

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2016

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

CHENNA Mohand Akli

KOUSSOURI Abdallah

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits

Thème

**Etude de l'effet du poly-éthylène glycol sur les propriétés rhéologiques
et les paramètres d'écoulement des suspensions de Bentonite de base**

Devant le jury :

MELLAK Abderrahmane	Professeur	UMBB	Président
AZRIL Nadjat	MA(A)	UMBB	Encadreur
BENTRIOU Abdelhak	MC (A)	UMBB	Examineur
BOUMAZA Nadia	MA (A)	UMBB	Examinatrice

Année universitaire 2015 / 2016

Résumé

Le but de ce travail est de montrer l'influence de l'ajout du polymère non-ionique, le polyéthylène glycol (PEG) de poids moléculaire 10 000g/mol, sur les propriétés rhéologiques d'une suspension de bentonite à concentration massique de 6%. Le PEG présente une affinité pour les particules de bentonite, causant un ralentissement dans la cinétique d'agrégation. Pour la corrélation de nos résultats expérimentaux obtenus, deux modèles ont été utilisés, à savoir le modèle classique d'Herschel-Bulkley et le modèle structurale de Carreau, par la suite, nous avons simulé à l'aide d'un code de calcul numérique, l'écoulement de nos fluides en question à travers une conduite cylindrique, pour voir l'influence du caractère de rhéofluidification sur l'écoulement. Enfin, on pourra dire que le PEG affecte considérablement les propriétés rhéologiques des suspensions bentonitiques, et ce par divers mécanismes d'adsorption, permettant ainsi de contrôler la stabilité du comportement complexe des fluides de forage à base d'eau.

Mots clés : bentonite, polyéthylène glycol, rhéologie, suspension.

Abstract

The aim of this work, is to show the influence of adding a non-ionic polymer, the polyethylene glycol (PEG) of molecular weight of 10 000 g/mol, on the rheological properties of a bentonitic suspension. The PEG presents an affinity to the bentonite particles, slowing down the kinectik of aggregation. For the correlation of our results, two models were used, the classical model of Herschel-Bulkley and the structural model of Carreau. Then we attempt to simulate a flow of our fluids through a pipe, in order to see the influence of the rheofluidification character on the flow. Finally, we can say that the PEG considerably affects the rheological properties of the bentonitic suspension, and that by several mechanisms of adsorption, allowing to control the stability of WBM.

Key words: bentonite, polyethylene glycol, rheology, suspension, WBM

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire de Master à mes parents.

Mohand Akli

*Je tiens à dédier ce mémoire de Master à ma chère mère, à
mon père.*

*A mon frère, A mes sœurs, A la mémoire de mon grand-
père (KOUSSOURI Mouloud).*

Abdallah

Remerciements

Ce mémoire de master a été réalisé au sein du Laboratoire de Génie Physiques des Hydrocarbures “Simulation et Rhéologie des fluides complexes” de la faculté des Hydrocarbures et de la Chimie de l’Université de Boumerdès.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Madame Nadjat AZRIL, pour avoir dirigé ce travail et également pour les encouragements qu’elle n’a cessé de nous prodiguer. Nous sommes heureux de pouvoir lui exprimer nos plus sincères remerciements.

Toute notre reconnaissance va à Mr K.BRAHMI, Manager à la société MI-SWACO et coordinateur à la direction de production de SONATRACH, pour avoir suivi ce travail. Malgré ses multiples responsabilités.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury. Nos sincères remerciements à Mr A.MELLAK, président de jury. Nous sommes extrêmement reconnaissant envers tous les enseignants du département Exploitation des gisements miniers et pétroliers, et spécialement à ceux qui ont accepté d’être examinateurs de ce manuscrit.

Nous adressons nos remerciements à l’ensemble de l’équipe de recherche du laboratoire Génie Physique des Hydrocarbures, et tout particulièrement à Monsieur M.GARECHE et L.SAoudi pour l’aide précieuse qu’ils nous ont fourni au cours de ce travail.

Nous exprimons également toute notre gratitude et reconnaissance à tous nos enseignants, depuis l’école primaire à aujourd’hui, pour leurs dignes contributions à notre instruction à la fois morale et intellectuelle.

Nos remerciements vont également à nos amis, S.TAHANOUT et Y.BOUNEKTA pour leur amitié et leur soutien durant toute la durée de l’élaboration de ce travail.

Table de Matière

Introduction	1
 Chapitre I: fluide de forage	
I.1 Rôles du fluide de forage.....	3
I.2 Composition et types des fluides de forage.....	3
I.2.1 Les fluides à base d'eau WBM.....	4
I.2.2 Les fluides à base d'huile OBM.....	4
I.2.3 Les fluides de forage gazeux.....	4
I.2.3.1 Forage à l'air.....	5
I.2.3.2 Forage à la mousse.....	5
I.2.3.3 Forage à la boue aérée.....	5
I.3 Propriétés des fluides de forage.....	5
I.3.1 Densité.....	6
I.3.2 Viscosité.....	6
I.3.3 Contrainte seuil.....	7
I.3.4 Gels et thixotropie.....	7
I.3.5 Filtration.....	7
I.3.6 Teneur en solides.....	8
 Chapitre II: Rhéologie	
II.1 Notions de base de la rhéologie.....	9
II.1.1 Contrainte de cisaillement.....	10
II.1.2 Vitesse de déformation.....	10
II.1.3 Viscosité.....	10
II.2 Fluides dépendants de temps	11
II.2.1 La thixotropie	11
II.2.2 La rhéopexie (anti-thixotropie)	11
II.3 Modèles rhéologiques.....	12
II.3.1 Newtonien.....	12
II.3.2 Bingham plastique.....	12
II.3.3 Loi en puissance.....	12
II.3.4 Herschel-Bulkley.....	13
II.3.5 Autres modèles.....	14
II.3.6 Modèles rhéologiques dans l'industrie du forage.....	14
II.4 Viscoélasticité	14
II.4.1 Test de balayage en amplitude.....	15
II.4.2 Test de balayage en fréquence.....	15
II.5 Notions en mécanique des fluides	16
II.5.1 Nombre de Reynolds.....	16
II.5.2 Nombre de Taylor.....	16
II.5.3 Régimes d'écoulement.....	17
II.5.3.1 Ecoulement Laminaire.....	17

II.5.3.2 Écoulement turbulent.....	17
II.5.3.3 Ecoulement de transition.....	17

Chapitre III: Les Suspensions de Bentonite - Polymère

III.1 Bentonite.....	18
III.1.1 Définition.....	18
III.1.2 Microstructure de la Bentonite.....	19
III.1.2.1 Les feuillets.....	19
III.1.2.2 La particule.....	19
III.1.2.3 L'agrégat.....	20
III.1.3 L'espace interfoliaire.....	20
III.1.4 Le système Bentonite-Eau.....	21
III.2 Polymère.....	23
III.2.1 Classification des polymères.....	23
III.2.1.1 Selon leur origine.....	23
III.2.1.2 Selon leur structure (dimensionnalité).....	23
III.2.2 Adsorption des polymères.....	24
III.2.3 Les polymères dans les fluides de forage.....	25
III.2.3.1 La gomme xanthane.....	26
III.2.3.2 Carboxyméthylcellulose (CMC).....	26
III.2.3.3 Les celluloses polyanioniques (PAC).....	27
III.2.3.4 Amidon.....	27
III.2.3.5 Polymères synthétiques PHA.....	28
III.2.3.6 Les glycols.....	29
III.3 Interactions interparticulaires.....	30
III.3.1 Interaction argile-eau.....	30
III.3.2 Interaction polymère-eau.....	30
III.3.3 Interaction argile-argile.....	30
III.3.4 Interaction argile-polymère.....	30
III.3.5 Interaction polymère-polymère.....	31
III.4 Mécanisme de floculation et de défloculation.....	31

Chapitre IV : Protocole et Mesures expérimentales

IV.1 Mesures rhéologiques.....	33
IV.2 Matériaux.....	36
IV.2.1 Bentonite.....	36
IV.2.2 Eau.....	36
IV.2.3 Poly (Ethylène-Glycol) PEG 10000.....	36
IV.3 Protocole et préparation.....	36
IV.3.1 Préparation des suspensions.....	37
IV.3.2 Protocole de mesures expérimentales.....	37
IV.3.2.1 Régime statique.....	37
IV.3.2.2 Régime dynamique.....	37

IV.4 Résultats et Discussions.....	39
IV.4.1. Etude en régime stationnaire (cisaillement simple)	39
IV.4.1.1 Courbes d'écoulement et de viscosité	39
IV.4.1.2 Evolution de la contrainte seuil en fonction de concentration.....	39
IV.4.1.3 Courbes de viscosité.....	40
IV.4.1.4 Modélisation des courbes d'écoulement.....	41
IV.4.2 Etude en régime dynamique.....	46
IV.4.2.1 Balayage en contrainte.....	47
IV.4.2.2 Balayage en fréquence.....	47
IV.4.2.3 Suivi cinétique.....	49

Chapitre V: Simulation d'écoulement d'un fluide Non-Newtonien à travers une conduite cylindrique

V.1 Théorie fondamentale des écoulements.....	51
V.2 Formulation du problème.....	52
V.3 Résolution du problème.....	53
IV.3.1 Démarche de calcul.....	54
IV.3.2 Validation de maillage.....	55
IV.3.3 Résultats et discussion	57
Conclusion	64
Références bibliographiques	

Nomenclature

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

A : Surface [m²].

F : Force [N].

$\dot{\gamma}$: Vitesse de cisaillement [s⁻¹].

$u \ v \ w$: Vitesse [m.s⁻¹].

η : Viscosité [Pa.s].

τ_c : Contrainte seuil d'écoulement [Pa].

η_p : Viscosité plastique [Pa.s].

η_a : Viscosité apparente [Pa.s].

K : Indice de consistance.

n : Indice d'écoulement.

λ : Temps caractéristique.

n : Indice de puissance.

η_∞ : Viscosité infini [Pa.s].

η_0 : Viscosité nul [Pa.s].

G' : Module de stockage.

G'' : Module de perte.

P : Pression hydrostatique [kgf/cm²].

H : Profondeur [m].

d : Densité.

L_{600} , L_{300} : Contrainte lue sur le viscosimètre Fann.

Re : Nombre de Reynolds.

D : Diamètre de la conduite [m].

ρ : La masse volumique du fluide [Kg/m³].

T_a : Nombre de Taylor.

w : Vitesse angulaire [rad/s].

R : Rayon du cylindre [mm].

e : Entrefer entre les deux cylindres [mm].

C_f : Coefficient de frottement.

λ : Coefficient de perte.

C_p : Pouvoir calorifique Jol/ kg.

Liste des figures

Chapitre I

Figure II.1: Circuit du fluide de forage.....	2
--	---

Chapitre II

Figure II.2: Profil de vitesse d'un cisaillement simple d'un fluide Newtonien entre deux plans.....	9
Figure II.3: Graphe illustrant la variation de la viscosité en fonction du temps, sous une contrainte statique	12
Figure II.4: Les modèles rhéologiques.....	13
Figure II.5: Evolution des des modules G' et G'' en fonction de la déformation.....	15
Figure II.5: Illustration des différents régimes d'écoulement.....	17

Chapitre III

Figure III.6: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 (smectite).....	18
Figure III.7: Structure multi-échelle de la montmorillonite.....	19
Figure III.8: Les différents types d'espaces poreux.....	20
Figure III.9: Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales les bordures des particules, ainsi que les espaces interfeuillets.....	21
Figure III.5: Représentation schématique de l'état gel.....	22
Figure III.6: Représentation de l'espace interfoliaire (distance basale) entre deux feuillets de montmorillonite.....	22
Figure III.7: Schéma d'adsorption d'une chaîne de polymère sur une surface.....	25
Figure III.8: Structure primaire (A) et structure secondaire (B) de la gomme xanthane à l'état solide.....	26
Figure III.9: Principe de fabrication de CMC (A) et représentation d'une unité structurale CMC Na.....	27
Figure III.10: Représentation de structure chimique de l'amylopectine (A) et d'amylose(B).....	28
Figure III.11: Polyacrylamide partiellement hydrolysé (sel de sodium).....	28
Figure III.12: Schéma des différents séquences d'un polymère adsorbé sur une surface argileuse.....	31
Figure III.13: Schéma représente mécanisme de floculation et de défloculation.....	32

Chapitre IV

Figure IV.1: Rhéomètre MCR 301 utilisé pour la caractérisation Rhéologique.....	34
Figure IV.2: Géométrie de Couette cylindrique.....	35
Figure IV.3: Courbe d'écoulement du mélange bentonite-PEG 10 000 g/mol.....	39
Figure IV.4.a: Extrapolation des courbes d'écoulement à faible taux de cisaillement.....	40
Figure IV.4.b: Evolution de la contrainte seuil d'écoulement en fonction de la concentration en PEG 10 000.....	40

Figure IV.5: Evolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement.....	41
Figure IV.6.a: Evolution de la viscosité a cisaillement nul en fonction de la Concentration.....	41
Figure IV.6.b: Evolution de la viscosité a cisaillement infini en fonction de la Concentration.	41
Figure IV.7: Courbe d'écoulement du mélange bentonite-PEG(Modèle de Herschel-Bulkley).....	42
Figures IV.8.a , IV.8.b, IV.8.c: Illustrent l'évolution des paramètres du modèle rhéologiques de Heschel-Bulkley en fonction de la concentration massique en PEG.....	43
Figure IV.9: Courbe d'écoulement du mélange bentonite-PEG (modèle de Carreau).....	44
Figures IV.10.a , IV.10.b, IV.10.c, IV.10.d: Illustrent l'évolution des paramètres du modelé rhéologiques de Carreau fonction de la concentration massique en PEG.....	45
Figure IV.11: Balayage en contrainte.....	47
Figure IV.12 : Balayage en fréquence.	48
Figure IV.13: Suivi cinétique des mélanges (bentonite+PEG).....	49

Chapitre V

Figure V.1: Géométrie de la conduite cylindrique.....	52
Figure V.2: Organigramme de calcul numérique.....	54
Figure V.3: Maillage de la conduite cylindrique (210*20) raffiné à l'entrée et à la paroi.....	56
Figure V.4: Evolution des profils de vitesse axiale pour différentes valeur de Reynolds à concentration [0%,0.5%,0.75%,1%,1.2%].....	57
Figure V.5: Evolution des profils de vitesse axiale pour différentes concentration à Reynolds [25, 50, 100, 200].....	58
Figure V.6: Evolution de la vitesse moyenne à la sortie pour différentes concentration à Reynolds [25,50,100,200].....	59
Figure V.7: Evolution des profils de pression pour différentes valeur de Reynolds à concentration [0%,0.5%,0.75%,1%,1.2%].....	60
Figure V.8: Evolution des profils de pression à la sortie pour différentes concentration à Reynolds [25,50,100,200].....	61
Figure V.9: Evolution de la contrainte a la paroi de perte en fonction de la concentration en PEG à Reynolds [25,50,100,200].....	62
Figure V.10: Evolution de Coefficient de perte en fonction de la concentration en PEG à Reynolds [25,50,100,200].....	63

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.....	4
--	---

Chapitre III

Tableau III.1: Structures des polymères.....	24
---	----

Chapitre IV

Tableau IV.1: Caractéristiques de rhéomètre Anton Paar Physica MCR 301.....	33
Tableau IV.2: Caractéristiques géométrie de Couette cylindrique.....	34
Tableau IV.3: Compositions chimique de la Bentonite simple.....	36
Tableau VI.4: Paramètres de régression du modèle Herschel-Bulkley.....	42
Tableau IV.5: paramètres de régression du modèle de Carreau.....	44
Tableau IV.6: Temps de gélification des mélanges bentonite+PEG.....	49

Chapitre V

Tableau V.1: Test de convergence de maillage.....	55
Tableau V.2: paramètres de régression du modèle de Carreau.....	56

Introduction

Aujourd'hui, la boue de forage suscite un grand intérêt au sein de l'ensemble de la communauté scientifique, du fait de divers contributions existantes et de la richesse de la littérature actuelle, avec objectifs de comprendre les phénomènes physico-chimico-mécanique liés au fluide de forage et surtout d'approcher l'équation performance-cout-environnement.

Dans une boue de forage à base d'eau, la bentonite n'est pas l'unique composant présent, des polymères sont souvent ajoutés pour lui conférer les propriétés adéquates, lui permettant de rependre, d'une façon optimale, aux nombreuses exigences des opérations de forage. En effet, l'addition de polymères aux fluides de forage, provoque une modification importante des propriétés rhéologiques. En général, les comportements de ces matériaux s'avèrent complexes, en raison notamment, de leurs caractère thixotrope, rhéofluidifiant à seuil et de la rigidité qui leur confère un comportement viscoélastique. La bonne connaissance des interactions de nature physicochimiques aux seins de ces systèmes colloïdaux chargés, sont des éléments précieux pour adopter la composition du fluide aux conditions de forage, c'est de cela qu'a découlé notre volonté d'étudier et de montrer, comment un polymère non-ionique (le polyéthylène glycol, PEG 10 000g/mol) influe sur les propriétés rhéologiques d'une suspension bentonitique de base.

Dans l'objectif de cerner la relation entre les propriétés rhéologiques et la microstructure de ces suspensions (avec un additif non-ionique), ce modeste travail s'articule sur deux parties distinctes (bibliographique et expérimentale) :

La première partie fait l'objet d'une revue bibliographique, elle se subdivise en trois chapitres, le premier met l'accent sur les fluides de forage, rôles, type et composition, par la suite, des notions fondamentales sur la rhéologie sont présentés au deuxième chapitre. Le troisième est consacré aux suspensions de mélange bentonite-polymère (microstructures, mécanismes physico-chimiques,...).

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les matériaux et les méthodes de mesure utilisés dans cette étude, ainsi que les résultats obtenus pour la partie caractérisation rhéologique. Enfin, le dernier chapitre est consacré à une simulation numérique de l'écoulement d'un fluide de carreau dans une conduite cylindrique simple en régime laminaire.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale, et des perspectives susceptibles de nous éclairer d'avantage sur le volet pragmatique de ce type de mélange polymérique.

Le succès d'une opération de forage est assuré par plusieurs facteurs, parmi lesquels celui du choix des fluides de forage. Ces fluides dits complexes, plus classiquement appelés boues de forage, sont le plus souvent des émulsions/suspensions, de divers constituants dont les fonctions sont multiples.

Le fluide de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments,...). L'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille (Figure I.1). A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales.

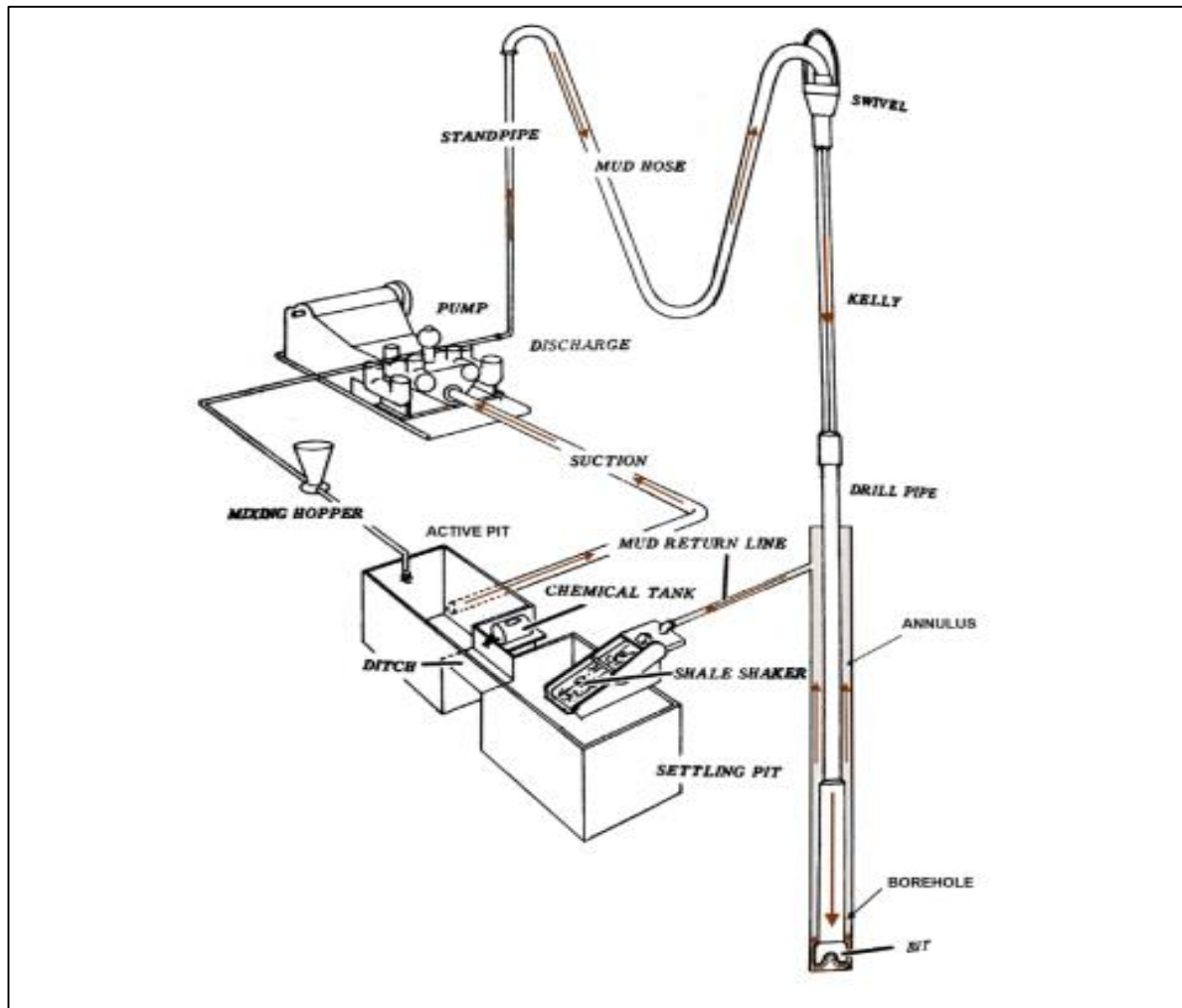


Figure I.1: Circuit du fluide de forage.

I.1 Rôles du fluide de forage

En général, les principaux rôles du fluide de forage sont :

- Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu'à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire, ces déblais donnent des informations géologiques sur les formations traversées lors du forage.
- Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide.
- Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées. Du fait de cette différence de pression, le fluide va "filtrer" dans les formations perméables et déposer un film sur la paroi appelé "cake de filtration". Ce gâteau permet de réduire la perméabilité des parois et d'isoler le fluide de forage de la formation mais ne doit pas être épais afin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil. Le fluide de forage joue donc un rôle déterminant dans la résolution du problème de stabilité des parois du puits de par sa densité mais également de par sa capacité à former une barrière limitant les transferts de fluides entre l'espace annulaire et la formation.
- Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie.

I.2 Composition et type des fluides de forage

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue " vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés.

Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile.

Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires.

Les boues doivent par exemple être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont donc ajoutées à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Il est possible de classer grossièrement ces composants dans le (Tableau I.1).

Tableau I.1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.

1	Viscosifiants (Bentonite, Attapulgate)
2	Alourdissants (Barytine, Carbonate de Calcium)
3	Réducteurs de filtrat (Amidon, CMC, PAC)
4	Fluidifiant (Lignosulfonate)
5	Contrôleurs d'alcalinité (Soude Caustique)
6	Anti-mousses (Strate d'Alumine)
7	Emulsifiants (Tension Actif)
8	Huile minérale ou organique (Pétrole brute, Gazole)
9	Inhibiteurs de gonflement des argiles (Glycols)
10	Saumure (Sel)

I.2.1 Les fluides à base d'eau WBM

Les fluides à base d'eau sont des fluides dont la phase continue est une eau. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation (activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines).

I.2.2 Les fluides à base d'huile OBM

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gazole.

I.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 provenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard. Citons brièvement les fluides gazeux utilisés :

I.2.3.1 Forage à l'air

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua, Djebel Onk (Abid, 1995) suite aux pertes importantes rencontrées dans la région (S.N.Repal, 1961).

I.2.3.2 Forage à la mousse

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

Des problèmes de sécurité au sujet de l'utilisation de la mousse en réservoir sont à signaler, notamment des explosions dans le cas où le volume d'hydrocarbures gazeux est compris entre 3 et 10% par rapport à l'air. C'est le cas en 1992, du puits RB-13 en Algérie, où lors d'une opération de reprise de puits (de "work-over") avec une boue à la mousse pour éviter les pertes de circulation, une explosion s'est produite suite à une contamination de la boue par une venue d'huile ou de gaz.

I.2.3.3 Forage à la boue aérée

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides.

I.3 Propriétés des fluides de forage

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises édictées par l'API (API 13A, 2004). Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres : densité, viscosité, filtrat et réactivité.

Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres en fonction des besoins (taux de gaz, alcalinité). A partir des mesures réalisées et des connaissances acquises, on ajuste si nécessaire la composition de la boue en "temps réel" en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue.

Historiquement, face aux problèmes majeurs rencontrés dans les premiers forages, la densité est le premier paramètre fondamental pour la caractérisation des fluides de forage.

I.3.1 Densité

La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions.

Cependant elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation. Pour l'alourdissement de la boue, on utilise la barite ou le Carbonate de Calcium.

La pression exercée par la boue sur les parois du puits, est donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{Hd}{10} \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec P : Pression (kgf/cm²), H : Profondeur de la couche traversée (m) et d : Densité de la boue.

A cause de cette pression de contre-balancement en conditions normales de forage, une diffusion du fluide dans les milieux poreux est possible. Pour diminuer autant que possible cette invasion, un produit de filtration, de faible épaisseur, appelé cake, est formé sur les parois du trou foré. Ce cake doit être de perméabilité faible et doit être facilement enlevé avant la cimentation.

