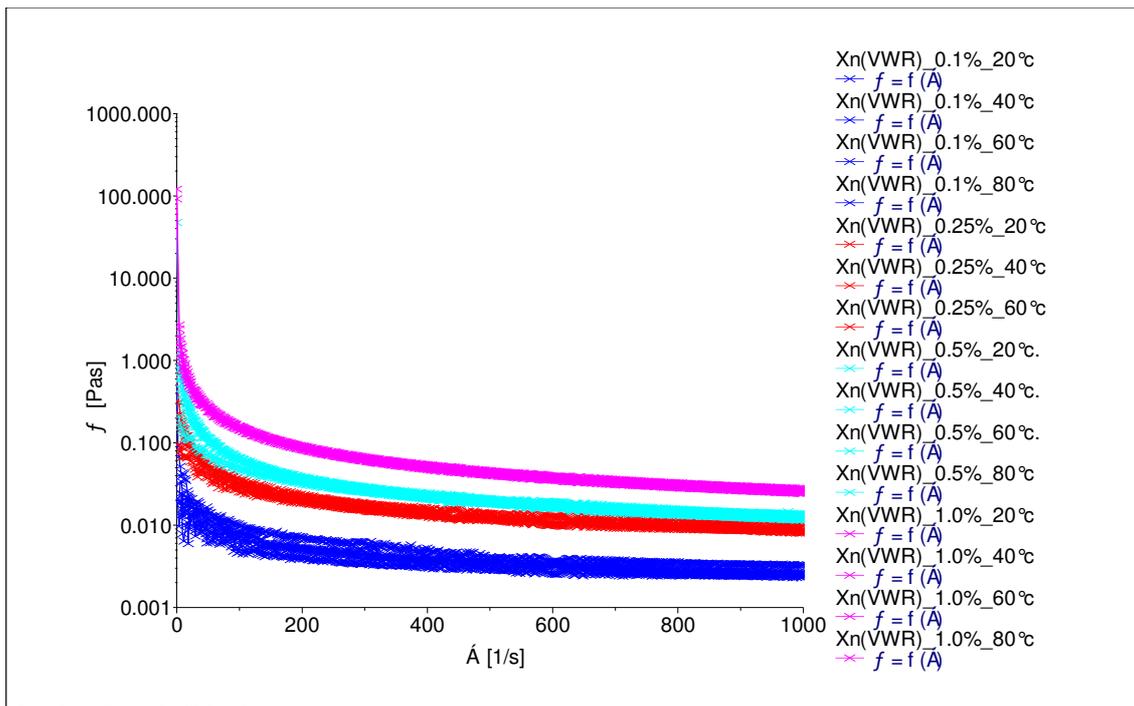


Fig. VIII.38 : Evolution de la viscosité apparente de différentes concentrations du xanthane sur la température, en fonction du taux de cisaillement.

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. [SIMON, j., (2008)]

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.39, VIII.40) montrent que les sels n'influent pas sur le comportement rhéologique du xanthane (reste stable).

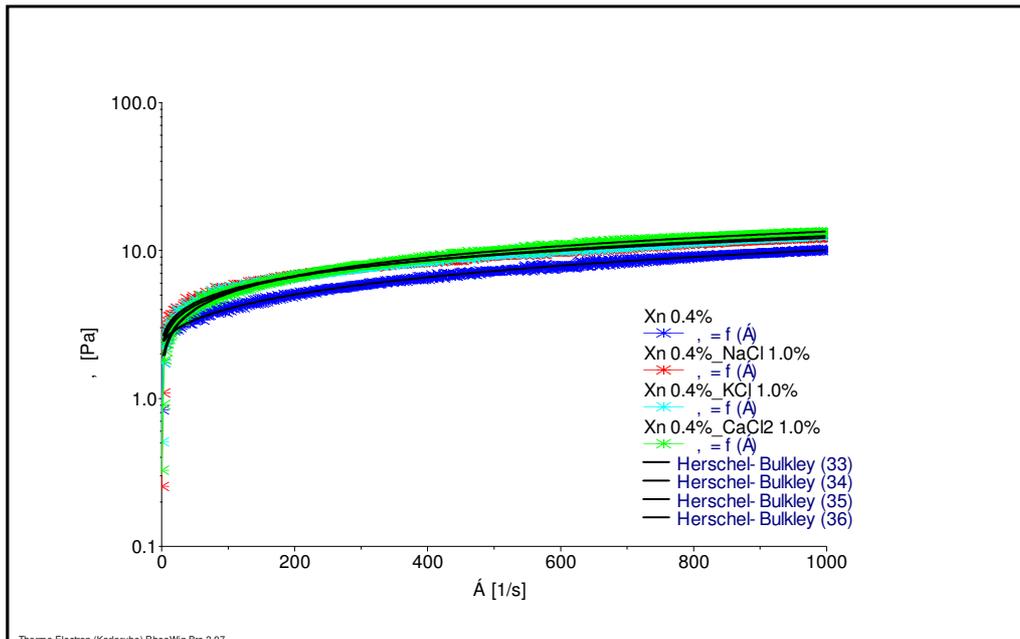


Fig. VIII.39 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

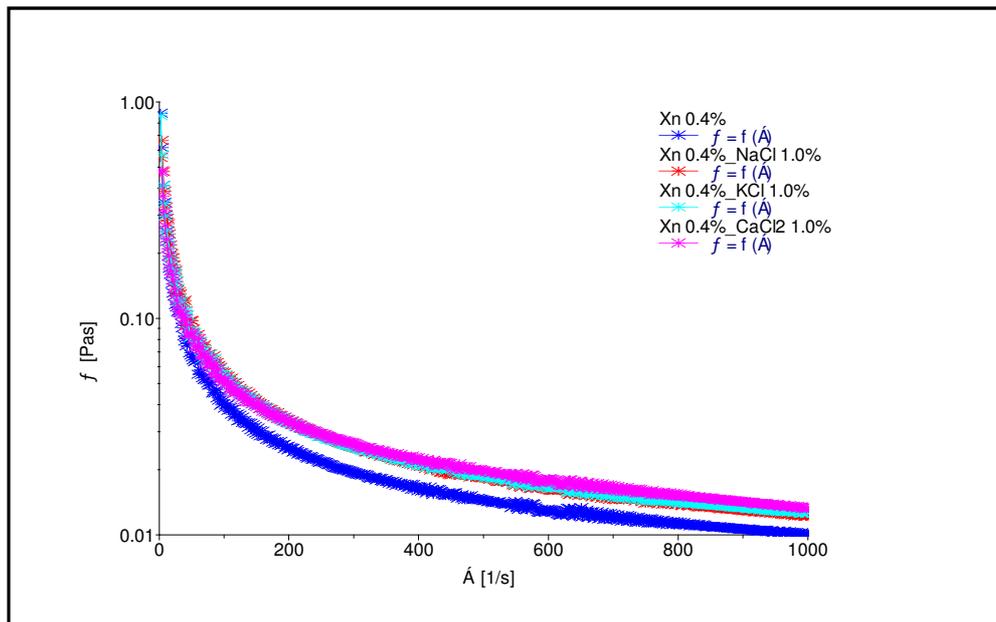


Fig. VIII.40: Effet des sels sur la viscosité du xanthane en fonction de la vitesse de cisaillement.

VIII.3.3.4. Effet de la concentration sur le potentiel zêta de Xanthane

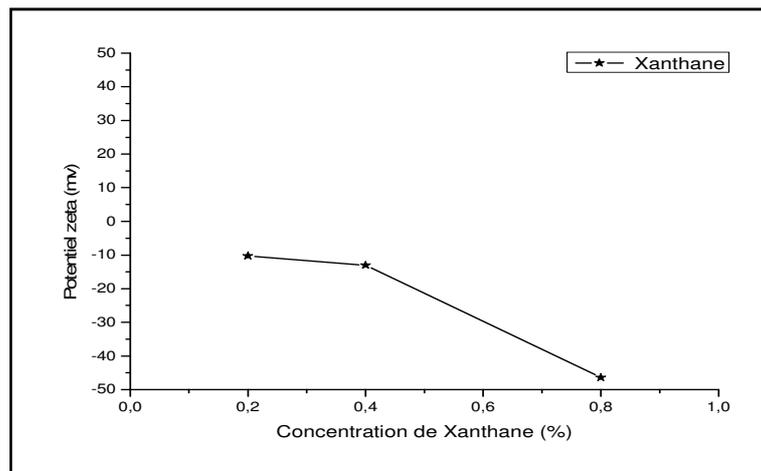


Fig. VIII.41 : Potentiel zêta en fonction de la concentration de Xanthane.

Les essais zétamétriques effectués sur les solutions de xanthane (Fig. VIII.41) donnent des bonnes solutions colloïdales en fonction de la concentration. Deux phénomènes participent dans cette stabilité colloïdale, un phénomène physique et un 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. Ce caractère anionique manifeste par la répulsion entre les chaînes de xanthane enchevêtrés qui assure une bonne suspension colloïdale.

VIII.4. Etude rhéologique et physico-chimique des suspensions mélangées

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 la gomme xanthane avec un carboxyméthylcellulose (CMC) à différentes concentrations (Fig. VIII.42). Par la suite, on a effectué une autre combinaison de xanthane avec polyanionique cellulose (PAC R) (Fig. VIII.44), 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.42, 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.42 et VIII.43).

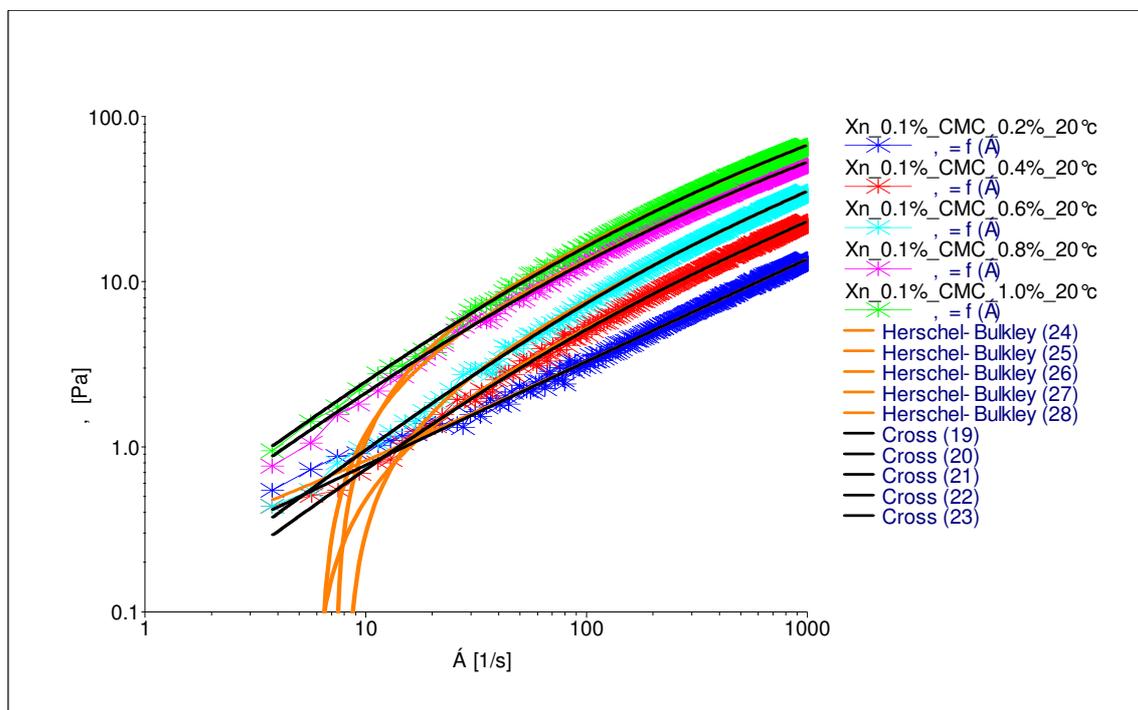


Fig. VIII.42 : Effet de l'ajout de CMC sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