I.3.2 Viscosité

La viscosité dépend avant tout de la teneur en solides contenue dans la boue et de la présence des polymères. Une augmentation de viscosité ne pourra donc être combattue que par l'élimination de solides. D'un point de vue pratique, on définit deux types de viscosité (exprimées en cP) : une viscosité apparente (η_a) et une viscosité plastique(η_p) souvent liée à la taille des particules, et à leur forme.

$$\eta_a = L_{600}/2 \quad ; \quad \eta_p = L_{600} - L_{300} \dots\dots\dots(I.2)$$

Où L_{600} et L_{300} représentent respectivement les lectures à 600 et 300 tr/mn sur le rhéomètre fann 35.

Sur chantier, les outils disponibles pour contrôler la rhéologie de la boue sont de deux types. Le premier est le viscosimètre Marsh, outil encore très largement utilisé, le deuxième est un viscosimètre Fann 35, réalisant une mesure de contrainte pour 2 ou 6 valeurs du cisaillement selon les appareils.

D'autre part, la circulation dans le puits impose des valeurs élevées de pression et de température, il est donc nécessaire de mesurer ou de prévoir la rhéologie des fluides aux hautes températures et pressions ainsi que la tenue des additifs soumis à ces conditions. D'où l'importance de l'utilisation de rhéomètres travaillant à haute pression et haute température, type Fann70 (20000 Psi/500 °F) et d'appareils de filtration, type Dynamic Filtration System: Fann Model 90 (2500 Psi/500 °F).

I.3.3 Contrainte seuil

Les solides présents dans la boue de forage influencent un paramètre autre que la viscosité plastique, qui est la contrainte seuil (exprimée en Pa ou en lb/100 ft²), plus connue sous le nom de "yield value" ou "yield point".

$$\tau_c = Y_p = (L_{300} - \eta_p) = (\eta_a - \eta_p)2 \dots\dots\dots(I.3)$$

La contrainte seuil représente la résistance initiale à vaincre, pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées à la surface des particules. C'est une mesure dynamique.

La contrainte seuil dépend du type des solides présents et de leurs charges de surface respectives, de la concentration de ces solides, et du type et de la concentration des autres ions ou sels éventuellement présents.

I.3.4 Gels et thixotropie

Une boue de forage laissée au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle thixotropie le fait que ce phénomène soit non instantané et réversible.

Le caractère thixotrope d'une boue est évalué en mesurant le "gel 0" et le "gel 10". Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann35 à une vitesse de 3 tr/min et exprimé en lb/100ft². Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes.

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique.

I.3.5 Filtration

La filtration du fluide de forage se produit sous l'effet de la pression différentielle (différence entre la pression du fluide et celle de la formation) lorsque le fluide se trouve au contact d'une paroi poreuse et perméable. La pression dans le puits étant supérieure à celle de la formation, le liquide pénètre dans la formation tandis que les solides présents dans la boue sont déposés (gâteau ou cake). Deux sortes de filtration ont lieu pendant le forage: la filtration statique, lors de l'arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide, qui entraîne une érosion du cake formé.

Les propriétés de filtration des fluides de forage doivent être aussi évaluées et contrôlées par des tests régis par les recommandations de l'API. Ce sont des tests en régime statique utilisant un filtre-presse standardisé. Ces mesures peuvent être faites sous conditions de haute pression et haute température.

La filtration du fluide de forage au travers des parois du puits peut avoir des conséquences importantes, d'une part sur le déroulement des opérations (stabilité des parois du puits, avancement de l'outil, coincement de la garniture par pression différentielle, en particulier dans

les zones inclinées) et d'autre part, lorsque l'on atteint le réservoir, sur l'endommagement des zones productrices.

Dans les deux cas l'augmentation de la durée de forage ou la diminution de la productivité comporte des incidences économiques défavorables.

I.3.6 Teneur en solides

La teneur en solides dans les fluides de forage est une caractéristique assez importante notamment celle des particules dite sables.

En terminologie du forage, est considéré comme sable toute particule inerte de dimension supérieur ou égale 74 micromètre. Le pourcentage en volume du sable ne doit pas dépasser 1% pour une raison de limiter l'abrasion des équipements tubulaires du circuit de boue. Le pourcentage en volume du solide se mesure à l'aide d'un distillateur et la teneur en sable par un élutriomètre.

Une littérature assez développée existe au sujet du comportement rhéologique des fluides de forage. Les fluides de forage sont souvent des suspensions colloïdales qui ont un comportement complexe et variable suivant leur composition et les conditions d'utilisation. Ce sont le plus souvent des fluides non-newtoniens, visqueux ou viscoélastiques, éventuellement thixotropes. De nombreux modèles rhéologiques ont été proposés et traités dans l'industrie pétrolière. L'objectif principal des études rhéologiques est de caractériser et de quantifier les effets des interactions entre particules sur les propriétés macroscopiques.

II.1 Notions de base de la rhéologie

La Rhéologie est définie comme étant la science de la déformation et de l'écoulement de la matière. En tant que sujet théorique, la rhéologie est une branche de la physique et de la chimie-physique; généralement classé comme une branche de la mécanique des fluides. La Rhéologie elle-même a été reconnue comme une branche scientifique séparée depuis le milieu des années 1920.

Tous les matériaux réels se déforment dans une certaine mesure lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. Si le matériau est un liquide idéal, il peut "se déformer en continu" ou s'écouler, lorsqu'une force est appliquée. Pour les solides idéaux, la déformation sera élastique. La relation entre la force appliquée et la déformation qui en résulte est une fonction unique de chaque matériau spécifique. Pour des fluides, cette fonction est connue comme une propriété rhéologique du matériau.

Dans tous les écoulements de fluide, il existe différents sous-couches de fluide qui se déplacent avec des vitesses différentes. Si l'écoulement dans une conduite circulaire est laminaire, la vitesse d'écoulement du fluide adjacent à la paroi sera de zéro, tandis que le débit sera à la vitesse maximale dans le centre de la conduite. Ce phénomène, appelé le profil de vitesse, implique que les molécules se déplacent par rapport aux autres lorsqu'ils sont en mouvement. Le mouvement relatif et de la rotation des molécules sont causés par les forces de friction internes, ce qui conduit à une certaine résistance à l'écoulement.

Soit un liquide entre deux plans parallèles (voir Figure II.1). Le plan inférieur est fixe, et on exerce sur le plan supérieur une contrainte τ : le plan supérieur se met en mouvement rectiligne uniforme de vitesse v . On parle, pour une telle configuration, de géométrie plan-plan ou de Couette plan.

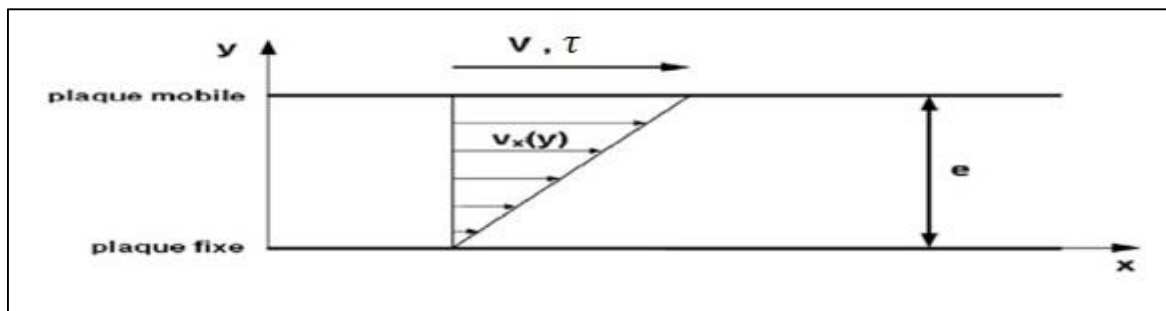


Figure II.1: Profil de vitesse d'un cisaillement simple d'un fluide Newtonien entre deux plans.

II.1.1 Contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement exercée sur le fluide est défini comme étant le rapport entre la force F qui agit sur une surface A , la relation est donnée comme suit :

$$\tau = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (II.1)$$

Où F est exprimé en Newton (N), A en (m^2) et τ en pascal (Pa).

II.1.2 Vitesse de déformation

Pour un gradient de vitesse donné du à une position , la vitesse de déformation est :

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \frac{1}{dy} \frac{d}{dt} (dx) = \frac{du}{dy} \dots\dots\dots (II.2)$$

Ou $\dot{\gamma}$ est exprimé en (s^{-1}).

Le taux de cisaillement est le même que le gradient de vitesse illustrée dans la (Figure II.1). En d'autres termes, il est le taux de cisaillement qui est appliqué sur le fluide. Tous les fluides dépendants de la contrainte de cisaillement voient leur viscosité changer quand elles sont soumises à de différentes contraintes.

II.1.3 Viscosité

La viscosité est la représentation de la résistance interne à la déformation. Dans le langage courant on se réfère généralement à "l'épaisseur". Ce qui signifie que, plus les fluides est « épais », plus les frottements internes sont considérables. La viscosité est la propriété la plus élémentaire traitée dans la rhéologie.

Pour certains fluides, la viscosité peut être exprimée par un coefficient, mais pour la plupart des fluides, il est plus un facteur dépendant des autres propriétés. Ces propriétés peuvent être, mais sans s'y limiter, la température, la pression, le taux de cisaillement, sur la façon dont le liquide a été traitée auparavant.

L'unité SI de la viscosité est Pa.s, tandis que dans l'industrie, elle est exprimée en centipoises (cP). Un centipoise est équivalent à 1 mPa.s. L'eau à 20 ° C possède une viscosité de 1.002 centipoises et sert ainsi de référence utile.

La viscosité est définie par l'American Petroleum Institute (API), comme le rapport de la contrainte de cisaillement à la vitesse de cisaillement.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots (II.3)$$

Ou τ est exprimé en pascalle (Pa), $\dot{\gamma}$ en (s^{-1}) et η en (Pa.s).

La viscosité des fluides dépend de la température. Pour les fluides newtoniens, la viscosité diminue généralement lorsque la température augmente. Comme mentionné plus tôt la pression

influencera également la viscosité. Avec l'augmentation de la pression isotrope, la viscosité du fluide va croître de façon exponentielle. Pour effectuer des mesures et des analyses dans un laboratoire, un changement de pression absolue de l'ampleur d'un bar, aura un effet négligeable sur la viscosité. D'autre part, un changement de température aura un effet significatif sur les mesures, et doit être enregistré ultérieurement. De préférence, les changements de température doivent être évités, lorsque l'on mesure la viscosité. Dans une situation réelle, le fluide va connaître une gamme de différentes températures et pressions. Par conséquent, il est important d'avoir une compréhension de base sur la façon dont les fluides de forage se comportent dans différentes conditions externes.

II.2 fluides dépendants de temps

Au cours du cisaillement, la structure interne du fluide, et par conséquent sa viscosité, peut évoluer. Citons ici différentes caractéristiques d'un fluide dont la viscosité dépend du temps de cisaillement.

II.2.1 La thixotropie

Les fluides thixotropes voient leur viscosité diminuer avec le temps lorsqu'ils sont soumis à une contrainte constante. À l'arrêt du cisaillement, la viscosité augmente avec le temps, ce qui indique une réversibilité (au moins partielle) du phénomène, une interprétation est que la thixotropie reflète la destruction progressive, en fonction du temps et sous cisaillement, d'une microstructure interne du fluide. La microstructure peut signifier par exemple, suivant le fluide étudié, des enchevêtrements d'amas de macromolécules pour les polymères, ou des configurations spatiales de particules pour les suspensions ou de gouttelettes pour des émulsions. La modification de cette microstructure résulte de la compétition entre les contraintes dues à l'écoulement qui détruisent la microstructure, et les collisions et le mouvement brownien qui amènent les éléments composant le fluide à se rencontrer et à reformer la microstructure.

II.2.1.2 La rhéopexie (anti-thixotropie)

Les fluides rhéopexes voient leur viscosité augmenter avec le temps lorsqu'ils sont soumis à une contrainte constante.

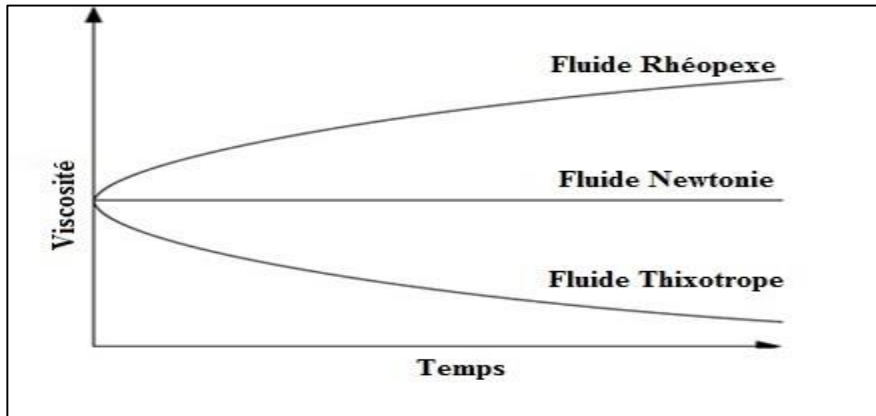


Figure II.2: La variation de la viscosité en fonction de temps, sous une contrainte statique.

II.3 Modèles rhéologiques

Les fluides sont classés par leur comportement rhéologique « API » (2010), comme newtonien ou non newtonien, c'est la plus claire distinction entre les différents types de fluides. La Figure II.3 illustre une représentation graphique sur la façon dont les différents fluides réagissent, lorsqu'ils sont exposés à un taux de cisaillement accru.

II.3.1 Fluide Newtonien

Le modèle newtonien est valable pour les fluides dont les propriétés ne changent pas au cours du temps où en faisant varier la contrainte de cisaillement. Les fluides newtoniens ont une relation proportionnelle linéaire entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$, η est viscosité.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (II.4)$$

II.3.2 Fluide plastique de Bingham

Un fluide à seuil est un fluide qui ne s'écoule que lorsque la contrainte τ qui lui est appliquée dépasse un certain seuil, appelée contrainte critique τ_c . Pour $\tau < \tau_c$, le fluide ne s'écoule pas et sa viscosité est infinie ; pour $\tau \geq \tau_c$, le fluide s'écoule et sa viscosité est finie. C'est le cas des suspensions concentrées de particules, de certaines solutions concentrées de polymères,

Où τ_c est la contrainte critique, η_p est la viscosité plastique.

II.3.3 Fluide de Loi en puissance

La loi de comportement pour les fluides d'Ostwald est donnée par :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (II.5)$$

Où K est l'indice de consistance et n est l'indice de loi de puissance, il représente l'écart par rapport au comportement Newtonien.

Il existe deux formes de base de fluides de loi de puissance, en fonction de la valeur des coefficients dans l'équation de la loi de puissance, K et n .

➤ Pseudoplastique

Les fluides pseudoplastiques sont rhéofluidifiants, ce qui signifie que leurs viscosités diminuent avec des taux de cisaillement plus élevés. Pour des fluides pseudoplastiques l'indice de comportement d'écoulement est inférieur à 1, ($n < 1$). Comme exemple de ce type de comportement, on peut citer les solutions de polymères, et certains fluides de forage.

➤ Dilatant

Les fluides dilatants sont rhéoépaississants. La viscosité de ces fluides augmente de façon exponentielle lorsque la force de cisaillement est augmentée, à savoir l'indice de comportement d'écoulement est supérieur à 1, ($n > 1$).

II.3.4 Herschel-Bulkley

Le modèle Herschel-Bulkley est une combinaison des modèles de Bingham et de loi de puissance.

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (II.6)$$

Où τ_c est la contrainte critique, K indice de consistance, n indice d'écoulement.

Le modèle Herschel-Bulkley est souvent utilisé pour décrire les fluides de forage, Car il considère à la fois un point de rendement et le développement de la loi de puissance avec l'augmentation du taux de cisaillement. Le facteur de point de rendement est dû à la gélification.

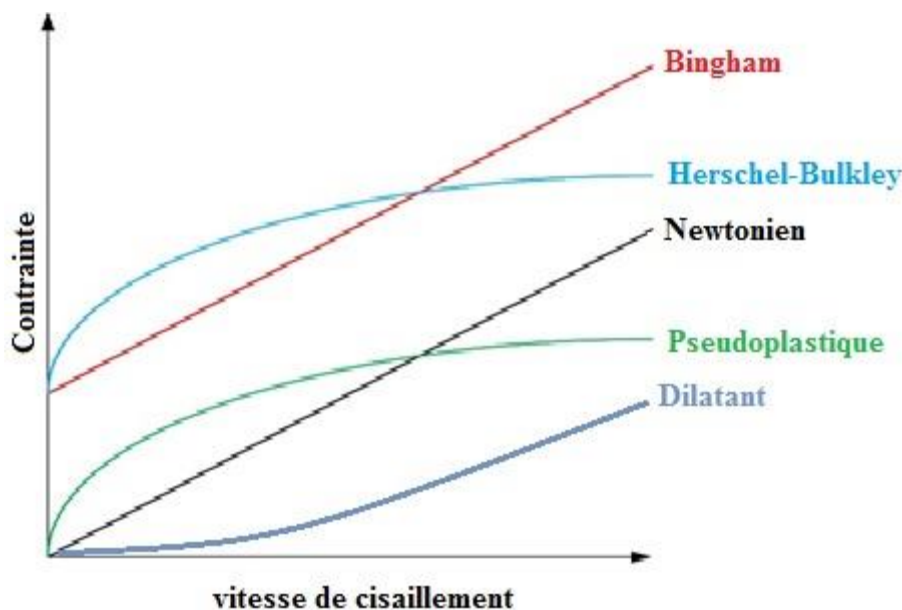


Figure II.3: Les modèles rhéologiques.

II.3.5 Autres modèles

Les modèles de rhéologie sont utilisés dans de nombreuses industries autres que l'industrie du forage, et donc d'autres modèles sont développés pour mieux répondre aux fluides viscoélastiques utilisés. Les modèles de rhéologie sont faits pour les prédictions, en raison du fait qu'il est difficile, voire impossible, de mesurer les propriétés des fluides dans toutes les conditions possibles. D'autres modèles généralement pas vu dans l'industrie du forage, sont :

• **Carreau :** $\tau = \left[\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})(1 + (\lambda\dot{\gamma})^2)^{\frac{p-1}{2}} \right] \dot{\gamma} \dots\dots\dots (II.7)$

• **Casson :** $\tau = \tau_c + \eta_p \dot{\gamma} \dots\dots\dots (II.8)$

• **Collins-Craces :** $\tau = (\tau_c + K\dot{\gamma})(1 - e^{\beta \cdot \dot{\gamma}}) \dots\dots\dots (II.9)$

• **Rob Ertson-Stiff :** $\tau = K(\dot{\gamma}_y + \dot{\gamma})^n \dots\dots\dots (II.10)$

II.3.6 Modèles rhéologiques dans l'industrie du forage

Aujourd'hui, le modèle de Herschel-Bulkley est le modèle le plus couramment utilisé pour les fluides de forage dans l'industrie pétrolière. Les fluides utilisés pour les puits de forage de pétrole et de gaz connaîtront une large gamme de différents taux de cisaillement, et le modèle des fluides a seuil, a été trouvé pour être un modèle simple et applicable lors de l'examen l'ensemble des différents taux de cisaillement (API). La connaissance de la rhéologie des fluides de forage est importante pour les applications suivantes :

- Calcul des pertes de charges dans l'annulaire et les tiges.
- Estimation de la densité équivalente de circulation (ECD) du fluide dans des conditions de fond du puits.
- Détermination des régimes d'écoulement dans l'espace annulaire.
- Estimation de l'efficacité du nettoyage du trou du trou.
- Estimation des pressions lors du pistonnage (swab and surge).
- Optimisation du système de circulation pour une meilleure efficacité du forage.

II.4 Viscoélasticité

Un solide ou un fluide viscoélastique présente des caractéristiques tantôt d'un solide, tantôt d'un liquide, selon le temps de sollicitation auquel le matériau est soumis. Sous cisaillement ou élongation, ces matériaux subissent une première déformation instantanée comme un solide élastique, puis continuent à se déformer de manière continue comme un liquide visqueux. à l'arrêt du cisaillement ou de l'élongation, le matériau reprend en partie sa forme initiale. Dans certains cas, le matériau trop sollicité peut se déformer jusqu'à la rupture.

Le comportement des fluides viscoélastiques peut être expliquée par deux paramètres, le G' module de stockage et le module de perte G'' . Le module de stockage représente la partie élastique du comportement du matériau. Ce module est une mesure de l'énergie de déformation qui est stockée par le matériau. Si l'énergie est stockée à 100%, le matériau récupère sa structure d'origine, donc un solide élastique idéal. G'' caractérise la dissipation visqueuse au sein du matériau, c'est la mesure de la perte d'énergie de déformation au cours du processus de cisaillement.

II.4.1 Test de balayage en amplitude

Les balayages en amplitude sont des tests effectués en oscillation, avec l'augmentation de l'amplitude pour une fréquence constante. Ils sont faits pour trouver la plage de la viscoélasticité linéaire (Linear Visco Elasticity LVE). Dans cette dernière, les fluides vont agir selon la loi de Hooke, ce qui signifie qu'ils auront un comportement élastique.

Le balayage d'amplitude mesure les modules de stockage et de perte, respectivement G' et G'' en faisant varier la contrainte. Si le module de stockage est supérieur au module de perte ($G' > G''$), le fluide présente des caractéristiques d'un solide ou d'un gel. La partie élastique domine la partie visqueuse. Certaines matières, telles que les lotions et les revêtements, ont une consistance de gel à des taux de cisaillement faibles, et même si elles ont seulement une structure de gel faible, la stabilité et la fermeté sont attendues. La Figure II.4 illustre un fluide présentant de telles propriétés de dispersions stables, tels que certains fluides de forage à base d'eau.

Si le module de perte G'' est supérieur au module de stockage G' ($G'' > G'$), le comportement visqueux domine la partie élastique. Au repos, et dans la plage de la viscoélasticité LVE, ces matériaux ne sont pas stables et s'écoulent avec le temps.

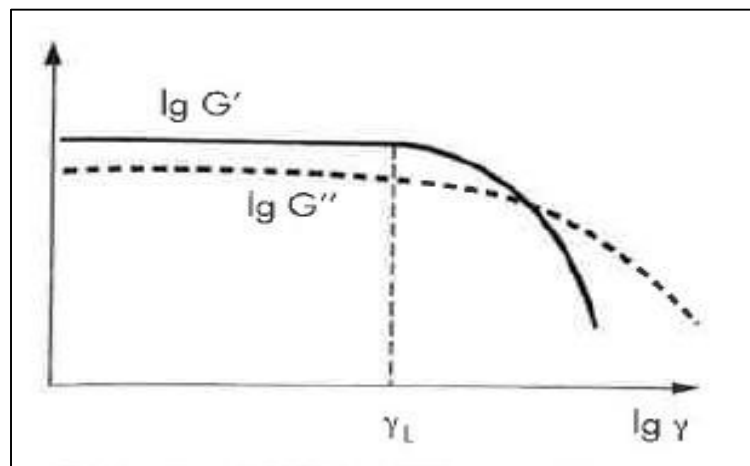


Figure II.4: Evolution des des modules G' et G'' en fonction de la déformation.

Lorsque les valeurs de stockage et de perte des modules sont égales, le matériau commence à s'écouler. Dans la communauté scientifique, cette valeur $G' = G''$ est appelée « point de l'écoulement de fluide ». Dans l'industrie du forage cette valeur est appelée point de rendement. Dans un sens rhéologique, ce point est le moment où le plateau de la LVE commence à dévier. Le point de rendement rhéologique est donc la limite de la plage de la LVE.

II.4.2 Test de balayage en fréquence

Le balayage de fréquences oscillatoires est un essai réalisé avec une amplitude constante dans la plage de la viscoélasticité linéaire (LVE), tandis que la fréquence varie. Le balayage en fréquence est réalisé afin d'examiner la déformation en fonction du temps, étant donné que la fréquence est l'inverse du temps. Le comportement à long terme est simulé par les basses fréquences (mouvement lent), et à court terme en mouvement rapide (hautes fréquences). La

propriété viscoélastique de la stabilité de stockage de la dispersion à long terme peut être évaluée avec des balayages de fréquence. En d'autres termes, pour combien de temps un fluide de forage avec des particules en suspension peut être uniforme et stable dans des conditions statiques (pas de circulation).

II.5 Notions en de mécanique des fluides

Lorsqu'on fait des recherches sur les fluides de forage et de leurs comportements, il n'est pas bénéfique de décrire seulement le côté rhéologique des choses. La Mécanique des fluides devrait également faire partie de ces recherches.

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base du dimensionnement des conduites de fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle comprend deux grandes sous branches :

- la statique des fluides, ou hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède et l'étude de la pression.
- la dynamique des fluides qui étudie les fluides en mouvement. Comme autres branches de la mécanique des fluides.

II.5.1 Nombre de Reynolds

Reynold introduit un nombre sans dimension, afin de comparer l'écoulement du fluide indépendant de ce milieu et d'autres variables entouré. Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses dans l'écoulement de fluide.

Le rapport est sans dimension et défini pour les conduites circulaires comme suit :

$$R_e = \frac{DV\rho}{\eta} \dots\dots\dots (II.11)$$

Où D est le diamètre du canal d'écoulement, V est la vitesse moyenne d'écoulement, ρ la masse volumique du fluide et η la viscosité du fluide. Pour les autres cas, l'équation sera différente, ou compensée par le choix d'une valeur différente pour D .

II.5.2 Nombre de Taylor

G.I. Taylor (1923) a introduit un nombre sans dimension qui caractérise l'importance des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans un fluide en rotation autour d'un axe. Le sens physique du nombre de Taylor est comparable au nombre de Reynolds, ils sont à la fois un rapport entre les forces visqueuses et d'inertie. La définition du nombre de Taylor pour le passage entre deux cylindres concentriques est la suivante:

$$T_a = \frac{w^2 \rho^2 R_1 (R_2 - R_1)^3}{\eta^2} \dots\dots\dots (II.12)$$

Où w est la vitesse angulaire caractéristique, ρ la masse volumique du fluide, η la viscosité, R_1 le rayon extérieur du cylindre intérieur, et R_2 le rayon intérieur du cylindre extérieur.