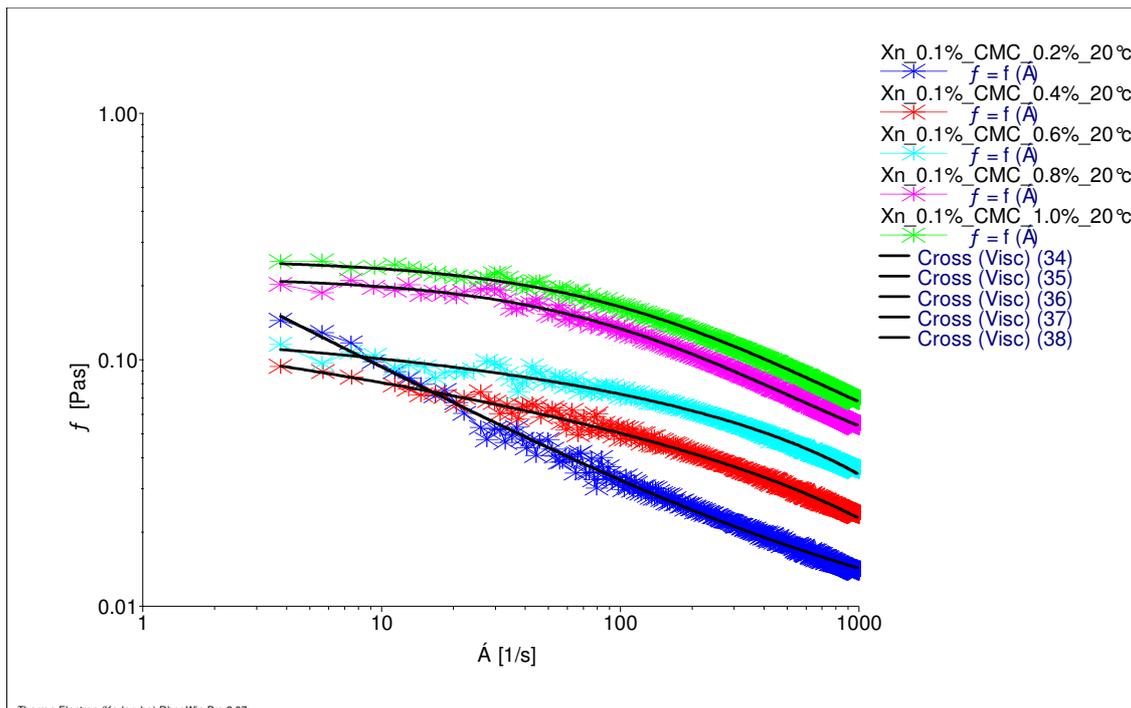


Fig. VIII.43 : Effet de l'ajout de CMC sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

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.44).

On remarque aussi qu'à faible vitesse de cisaillement, l'écart de la viscosité entre chaque concentration est très importante (Fig. VIII.45), cet écart va se diminuer en fonction de la vitesse de cisaillement.

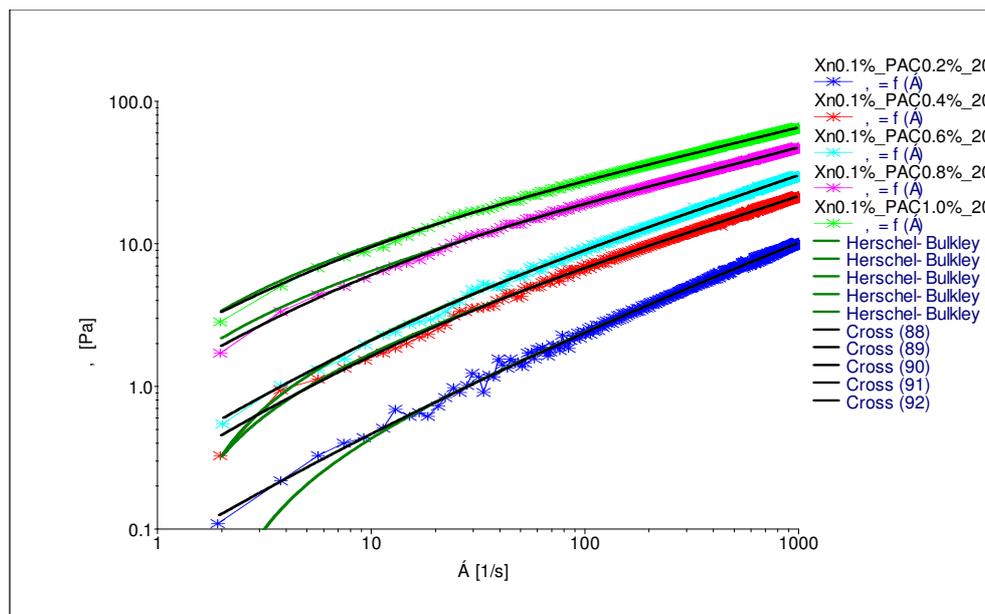


Fig. VIII.44 : Effet de l'ajout de PAC R sur la contrainte de cisaillement du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

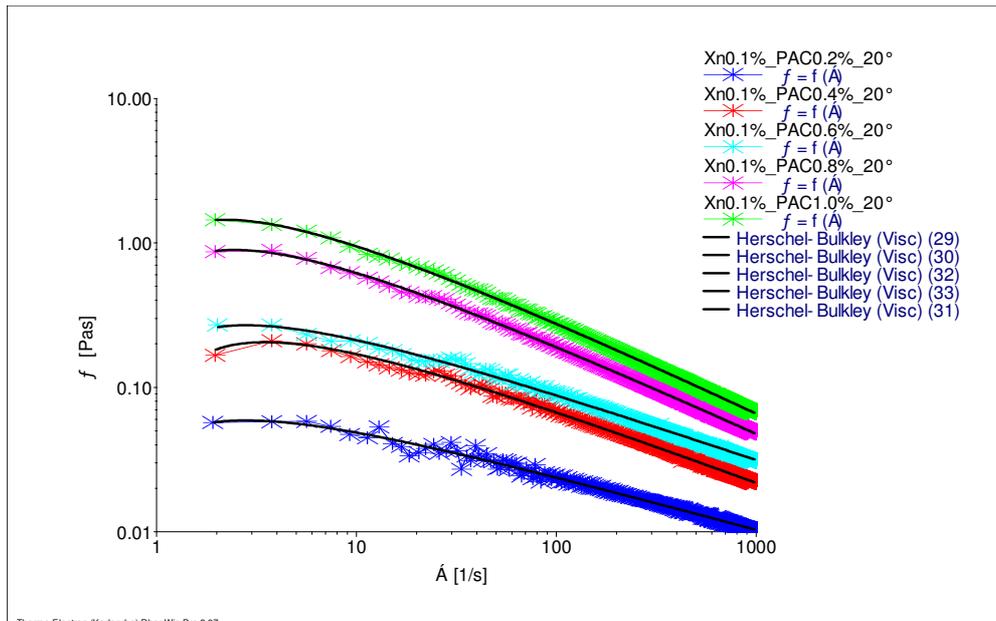


Fig. VIII.45 : Effet de l'ajout de PAC R sur la viscosité du xanthane 0,1% en fonction de la vitesse de cisaillement.

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.46), on remarque que :

- Xanthane – PAC R est le plus visqueux à faible vitesse de cisaillement, cela serait 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 se rapproche à la viscosité de (xanthane – CMC) (Fig. VIII.47). ce rapprochement dû à la manifestation des contraintes de cisaillement qui sont très importantes provoque 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.

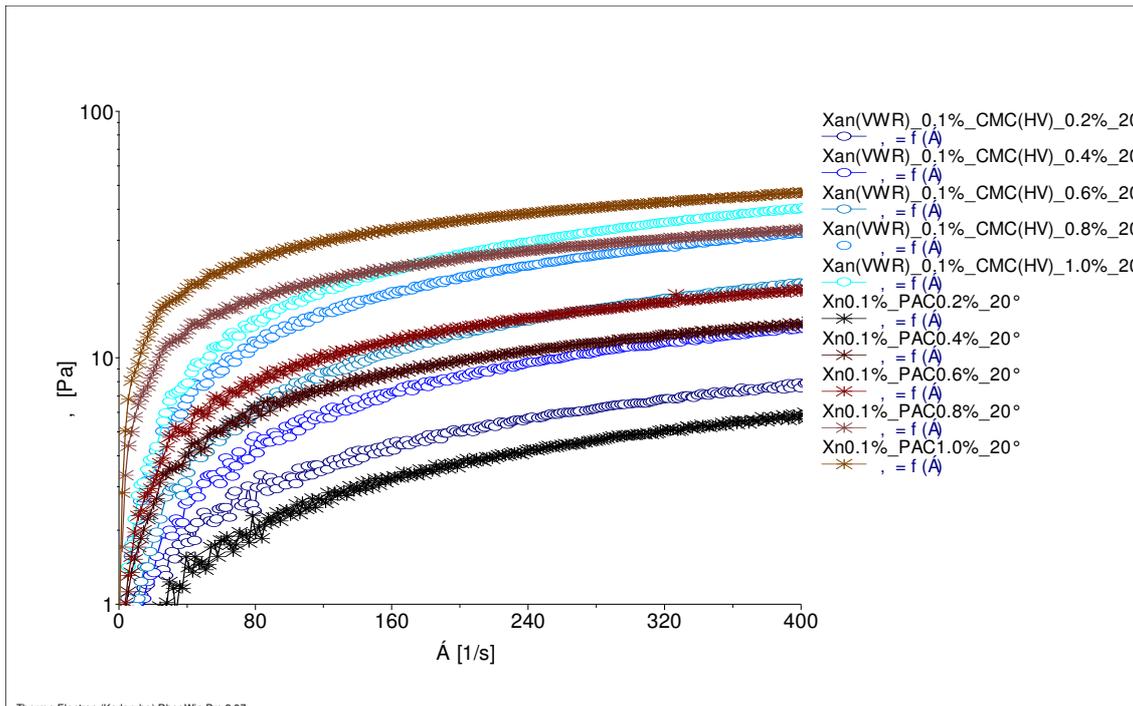


Fig. VIII.46 : Comparaison entre la contrainte de cisaillement de mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction du taux de cisaillement.

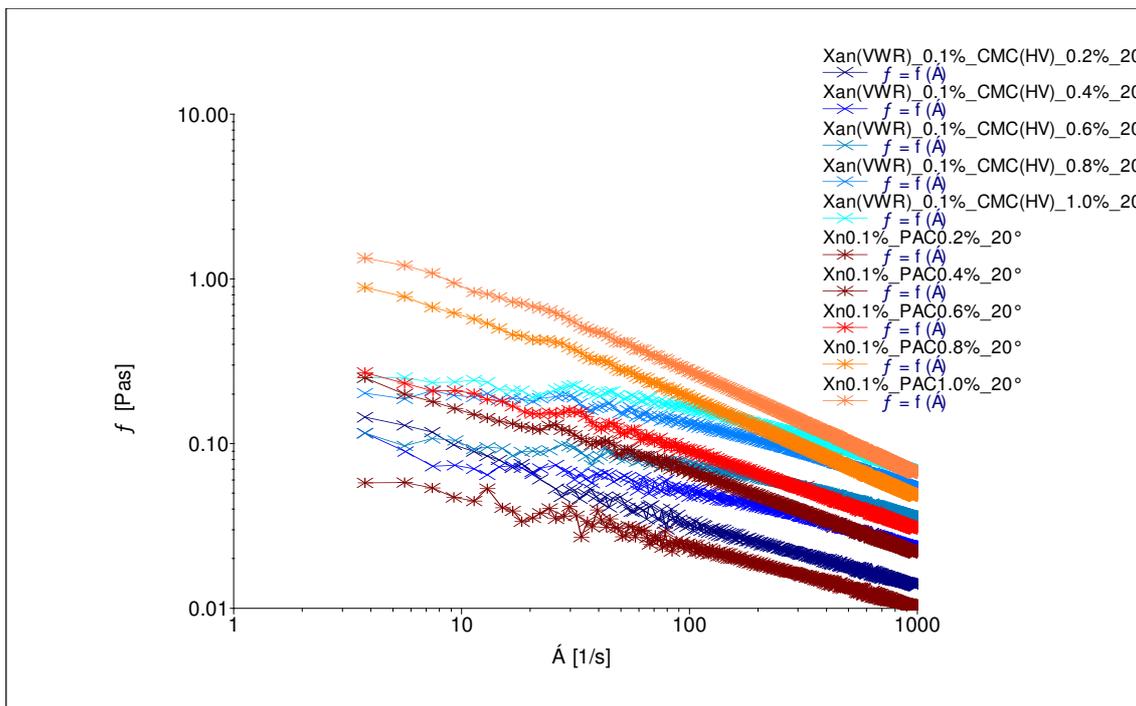


Fig. VIII.47 : Comparaison entre la viscosité apparente du mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

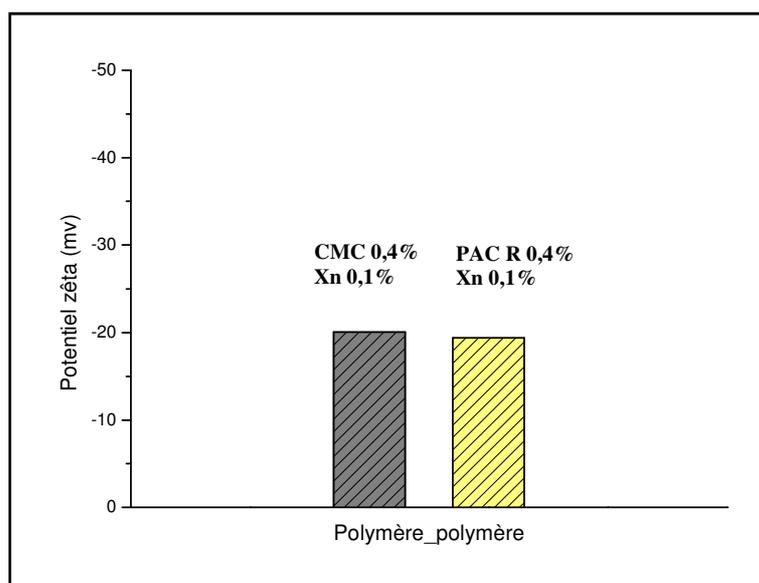


Fig. VIII.48 : Comparaison entre le potentiel zêta du mélange (xanthane – CMC) et (xanthane – PAC R).

Dans l’histogramme (Fig.VIII.48), 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.49), 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.50).

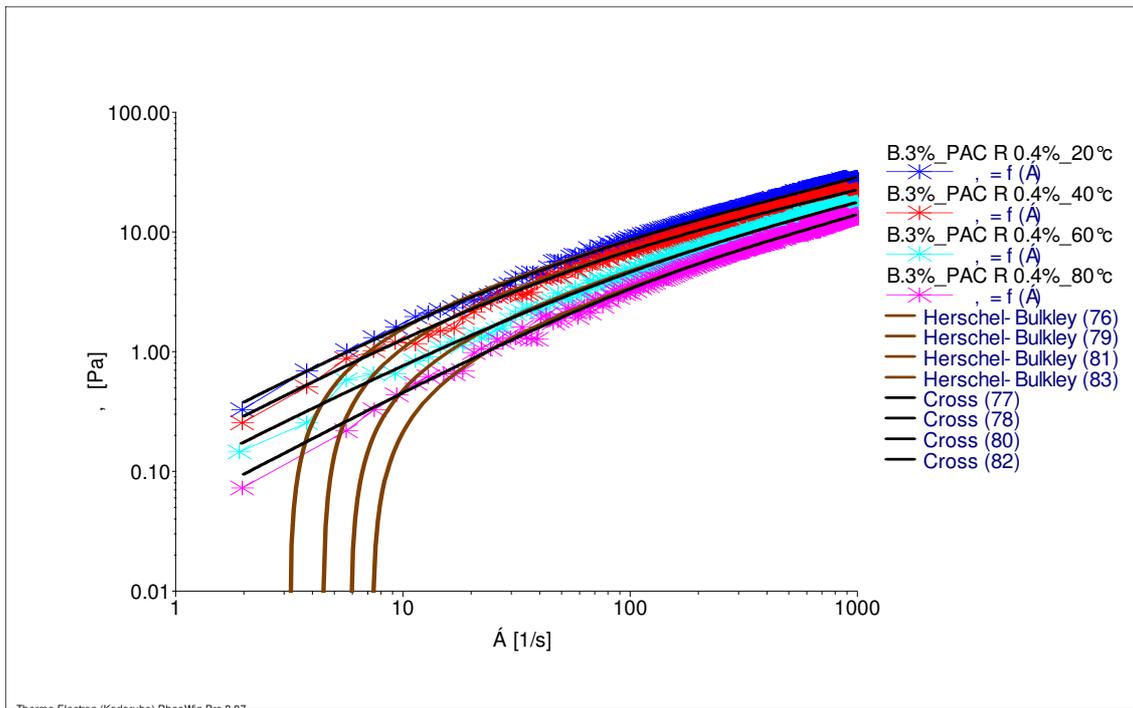


Fig. VIII.49 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

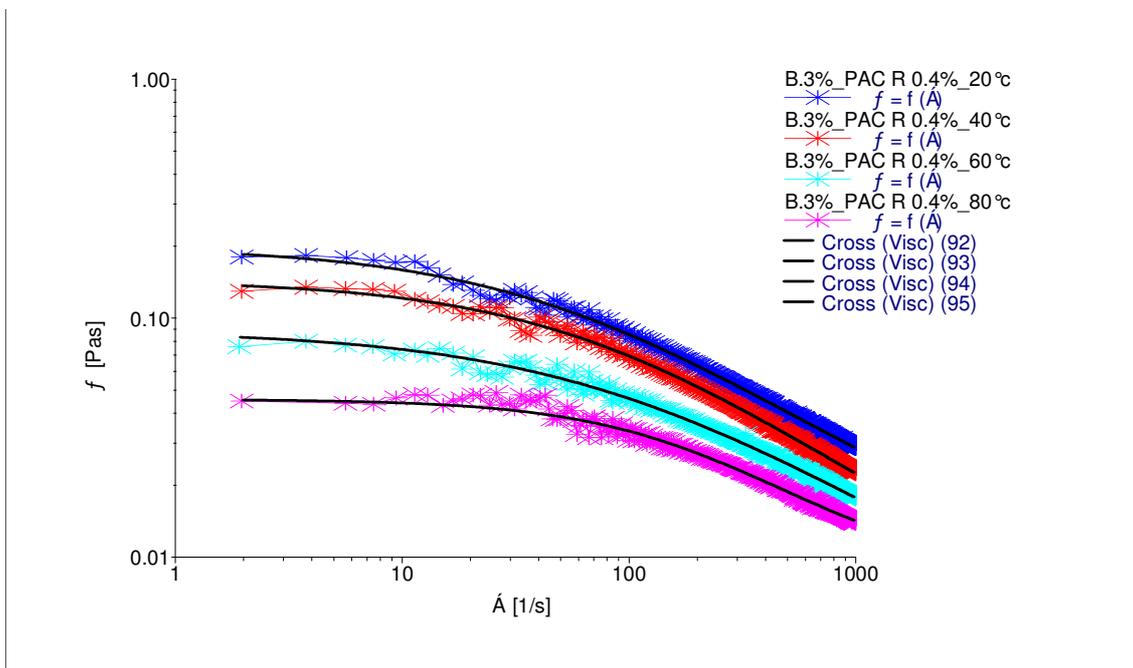


Fig. VIII.50 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

On remarque sur la figure VIII.51 l'évolution de la contrainte sous l'effet de différents sels (NaCl, KCl et CaCl₂) sur le mélange bentonite-PAC R. Ce dernier garde toujours le même comportement rhéologique défini par le modèle du Cross. Aussi, les sels influent sur la

viscosité du mélange par une diminution de la viscosité apparente (Fig. VIII.51). Si on remarque bien sur le rhéogramme de la viscosité, une chute importante de la viscosité 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 du défloculation. Ce phénomène provoque une diminution de la viscosité.

Dans le cas de l'ajout de NaOH dans le mélange de la bentonite – PAC R, deux facteurs influent sur la viscosité apparente de la suspension, le PH et la présence des cations Na^+ (Fig. VIII.53).

C'est le même phénomène observé dans la suspension bentonitique (voir la Fig.VIII.10).

L'effet de l'ajout de PAC R sur les propriétés rhéologiques de la suspension de bentonite (3%) est montré dans la (Fig. VIII.54). 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 figure. VIII.25). Donc, on peut conclure que le comportement rhéologique du PAC R domine celui de la bentonite (Fig. VIII.54).