II.5.3 Régimes d'écoulement

II.5.3.1 Ecoulement Laminaire

Les flux laminaires sont relativement faciles à décrire à la fois mathématiquement, physiquement, et graphiquement, l'écoulement laminaire se caractérise par des lignes de courant lisses et un mouvement très ordonné. En général, ils ont des valeurs de faible nombre de Reynold, et peuvent donc être décrits comme écoulements lents. Pour les tuyaux circulaires le régime d'écoulement est généralement laminaire si le nombre Reynold est en dessous de 2300. La pression nécessaire pour déplacer le fluide dans des conditions laminaires augmente lorsque la vitesse ou la viscosité est augmentée. Le profil de vitesse d'un écoulement laminaire est assez facile à peindre, il est sous forme parabolique.

II.5.3.2 Ecoulement turbulent

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des fluctuations de vitesse pour une seule particule d'élément et un mouvement très désordonné. La raison derrière ces fluctuations est un mélange rapide entre les particules de fluide à partir de couches adjacentes. Cela conduit à un transfert de mouvement entre particules de fluide, et augmentent ainsi la force de frottement sur la paroi du tube. Etant donné que le frottement est plus élevé dans un écoulement turbulent, une chute de pression plus élevée est nécessaire pour un écoulement turbulent, ce qui signifie le besoin d'une puissance artificielle (pompage).

Les fluides circulant dans des tuyaux circulaires agiront en turbulent si le nombre Reynold est supérieur à environ 4000. Pour d'autres géométries d'autres valeurs limites sont valables. Il est assez compliqué à modéliser l'écoulement dans ces conditions, en raison de la nature irrégulière et instable de la turbulence.

II.5.3.3 Ecoulement de transition

La transition du laminaire au turbulent n'est pas soudaine. Elle se produit sur certaines régions où le débit fluctue entre laminaire et turbulent. Il est donc décrit comme un régime distinct. La transition est contrôlée par l'importance relative des forces visqueuses et les forces d'inertie sur le flux, qui est le nombre de Reynolds.

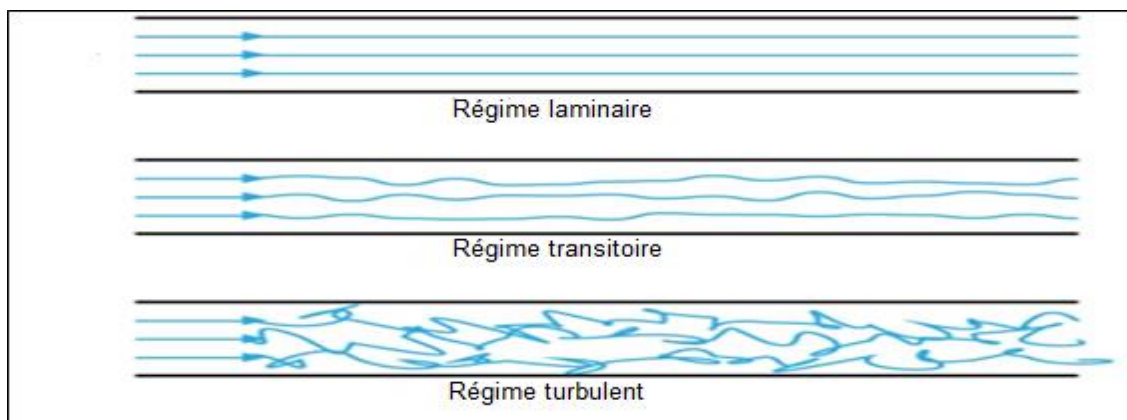


Figure II.5: Illustration des différents régimes d'écoulement.

III.1 La Bentonite

III.1.1 Définition

Les bentonites sont des argiles du type montmorillonite qui présentent la propriété de se disperser dans l'eau douce en absorbant de grandes quantités d'eau.

Les bentonites sont employées pour augmenter la viscosité et les gels des boues douces et diminuer leur filtrat. En milieu salé (plus de 35 g/l de Na Cl), les bentonites sont inefficaces et ne servent alors que de support colloïdal, dans ce cas on utilise de l'attapulгите qui est de même type.

Ce sont des phyllosilicates constitués de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique (phyllosilicates 2:1). Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite. La charge élevée de ces argiles est due pour l'essentiel à des substitutions isomorphiques. Cette charge est donc permanente, négative et dépendante du pH. Des cations compensateurs viennent alors se placer dans l'espace interfoliaire pour combler le déficit de charge. Ces argiles ont une capacité d'échange cationique élevée. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace interfoliaire et le degré d'hydratation dépend de la nature du cation hydraté et de l'humidité relative. Cette possibilité de « gonflement » des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme d'« argiles gonflantes ». D'un point de vue textural, les smectites sont généralement constituées de feuillets de grande extension latérale, associés, les uns aux autres en nombre très variable selon l'humidité et la nature du cation échangeable. A titre d'exemple, la **montmorillonite** est une argile dioctaédrique. L'aluminium des couches octaédrique peut être remplacé par Mg, Fe, Zn, Ni, Li, etc. Il peut d'autre part remplacer jusqu'à 15 % du silicium dans la couche tétraédrique.

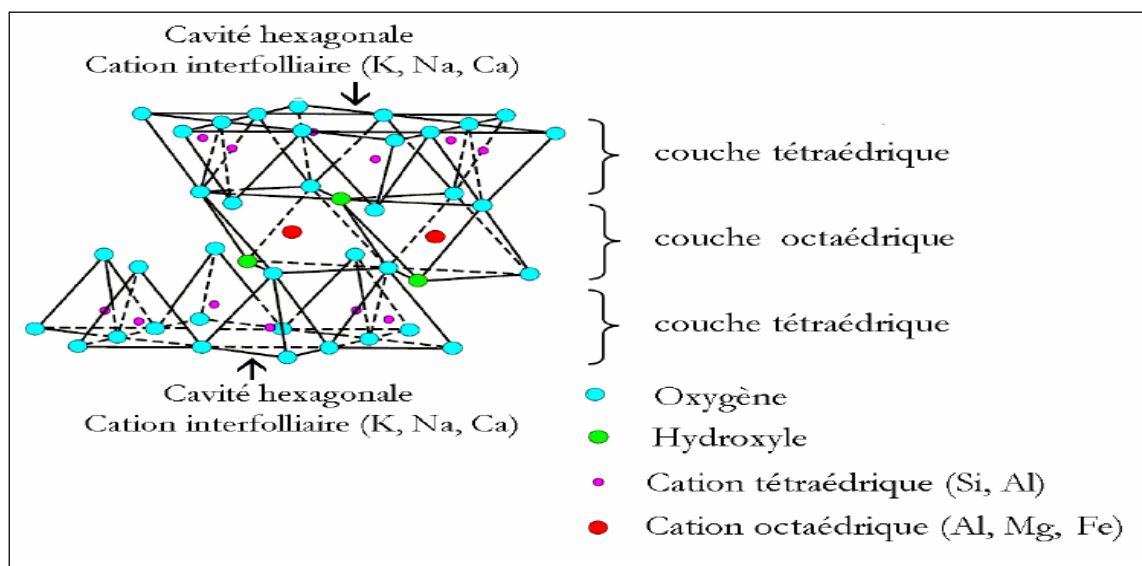


Figure III.1: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1(smectite).

III.1.2 Microstructure de la Bentonite

Pour comprendre la microstructure de la bentonite, nous présentons dans ce paragraphe une revue bibliographique sur la microstructure de la montmorillonite en prenant en considération les différents types de minéraux et d'empilements de particules constituant l'argile en question. Cette démarche est motivée par :

- la forte présence de la montmorillonite dans la littérature.
- le fait que les phyllosilicates présentent des similitudes de structure et de propriétés.
- la bentonite en général, particulièrement celle étudiée ici, est constituée en grande partie par ce type de minéral.

En plus de leur facteur de forme exceptionnel [L/e généralement compris entre 100 et 1000] (Figure III.2), les montmorillonites possèdent la propriété de gonflement la plus intéressante de tous les minéraux de la famille des phyllosilicates. Nous nous attachons dans cette partie à décrire leur structure à différentes échelles et leurs propriétés spécifiques.

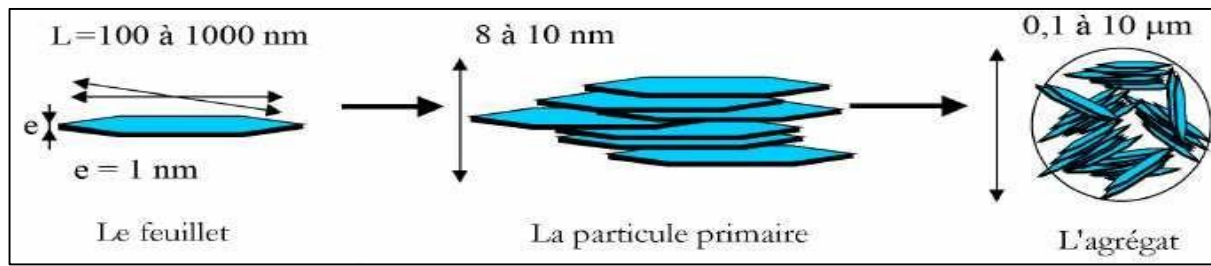


Figure III.2: Structure multi-échelle de la montmorillonite.

III.1.2.1 Les feuillets

Les feuillets sont les unités structurales de base définissant la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Séparés les uns des autres par une quantité d'eau variable, ils sont regroupés parallèlement au sein d'édifices que nous appellerons particules.

III.1.2.2 La particule

Les particules constituent le premier niveau d'organisation. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. La structure d'une particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets montre qu'elle peut être ordonnée (distance interfeuillets constante) ou désordonnée (distance interfeuillets variable).

III.1.2.3 L'agrégat

L'agrégat est un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules (et du degré de compaction). En effet, lorsque les forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. Ces particules s'assemblent au sein d'agrégats, plus au moins denses selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre celles-ci. En prenant pour référence les données de Van Olphen, portant sur les minéraux expansibles, a proposé une nomenclature pour nommer les différents modes d'association des particules : bord à bord et face-face.

Selon la quantité d'eau présente au sein du système et la nature du matériau considéré, l'organisation sera plus ou moins poussée. Il en résulte différents types de structuration. La montmorillonite est une argile possédant des unités morphologiques très déformables. Ces déformations sont probablement plus aisées que dans les autres phyllosilicates, étant donné qu'il n'existe pas ou peu d'association face-face des particules primaires conduisant à des agrégats, mais seulement des liaisons bord-bord entre particules primaires, qui joueraient un rôle de charnières. Mais cette déformation est certainement limitée du fait que les particules possèdent une certaine rigidité.

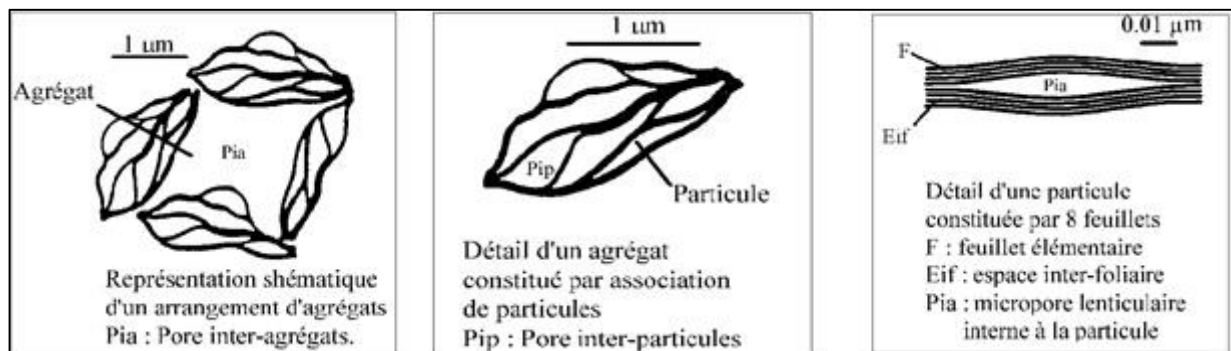


Figure III.3: Les différents types d'espaces poreux.

III.1.3 L'espace interfoliaire

Les espaces qui se trouvent entre les feuillets peuvent être vides ou remplis. Ils sont vides lorsque les différents feuillets sont neutres et liés entre eux par des liaisons hydrogène dans le cas des espèces 1:1, ou par des liaisons de Van der Waals dans le cas des minéraux 2:1 type talc ou pyrophyllite.

Ils sont occupés par des cations dès que les feuillets de l'édifice présentent un déficit de charge à la suite de substitutions isomorphiques. Ces cations rétablissent l'électro-neutralité du système et en même temps assurent la liaison entre les feuillets adjacents, qui est ici de nature ionique. Ces cations peuvent être soit «secs» soit hydratés. Les cations les plus fréquents sont Ca^{2+} Mg^{2+} K^{+} Na^{+} Li^{+} .

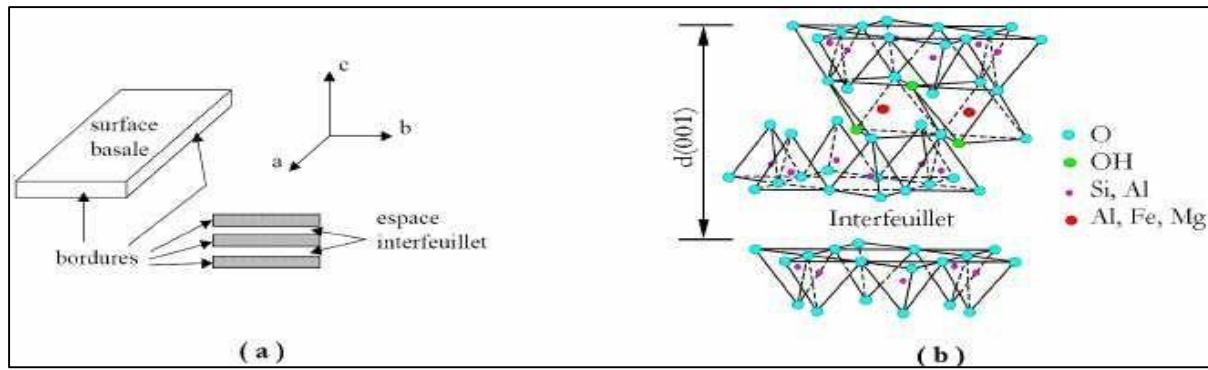


Figure III.4: Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales, les bordures des particules, ainsi que les espaces interfeuillets.

On en conclut que l'organisation de la microstructure de la bentonite (du feuillet à l'assemblage d'agrégats) ne peut être interprétée que si l'organisation de l'espace poreux est pris en considération. La dimension, la forme et la distribution des espaces poreux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant et aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise.

III.1.4 Le système Bentonite-Eau

Les particules de la bentonite présentent une grande affinité pour l'eau qui s'exprime d'une part par la quantité d'eau qu'est susceptible de retenir l'argile et d'autre part par l'énergie avec laquelle cette eau est retenue. Ce phénomène d'ordre capillaire résultant de la granulométrie fine des particules ainsi que de la présence de charges à la surface des feuillets vont contribuer à accentuer les interactions bentonite-eau. Pour comprendre cela, on s'intéresse à l'échelle des particules où les feuillets sont séparés par un nombre variable de couches d'eau (entre 0 et 4) et des pores lenticulaires de l'ordre de 30 à 50 Å. Les particules sont plus ou moins épaisses, selon la nature du cation compensateur et les propriétés physico-chimiques de la bentonite.

Les particules sont séparées les unes des autres par une quantité d'eau, relativement importante, mais elles ne sont cependant pas indépendantes. Du fait de la très grande étendue des feuillets dans leur plan et des forces d'attraction interfeuille, il se forme des connections entre particules par rapprochement de deux zones de feuillets extérieurs à deux particules adjacentes, ou par interaction entre feuillets que l'on détaillera par la suite. Comme cela a été expliqué plus haut, les particules ainsi connectées forment des agrégats ou des super-agrégats suivant la densité des suspensions. Cette organisation est caractéristique de ce qu'on appelle "*milieu granulaire*".

Lorsque l'hydratation se poursuit par le gonflement des particules, on désigne l'état de la bentonite hydratée sous le terme de "*gel*". Ces types de gels sont caractérisés par des particules très lâches constituées d'un nombre faible de feuillets (en moyenne 5), voire des feuillets isolés, situés à des distances allant de 30 à quelques centaines d'Å (Figure III.6). L'ensemble forme un réseau très souple, aux propriétés importantes de viscosité et de thixotropie.

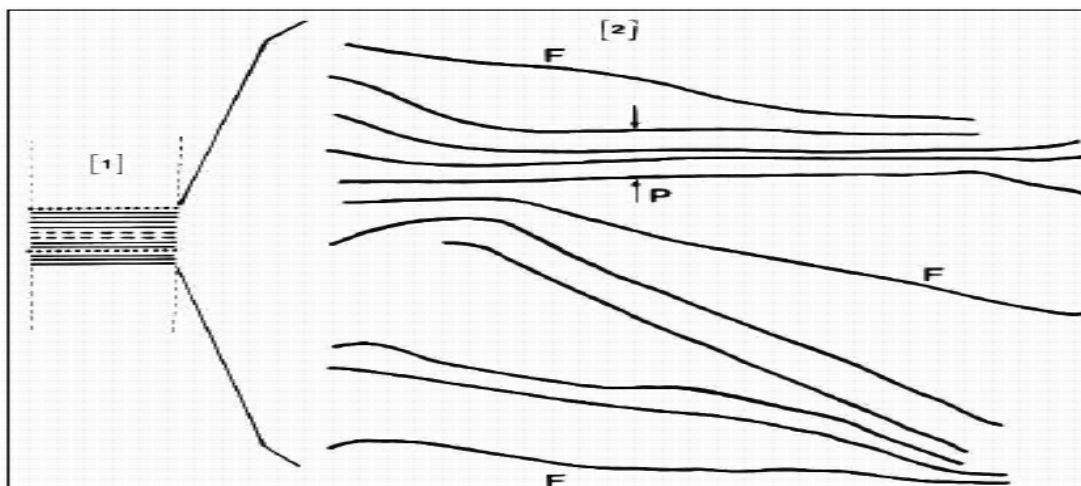


Figure III.5: Représentation schématique de l'état gel.

Si on essaye de comprendre le phénomène de gonflement au niveau de l'organisation structurale de la bentonite, on peut distinguer deux échelles différentes : (i) *une dispersion interparticulaire* où la pénétration des molécules d'eau est localisée entre les particules élémentaires ; (ii) *une hydratation interfeuillets* où la pénétration des molécules d'eau est localisée entre les feuillets qui constituent une particule.

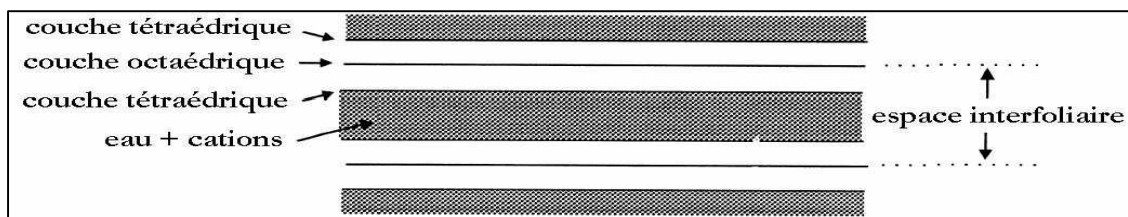


Figure III.6: Représentation de l'espace interfoliaire (distance basale) entre deux feuillets de montmorillonite

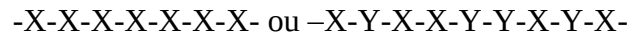
Dans la littérature, la stabilité colloïdale des particules chargées se résume, en grande partie, à l'étude de la distribution des charges électriques sur les surfaces des particules argileuses hydratées (la double couche électrique) et à l'étude des différentes conditions de stabilité ou d'agrégation à travers la combinaison entre toutes les forces d'attraction et de répulsion dans le système.

III.2 Les Polymères

Les polymères ont été employés dans les fluides de forage pendant les années 30, quand l'amidon de maïs a été ajouté comme additif pour réduire les pertes de fluide dans les formations poreuses. Depuis cette date, les polymères sont devenus très spéciaux et leur utilisation a augmenté en conséquence. Les polymères les plus spéciaux sont les polymères naturels modifiés, alors que d'autres polymères plus sophistiqués sont dérivés toujours des synthétiques. Il est possible d'analyser une situation à un niveau moléculaire et concevoir un polymère avec des propriétés spécifiques pour dresser la situation. Pour cette raison, les polymères ont un avenir intéressant dans le domaine des fluides de forage.

Un polymère est un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées monomères. Ils peuvent se présenter

- En chaînes linéaires avec une répétition linéaire n fois du motif X (homopolymère) ou de deux ou plusieurs motifs (copolymères XY par exemple).



- En chaîne non linéaire : branchés en étoiles ou en réseau.

III.2.1 Classification des polymères

III.2.1.1 Selon leur origine

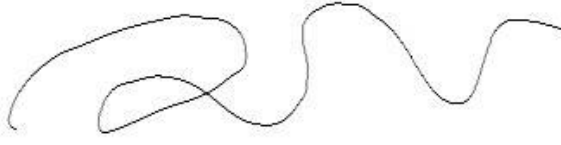
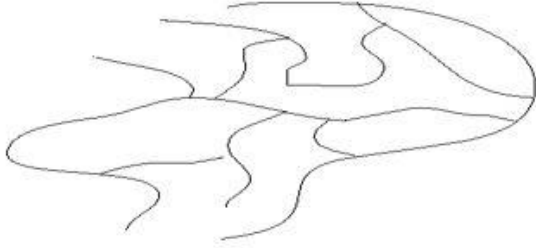
On peut les classer en trois catégories :

- **Les polymères naturels** : Sont issus des règnes végétal ou animal ; les exemples les plus connus, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...) celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc
- **Les polymères artificiels** : Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, les esters cellulose ont toujours connus une certaine importance économique.
- **Les polymères synthétiques** : Totalement issus du génie de l'homme.

III.2.1.2 Selon leur structure (dimensionnalité)

Les polymères peuvent encore être classés selon leur structure en trois catégories en trois catégories.

Tableau III.1: Structures de polymères.

Type de structure	Schéma de la structure	Exemples
Linéaire ou monodimensionnel		CMC, PHPA, HEC
Branché ou bidimensionnel		Amidon, gomme de xanthane
Réticulé ou tridimensionnel		Gomme de xanthane réticulé

Il y a une possibilité infinie dans les conformations structurales des polymères, certaines d'elles et qui affectent les performances des polymères sont :

- Le type du monomère ou des monomères.
- La masse moléculaire.
- Le type et l'abondance de la modification chimique sur le polymère.
- Nombre de groupes ramifiés ou réticulés dans la chaîne du polymère.

Les polymères en fluides de forage peuvent être classés en trois manières, ils peuvent être classés selon leur chimie, en tant qu'anionique ou non-anionique, ils peuvent être classés par leur fonction telle que des additifs viscosifiant ou réducteur de filtrat, ou ils peuvent être classés tout simplement par leur origine naturel, naturel modifiés ou synthétique.

III.2.2 Adsorption des polymères

L'adsorption des polymères à l'interface solide/liquide est associée à des problèmes variés tel la stabilisation colloïdale, la floculation, l'adhésion, la lubrification, etc. la structure des couches de polymères absorbés de même que les quantités de polymères dans ces couches jouent un rôle capital pour ces processus. L'adsorption des polyélectrolytes sur les surfaces minérales est généralement différente de celle des polymères non chargés, la différence principale étant liée à l'intervention de forces électrostatiques à longue portée dans le cas des polymères chargés.

L'étude statistique d'une chaîne isolée adsorbée a été l'objet de nombreux travaux dans les années 60. Hoeve et Silberberg distinguent les **boucles**, les **trains** et les **queues** (Figure III.7). Les boucles sont constituées par les portions de chaînes situées entre deux monomères en contact avec la surface, les trains désignent les sections de chaînes complètement adsorbées sur la surface, tandis que les queues sont les portions terminales de la chaîne, situées entre un bout libre et le plus proche monomère en contact avec la surface.

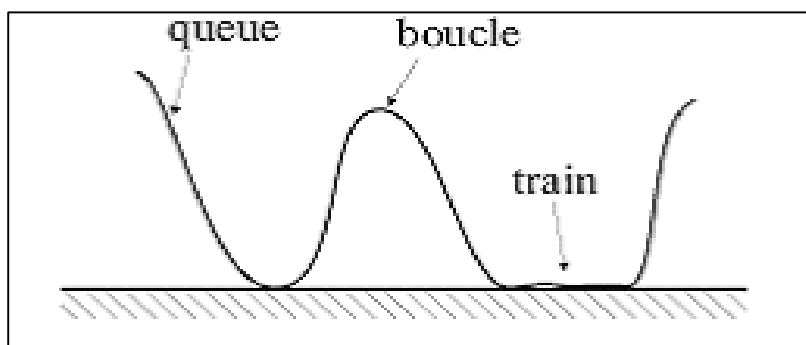


Figure III.7: Schéma d'adsorption d'une chaîne de polymère sur une surface.

Plusieurs interactions thermodynamiques doivent être prises en compte pour décrire le processus d'adsorption du polymère à la surface d'une particule minérale. Ainsi, les interactions segment - surface, segment - solvant, et segment - segment apportent une contribution à la thermodynamique du processus. D'autres changements sont aussi à considérer si l'on désire obtenir une image complète du système, il s'agit notamment :

- Du changement de conformation du polymère après son adsorption à l'interface.
- Du changement de conformation d'une molécule adsorbée induit par l'adsorption de nouvelles molécules à l'interface.
- Des phénomènes d'échanges associés à l'adsorption préférentielle de molécules de poids moléculaires élevés.
- Du changement du taux d'ionisation de la surface minérale et du polymère liée à une augmentation de la densité entière de charge au voisinage de la surface.