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

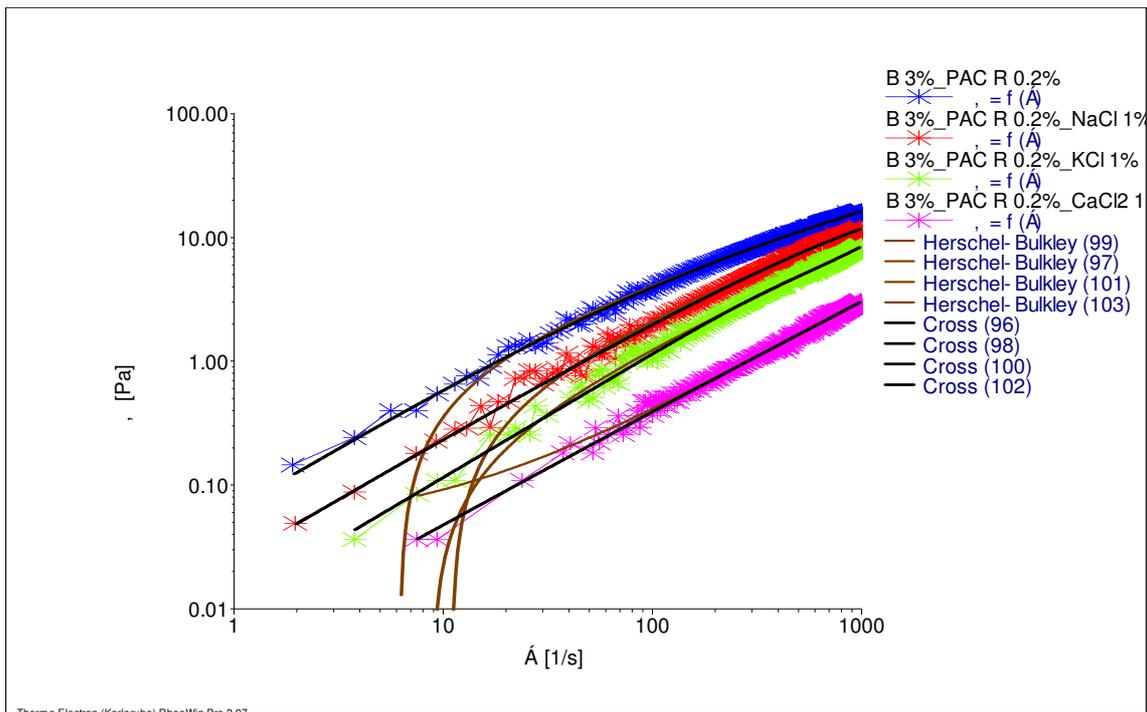


Fig. VIII.51 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

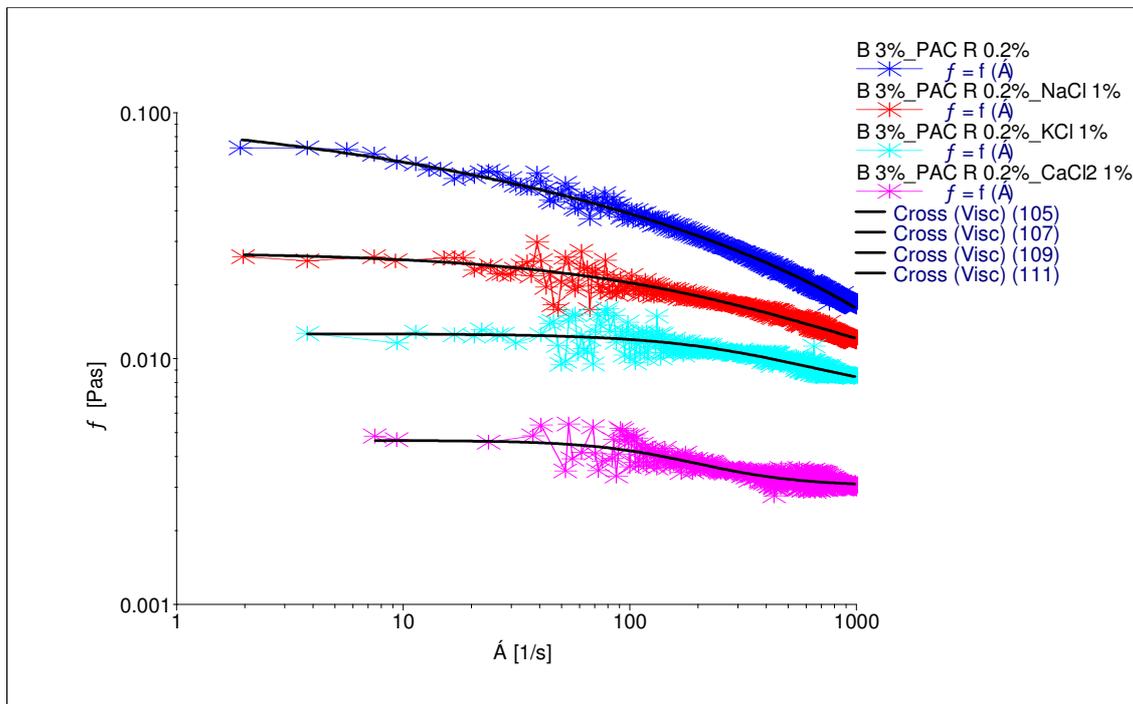


Fig. VIII.52 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

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

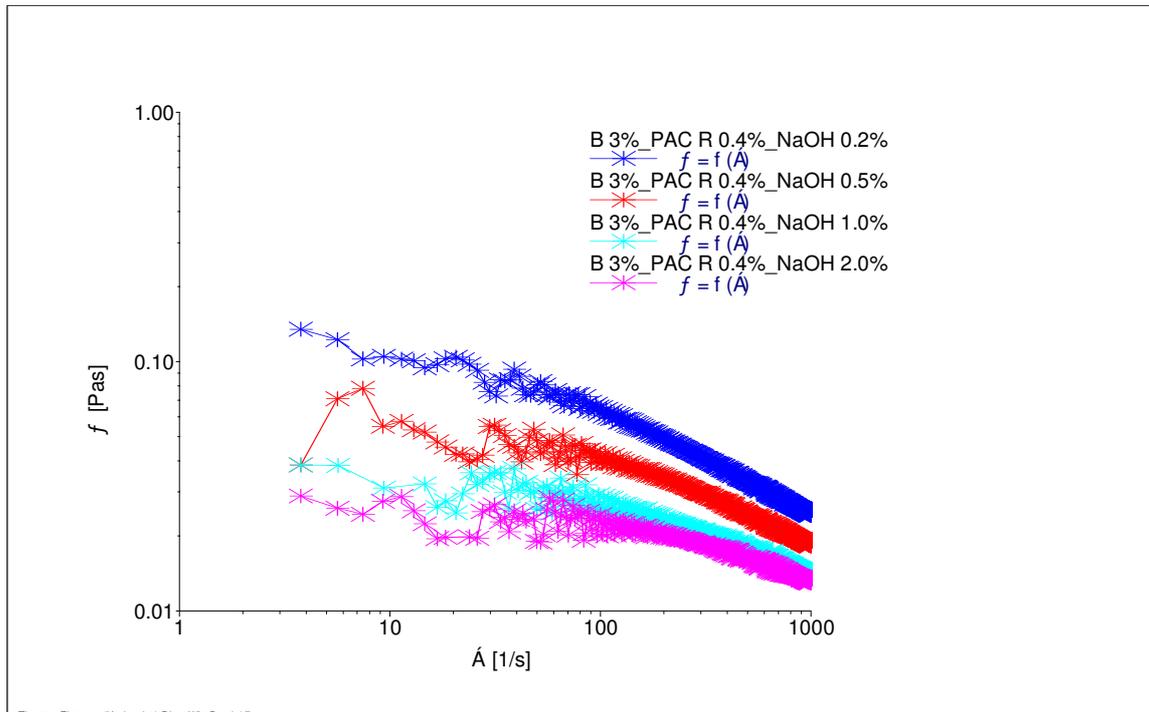


Fig. VIII.53 : Effet de NaOH sur la viscosité de (bentonite – PAC R) en fonction de la vitesse de cisaillement.

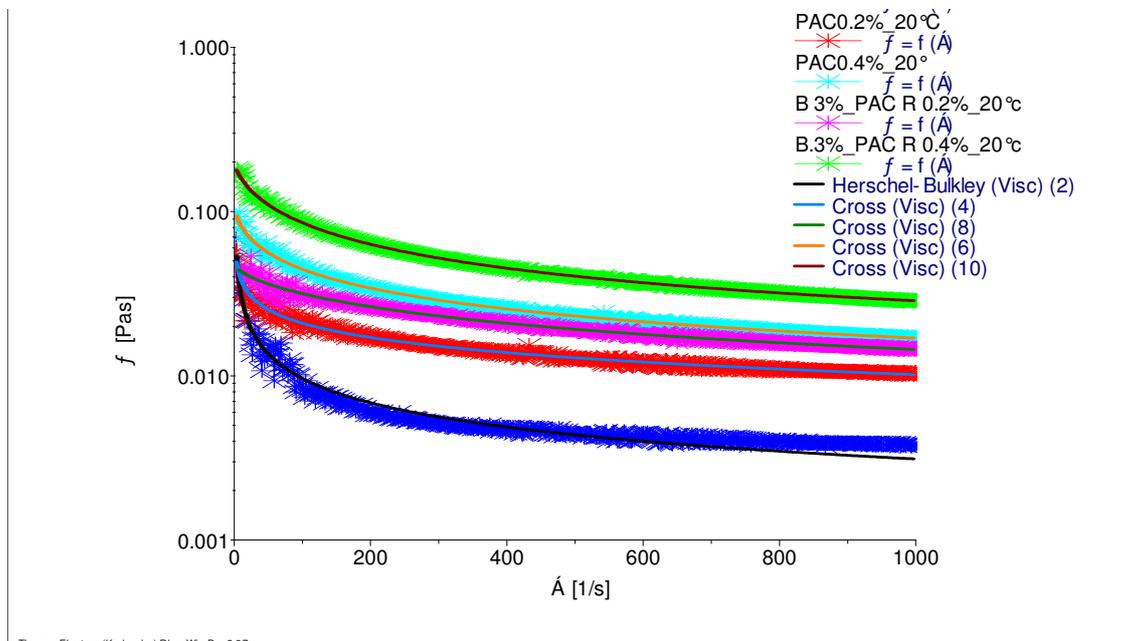


Fig. VIII.54 : Influence de l'ajout du PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%).

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

Vue 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 de celles de la 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.55, VIII.56).
- Les sels n'influent pas sur les propriétés rhéologiques de mélange (Fig. VIII.57, VIII.58).
- L'alcalinité n'influe pas non plus sur les propriétés rhéologiques de mélange (Fig.VIII.59, VIII.60).

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

En générale du point de vue chimique, 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.[BENCHABANE, A., (2006)]

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 [BENCHABANE, A., (2006)].

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

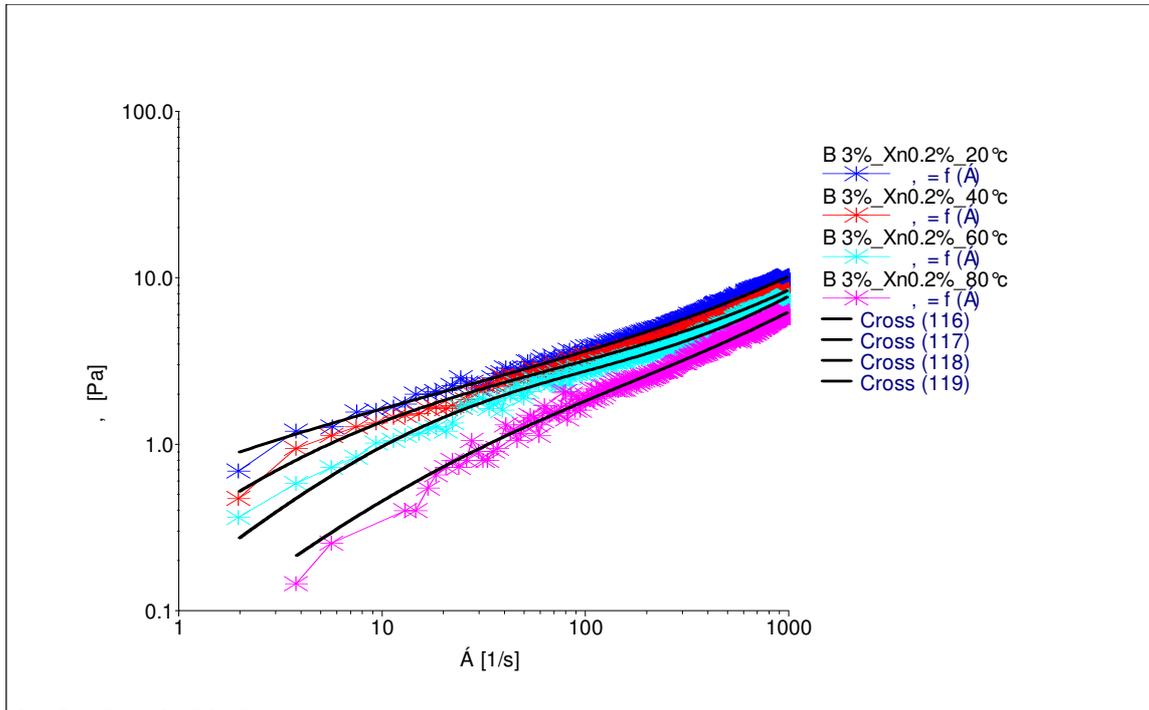


Fig. VIII.55 : Effet de la température sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

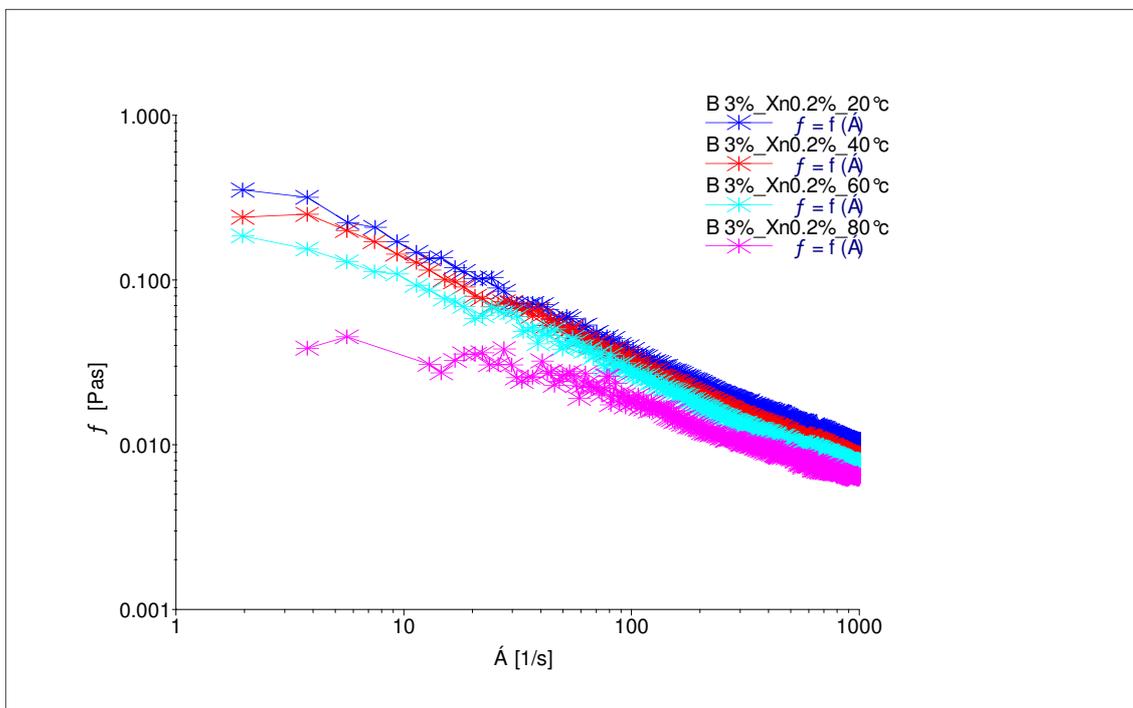


Fig. VIII.56 : Effet de la température sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

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

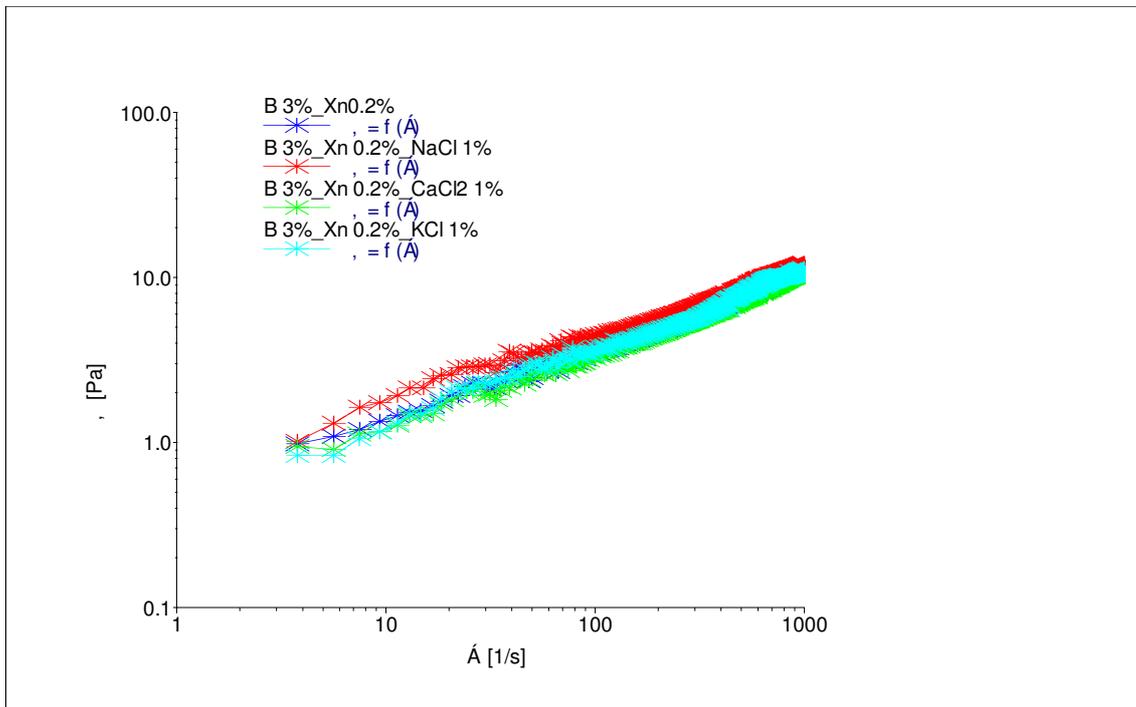


Fig. VIII.57 : Effet des sels sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

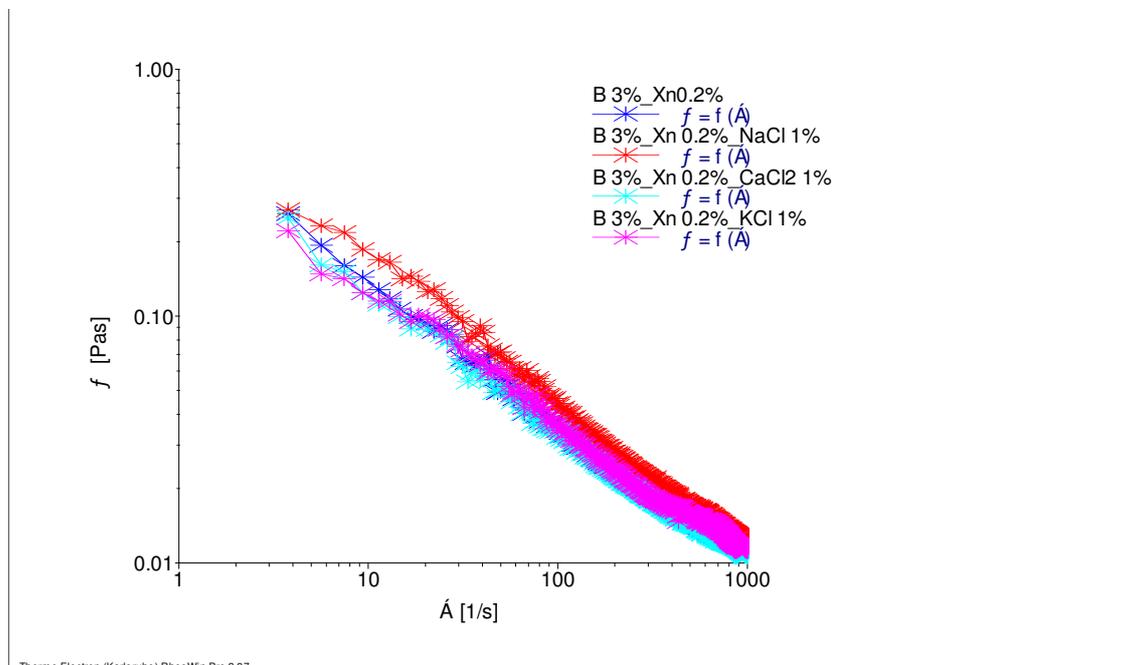


Fig. VIII.58 : Effet des sels sur la viscosité de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

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

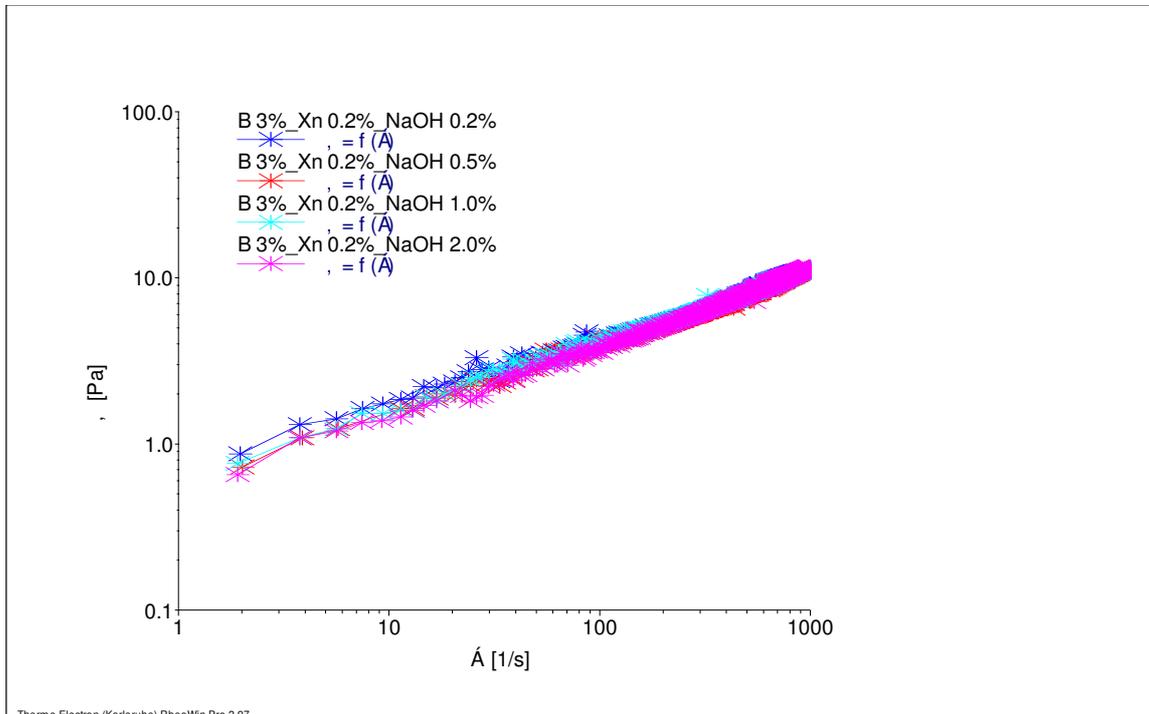


Fig. VIII.59 : Effet de NaOH sur la contrainte de cisaillement de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

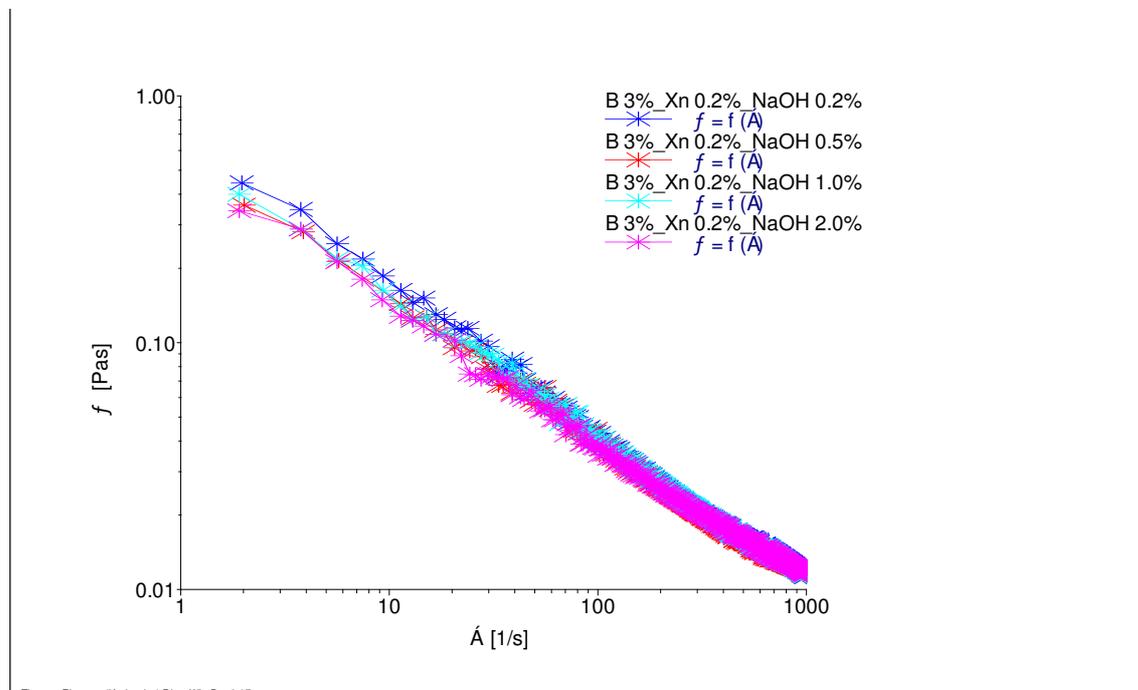


Fig. VIII.60 : Effet de NaOH sur la viscosité apparente de (bentonite – xanthane) en fonction de la vitesse de cisaillement.

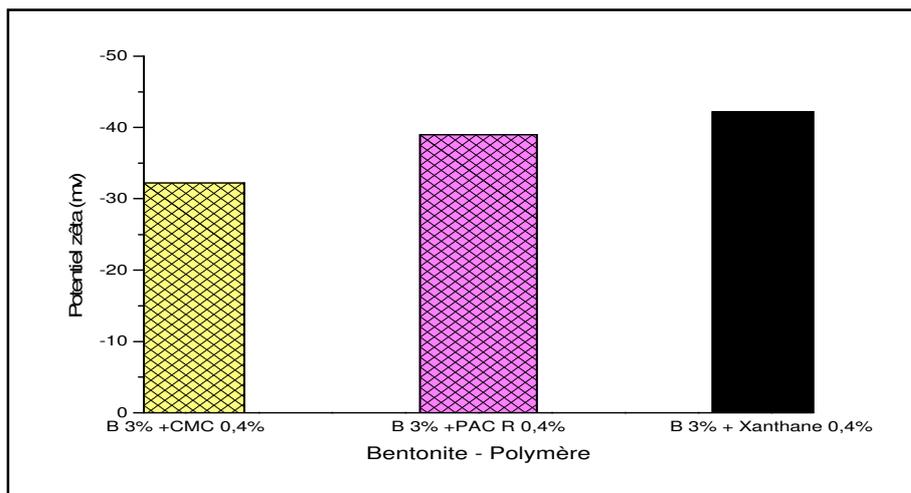


Fig. VIII.61 : Potentiel zêta en fonction de (Bentonite – CMC), (bentonite – PAC R), (bentonite – xanthane et (bentonite – xanthane– PAC R).