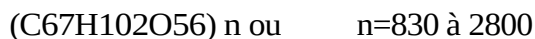
Il convient également de souligner que dans la plupart des situations, l'adsorption d'un polymère sur une surface minérale est limitée par le temps d'accès d'une molécule de polymère vers la surface ; cet accès est contrôlé, suivant le système considéré, soit par la diffusion du polymère soit par la convection.

III.2.3 Les polymères dans les fluides de forage

Dans la pratique, Bien souvent, ces matériaux sont ajoutés dans des suspensions argileuses pour améliorer leurs propriétés colloïdales et rhéologiques. Prenons l'exemple des fluides de forage : environs tous les fluides à base d'eau renferment dans leurs composition un polymère, parmi les plus connus on trouve le Xanthane, Le polyacrylamide (PAM) dans sa forme partiellement hydrolysé (PHPA), le Carboxyméthylcellulose (CMC), le polyanionique de cellulose (ou PAC) et les silicates de sodium et enfin les Glycol (PEG).

III.2.3.1 La gomme xanthane

Le xanthane est un hétéropolysaccharide anionique ramifié, extracellulaire, produit par voie microbienne, par *Xanthomonas campestris*, une bactérie inoffensive. Ce biopolymère hydrosoluble possède des propriétés rhéologiques exceptionnelles et trouve des applications industrielles nombreuses et variées. Sa formule brute moyenne est approximative:



Le xanthane est largement utilisé en tant que viscosifiant vu sa qualité rhéologique, sa résistance vis-à-vis de la salinité, et sa biodégradabilité. Son domaine de stabilité thermique est 120 à 138 °C.

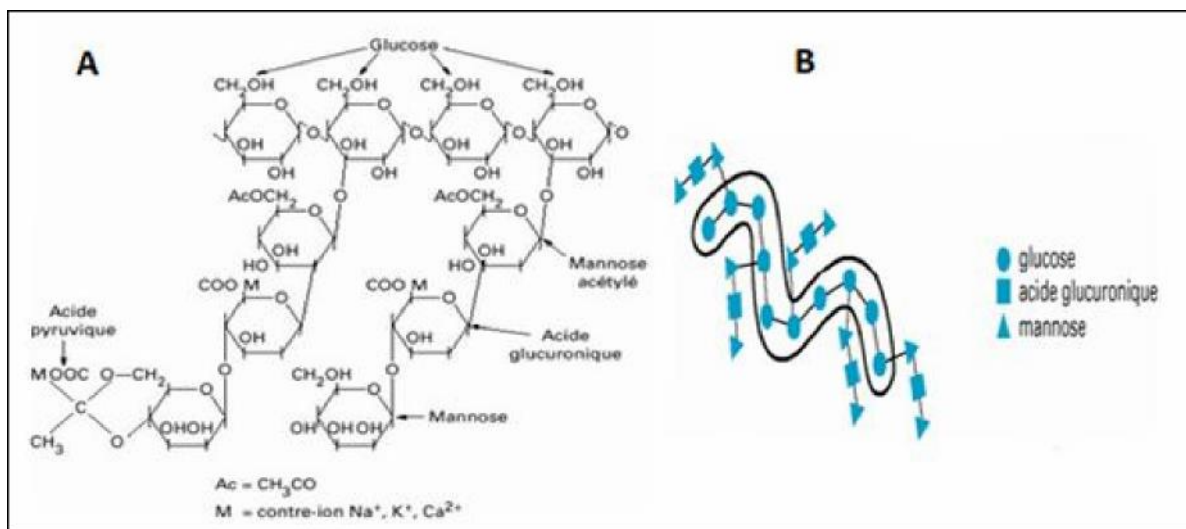


Figure III.8: Structure primaire (A) et structure secondaire (B) de la gomme xanthane à l'état solide

III.2.3.2 Carboxyméthylcellulose (CMC)

Le carboxyméthylcellulose (CMC) a été employée depuis 1947 dans divers fluides de forage à base d'eau comme réducteur de filtrat ou comme viscosifiant selon sa longueur de chaîne. Le CMC est un polymère linéaire anionique à base de cellulose partiellement greffée par des groupes $—OCH_2COO—$ selon un certain degré de substitution (DS).

La fabrication du CMC consiste en deux étapes (Figure III.9) **i)** Dans la première étape, la cellulose est suspendue dans une suspension alcaline pour couper les liaisons entre les chaînes de cellulose **ii)** Ensuite, la cellulose réagit avec le monochloroacétate de sodium pour produire le CMC Na

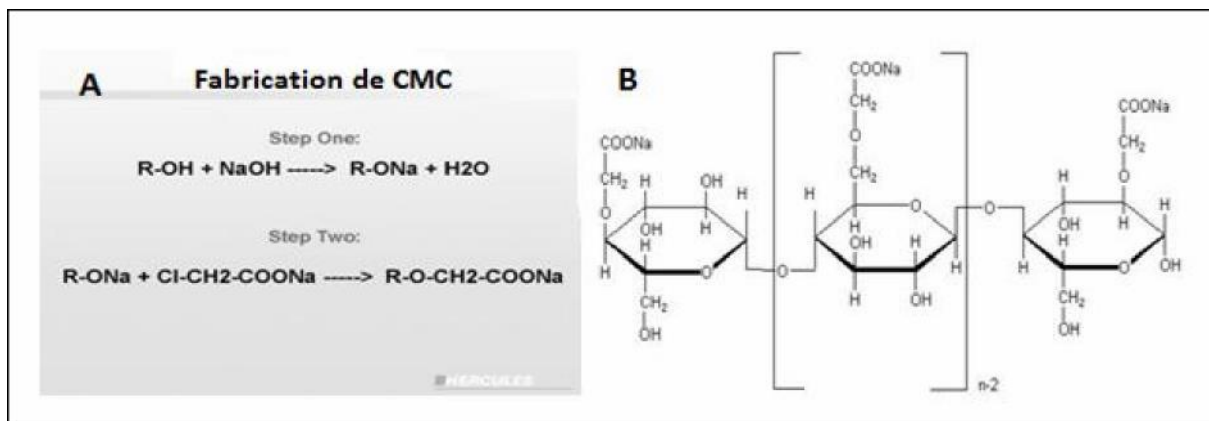


Figure III.9: Principe de fabrication de CMC (A) et représentation d'une unité structurale CMC (B).

III.2.3.3 Les celluloses polyanioniques (PAC)

Le PAC est un polymère cellulosique de type carboxyméthylcellulose ayant une conformation en pelote flexible, opposée à celle du xanthane qui est un polysaccharide se présentant sous forme d'une hélice semi-rigide. Les celluloses polyanioniques sont employées principalement comme réducteurs de filtrat pour les boues à base d'eau douce et d'eau de mer, mais agissent également en tant que viscosifiants dans ces systèmes.

Une caractéristique du PAC est le degré de substitution (DS) du groupe carboxyméthyl qui est supérieur à 0.8. La stabilité thermique du PAC est de 149 °C et il n'est pas sensible à dégradation bactérienne.

III.2.3.4 Amidon

Les granules d'amidon sont des particules blanches semi-cristallines, insolubles dans l'eau à température ambiante et dont la taille varie entre 2 et 100 μm . L'hydrolyse acide complète de l'amidon libère de 98 à 99 % de D-glucose, la fraction non glucidique (lipides) représente 1 à 2 %. Les unités monomères de D-glucose sont liées majoritairement par des liaisons de type $\alpha(1-4)$ (95-96 %) et dans une moindre mesure par des liaisons de type $\alpha(1-6)$ (4-5 %). La fraction glucidique est un mélange de deux polymères : l'amylose (20 à 30 %), molécule essentiellement linéaire et l'amylopectine (70 à 80 %), molécule ramifiée. La (Figure III.10) représente la structure chimique de l'amylose et de l'amylopectine.

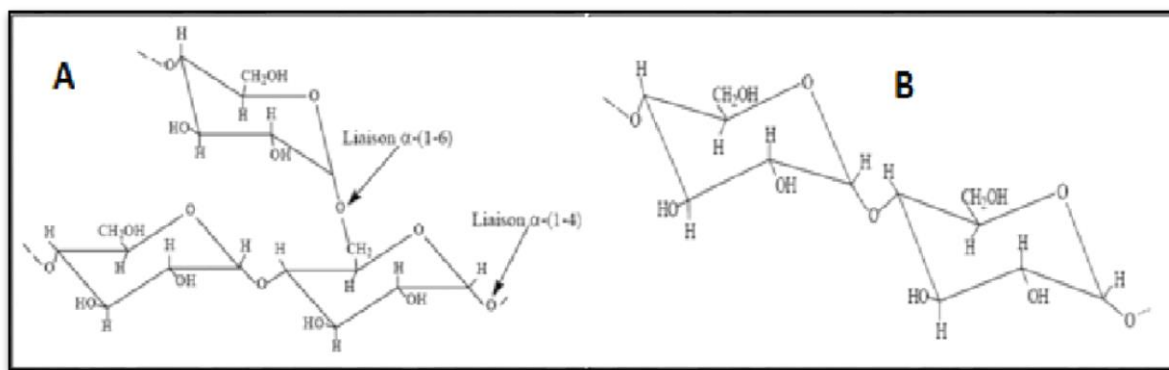


Figure III.10: Représentation de structure chimique de l'amylopectine (A) et d'amylose (B).

En excès d'eau et à une température supérieure à 60°C, le grain d'amidon natif qui est insoluble dans l'eau ($3 \leq \text{pH} \leq 10$), subit plusieurs transformations. Il passe successivement par trois états : le grain gonflé, le grain gélatinisé et le grain solubilisé. Lors du refroidissement, le système se gélifie.

III.2.3.5 Polymères synthétiques PHPA

Le PH PA est parmi les polymères synthétiques les plus utilisés dans le domaine pétrolier et surtout le PH PA hydrolysé à 30% qui est utilisé dans les fluides de forage pour l'inhibition des argiles. C'est un polymère linéaire anionique de masse molaire élevée, dont certaines fonctions amide ont été hydrolysées.

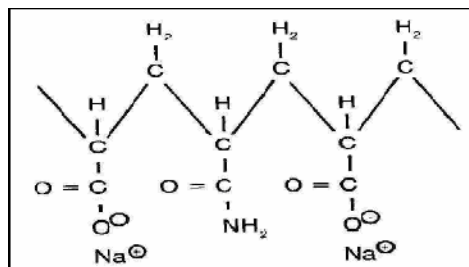


Figure III.11: Polyacrylamide partiellement hydrolysé (sel de sodium).

L'attraction entre les sites chargés négativement du PHPA et les sites positifs des argiles conduisent à une "encapsulation" retardant le gonflement et la dispersion. Le PHPA peut être utilisé dans les fluides de forage à l'eau douce ou à l'eau salée, contenant de faibles quantités de solides.

Une classe de base d'eau emploie le polyacrylamide partiellement hydrolysée (PH PE) comme additif fonctionnel, Pour l'encapsulation des déblais et la stabilisation des argiles. Le PHPA joue aussi le rôle de viscosifiant, réducteur de friction et floculant lorsque il apporte une réduction du filtrat. Le KCl est employé comme un inhibiteur d'argile dans la plupart des boues de PH PA conçus.

III.2.3.6 Les glycols

L'éthylène glycol fut synthétisé pour la première fois en 1859 par Charles Wurtz. Il fut produit en petite quantité durant la première guerre mondiale comme réfrigérant et comme constituant d'explosifs. Sa production industrielle débuta en 1937, dès lors que son précurseur, l'oxyde d'éthylène, fut lui-même produit en quantité industrielle à bas prix. Il provoqua une petite révolution dans le monde de l'aéronautique en remplaçant l'eau du système refroidissant. Sa température d'ébullition élevée permet ainsi de diminuer la taille du radiateur, et donc son poids. Avant que l'éthylène glycol ne soit disponible, les systèmes de refroidissement utilisaient en effet de l'eau à haute pression ; ces systèmes étaient encombrants et peu fiables, et en cas de combat aérien, facilement touchés par les balles ennemies.

➤ Définition

L'éthylène glycol est le plus simple composé chimique de la famille des glycols. Sa formule chimique est $\text{HO} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$ (c'est un diol).. À température ambiante, c'est un liquide visqueux incolore et sans odeur, avec un goût sucré. L'éthylène glycol est toxique, et son ingestion nécessite des soins médicaux urgents.

➤ Production

Il est synthétisé à partir d'éthylène, via un intermédiaire d'oxyde d'éthylène qui réagit avec l'eau, selon l'équation :



Cette réaction peut être catalysée en milieu acide ou basique, ou bien encore à haute température. En milieu acide et avec un excès d'eau, le rendement de la réaction peut atteindre 90 %. Les oligomères d'éthylène glycol (diéthylène glycol, triéthylène glycol, tétraéthylène glycol) peuvent être obtenues de la même manière.

➤ Utilisation

L'éthylène glycol est surtout employé en tant qu'antigel et réfrigérant. Son point de fusion étant bas, il a aussi été utilisé comme dégivrant pour les pare-brise et les moteurs à réaction. L'éthylène glycol a définitivement pris de l'importance dans le domaine des industries pétrochimiques, où il permet la production de fibres et de résines de polyesters, dont le polyéthylène téréphtalate, principal matériau des bouteilles en plastique. Ses propriétés antigel en font aussi un constituant important des solutions destinées à la conservation de tissus organiques à basse température.

La température d'évaporation élevée de l'éthylène glycol et sa grande affinité pour l'eau en font un déshydratant idéal pour la production de gaz naturel. Dans les tours de séparation, on fait ainsi se rencontrer l'éthylène glycol liquide coulant du haut de la tour avec le mélange d'eau et d'hydrocarbures gazeux s'échappant du bas. Le glycol capte l'eau et s'écoule au fond, tandis que les vapeurs d'hydrocarbures sont récupérées au sommet.

III.3 Interactions interparticulaires

III.3.1 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.

III.3.2 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.

III.3.3 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.

III.3.4 Interaction argile-polymère

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

➤ **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 Kg/mol a une longueur de chaîne d'environ 20 microns qui peut être beaucoup plus importante que les particules d'argiles.

Ainsi, une molécule peut adsorber plus d'une particule d'argile et donc former une association entre les particules d'argile. Par conséquent les polymères à poids moléculaire élevé agissent en tant que flocculants [PEO 200 000 g/mol]. 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 [PEG à faible poids moléculaire].

➤ **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" (Figure. III.12). 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. 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.

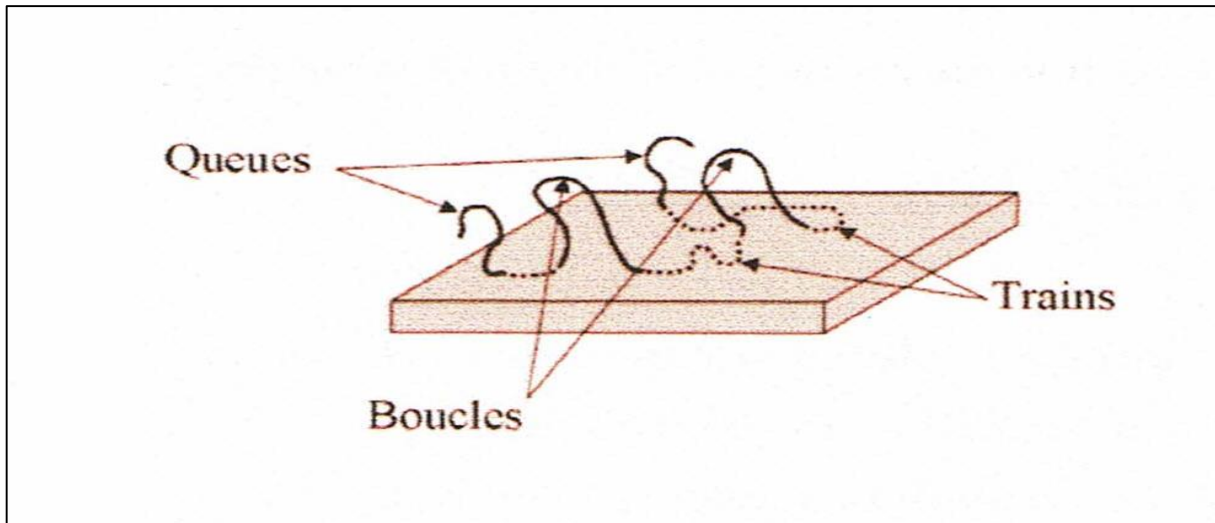


Figure III.12: Schéma des différentes séquences d'un polymère adsorbé sur une surface argileuse

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.

III.3.5 Interaction polymère-polymère

L'interaction entre polymère peut être par un mécanisme d'enchevêtrement. Il est d'autant plus prononcé que les chaînes sont longues. Ainsi, à poids moléculaire élevé ont des viscosités plus élevées que les polymères plus courts ou à poids moléculaire faible. Dans ce cas, la solution est dite semi-diluée. Lorsque les polymères sont de même nature, on aura plutôt des répulsions par effet stérique. Les polymères se repoussent et s'excluent mutuellement de l'espace qu'ils remplissent. Dans le cas contraire, les interactions sont essentiellement attractives et les polymères s'attirent mutuellement et s'attachent entre eux.

III.4 Mécanisme de floculation et de défloculation

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.

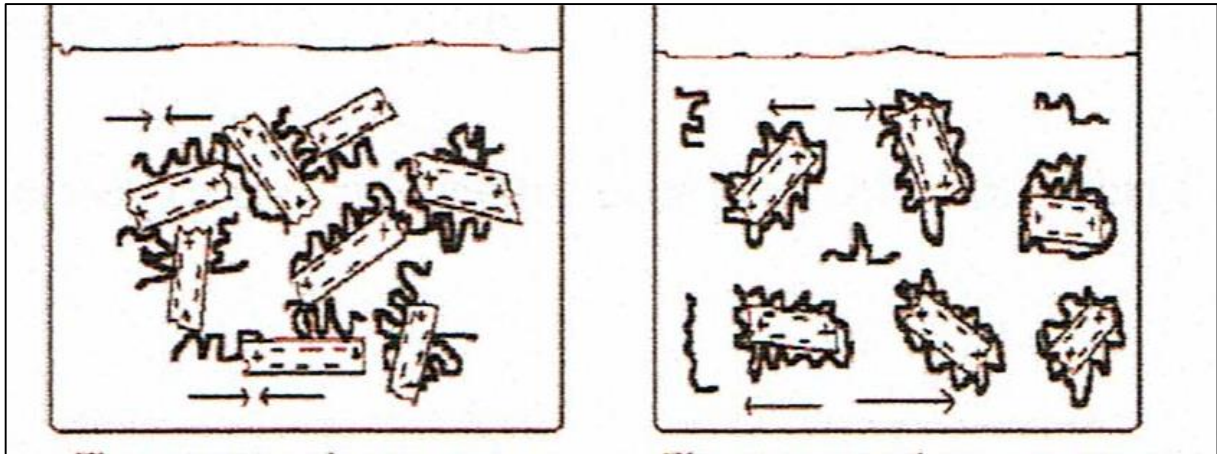


Figure III.13: Schéma représentant les mécanismes de floculation et de défloculation

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

Pour augmenter la stabilité de la suspension, il faut assurer une :

- Augmentation de la charge de surface
- Inversement de la charge de surface positive
- Elévation du pH
- Neutralisation des cations plurivalents : dans les fluides de forage, le Soda Ash (Na_2CO_3) est ajouté dans l'eau pour neutraliser les ions multivalents afin d'assurer une bonne efficacité des polymères.

Nous présentons en premier lieu les différents équipements utilisés dans cette étude pour effectuer des analyses complémentaires, pour l'interprétation et la bonne compréhension du comportement rhéologique de nos systèmes complexes Bentonite-PEG, nous décrivons essentiellement les techniques de Rheométrie classique permettant de mesurer la viscosité de cisaillement, les contraintes et éventuellement les modules viscoélastiques à l'aide de la géométrie couette cylindrique.

IV.1 Mesures rhéologiques

Pour mesurer les caractéristiques rhéologiques d'un fluide (viscosité, contraintes normales, etc.), on utilise un appareil de mesure appelé rhéomètre. Un rhéomètre mesure à la fois la contrainte et la déformation d'un fluide en fonction du temps.

Pour mesurer la viscosité de cisaillement, $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ un rhéomètre peut appliquer la contrainte τ et mesurer le taux de cisaillement $\dot{\gamma}$ (fonctionnement à contrainte imposée), ou vice versa (fonctionnement à taux de cisaillement imposé). En réalité, le rhéomètre impose soit un couple, soit une vitesse de rotation. Le couple est proportionnel à la contrainte, et la vitesse de rotation est proportionnelle au taux de cisaillement; les deux coefficients de proportionnalité sont des caractéristiques de la géométrie utilisée (Couette cylindrique, cône-plan, plan-plan, etc.).

Le rhéomètre utilisé pour nos expériences est: le physica CMR 301, rhéomètre à vitesse de déformation imposé (figure IV.1). Le tableau suivant résume les caractéristiques de ce rhéomètre.

Tableau IV.1: Caractéristiques de rhéomètre Anton Paar Physica MCR 301.

Sollicitation dynamique	Déformation
Vitesse de cisaillement	10^{-7} ; 3000 [min ⁻¹]
Force	0.01 ; 50 [N]
Gamme de couples	5.10^{-6} ; 2.10^{-2} [Kg.m]
Gamme de fréquences mesurables	5.10^{-3} ; 628 [rad.s ⁻¹]
Gamme de températures	-150 ; + 1000 [°C]
Atmosphère d'analyse	Air
Mesure temporelle	Fonction de relaxation

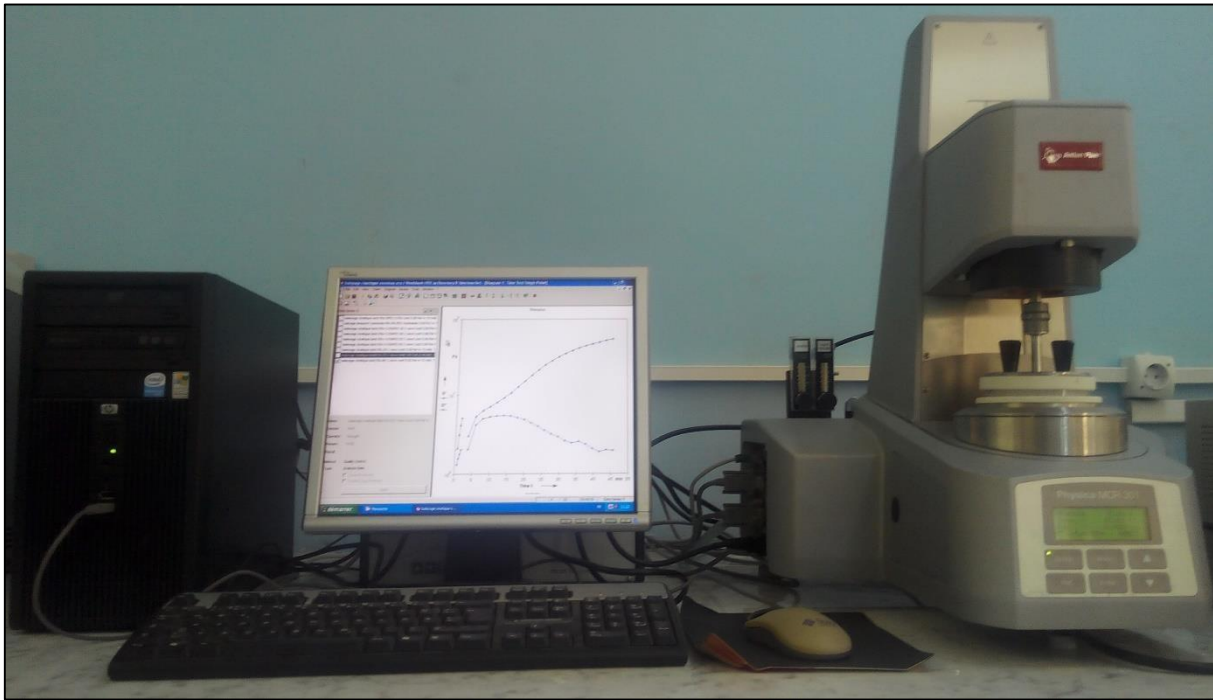


Figure IV.1: Rhéomètre MCR 301 utilisé pour la caractérisation Rhéologique.

➤ Géométrie de Couette cylindrique

La géométrie de Couette est composée de deux cylindres coaxiaux en rotation relative. Le rayon intérieur est noté R_i et le rayon extérieur R_e (et on a donc $R_e > R_i$), l'entrefer (e) est l'espace entre les deux cylindres ($e = R_e - R_i$), la hauteur du cylindre intérieur est notée h . La géométrie de Couette utilisée dans cette étude, a un cylindre extérieur fixe avec un fond (« cup » en anglais; il s'agit donc d'un récipient cylindrique destiné à contenir le fluide) et un cylindre intérieur tournant (« bob » en anglais; le Couette cylindrique est donc parfois dénommé en anglais « bob and cup »). La (Figure IV.2) représente une coupe de profil d'une géométrie de Couette cylindrique. Le rhéomètre impose un couple au cylindre tournant et mesure la vitesse de rotation de ce cylindre.

Tableau IV.2: Caractéristiques de la géométrie .