Les résultats représentés dans l’histogramme (Fig. VIII.61) montrent que le mélange (bentonite – polymère) dans le domaine de fluide de forage donne des suspensions stable.

On constate que le potentiel zêta dans le mélange (bentonite – viscosifiant) est élevé par rapport à celui du mélange (bentonite – contrôle de filtrat) ; le mélange (bentonite – viscosifiant) donne meilleure suspension colloïdale par rapport au bentonite – contrôle filtrat.

Aussi, la suspension (bentonite – PAC R) est meilleure et plus stable que celle de la suspension de mélange (bentonite – CMC) de même concentration et c’est la raison pour laquelle nous avons fait la suite des essais (combinaison de deux polymères) seulement avec un seul réducteur de filtrat (PAC R).

VIII.4.6. Etude de la suspension du mélange (bentonite – xanthane– PAC R)

Vu les propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la bentonite, du xanthane, du PAC R, de (bentonite-xanthane), (bentonite- PAC R) et (xanthane- PAC R) et dans le cas des mélanges de (bentonite-xanthane- PAC R) réalisé, les propriétés rhéologiques de ce dernier sont similaires à celles de bentonite-xanthane, de bentonite- PAC R et xanthane- PAC R. D’où, l’ajout du xanthane et PAC R dans la suspension de bentonite influe sur la viscosité apparente de mélange. Aussi, il donne une meilleure stabilité à la suspension du mélange (voir Fig. VIII.63).

Du point de vue physique, dans le cas d'une suspension de bentonite – xanthane, la structure de xanthane (ramifiée), les grandes chaînes de PAC R et leurs poids moléculaire, créent, avec la bentonite, un réseau tridimensionnel enchevêtré par l'adsorption des chaînes des polymères sur les molécules de la bentonite. Comme nous l'avons vu, ce système d'adsorption de polymère sur l'argile et la puissance de l'adsorption sont fonctions du caractère chimique du polymère.

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 [BENCHABANE, A., (2006)]. 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 [BENCHABANE, A., (2006)].

Dans le mélange (xanthane – PAC R), nous avons remarqué que le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley est le plus proche à décrire ce type des mélanges (Fig. VIII.44), le modèle de Herschel-Bulkley a donné aussi une reproduction satisfaisante des courbes bentonite- PAC R (Fig. VIII.49) et les courbes d'écoulement du xanthane sont proches du modèle de Herschel-Bulkley. Nous avons représenté tous les mélanges dans l'annexe avec le modèle de Herschel-Bulkley.

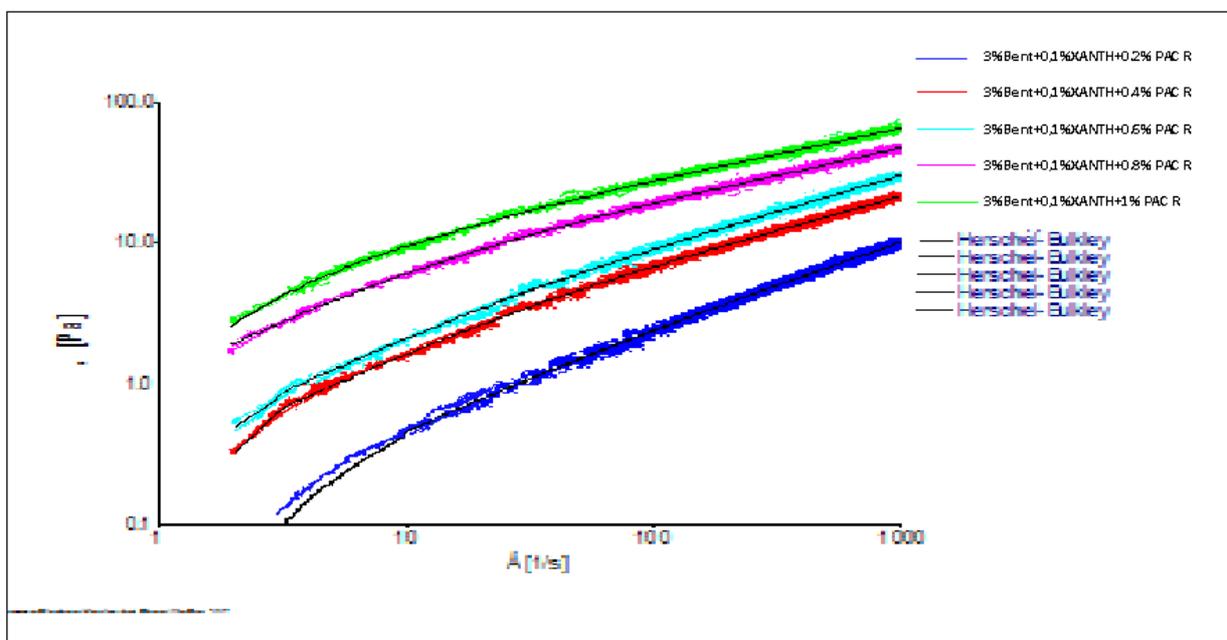


Fig. VIII.62: Influence de l'ajout du xanthane – PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%).

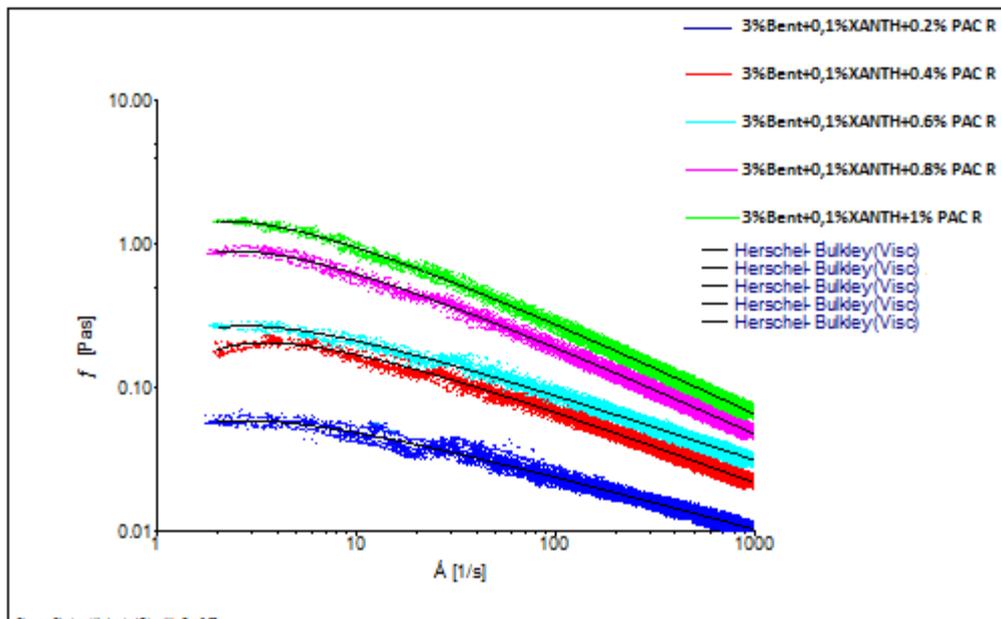


Fig. VIII.63: Influence de l'ajout du xanthane – PAC R sur la viscosité de la suspension de bentonite (3%).

On observe sur les figures VIII.62 et VIII.60 que la viscosité apparente du mélange (Bentonite-Xanthan-PAC R) augmente avec l'ajout PAC R et diminue en fonction du taux de cisaillement. A titre d'exemple on remarque sur les figures VIII.65 et VIII.66 que la viscosité apparente de (B 3%_PAC R 0,5%) et (B6%_PAC R 0,5%) est presque la même par comparaison avec celle du (B 0,3%_0,1%Xanthan _PAC R 0,4%) et (B 0,3%_0,1%Xanthan _PAC R 0,4%) successivement malgré que la concentration du polymère ne sont pas la même.

On remarque aussi que le comportement rhéologique de la suspension du mélange (Bentonite-Xanthane-PAC R) est proche au modèle de Herschel-Bulkley ; ce comportement rhéologique est le même que celui de Xanthane-PAC R (voir Fig. VIII.45). Donc, on peut conclure que le comportement rhéologique du Xanthane-PAC R domine de polymère seul et celui de la bentonite (Fig. VIII.63).

Les résultats représentés dans l'histogramme (Fig. VIII.64) montrent que le mélange (bentonite – polymères) dans le domaine de fluide de forage donne des suspensions stable.

On constate que le potentiel zêta dans le mélange (bentonite – viscosifiant– contrôle de filtrat) est élevé par rapport à celui dans le mélange (bentonite – viscosifiant), (bentonite – contrôle de filtrat) (Fig. VIII.61), (polymère – polymère) (Fig. VIII.48), donc le mélange (bentonite – viscosifiant– contrôle de filtrat) donne une meilleure suspension colloïdale par rapport au (bentonite – viscosifiant) et (bentonite– contrôle de filtrat).

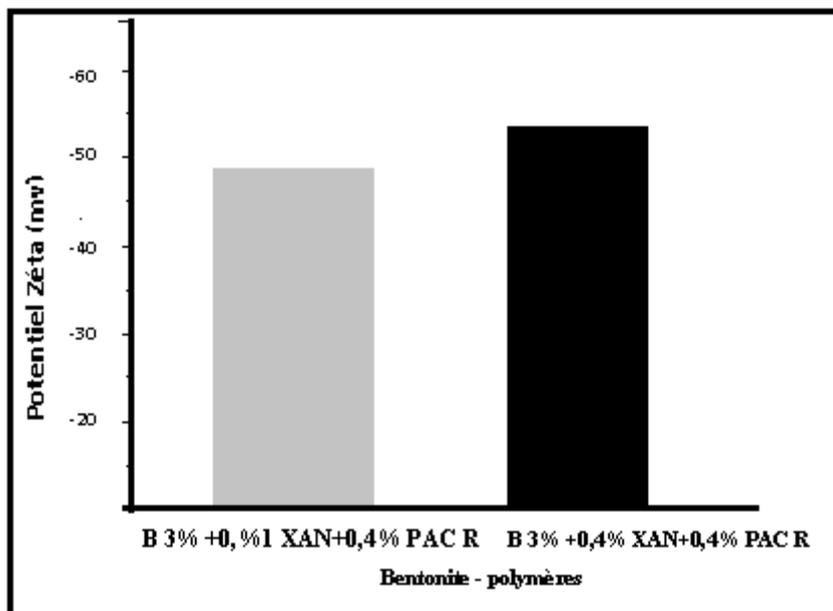


Fig. VIII.64 : Potentiel zêta en fonction de (bentonite – xanthane – PAC R).

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 $88,85 \mu\text{m}$ et la surface spécifique est de $0,188 \text{ m}^2/\text{g}$. 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'écoulement 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 du modèle de Herschel Bulkley.

Aussi, une étude rhéologique et physico-chimique sur le système (Eau- polymère) a été effectuée 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) à 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 faibles vitesses de cisaillement. L'effet de la température (20° , 40° , 60° et 80°C) et des sels (KCl 1%, NaCl 1% et CaCl_2 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) à différentes 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% à 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 à 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 seuil est visible à faibles 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 la contrainte et la 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 cette 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 à 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 les 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 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 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 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 que 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).