Rayon intérieur R_i (bob)	13.3250 (mm)
Rayon extérieur R_e (cup)	14.4645 (mm)
Entrefer e	1.1395 (mm)
Longueur h (cup)	39.997 (mm)
Angle du cône α	120°

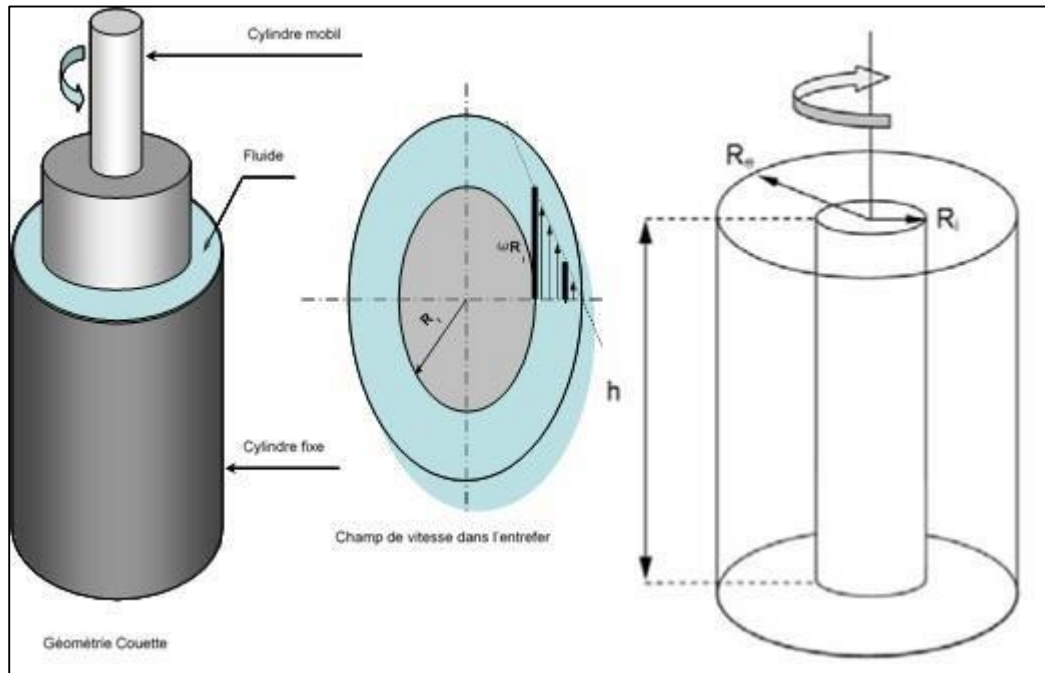


Figure IV.2: Géométrie de Couette cylindrique.

Le couple C imposé par le rhéomètre sur le cylindre tournant vaut, en notant la contrainte moyenne sur le cylindre intérieur $\tau (r = R_i) = \tau_i$

Force = (contrainte) (surface)

$$F = \tau \cdot S \dots\dots\dots (IV.2)$$

$$F = \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_i \dots\dots\dots (IV.3)$$

$$C = (\text{distance}) \cdot (\text{force}) = R_i \cdot \tau \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_i \dots\dots\dots (IV.4)$$

$$C = 2\tau\pi R_i^2 \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$\tau = \frac{C}{2\pi R_i^2} \dots\dots\dots (IV.6)$$

Pour un entrefer faible ($e = R_e - R_i \ll 1$), le système équivaut à un cisaillement entre deux plaques, et le taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$), fonction de la vitesse angulaire de rotation C , s'écrit :

$$\dot{\gamma} = \frac{V_\theta}{e} \dots\dots\dots (IV.7)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega R_i}{R_e - R_i} \dots\dots\dots (IV.8)$$

IV.2 Matériaux

IV.2.1 Bentonite

L'argile qui fait l'objet de notre travail est une bentonite calcique (285234) de Sigma Aldrich. Sa composition moyenne est (en % massique) :

Tableau IV.3: Compositions chimique de la Bentonite.

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
% massique	48,35	12,15	8,26	6,68	5,47	3,65	2,39

Elle possède une surface spécifique de 39,3 m²/g et une capacité d'échange cationique de 0,88 meq/g. D'après les données du fabricant, elle a un pH de 9 et une masse volumique de 2,4 g/cm³.

IV.2.2 Eau

L'eau est un fluide particulièrement complexe dont les propriétés peuvent varier dans des proportions considérables. Dans notre étude, nous avons utilisé une eau déminéralisée de pH égal à 6,63.

IV.2.3 Poly (Ethylène-Glycol) PEG 10000

Le PEG ou polyéthylène glycol est fourni par Sigma ALDRICH, c'est un polymère nonionique de la famille des polytheres, les unités d'éthylène (CH₂-CH₂-O) constitue la partie hydrophobe du polymère, et l'atome d'oxygène forme la partie hydrophile, l'arrangement entre ces deux parties est responsable des propriétés de solubilité dans l'eau, Pour notre travail, nous avons choisi un poids moléculaire de 10 000 g/mol. Il a une masse volumique de 1.74 kg/m³, et un rayon de giration de 30 Å.

IV.3 Protocole et préparation

Dans le but d'étudier le comportement de notre système modèle (eau-bentonite-PEG) à différentes concentrations de ce polymère, il a été plus que nécessaire de se référer à des travaux antérieurs fait dans le domaine, à savoir la fixation des paramètres de formulation de ce système de référence. Une étude de caractérisation des systèmes isolés (eau + bentonite) et (eau+ PEG), a été faite auparavant afin de comprendre leurs comportements rhéologiques (Gareche et al).

A partir de ces études préliminaires, il a été constaté que le comportement rhéologique se modifie à partir d'une concentration de 4% de bentonite, c'est pour cela que nous avons fixé la concentration de la bentonite à 6%, qui n'est d'ailleurs pas loin en pratique dans la formulation des fluides de forage.

La gamme de concentration en additif (PEG) est comprise dans l'intervalle [0.5, 0.75, 1,1.2] pour le poids moléculaire 10 000 g/ mol.

IV .3.1 Préparation des suspensions

Pour la préparation du mélange ternaire (eau-bentonite-PEG), le protocole expérimental a été comme suit :

On a préparé une suspension bentonitique de base de concentration massique de 6% (6 gr de bentonite dans 94 gr d'eau déminéralisé), après 8 heures d'agitation magnétique (450 rpm), on a ajouté le PEG de poids moléculaire 10 000 g/mol dans la suspension de base. L'homogénéisation est obtenue après 24 heures d'agitation magnétique.

IV.3.2 Protocole de mesures expérimentales

Etant donné que cette étude est portée essentiellement sur la rhéologie des suspensions colloïdales, nous allons donc nous limiter juste à la présentation du protocole de mesures concernant la rhéométrie.

Pour s'assurer de la bonne reproductibilité des mesures, nous avons ainsi adopté un protocole rigoureux de telle façon que nos échantillons soient soumis à une même histoire mécanique. Enfin nous avons effectué les tests dans les deux régimes : stationnaire et dynamique.

IV.3.2.1 Régime stationnaire

➤ Les courbes d'écoulement

Nous avons suivi l'évolution de la contrainte de cisaillement (la viscosité) de nos suspension en fonction de la vitesse de déformation en utilisant la géométrie couette du rhéomètre MCR 301 .Le protocole adopté est le suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon pendant 5 minutes.
- Rampe montante en vitesse de 0.01 s^{-1} à 1000 s^{-1} .
- Rampe descendante en vitesse de déformation de 1000 s^{-1} à 0.01 s^{-1} .

IV.3.2.2 Régime dynamique

➤ Balayage en contrainte

Consiste à suivre l'évolution des deux modules G' et G'' en fonction de la contrainte pour une fréquence donnée, on a opté pour le protocole suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon sous un agitateur magnétique pendant 5 minutes.
- Précisaillement sous un fort cisaillement de 800 s^{-1} pendant 60 secondes.
- Repos sous la géométrie pendant 20 minutes.
- Balayage en contrainte de 0.01 Pa à 15 Pa sous la fréquence de $\omega=10 \text{ rad/s}$.

➤ Balayage en fréquence

Consiste à suivre l'évolution des modules G' et G'' en fonction de la fréquence pour une contrainte donnée. Nous avons effectué des essais de balayage fréquentiel sous une contrainte déterminée à partir du balayage en contrainte définie dans le domaine linéaire. Le protocole adopté est le suivant :

- Agitation préalable de l'échantillon pendant 5 minutes.
- Précisaillement sous un fort cisaillement de $[800 \text{ s}^{-1}]$ pendant 60 secondes.
- Repos de 90 minutes dans la géométrie de mesure.
- Balayage en fréquence compris entre 10^{-2} à 100 rad/s avec une contrainte fixe de $[0.1] \text{ Pa}$.

➤ Balayage en temps (Suivi cinétique)

Consiste à suivre l'évolution des deux modules viscoélastiques G' et G'' en fonction du temps, pour une fréquence et une contrainte données.

Les essais de cinétique de structuration ont été réalisés sur des échantillons frais suivant le protocole :

- Pré cisaillement sous un fort cisaillement de $[800 \text{ s}^{-1}]$ pendant 60 secondes.
- Suivi cinétique pendant 4h sous la fréquence $\omega=10 \text{ rad/s}$ et une contrainte de cisaillement très faible $[0.09 \text{ Pa}]$.

IV.4 Résultats et Discussions

Dans cette partie, nous vous caractérisé rheologiquement nos suspension, Bentonite-polymère, afin de faire un lien entre la structure de la suspension et son comportement rhéologique.

L'impact de l'ajout du PEG 10 000 g/mol sur le comportement rhéologique des suspensions de base a été examiné en terme de viscosité, contrainte seuil et modules viscoélastique.

IV.4.1 Etude en régime stationnaire (cisaillement simple)

IV.4.1.1 Courbes d'écoulement et de viscosité

Les résultats disponibles sur de telles mélanges sont souvent très différents, ceci peut s'expliquer par les diverses sources des matériaux utilisés (bentonite et PEG, origine, fabrication etc...), ainsi que les protocoles expérimentaux adaptés.

Nous présentons ci-dessous les rhéogrammes obtenus à partir de mesures rhéométriques :

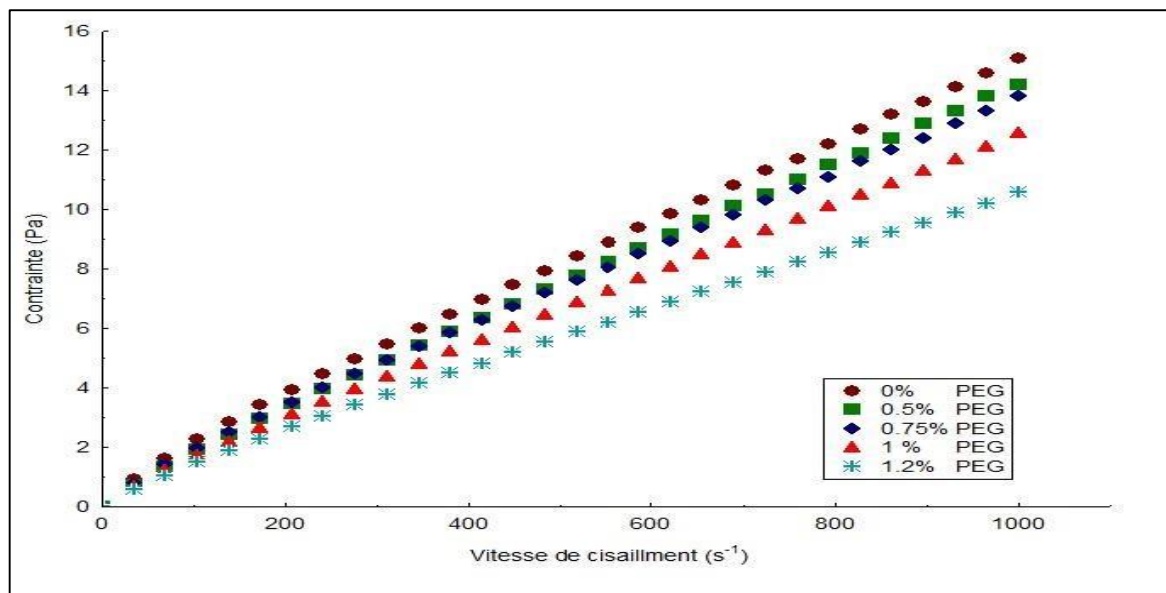


Figure IV.3: Courbe d'écoulement du mélange bentonite-PEG 10 000 g/mol ($T=25^{\circ}C$).

L'allure des courbes d'écoulement à différentes concentrations confirme le caractère Non-Newtonien de nos mélanges Bentonite-PEG, on observe toutefois que les paramètres rhéologiques diminuent en fonction de l'ajout du PEG 10 000 g/mol, ce qui revient à dire que le comportement est pratiquement rhéofluidifiant.

IV.4.1.2 Evolution de la contrainte seuil en fonction de concentration

Dans la pratique, les suspensions de bentonite présentent une contrainte seuil d'écoulement (yeild value), pour cela nous avons investigue dans la plage de faibles gradients de cisaillement [$0-35 s^{-1}$] des rhéogrammes obtenus (Figure IV.4.a) et nous avons pu détermine les contraintes seuil de nos fluides à différentes concentration (Figure VI.4.b), ceci étant fait, par extrapolation des courbes sur l'axe de contrainte.

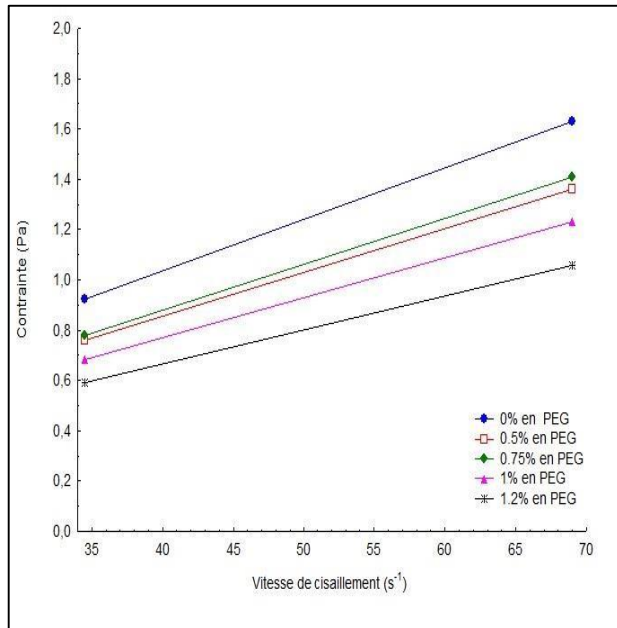


Figure IV.4.a :Extrapolation des courbes d'écoulement à faible taux de cisaillement.

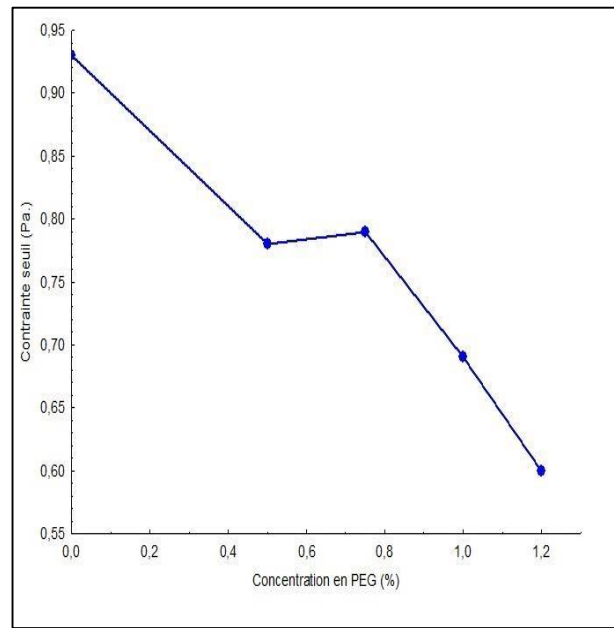


Figure IV.4.b: Evolution de la contrainte seuil d'écoulement en fonction de la concentration en PEG 10 000.

Comme nous pouvons le constater (Figure IV.4.a ; b), l'ensemble des suspensions en présence de PEG 10 000 g/mol, a un comportement rhéofluidifiant avec une contrainte seuil d'écoulement qui diminue au fur et à mesure de l'ajout du PEG, toutefois nous remarquons une légère augmentation en passant de la concentration de 0,5% à 0,75%, qui est du probablement aux différentes limitations de l'expérience.

IV.4.1.3 Courbes de viscosité

Si on inverse les valeurs des courbes d'écoulement, on peut produire une courbe de viscosité afin d'illustrer la réaction de la viscosité effective aux différents taux de cisaillement imposés.

La figure IV.5 illustre la variation de la viscosité en fonction du taux e déformation pour des mélanges Bentonite-PEG à différentes concentration de PEG.

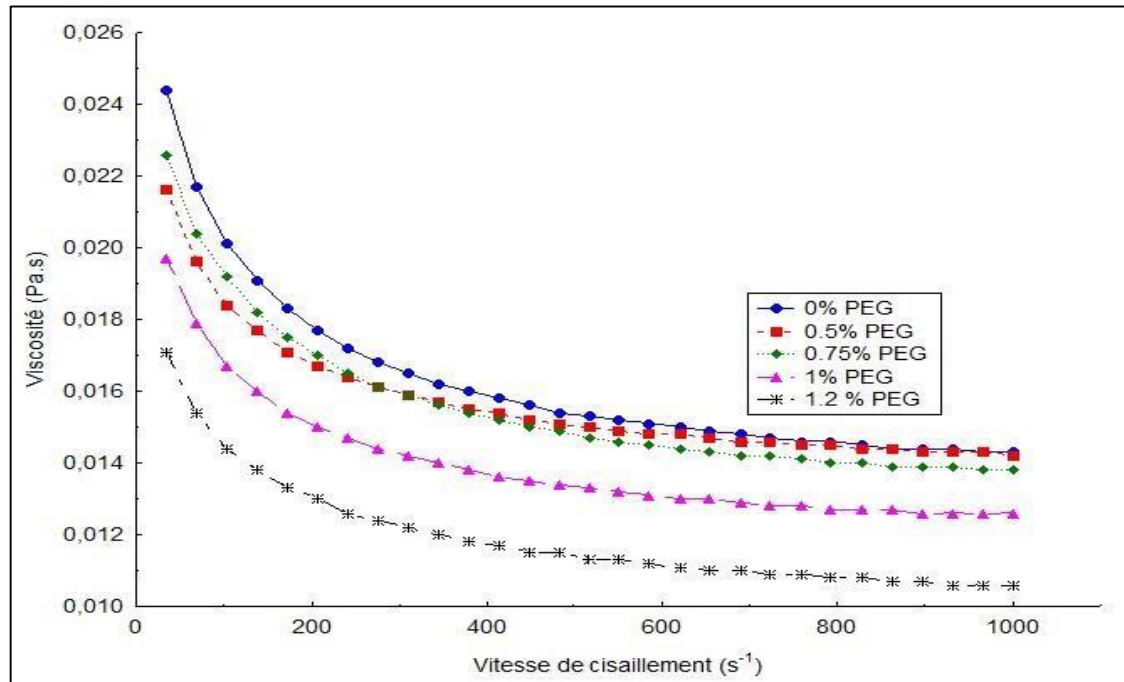


Figure IV.5: Evolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement (T=25°C).

On remarque que la viscosité effective de nos suspensions Bentonite-PEG diminue en fonction de l'ajout du PEG 10 000 g/mol. Le caractère rhéofluidifiant est, une fois de plus, mis en évidence.

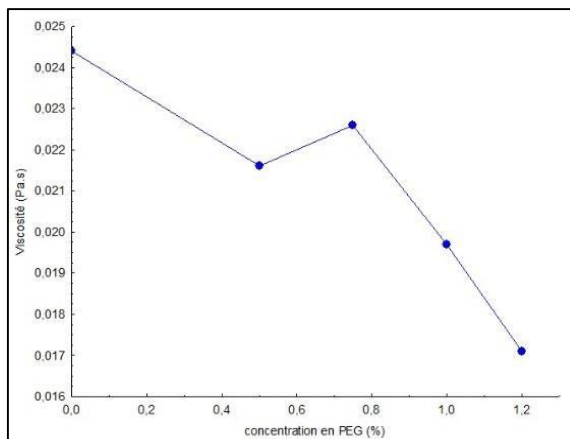


Figure VI.6.a : Evolution de la viscosité à cisaillement nul en fonction de la concentration.

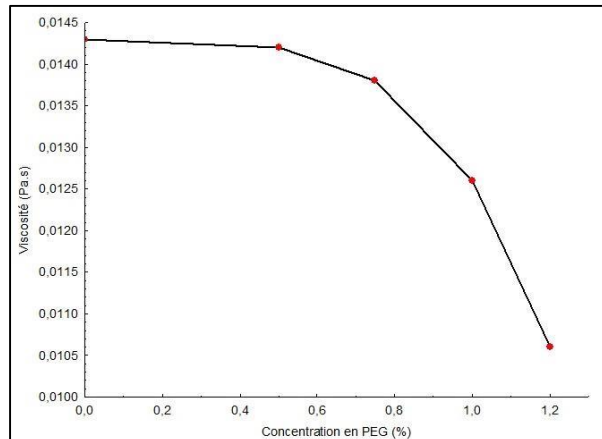


Figure VI.6.b : Evolution de la viscosité à cisaillement infini en fonction de la concentration.

IV.4.1.4 Modélisation des courbes d'écoulement

Par le biais d'un logiciel de traitement de données, nous avons pu déterminer les différents paramètres rhéologiques des deux modèles Herschel-Bulkley et de Carreau respectivement, ce logiciel utilise l'algorithme **Levenberg –Marquardt** pour la détermination des différents paramètres de régressions interpolées par ces deux modèles.

➤ Modèle Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (IV.9)$$

τ : contrainte de cisaillement ;

τ_c : contrainte seuil d'écoulement ;

K : indice de consistance ;

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement ;

n : indice d'écoulement .

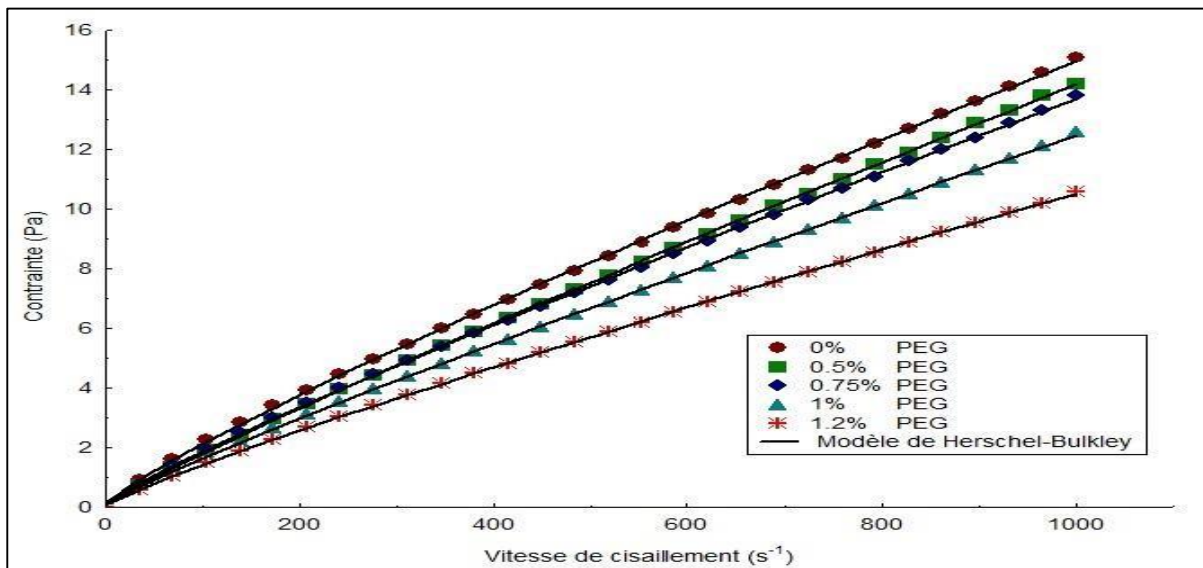


Figure IV.7: Modélisation des Courbes d'écoulement du mélange Bentonite-PEG par le modèle de Herschel-Bulkley (T=25°).

Tableau VI.4: Paramètres de régression du modèle Herschel-Bulkley.

PEG [%]	τ_c [Pa]	λ [S]	n -
0	0,162192	0,034802	0,876214
0,5	0,105663	0,024994	0,916813
0,75	0,126691	0,028739	0,891188
1	0,113194	0,023152	0,909043
1,2	0,008287	0,022754	0,887301

L'évolution des paramètres rhéologiques en fonction de la concentration du PEG ajouté, est illustrée par les figures IV.8.a, IV.8.b, IV.8.c.

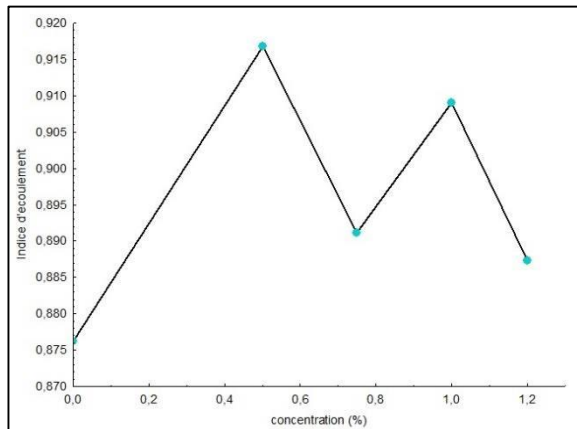


Figure IV.8.a: Indice d'écoulement

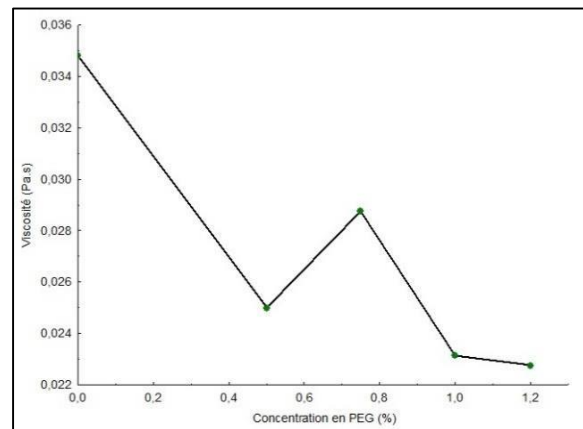


Figure IV.8.b: Indice de consistance.

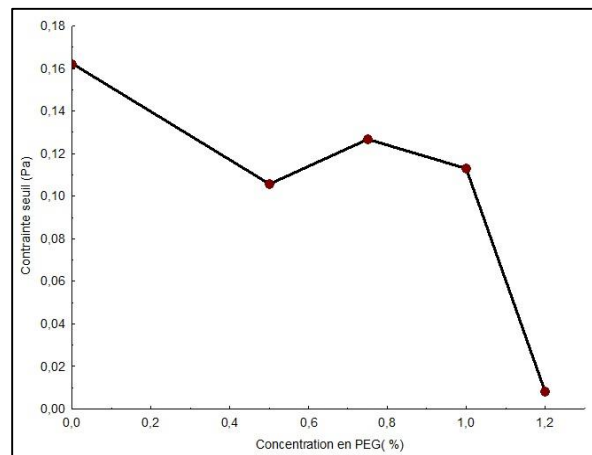


Figure IV.8.c: La contrainte seuil.

Par ailleurs, pour une même courbe d'écoulement, plusieurs modèles rhéologiques peuvent être donnés selon le choix du domaine de variation de la contrainte et du taux de cisaillement. Ceci dit, et d'après l'analyse de l'évolution de la contrainte seuil d'écoulement représenté au-dessus, nous pouvons dire que pour le cas des modèles classiques, le modèle de Hershel- Bulkley prédit assez bien le comportement rhéologique des suspensions de base et du complexe (eau+bentonite+PEG). (Valeurs de contraintes seuil obtenues à partir des rhéogrammes sont voisines à celles du modèle).

Pour une meilleure approche microscopique, nous avons tenté de modéliser le comportement rhéologique de nos complexes, par un modèle structural qui est celui de Carreau.

➤ **Modèle de Carreau**

$$\tau = \left[\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}} \right] \dot{\gamma} \dots\dots\dots (IV.10)$$

τ : contrainte de cisaillement ;

η_0 : viscosité à cisaillement nul ;

η_{∞} : viscosité à cisaillement infini ;

λ : temps caractéristique ;

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement ;

n : indice de puissance.

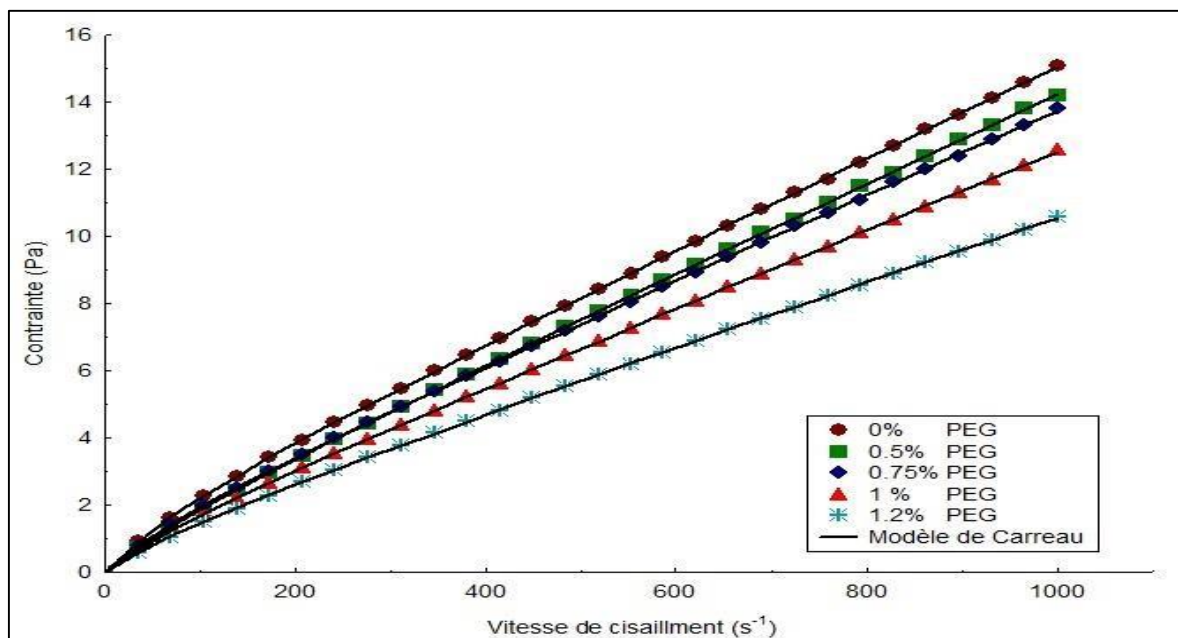


Figure IV.9: Modélisation des courbes d'écoulement des mélanges Bentonite-PEG par le modèle de Carreau (T=25°C).

Tableau IV.5: Paramètres de régression du modèle de Carreau.

PEG [%]	η_{∞} [Pa .s]	η_0 [Pa .s]	λ [s]	n -
0	0,012850	0,027143	0,015642	0,319069
0,5	0,012538	0,022323	0,019942	0,412151
0,75	0,012079	0,022696	0,013633	0,292460
1	0,011279	0,019754	0,014146	0,275502
1,2	0,008287	0,018057	0,023748	0,538374

Les **Figures IV.10.a, IV.10.b, IV.10.c, IV.10.d**: Illustrent l'évolution des paramètres du modèle rhéologiques de Carreau fonction de la concentration massique en PEG.

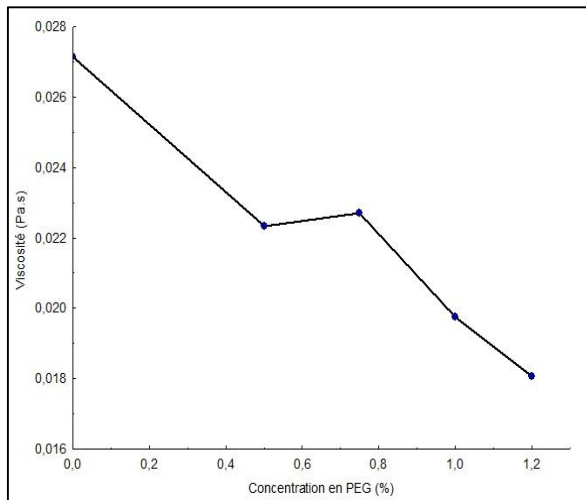


Figure VI.10.a: Viscosité nul.

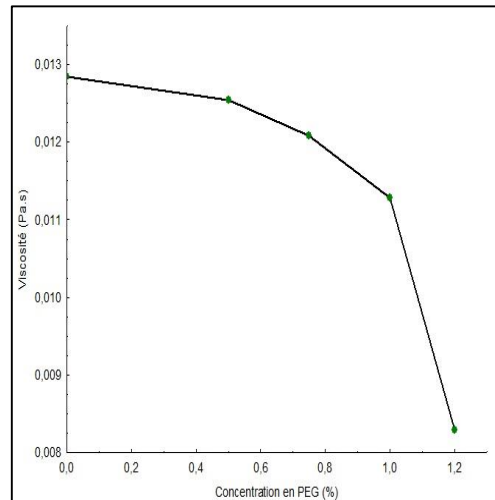


Figure VI.10.b: Viscosité infini.

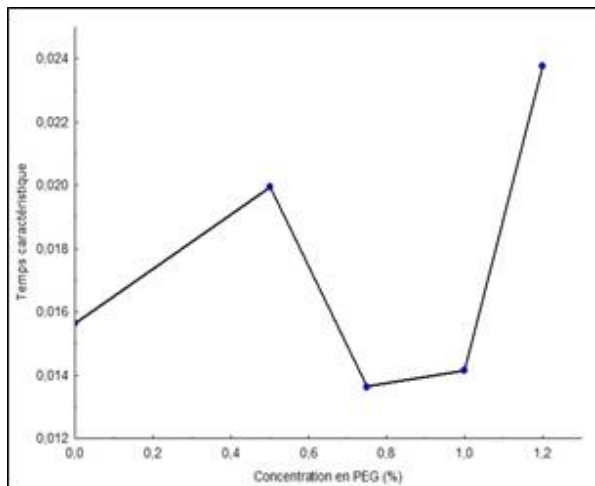


Figure VI.10.c: Temps caractéristique.

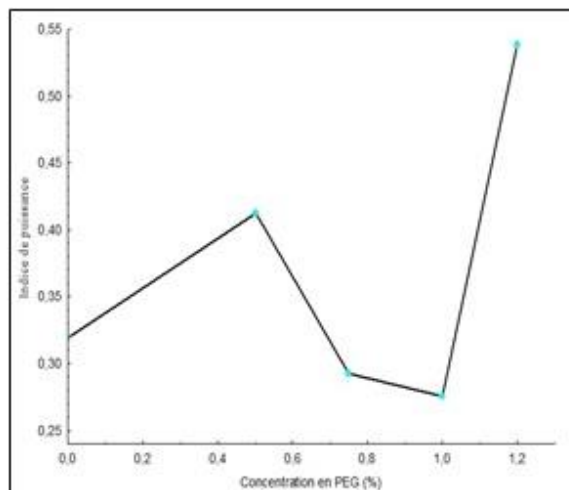


Figure VI.10.d: Indice de puissance.

La puissance de ce modèle réside dans le fait qu'il représente les conditions suivantes :

- Il ajuste les points expérimentaux sur une large gamme de gradient de cisaillement. Il inclue un minimum de constantes indépendantes.
- D'après la modélisation des courbes d'écoulement, la viscosité de cisaillement (à cisaillement nul et à cisaillement infini) décroît avec l'ajout du PEG.

Conclusion

1) D'après les courbes d'écoulement présentées au-dessus, On observe que l'ajout du PEG 10000, même à faible concentration change considérablement le comportement rhéologique de la suspension de base, entraînant une diminution de la viscosité de cisaillement, ce qui atteste de caractère rhéofluidifiant.

2) En outre, on note l'existence d'une contrainte seuil de tous nos mélange (bentonite+PEG) qui décroît au fur et à mesure de l'ajout du PEG, ce qui montre que la nature structurale de la suspension de base est modifiée après l'ajout du PEG 10 000.

3) On interprète généralement ces résultats, par le fait que les propriétés rhéologiques de nos complexe argilo-polymères sont significativement affectées par les interactions polymère-particule réduisant ainsi les interactions particule-particule, l'augmentation de la vitesse de cisaillement modifie l'ordre des molécules dans le milieu. Ce qui confère à la solution une grande viscosité au repos (ou aux faibles vitesses de cisaillement).

Lorsque la chaîne moléculaire n'est pas suffisamment longue, il se crée un effet stérique (Isci et al., 2004 ;Tunc et Duman, 2008 ; Zaman, 2000 ; Zaman et Delorme, 2002). Cela explique la diminution des paramètres rhéologiques observée après l'ajout du PEG.

4) Dans un système (eau+bentonite+polymère), les chaînes polymérique sont adsorbées sur les particules argileuses par des interactions de types : Van Der Waals, électrostatique, hydrophobes ou des liaisons hydrogène, cela conduit à un état stérique stable (Breen 1999), dans le cas des macromolécules neutre comme le PEG, la fixation à la surface argileuses serait majoritairement dû aux liaisons Hydrogènes, d'autres liaisons de type Van Der Waals sont aussi envisageables (Luckam et Rossi 1999).

IV.4.2 Etude en régime dynamique

Pour mieux comprendre la structure interne de nos complexe (bentonite+PEG), des mesures rhéologique ont été effectuées (en régime dynamique), il s'agit de mesurer : i) le module élastique (G') (qui est proportionnel à l'énergie élastique emmagasinée et restituée au cours d'une période) et ii) le module visqueux (G'') (l'énergie dissipée par frottement visqueux au cours du même cycle). Ces grandeurs rhéologiques (G' et G'') dépendent de la nature du matériau et de la température mais également de la fréquence (ω) à laquelle le matériau est sollicité au cours des essais dynamiques.

Pour nos mélanges (bentonite+PEG), nous avons effectué des mesures sur une gamme de fréquences et de contrainte appartenant aux limites du domaine de viscoélasticité linéaire.

IV.4.2.1 Balayage en contrainte

Le balayage en contrainte des suspensions a été effectué en imposant une contrainte à rampe montante [0.01 à 15 Pa], sous une fréquence de 10 rad/s qui est une valeur standard des particules suspendues. La figure suivante illustre les résultats du balayage effectué sur des suspensions à différentes concentration de PEG (0%, 0.5 %, 0.75%, 1%, 1.2%).

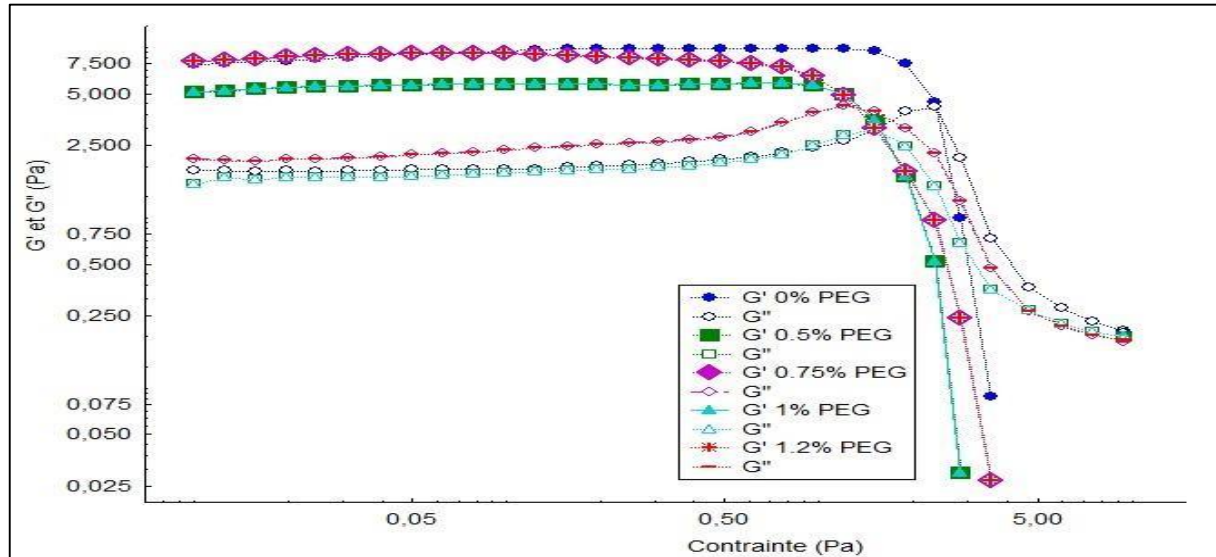


Figure IV.11: Evolution des modules G' et G'' en fonction de la contrainte ($w=10$ rad/s).

La partie élastique domine la partie visqueuse, indiquant une certaine stabilité aux basses contraintes.

IV.2.2.2 Balayage en fréquence

En se basant sur les résultats obtenus du test de balayage à contrainte, des essais de balayages en fréquence ont été réalisés sur l'ensemble de nos échantillons dans le domaine de la viscoélasticité linéaire (LVE), La contrainte a été fixé à 0.1Pa, les fréquences ont une rampe descendante de 100 à 0.01 rad/s

Les résultats sont représentés sur la figure suivante :

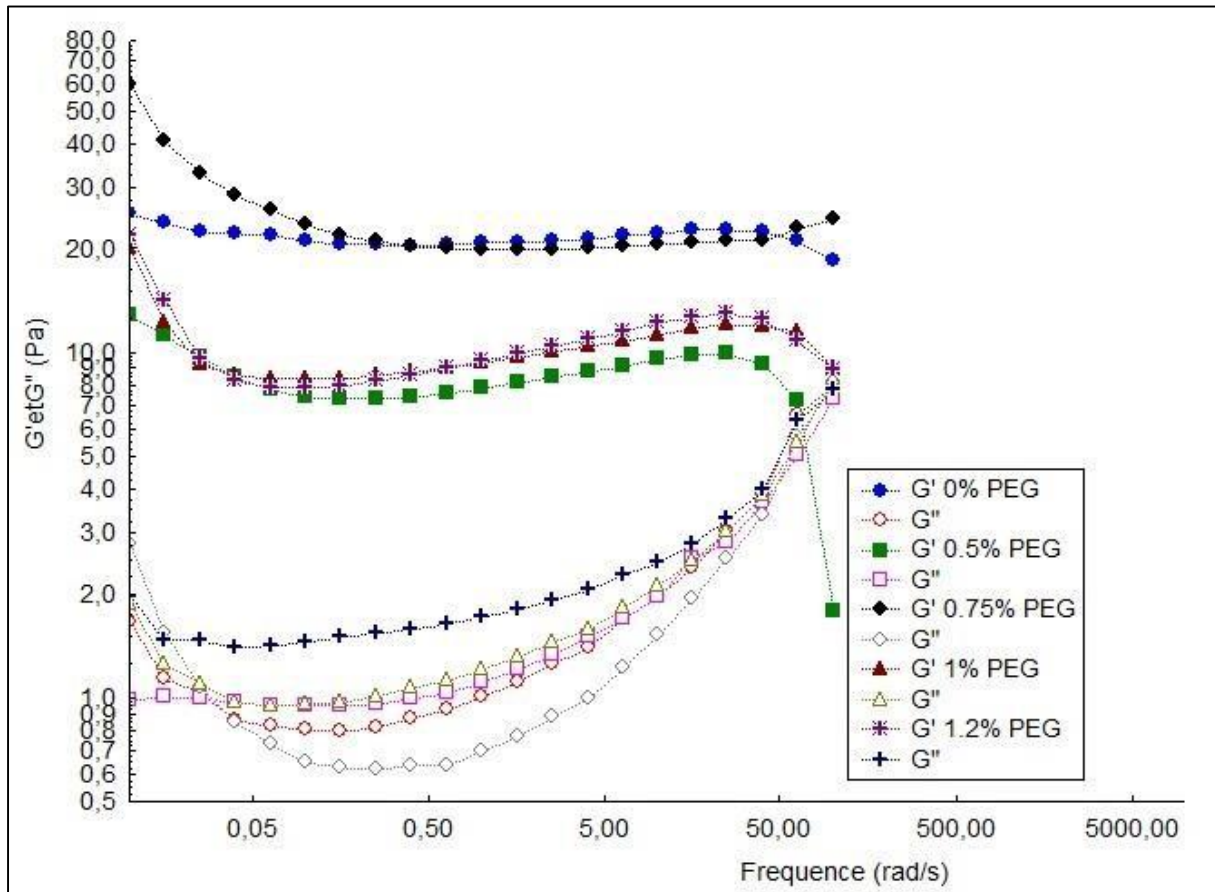


Figure IV.12: Evolution des modules G' et G'' en fonction de la fréquence ($\tau = 0.1$ Pa).

Tous les échantillons présentent une plage de viscoélasticité linéaire (LVE), dans laquelle, le module G' est toujours supérieur au module G'' , et ceci pour toutes les concentrations étudiées, ce qui met en évidence le comportement gel de nos suspensions.

D'après les courbes ; les valeurs de G' sont nettement supérieures à celle de G'' , tout au long de la gamme de fréquence, pour toutes les concentrations, cela signifie que la réponse élastique domine la réponse visqueuse.

On remarque aussi que le module de stockage G' montre une augmentation dans la gamme des basses fréquences, ce qu'on peut expliquer par une structuration aux basses fréquences.

IV.2.2.3 Suivi cinétique

La compréhension des mécanismes de structuration des particules et des agrégats est un point clé pour le contrôle des propriétés rhéologiques des suspensions dans le temps, pour étudier ces mécanismes de « structuration », nous avons entrepris de mesurer la variation des modules viscoélastiques G' et G'' en fonction du temps. La figure suivante illustre les résultats obtenus :

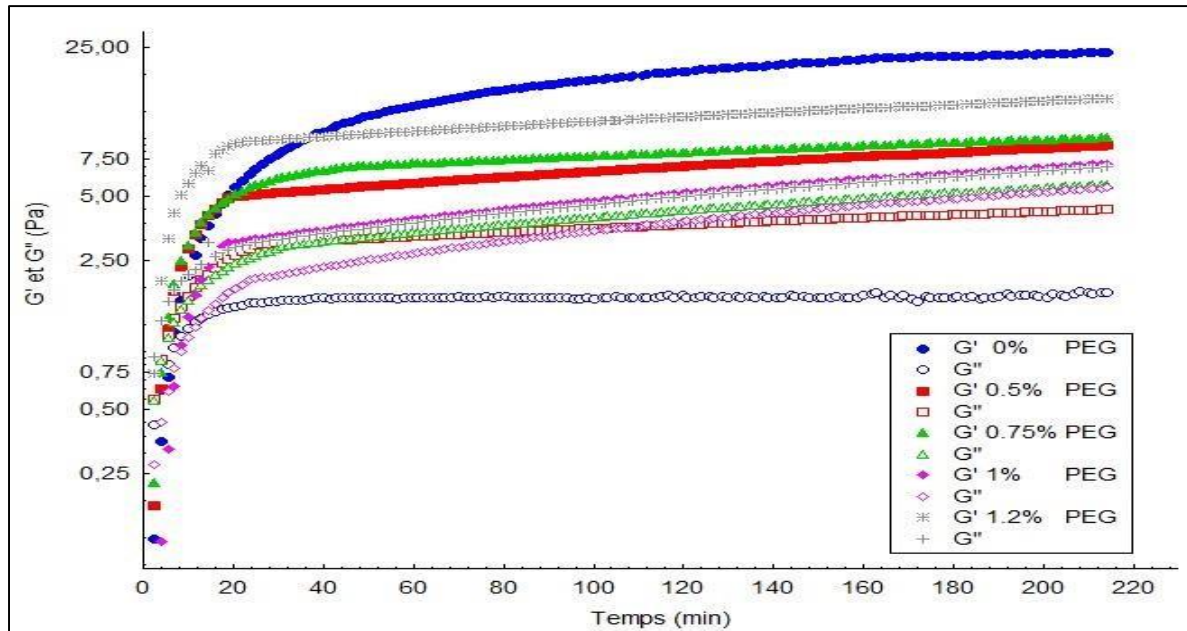


Figure IV.13: Evolution des modules G' et G'' en fonction de temps ($\tau = 0.1 \text{ Pa}$, $w = 10 \text{ rad/s}$).

Les courbes montrent que toutes nos suspensions ont un comportement d'un solide viscoélastique ($G' > G''$), Tout en enregistrant un point de croisement qui est le temps gel.

➤ Temps de gel

Afin d'étudier l'influence de la concentration en PEG sur les cinétiques de gélification de nos suspensions de mélange, nous avons identifié le temps de gélification au temps où $G' = G''$. (Tung et al 1982)

Ainsi les temps de gel de nos suspensions, augmente significativement au fur et à mesure de l'ajout du PEG, de ce fait on peut dire que le PEG-10000 ralentit la cinétique d'agrégation du système (Gareche et al (2011b et 2012b),

Tableau IV.6: Temps de gélification des mélanges bentonite+PEG.

Echantillon		Temps de gel (mn)
6% Bentonite +	0% PEG	6
	0.5% PEG	6.9
	0.75% PEG	6.8
	1% PEG	11
	1.2% PEG	12

Conclusion

Dans cette partie, nous avons montré l'influence du polyéthylène oxyde (PEO) de poids moléculaire 10 000g/mol sur les propriétés rhéologiques d'une suspension de bentonite de base (6%) qui est dû au processus d'enchevêtrement et de désenchevêtrement des chaînes moléculaires. Les résultats obtenus, soit en écoulement ou en régime dynamique permettent de conclure que le PEG présente une affinité pour les particules de bentonite et réduit de façon générale les propriétés rhéologiques de ces suspensions tels que la contrainte seuil d'écoulement et les modules viscoélastiques. Le PEO 10 000 ralentit la cinétique de structuration du système (formation de gel) en se diffusant dans l'espace interfoliaire, favorisant ainsi le glissement entre les différentes chaînes moléculaires lors du cisaillement, ce qui atteste du caractère rhéofluidifiant de notre polymère.

Dans beaucoup de cas, la simulation numérique des écoulements fournit le seul moyen pour accéder aux informations détaillées d'un champ étudié, la simulation numérique des écoulements a fourni une impulsion importante pour résoudre les équations d'Euler et de Navier-Stokes régissant écoulements externes et internes. Le progrès principal a été ultérieurement accompli dans le développement des techniques numériques, de la génération de maillage, de la modélisation, de l'application des conditions aux limites, pré et post-traitement des données. La plupart des techniques utilisées pour la résolution des équations de Navier-Stokes peuvent être classées en différences finies, surfaces ou volumes finis.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une simulation d'écoulement de nos suspensions ternaires (eau+ bentonite+PEG 10000) à concentration variables, (0%, 0.5%, 0.75%, 1% et 1.2%), afin d'étudier et de mettre en évidence l'influence des paramètres rhéologique sur la dynamique de l'écoulement, tout cela étant effectué par le biais d'un code de calcul numérique.

En premier lieu, nous allons rappeler les équations fondamentales qui gouvernent les écoulements de fluides, puis nous décriront notre géométrie et son maillage ainsi que la procédure de calcul pour l'injection de nos données (inputs), et enfin nous allons exposer les résultats obtenus et leur interprétation.

V.1 Théorie fondamentale des écoulements

Le traitement des problèmes physiques d'écoulement, nécessite l'utilisation d'équations de mouvement déduites des principes classiques de conservation de masse et de quantité de mouvement, bien qu'elles soient traitées d'une façon détaillée dans de nombreux ouvrages de base de la mécanique des fluides, nous rappelons brièvement leurs forme générales tout en insistant sur la signification des différents termes et sur les mécanismes physiques auxquels ils correspondent :

➤ Equation de conservation de la masse (équation de continuité)

De point de vue Lagrangien, le fluide est conservatif, sa masse reste constante.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0 \dots\dots\dots (V.1)$$

ρ : masse volumique (Kg.m⁻³)

v_i : vitesse (m.s⁻¹)

➤ Equation de conservation de quantité de mouvement (Navier-Stokes)

La loi de conservation de quantité de mouvement traduite par les équations de Navier

Stokes exprime tout simplement la loi fondamentale de la dynamique appliquée à un fluide Newtonien.