Référence :

- [1] ABEND, S. & LAGALY, G., (2000). « Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersions ». *Applied Clay Science*, 16 : 201–227.
- [2] AHMED, A. & RAMASWAMY, H.S., (2004). « Effect of high-hydrostatic pressure and concentration on rheological characteristics of xanthan gum », *Food Hydrocolloids* 18, 367–373.
- [3] AMOURA, M., (2009). « Caractérisation rhéologique de la carboxyméthylcellulose ». 19^{ème} Congrès Français de Mécanique.
- [4] BENCHABANE, A., (2006). « Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. », Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg.
- [5] BENYOUNES, K., (2007). « 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, Grenoble.
- [6] BESQ, A; MALFOY; C. PANTET, A; MONNET, P. & RIGHI, D., (2003). « Physicochemical characterization and flow properties of some bentonite muds ». *Applied Clay Science*, 23 : 275–286.
- [7] BOUSSAK, H., (2008). « Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique ». Thèse de magistère, Université M'hamed Bougara Bumerdès.
- [8] BRANDENBURG, U & LAGALY, G., (1988). « Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions ». *Applied Clay Science*, 3 : 263–279.
- [9] COUSSOT, P., (1992). « Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées ». Thèse de PhD, Institut national polytechnique de Grenoble. Etudes du CEMAGREF, 415 pages.
- [10] DDANI, M.; MEUNIER, A.; ZAHRAOUI, M.; BEAUFORT, D.; EL WARTITI, M.; FONTAINE, C.; BOUKILI, B. & EL MAHI, B., (2005). « Clay mineralogy and chemical composition of bentonites from the Gourougou volcanic massif (northeast Morocco) ». *Clays and Clay Minerals*, 53 : 250–267.
- [11] DELGADO, A.V., (2005). « Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena ». *Pure Appl.Chem.*, Vol.77, No.10, 1753–1805.

- [12] DIDIER, G. & COMEAGA, L., (1988). « Hydratation, gonflement, conductivité hydraulique. Influence de produits chimiques ». Congrès Géo-Bento, étanchéité par géosynthétiques bentonitiques : état de l'art, pages 74–95. Paris.
- [13] FOURAR, K., (2006). « Etude du comportement rhéologique et de filtration des fluides de forage a base de biopolymères », Thèse de magistère. Université M'hamed Bougara Boumerdès.
- [14] KAUFHOLD, S. & DOHRMANN, R., (2008). « Detachment of colloidal particles from bentonites in water », *Applied Clay Science*, 39.
- [15] KAYACIER, A. & DOGAN, M., (2006). « Rheological properties of some gums-salep mixed solutions », *Journal of Food Engineering* 72, 261–265.
- [16] KHANDAL, R.K. & TADROS, T.F., (1988). « Application of viscoelastic measurements to the investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions ». *Journal of Colloid and Interface Science*, 125 : 122–128.
- [17] KHERFELLAH, N.; BEKKOUR, S.; & BENHADID, K., (2005). « Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation ». *Rhéologie*, 7 : 48–54.
- [18] KHODJA, M., (2008). « Les fluides de forage : étude des performances et considérations environnementales ». Thèse de doctorat, École doctorale : Science des Procédés, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- [19] KHODJA, M. & KHODJA, S., (1999). « Etude comparative du pouvoir inhibiteur des fluides de forage à base d'eau sur le champ de Hassi Messaoud ».
- [20] KULICKET, W., (1996). « Characterization of aqueous carboxymethylcellulose solutions in terms of their molecular structure and its influence on rheological behavior ». *Polymer* Vol. 37 No. 13, 2723-2731.
- [21] LAGALY, G., (1989). « Principles of flow of kaolin and bentonite dispersions ». *Applied Clay Science*, 4 : 105–123.
- [22] LAGALY, G. & ZIESMER, S., (2003). « Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions ». *Colloid and Interface Science*, 100–102: 105–128.
- [23] MALFOY, C.; DDANI, M.; PANTET, A. & MONNET, P., (2006). « Les bentonites : transfert et échanges. Un matériau aux propriétés évolutives et variables ». Colloque National sur les propriétés de transfert dans les matériaux, page 15. Lille.

- [24] M'BODJ & AL., (2004). « Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay–water–electrolyte–xanthan », *Journal of Colloid and Interface Science* 273, 675–684.
- [25] MEUNIER, A., (2003). « Argiles. Géosciences ». Editions Scientifiques Gb, 434 pages.
- [26] MURRAY, H.H., (2001). « Clays in industry ». In Elsevier, editor, *A Clay Odyssey – 12th International Clay Conference*. Bahía Blanca, Argentina.
- [27] NORRISH, K., (1954). « The swelling of montmorillonite ». *Discussions of the Faraday Society*, 18 : 120–134.
- [28] PERMIEN, T. & LAGALY, G., (1995). « The rheological and colloidal properties of bentonite dispersions in the presence of organic compounds. Bentonite, sodium montmorillonite and surfactants ». *Clays and Clay Minerals*, 43 : 229–236.
- [29] PAUMIER, S., (2006). « Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile – eau pour des suspensions de smectites ». Thèse d'école Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, France.
- [30] SAFI, B., (2002). « 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} ». Mémoire de magistère, Université M'hamed Bougara Boumerdes.
- [31] SENTHIL KUMAR, A.; MAHTO, V.; & SHARMA, V.P., (2003). « 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, 525-530.
- [32] SHEN, Z., (2004). « Dispersion of nanosized aqueous suspensions of barium titanate with ammonium polyacrylate », *Journal of Colloid and Interface Science*, 275, 158-164.
- [33] SIMON, j., (2008). « Gomme xanthane : agent viscosant et stabilisant ». *Techniques de l'Ingénieur*.
- [34] SLIMANI, S., (2002). « Rheological study of polymer based drilling muds: effects of polymer type, its content, temperature & salinity », Thèse de magistère, Ecole d'ingénieur de boumerdes, IAP.
- [35] TERRISSE, H. (2001). « Zeta potential study of Calcium Silicate Hydrates interacting with alkaline cations », *Journal of Colloid and Interface Science*, 244, 58-65.
- [36] BERGAYA, F. & LAGALY, G., (2001). « Surface modification of clay minerals. *Applied clay science* », 19 : 1–3.

- [36] TOURET, O.; PONS, C.H.; TESSIER, D., & TARDY, Y., (1990). « Etude de la repartition de l'eau dans des argiles saturées Mg^{2+} aux fortes teneurs en eau ». *Clay Minerals*, 25 : 217–233.
- [37] VALI, H. & BACHMANN, L., (1988). « Ultrastructure and flow behavior of colloidal smectite dispersions ». *Journal of Colloid and Interface Science*, 126 : 278–291.
- [38] VAN OLPHEN, H., (1977). « An Introduction to Clay Colloid Chemistry ». Wiley, New York.
- [39] WEISS, A. & FRANCK, R., (1961). « Über den bau des gerüst en thixotropen gelen ». *Naturforsch*, 10 : 141–143.

ANNEXES

ANNEXE

ANNEXE A



Photo n°1: Rhéomètre FANN modele 266 et FANN 35 et Rhéomètre cup heater modele 25120



Photo n°2 : Image du viscosimètre Thermo HAAKE VT 550.



Photo n°3 : Zitamètre du type Zetasizer 2000 de Malvern Instruments.



Photo n°4 : Filtre presse API



Photo n°5 : Densimètre à boue



Photo n°6 : Mixeur Hamilton Beach



Photo n°7: PH Mètre et PH Mètre a boue





Photo n°8: Le BECKMAN COULTER LS 230



Photo n°9: a) Balance analytique, b) Spatules rigides, c) Plaque et Entonnoir en



Photo n°10: a) Eprovettes cylindriques graduées, b) Papiers filtres.

ANNEXE B

COBINAISON BENTONITE (3%) et (6%) AVEC XANTHAN OU PAC R

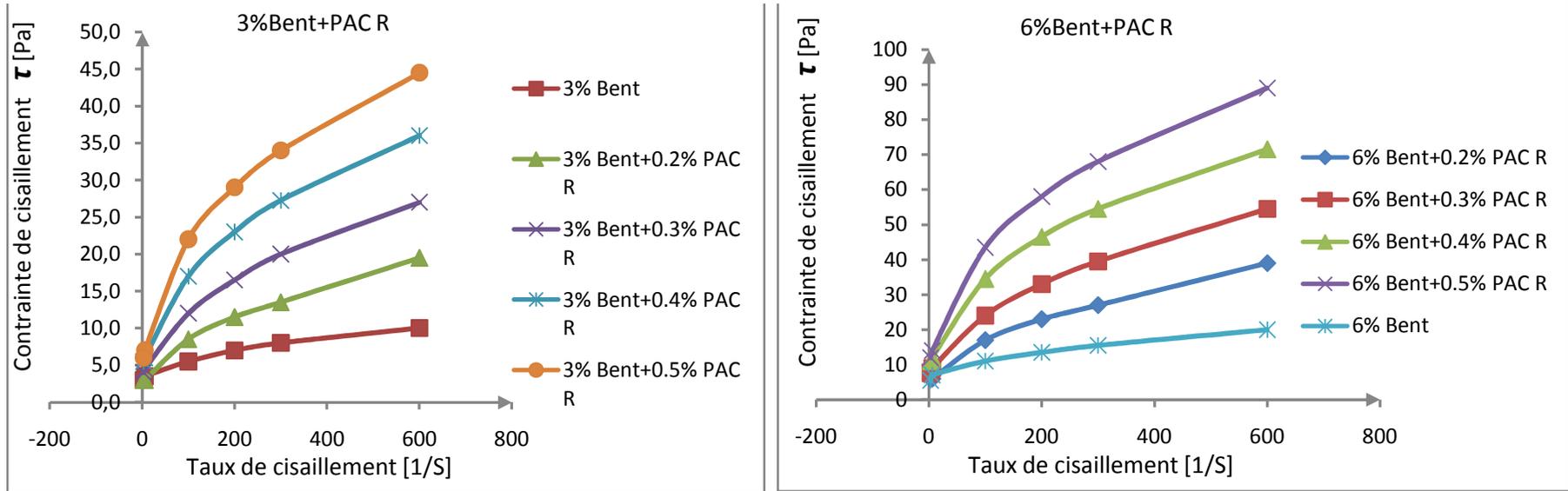


Fig. I : Influence de l'ajout du PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

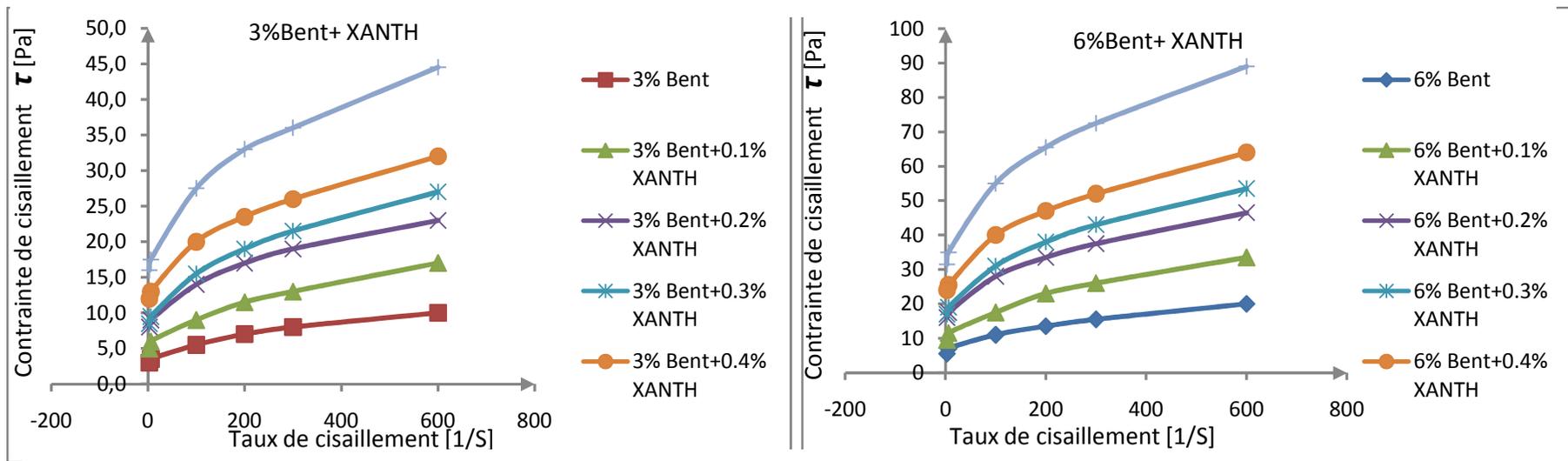


Fig. II: Influence de l'ajout du XANTHAN sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

COBINAISON BENTONITE (3%) et (6%) AVEC XANTHAN ET PAC R

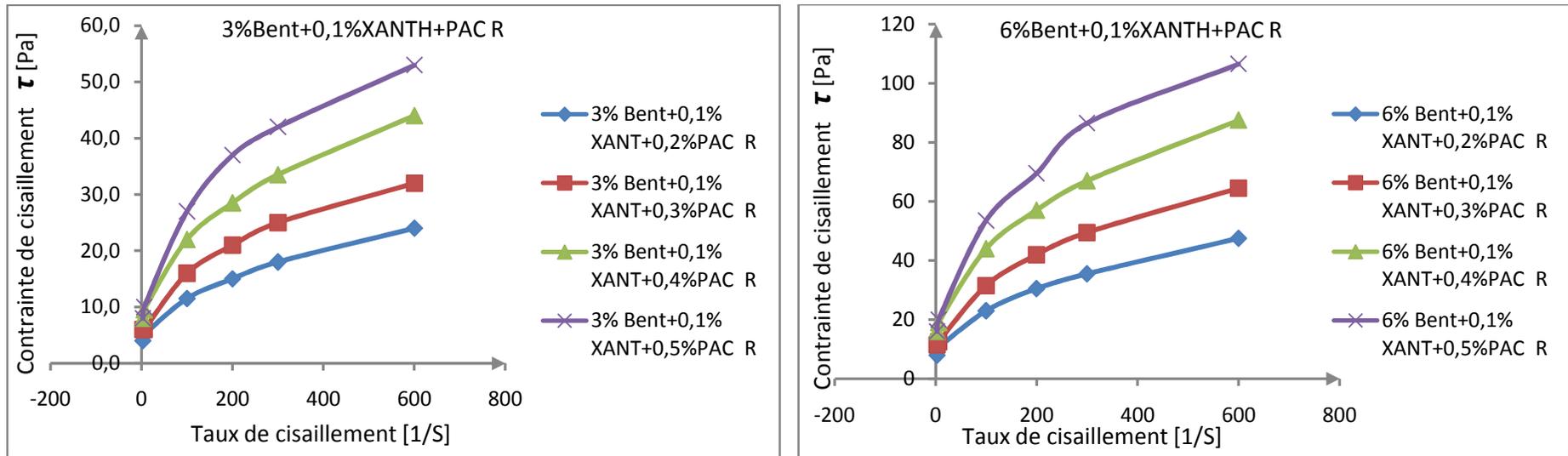


Fig. III : Influence de l'ajout du 0,1%XANTH+PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

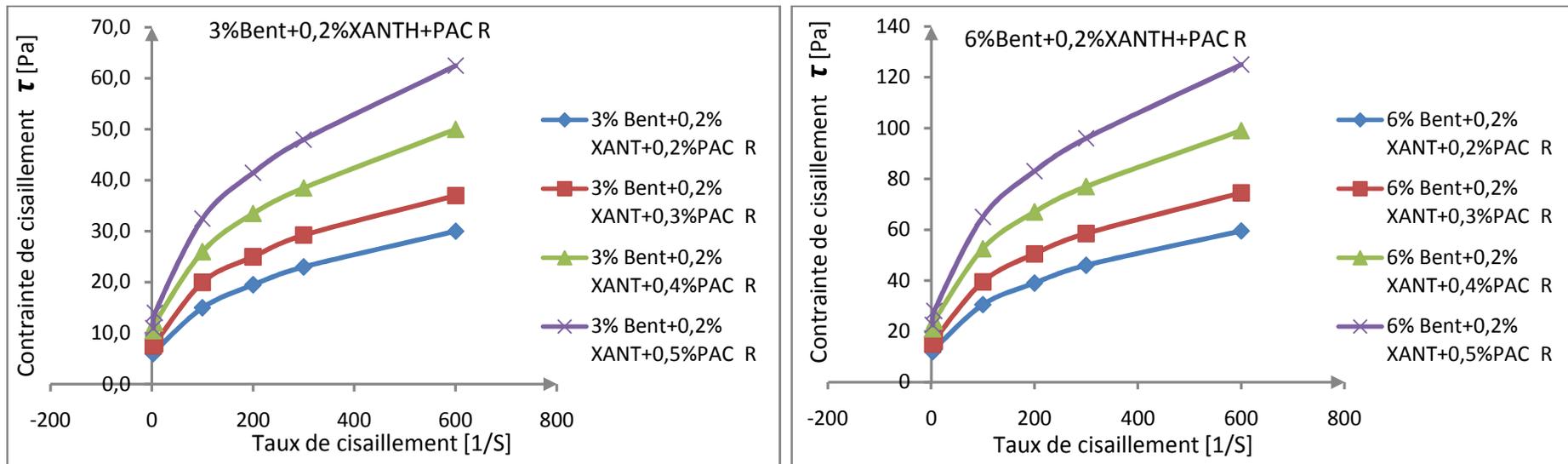


Fig. IV: Influence de l'ajout du 0,2%XANTH+PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

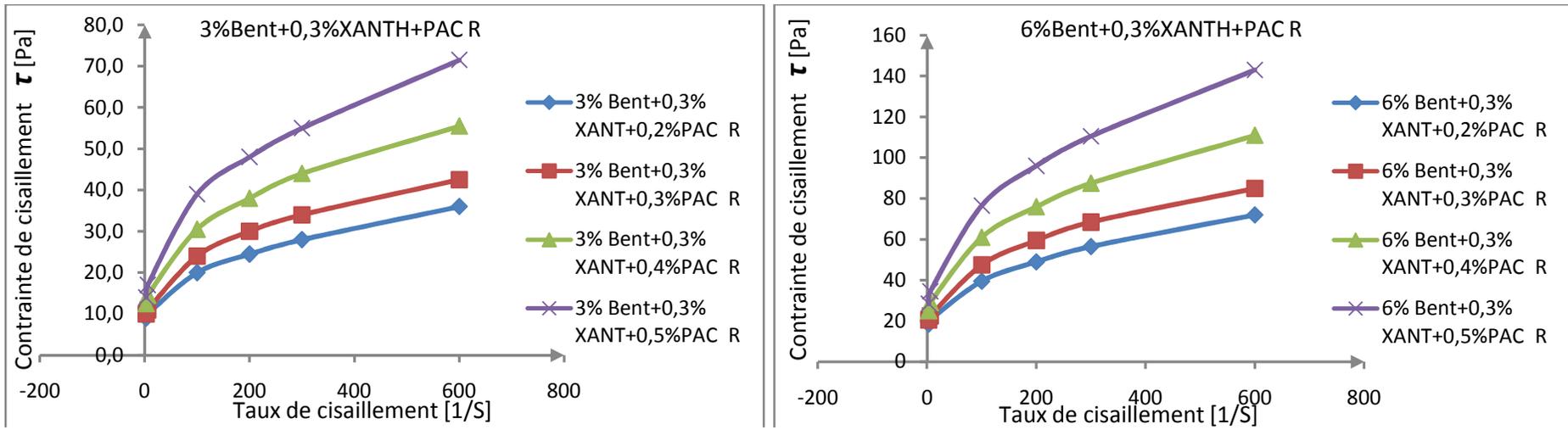


Fig. V: Influence de l'ajout du 0,3%XANTH+PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

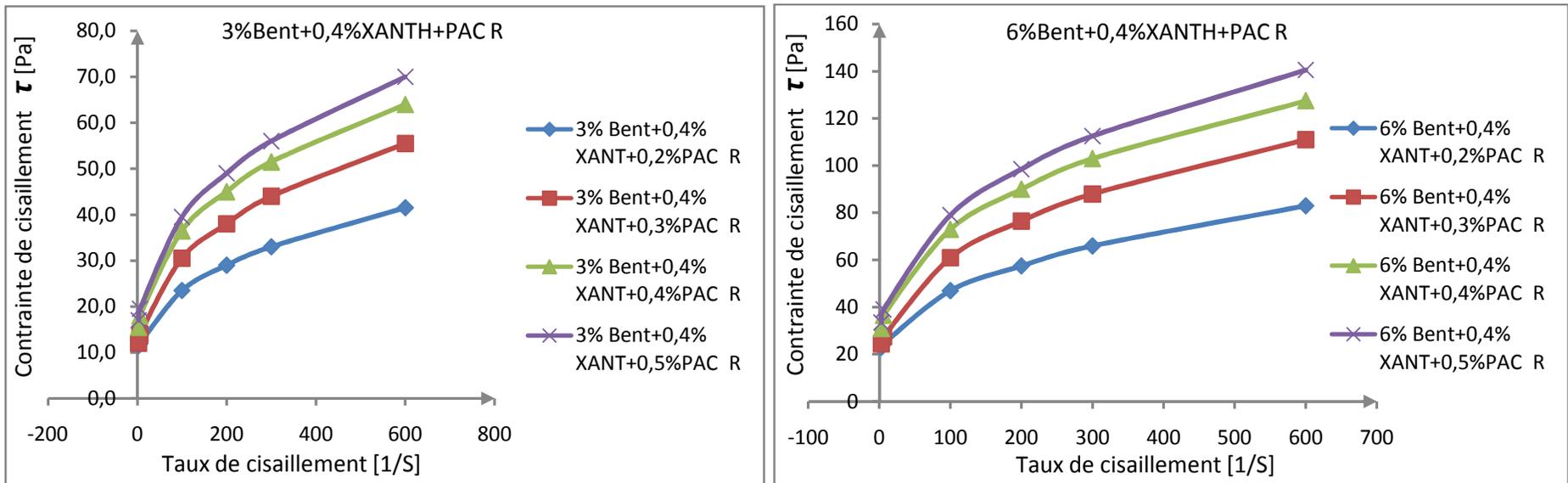


Fig. VI: Influence de l'ajout du 0,4%XANTH+PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)

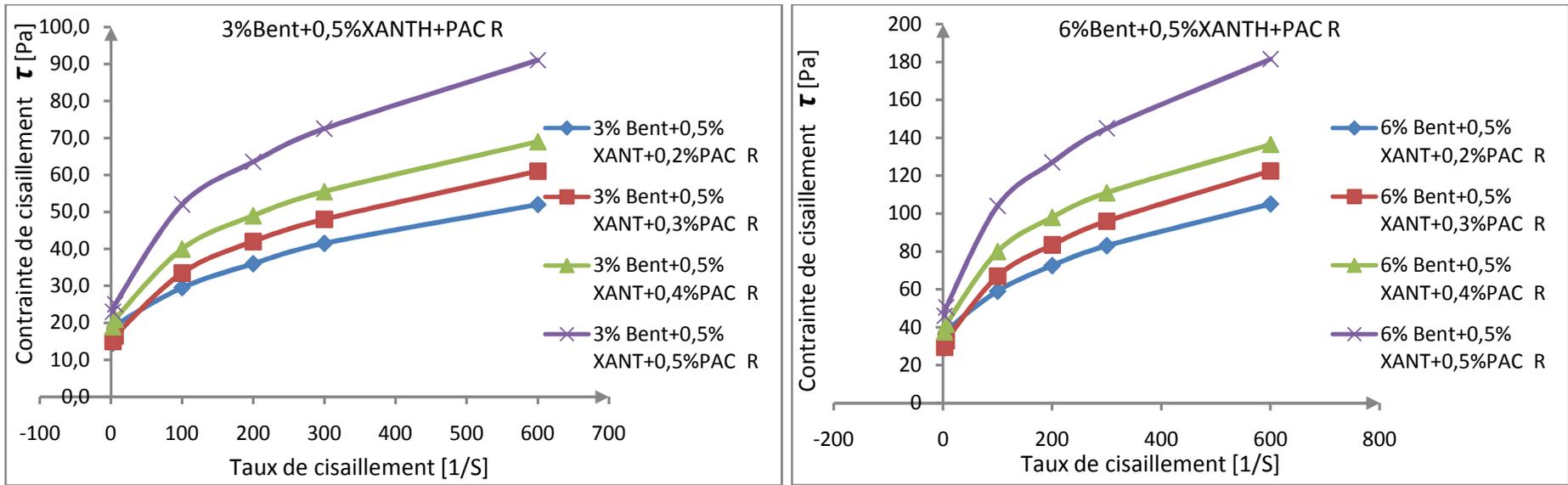


Fig. VII: Influence de l'ajout du 0,5%XANTH+PAC R sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite (3%) et (6%)