Les équations de quantité de mouvement écrites suivants x_i ($i=1, 2,3$) sont :

$$\rho \frac{dv_i}{dx_i} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \dots\dots\dots (V.2)$$

➤ **Equation de conservation de l'énergie**

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \dots \dots \dots (V.3)$$

V.2 Formulation du problème

Dans la figure ci-dessous, on montre la géométrie du système étudié, à savoir un une conduite cylindrique horizontal de longueur L=1m et de diamètre D=0.1m.

Le fluide s'écoulant à l'intérieur est Non-newtonien (eau+bentonite+PEG 10000), de type rhéofluidifiant. L'écoulement est supposé être stationnaire, laminaire et le fluide est incompressible, obéissant au modèle de viscosité de Carreau :

$$\eta = \left[\eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}} \right] \dots \dots \dots (V.4)$$

τ : contrainte de cisaillement ; η_0 : viscosité à cisaillement nul ; η_{∞} : viscosité à cisaillement infini

λ : Temps caractéristique ; $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement ; n : indice de puissance .

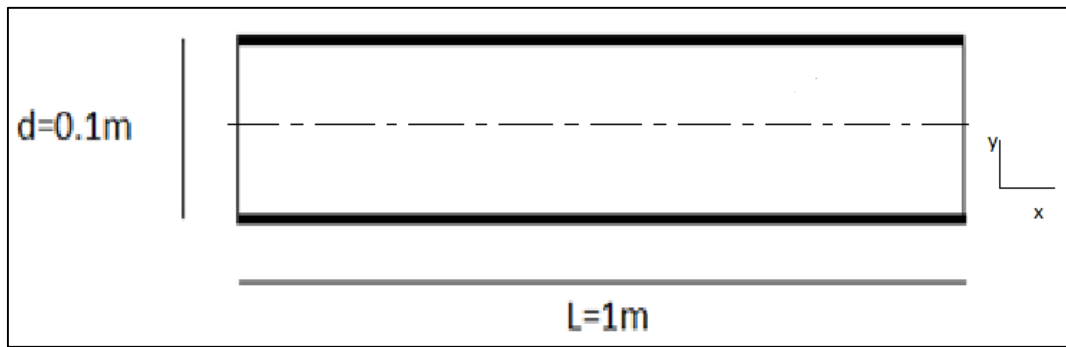


Figure V.1: Géométrie de la conduite cylindrique.

Les équations gouvernant ce type d'écoulement sont présentées ci-dessous :
Conservation de la masse :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (V.5)$$

Conservation de quantité de mouvement (Navier-stokes) :

- Suivant r

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv^2) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (wv) + \frac{\partial}{\partial z} (vu) - \frac{w^2}{r} \right] = \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \dots \dots \dots (V.6) \end{aligned}$$

- Suivant θ

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvw) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (w^2) + \frac{\partial}{\partial z} (uw) - \frac{vw}{r} \right] = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{w}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] \dots \dots \dots (V.7) \end{aligned}$$

- Suivant z

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rvu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (wu) + \frac{\partial}{\partial z} (u^2) \right] = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \dots \dots \dots (V.8) \end{aligned}$$

➤ **Hypothèses simplificatrices**

- Ecoulement permanent $\frac{\partial v_i}{\partial t} = 0$;
- Ecoulement unidimensionnelle $w = 0, v = 0$;
- Force de pesanteur négligeable $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$;
- Fluide incompressible $\rho = \text{const}$;

➤ **L'équation simplifiée s'écrit :**

$$\frac{\eta}{\rho} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] = 0 \dots \dots \dots (V.9)$$

V.3 Résolution du problème

De ce fait, on a utilisé un code de calcul numérique pour la résolution du système ,ce code de calcul utilise **la méthode des volumes finis** et la procédure de calcul est résumée dans l'organigramme suivant :

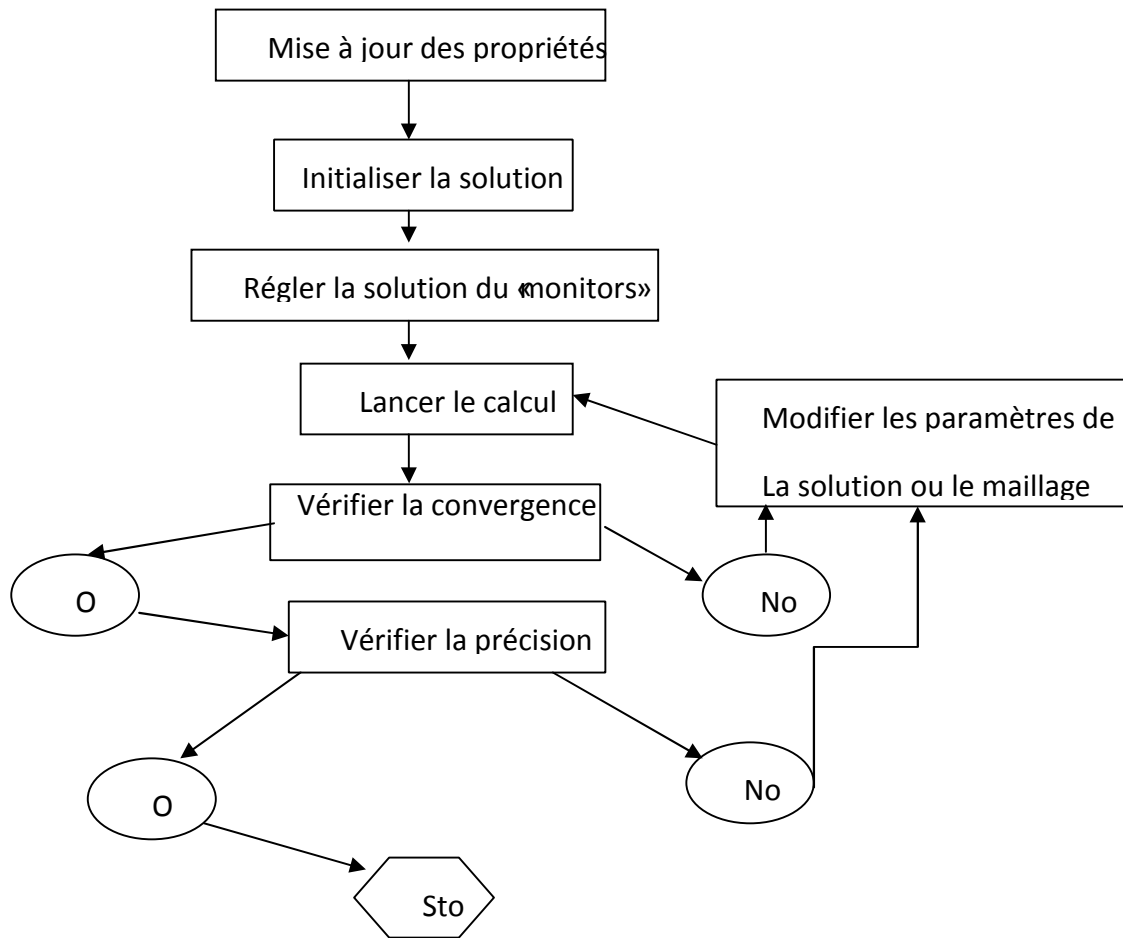


Figure V.2: Organigramme de calcul numérique.

V.3.1 Démarche de calcul

Afin de comparer les différents profils de vitesse et de pression ainsi que les différentes paramètres d'écoulement (coefficients de frottement et contraintes à la paroi), nous avons imposé un nombre de Reynolds variable (25 ; 50 ; 100 ; 200) pour nos fluides à concentrations variable.

La formule générale du nombre de Reynolds pour une conduite cylindrique est comme

suit :

$$R_e = \frac{UD\rho}{\eta} \dots\dots\dots (V.10)$$

Or dans notre cas d'étude la viscosité est fonction de taux de cisaillement, on distingue deux viscosité : une viscosité à cisaillement nul et une autre à cisaillement infini. Pour notre cas nous avons choisi (η_{∞}) car c'est elle qui nous intéresse lors du calcul des profils de vitesse et pressions à la sortie (le fluide étant soumis à de forts gradients de cisaillement):

$$R_e = \frac{UD\rho}{\eta_{\infty}} \dots\dots\dots (V.11)$$

V.3.2 Validation de maillage

Afin de valider notre maillage dans lequel nous avons utilisé des éléments quadrilatères à quatre nœuds, nous avons procédé à l'étude d'un écoulement stationnaire en régime laminaire d'un fluide Newtonien, à travers une conduite cylindrique droite.

Pour se faire, nous avons comparé nos résultats obtenus par le code de calcul, avec ceux issus de la solution analytique du problème, cette comparaison porte sur le calcul du coefficient de perte (λ). Ce coefficient pour un écoulement laminaire d'un écoulement laminaire est calculé comme suit :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \dots\dots\dots (V.12)$$

Pour notre cas, le calcul de ce coefficient est comme suit :

$$\lambda = 4C_f \dots\dots\dots (V.13)$$

avec :

$$C_f = \frac{2\tau}{\rho U^2} \dots\dots\dots (V.14)$$

τ_w : est la contrainte à la paroi, obtenue par le code de calcul.

C_f : est le coefficient de frottement.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.1: Test de convergence de maillage.

Maillage	Nombre de Mesh	Coefficient de perte λ	Erreur (%)
1	200-10 Non raffiné	0.6324	1.18
2	200-15 Raffiné	0.6345	0.8
3	200-20 Non raffiné	0.6332	1.06
4	210-20 Raffiné	0.6382	0.16
5	250-20 Raffiné	0.6382	0.16

- Notre choix a porté sur le quatrième maillage (210*20) raffiné pour la faible erreur qu'il présente.

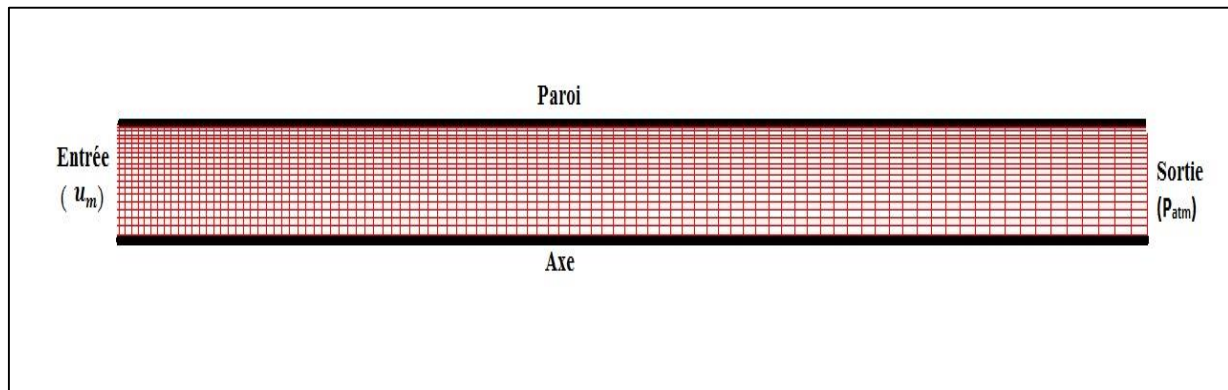


Figure V.3: Maillage de la conduite cylindrique (210*20) raffiné à l'entrée et à la paroi.

➤ **Rappel de la rhéologie des fluides utilisés**

Le tableau suivant récapitule les résultats concernant les paramètres rhéologiques de nos mélanges Benitonite-PEG à différentes concentrations de PEG, et interpolés par la loi de carreau, et qui met en évidence le caractère rhéofluidifiant.

Tableau V.2: Paramètres rhéologiques des mélanges (eau+bentonite+PEG 10000).

PEG [%]	η_{∞} [Pa .s]	η_0 [Pa .s]	λ [s]	n -
0	0,012850	0,027143	0,015642	0,319069
0,5	0,012538	0,022323	0,019942	0,412151
0,75	0,012079	0,022696	0,013633	0,292460
1	0,011279	0,019754	0,014146	0,275502
1,2	0,008287	0,018057	0,023748	0,538374

V.3.3 Résultats et discussions

➤ Influence du caractère rhéofluidifiant et de Reynolds sur le profil de vitesse axiale

L'évolution de la vitesse axiale à la sortie lors d'un écoulement plan et axisymétrique d'un fluide de Carreau pour différentes valeurs de Reynolds, est illustré sur la figure suivante :

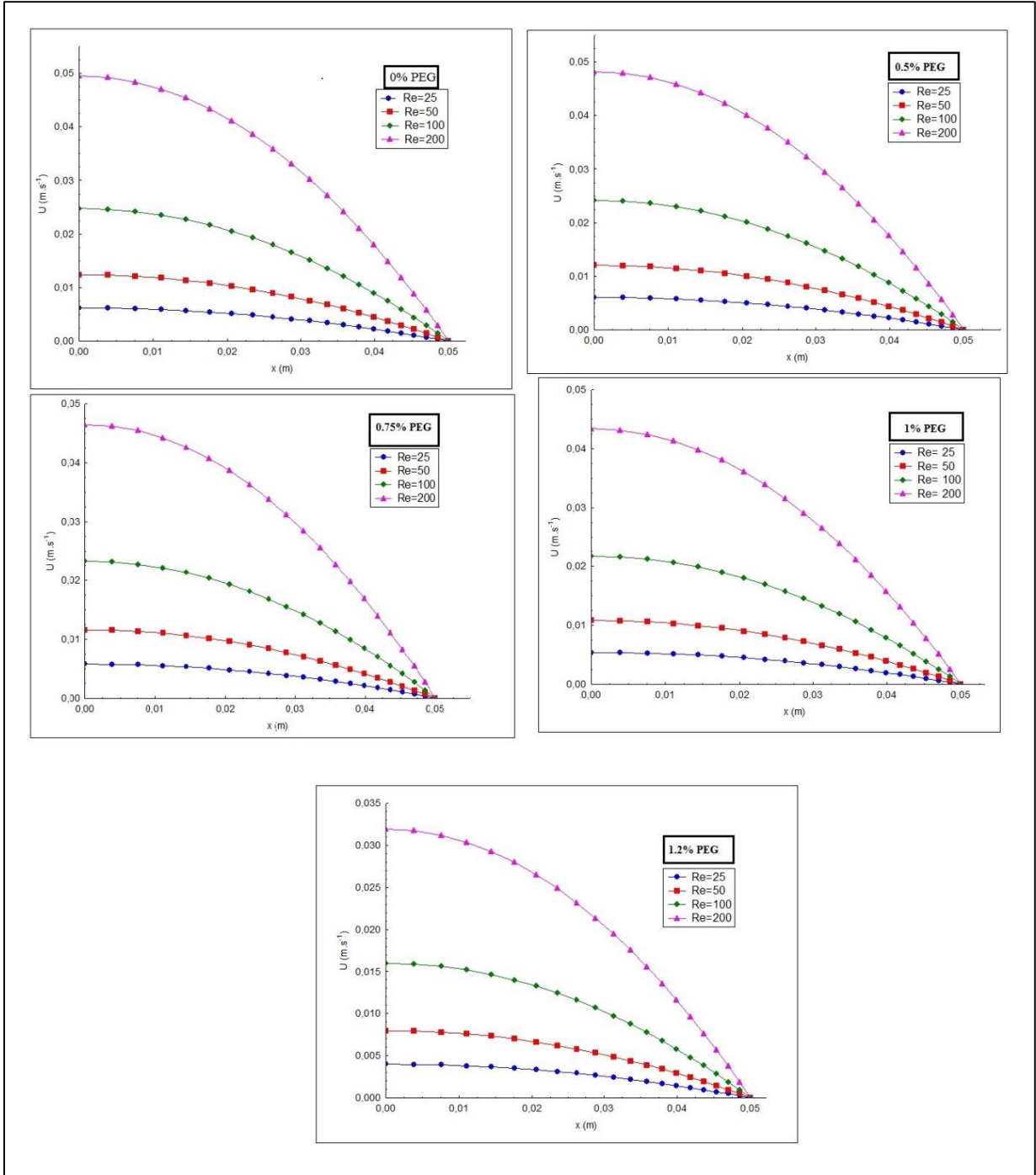


Figure V.4: Evolution des profils de vitesse axiale pour différentes valeurs de Reynolds à différentes concentrations de PEG [0%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.2%].

On remarque que, les profils de vitesse des différentes concentrations, s'aplatie au fur et à mesure que le Reynolds diminue.

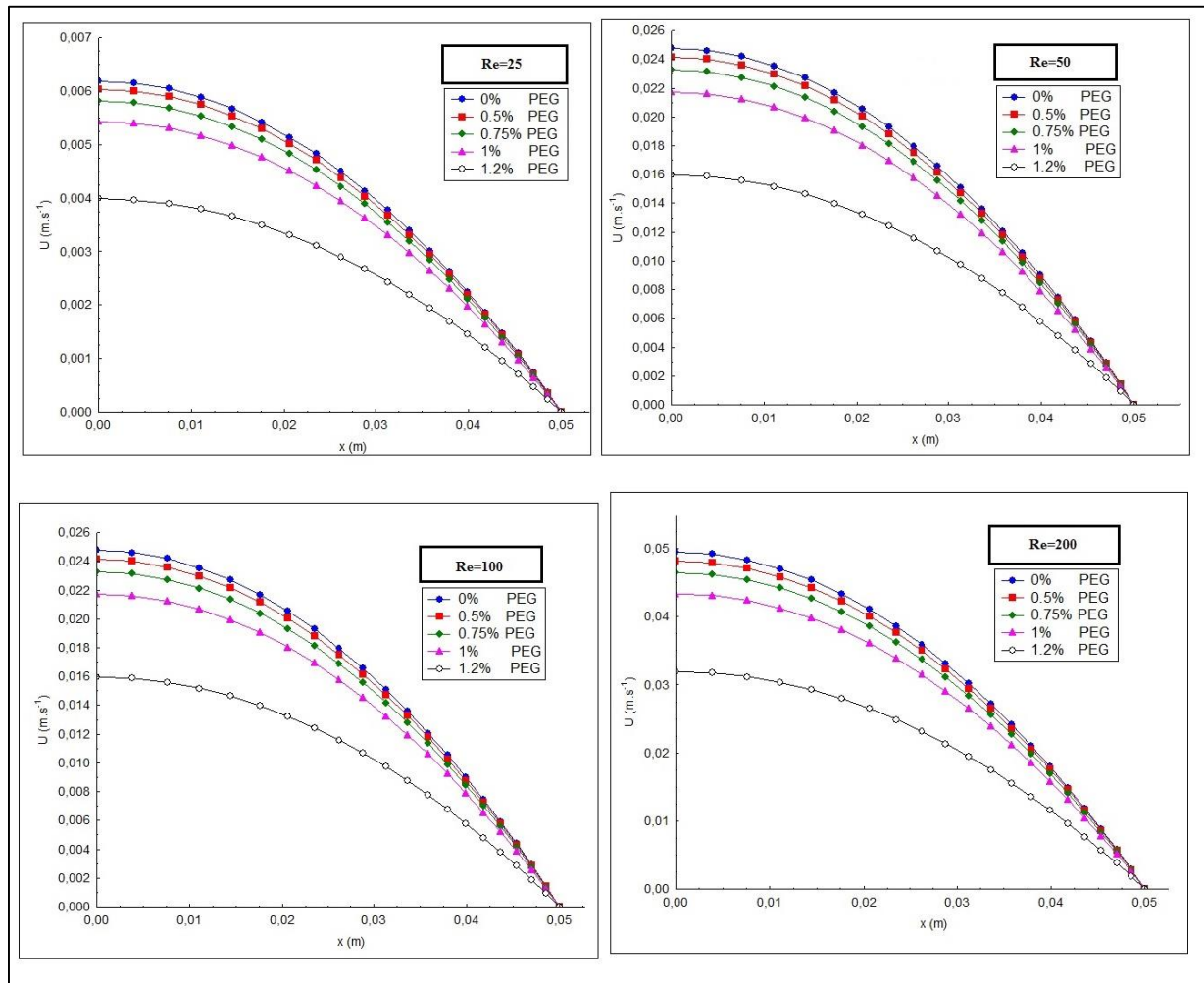


Figure V.4: Evolution des profils de vitesse axiale pour différentes concentration à Reynolds [25, 50, 100, 200]

Les Figures (V.3 ; V.4), rassemblent les profils de vitesse axiale obtenu numériquement, de tous les fluides utilisés à des nombres de Reynolds comparables (25, 50, 100, 200), et permet ainsi de mettre en évidence l'effet de la rhéofluidification sur l'allure du profil de vitesse.

Nous observons la déformation progressive des profils de vitesse non-newtonienne, en comparaison du profil de vitesse pour la suspension de base (eau+ bentonite), avec l'augmentation de la concentration du PEG, cela se manifeste par un aplatissement des profils et une diminution de la vitesse axiale au centre de la conduite.

➤ Vitesse moyenne à la sortie

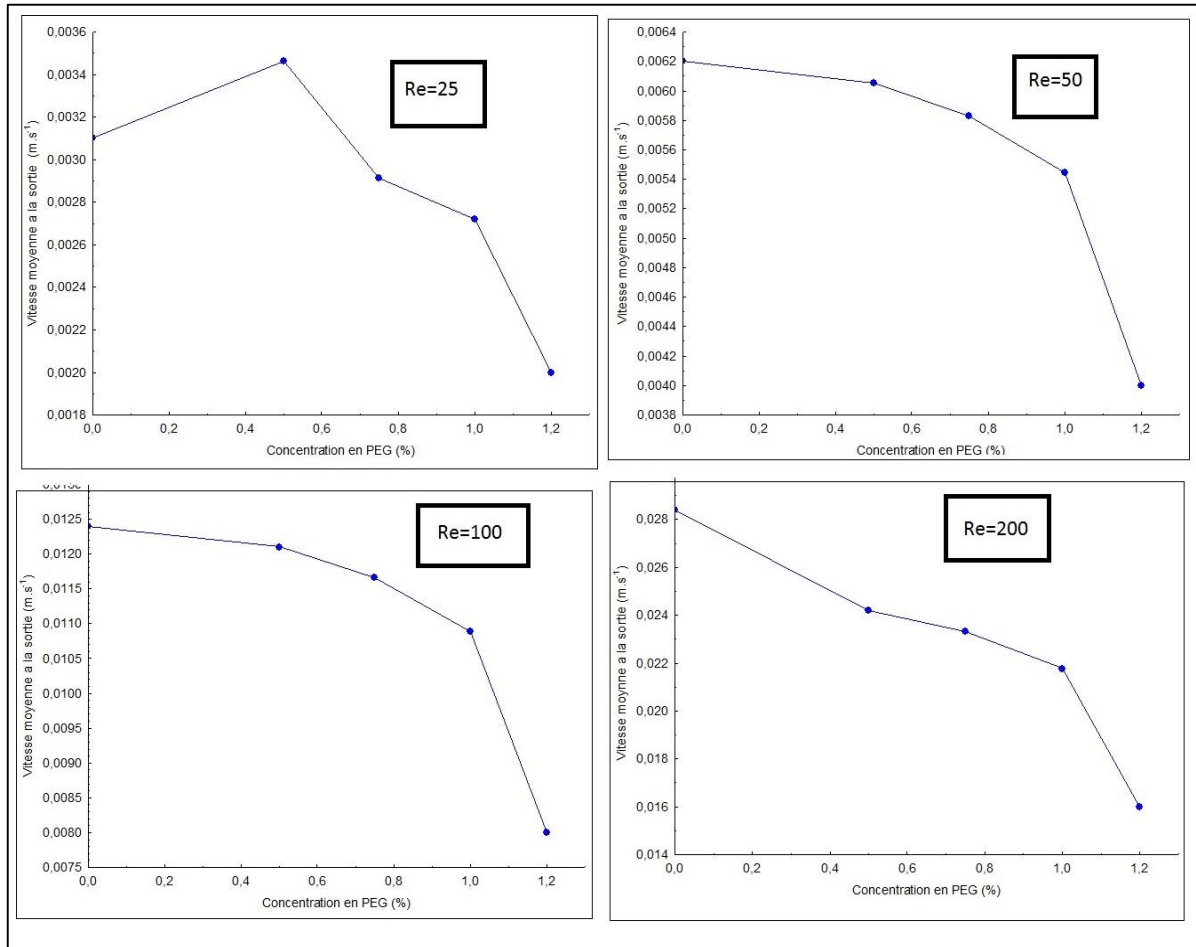


Figure V.5: Evolution de la vitesse moyenne à la sortie pour différentes concentration à Reynolds [25, 50, 100, 200].

➤ **Influence caractère rheofluidifiant de Reynolds sur les profils de Pression**

Nous avons suivi l'évolution du profil de pression de nos suspensions pour des Reynolds variables, les résultats sont présentés sur la figure suivante :

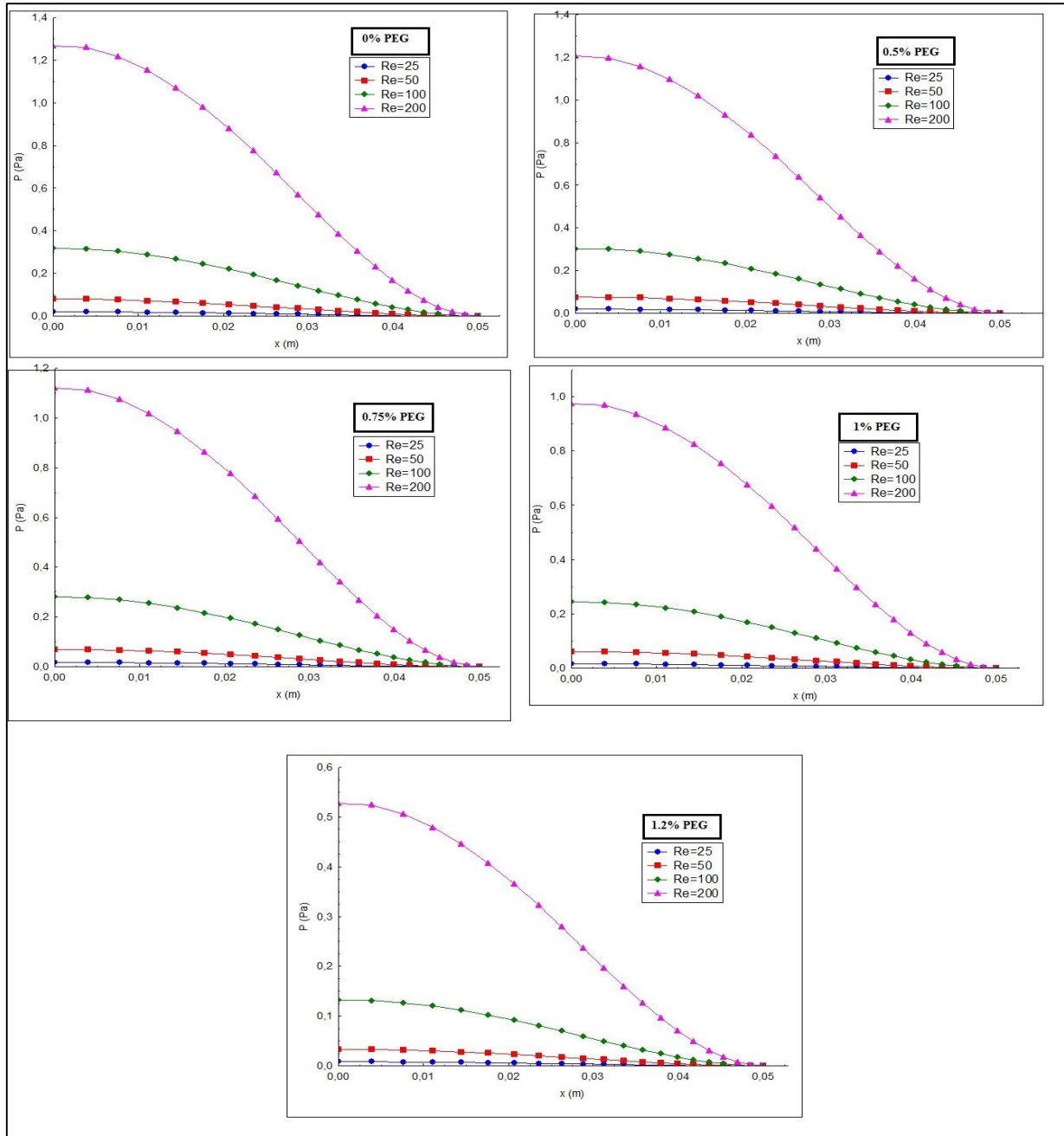


Figure V.6: Evolution des profils de pression pour différentes valeurs de Reynolds à concentration [0%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.2%].

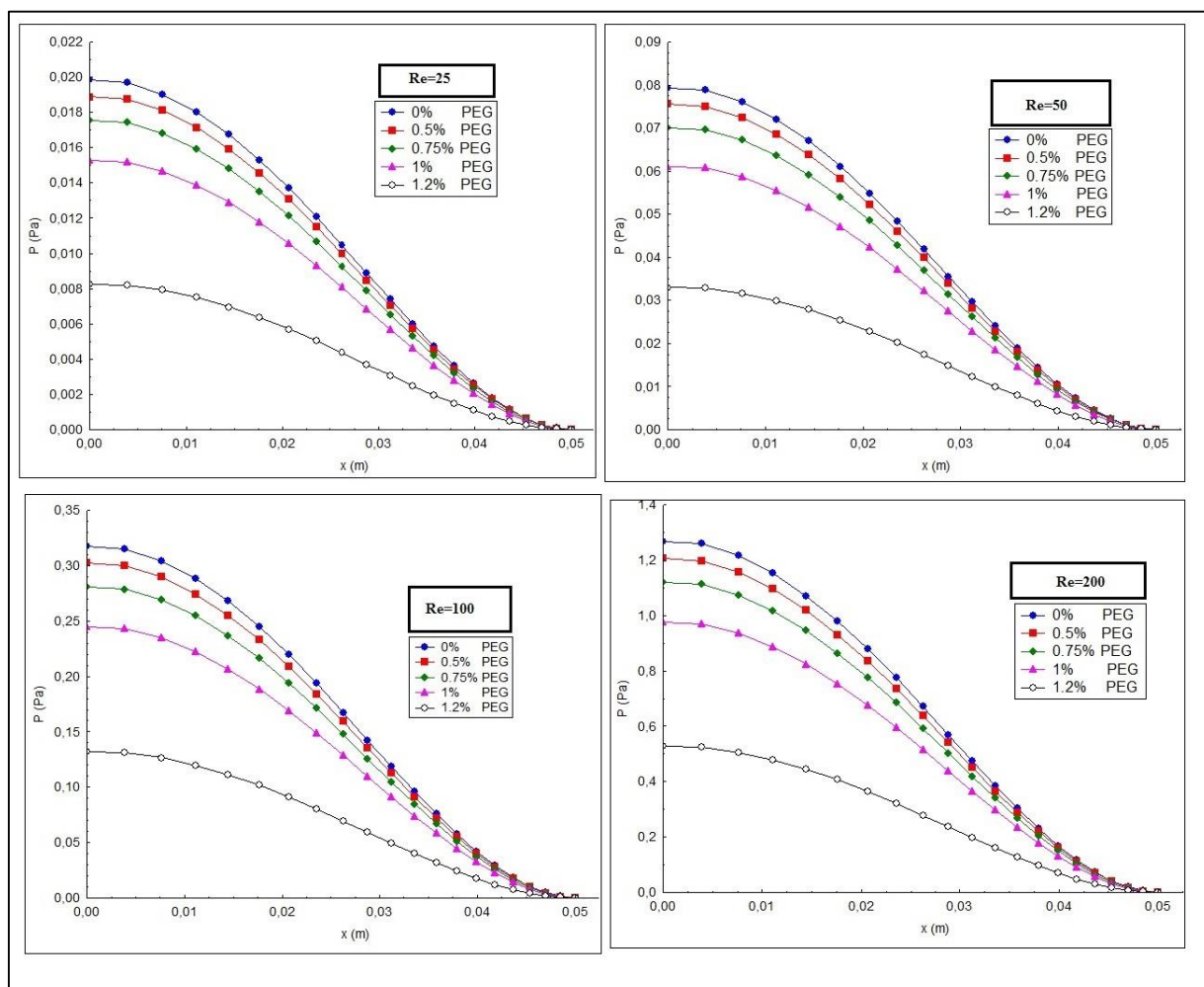


Figure V.7: Evolution des profils de pression à la sortie pour différentes concentrations à Reynolds [25, 50, 100, 200].

➤ **La contrainte à la paroi**

La variation de la contrainte à la paroi en fonction de la concentration en PEG ajouté, à des Reynolds variables est représenté sur la figure suivante :

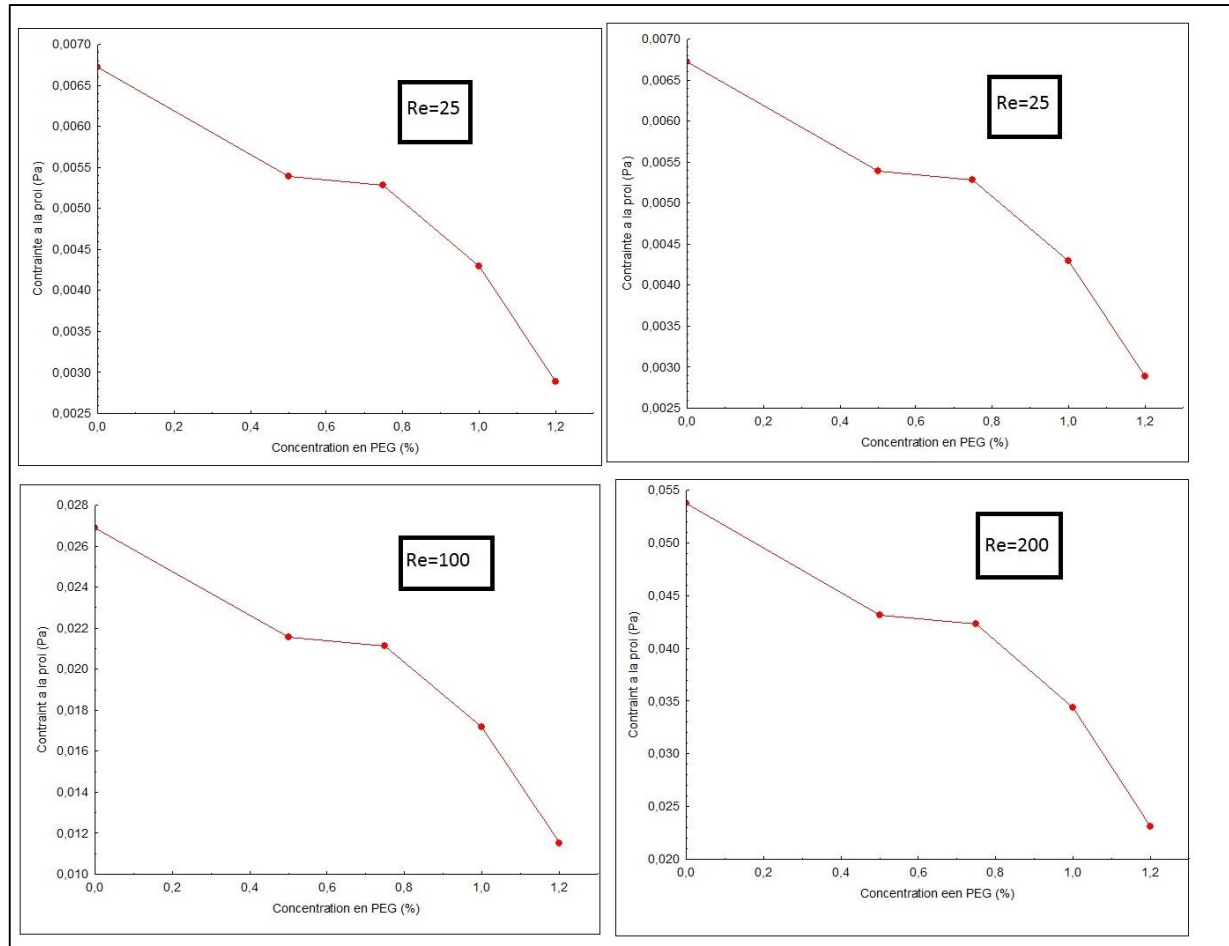


Figure V.8 : Evolution de la contrainte à la paroi de perte en fonction de la concentration en PEG à Reynolds [25, 50, 100, 200].

➤ **Coefficient de perte**

Nous représentons sur la figure suivante, la variation du coefficient de perte de charge, en fonction de la concentration en PEG à des Reynolds variables.

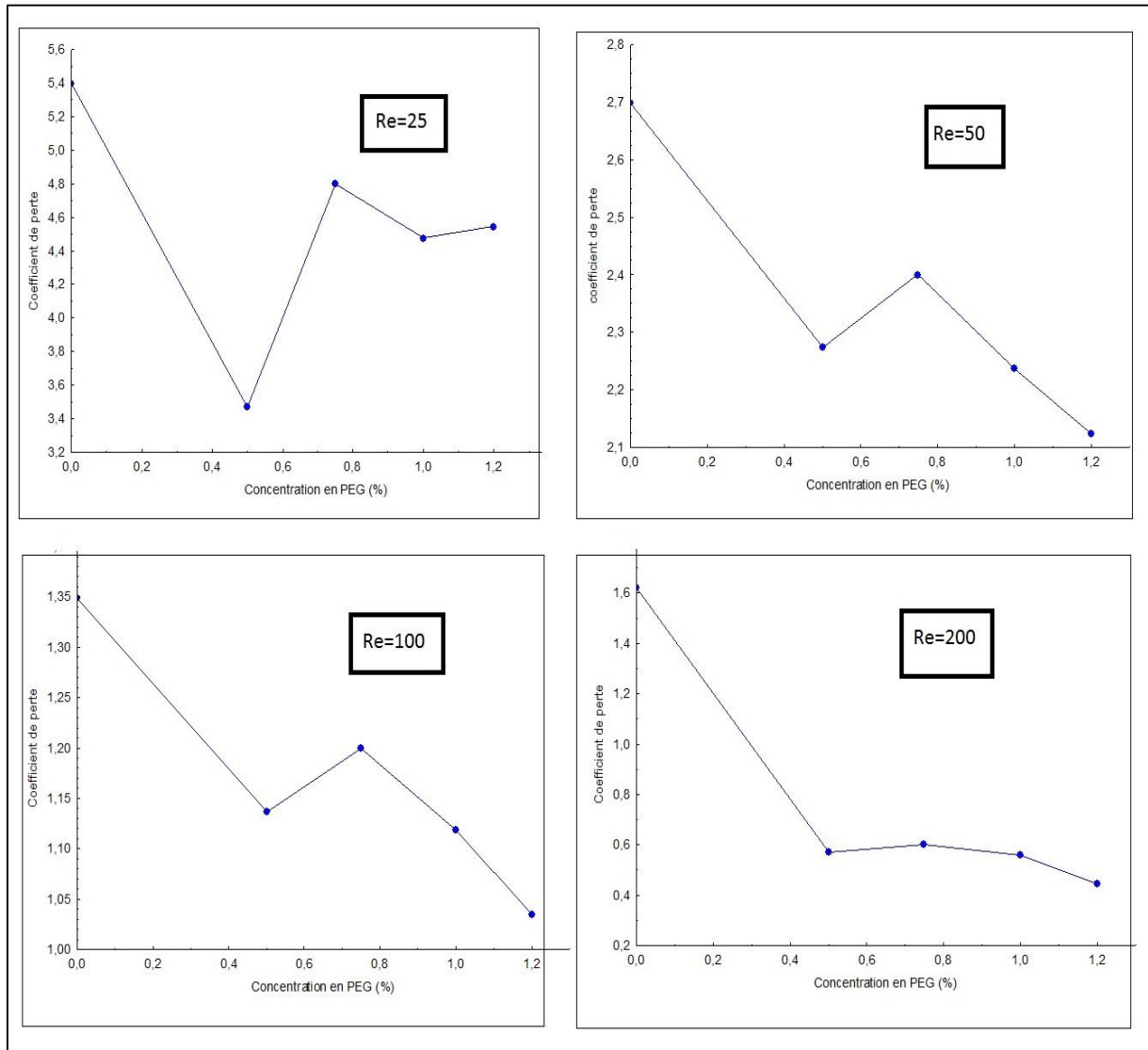


Figure V.9: Evolution de Coefficient de perte en fonction de la concentration en PEG à Reynolds [25, 50,100,200].

Conclusion

Le travail réalisé nous a permis de caractériser les propriétés rhéologique d'un complexe bentonite-PEG 10 000 g/mol, et d'étudier l'influence de ce dernier sur des suspensions bentonitiques de base, il en ressort que ce polymère affecte considérablement le comportement de ces suspensions en diminuant ces paramètre au fur et à mesure de l'ajout du polymère.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les propriétés rhéologiques de nos fluides modèles. Des mesures rhéologiques utilisant un rhéomètre à déformation imposé (MCR 301, Anton Paar) ont été réalisées, et nous ont permis d'observer que le PEG 10 000 g/mol dans les suspensions bentonitique présente : i) un caractère rhéofluidifiant qui augmente, et ii) une contrainte seuil qui diminue, avec la concentration. Ce modèle rhéofluidifiant à seuil est bien décrit par le modèle structurale de Carreau, qui malgré sa difficulté de mise en œuvre, il a l'avantage : i) d'ajuster les points expérimentaux sur une large gamme de taux de cisaillement et ii) de relier l'évolution de la structure au comportement par l'intermédiaire du temps caractéristique.

Nous avons également mis en évidence la viscoélasticité de nos solutions de mélange en réalisant des tests d'oscillation, en effet, à partir des modules visqueux et élastiques, on peut dire que le PEG 10 000 g/mol, ralentit considérablement la cinétique d'agréations de nos suspensions, ce phénomène est intimement lié au comportement thixotrope de ces fluides, et qui est un paramètre clé dans la formulation des boues de forage. Par ailleurs, il a été bénéfique d'étudier les écoulements de nos fluides modèles, afin de mettre en évidence l'influence de la rhéofluidification sur les écoulements, les résultats expérimentaux obtenus en simulation concordent en bonne et due forme avec l'aspect rhéologique de l'étude. A savoir une facilité à l'écoulement au fur et à mesure de l'ajout du PEG 10 000 g/mol.

Finalement, on pourra dire que le comportement de telles complexes (bentonite-PEG10 000) est très opaque, et cette opacité réside dans la compétition des différentes forces et interactions inter-particulaire ainsi que les mécanismes d'adsorptions, cela ouvrent ainsi de nouveaux horizons pour la poursuite éventuelle de ce travail.

Perspectives :

Ce travail pourrait être approfondie et complété, par :

- Une étude de la microstructure et des mécanismes d'adsorption par analyse zétamétrique, DRX, MEB,...etc.
- Simulation de l'écoulement du fluide avec transfert de chaleur, dans une conduite qui présente une singularité (rétrécissement ou élargissement brusque), et ceci pour mettre en évidence l'effet du PEO 10 000 g/mol sur les paramètres d'écoulement.
- Etudier les propriétés de filtration et d'inhibition des systèmes (bentonite-PEG).

Références bibliographiques

- KHODJA Mohamed ; les fluides de forage : Etude des performances et considérations environnementales. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Science des procédés, Génie des Procédés et de l'Environnement (2008).
- K. BENYOUNES, A. BENCHABANE & A. MELLAK ; Caractérisation rhéologique de la bentonite de Maghnia en suspension aqueuse sans et avec additifs anioniques. Courrier du Savoir - N°10, Avril 2010, pp.51-57.
- J.P. NGUYEN ; technique d'exploitation pétrolière, le forage. Livre, Institut Français du Pétrole, (1993).
- BOUSSAK Hassina ; Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique. Thèse Magistère, Université de Boumerdès, Faculté des Science de l'ingénieur, Département de Génie des Procédés Industriels, (2008),
- FOURAR Karim ; Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères « Application aux puits horizontaux ». Thèse de Magister, Université M'hamed Bougara Boumerdès, Faculté de Science de l'Ingénieur, Département de Génie des Matériaux, (2007).
- Adel BENCHABANE et Karim BEKKOUR ; Etude de l'effet d'un polymère anionique sur le comportement rhéologique de suspensions de bentonite, "39ème Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Mulhouse : France (2004).
- P. F. Luckham et Sylvia Rossi ; The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. Adv. Colloid Interface Sci., 82, 43-92 (1999).
- Khaled Benyounes a, Adel Benchabane b & Abderrahmane Mellak ; Effet de l'ajout de poly-anionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). 18ème Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31 août 2007.
- CHALAH Kaci ; Influence de l'ajout des polymères (PAC,HEC) et de la température sur le comportement rhéologique et les propriétés électrocinétiques des fluides de forage à base d'eau (2012).
- RIGAL Claire ; Comportement des fluides complexes sous écoulement : approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations numériques. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine (2012).
- MOUAZIZ Soumia ; Préparation et caractérisation des bentonites modifiées par des sels de bis-imidazium : Application à l'adsorption du bleu Telon, Mémoire de fin d'étude, Université Abou Bekr BELKAID, Tlemcen (2012).

- A.RAVI; Experimental assessment of water based drilling fluids in high pressure and high temperature conditions, Thèse de Master, TEXAS A&M University (2011).
- Koblan Wilfried EBAGNININ, Adel BENCHABANE et Karim BEKKOUR; Influence du polyéthylène oxyde (PEO) de différentes masses moléculaires sur les propriétés rhéologiques des suspensions d'argile, *Int. J. Biol, Chem, Sci* 6(6) :7027-7047, (2012).
- H. Van Olphen, Internal mutual flocculation in clay suspension, *J. Colloid Interf. Sci.*, 19, 313-322 (1964).
- Gareche M., Zeraibi N., Allal A. et Amoura M., The Influence of Low Molecular Weight polymer on the Rheological Behavior of Bentonite Suspensions. *Petroleum Science and Technology*. 30:19, 1981-1989. ISSN: 1091-6466, Publisher Francis Taylor (2012).
- Abdelhamid BOUALIT, Contribution à l'étude thermos-hydrodynamique des fluides Binghamiens, Thèse de Doctorat, Faculté des hydrocarbures et de la chimie, Laboratoire de Génie Physique des Hydrocarbures, Université de Boumerdes (2011).
- Tung C.Y.M et Dynes P.J., Relationship between Viscoelastic systems, *J.Appl. Polm.Sci.*, 27, 569-574, 1982.
- Mongondry, P "Structure et comportement rhéologique des suspensions aqueuses de laponite en présence de plusieurs additifs, " Université du Maine-Le mans, 2003.

Annexes

Tableau 1 : Valeurs de l'essai en cisaillement simple (courbes d'écoulement).

$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Contrainte de cisaillement τ (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
0.01	0.000821	0.000295	0.000792	0.00131	0.00128
34.5	0.925	0.744	0.779	0.681	0.591
69	1.63	1.35	1.41	1.23	1.06
103	2.26	1.91	1.98	1.73	1.49
138	2.85	2.44	2.51	2.2	1.9
172	3.41	2.95	3.02	2.66	2.29
207	3.94	3.46	3.51	3.11	2.68
241	4.47	3.95	3.99	3.54	3.05
276	4.98	4.44	4.45	3.97	3.42
310	5.48	4.93	4.92	4.39	3.78
345	5.99	5.41	5.37	4.81	4.14
379	6.48	5.89	5.84	5.23	4.49
414	6.98	6.35	6.28	5.63	4.83
448	7.47	6.83	6.73	6.04	5.18
483	7.94	7.31	7.18	6.46	5.53
517	8.43	7.76	7.61	6.87	5.87
552	8.9	8.24	8.06	7.28	6.21
586	9.38	8.7	8.5	7.68	6.54
621	9.86	9.16	8.94	8.08	6.88
655	10.3	9.62	9.37	8.49	7.23
690	10.8	10.1	9.82	8.89	7.56
724	11.3	10.5	10.3	9.3	7.89
759	11.7	11	10.7	9.71	8.24
793	12.2	11.5	11.1	10.1	8.56
828	12.7	11.9	11.6	10.5	8.9
862	13.2	12.4	12	10.9	9.23
897	13.6	12.9	12.4	11.3	9.56
931	14.1	13.3	12.9	11.7	9.89
966	14.6	13.8	13.3	12.1	10.2
1000	15.1	14.2	13.8	12.6	10.6

Tableau 2 : Valeurs de l'essai en cisaillement simple prédit avec le modèle de Carreau.

$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Contrainte de cisaillement τ (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
0.01	0.000271	0.000223	0.000227	0.000198	0.000181
34.5	0.895332	0.733808	0.758013	0.659726	0.5853
69	1.644815	1.359211	1.418877	1.237115	1.070706
103	2.275755	1.911561	1.988032	1.739565	1.49614
138	2.86651	2.44833	2.52486	2.218505	1.907246
172	3.409249	2.952725	3.019478	2.663282	2.29127
207	3.948698	3.460941	3.511998	3.108637	2.676019
241	4.460359	3.947198	3.97987	3.533394	3.042255
276	4.978052	4.442083	4.453915	3.96503	3.413281
310	5.474388	4.918532	4.908977	4.380328	3.769021
345	5.980054	5.40543	5.373126	4.804686	4.131228
379	6.467147	5.875546	5.820692	5.214488	4.479794
414	6.965062	6.356993	6.278634	5.634307	4.83569
448	7.44588	6.822596	6.721231	6.040482	5.178933
483	7.938309	7.300021	7.174869	6.457165	5.530008
517	8.414532	7.7622	7.613892	6.860741	5.869088
552	8.902832	8.236503	8.064342	7.275109	6.216319
586	9.375515	8.695972	8.50065	7.676715	6.552023
621	9.86057	9.167761	8.948625	8.08929	6.89609
655	10.33042	9.625015	9.382785	8.489342	7.22898
690	10.81285	10.09473	9.828771	8.900479	7.570383
724	11.28038	10.55013	10.26118	9.299267	7.90088
759	11.76061	11.01808	10.70553	9.709221	8.239996
793	12.22619	11.47191	11.13648	10.10696	8.568425
828	12.70457	11.93836	11.57945	10.51592	8.90555
862	13.16848	12.39082	12.00916	10.91276	9.232165
897	13.64527	12.85595	12.45095	11.32087	9.567535
931	14.10774	13.30722	12.87959	11.71695	9.892543
966	14.58314	13.7712	13.32035	12.12432	10.22635
1000	15.04434	14.22141	13.74807	12.51973	10.54992

Tableau 3 : Valeurs de l'essai en cisaillement simple prédis par le modèle d'Herschel-Bulkley.

$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	Contrainte de cisaillement τ (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
0.01	0.162808	0.10603	0.127166	0.113546	0.069561
34.5	0.936768	0.747953	0.801146	0.692008	0.595892
69	1.583966	1.318268	1.377604	1.200091	1.043447
103	2.181867	1.856452	1.914344	1.677606	1.459318
138	2.771933	2.394988	2.446763	2.154169	1.871295
172	3.327433	2.907223	2.9499	2.606566	2.26023
207	3.885176	3.425755	3.456597	3.063807	2.651609
241	4.415846	3.922491	3.939912	3.501257	3.024685
276	4.952509	4.427771	4.429736	3.945736	3.402575
310	5.465801	4.913516	4.899111	4.372614	3.764511
345	5.986954	5.408935	5.376469	4.807618	4.132445
379	6.486971	5.886202	5.835156	5.226355	4.485849
414	6.995923	6.373798	6.302678	5.653853	4.845932
448	7.48525	6.844183	6.752734	6.065994	5.192451
483	7.984189	7.325311	7.212159	6.487295	5.546078
517	8.464599	7.789919	7.654998	6.893904	5.886843
552	8.955069	8.265543	8.107562	7.309939	6.235002
586	9.42785	8.72518	8.544213	7.711793	6.570837
621	9.911002	9.196023	8.990836	8.123257	6.914263
655	10.37713	9.651303	9.42208	8.520948	7.245792
690	10.85385	10.11792	9.863472	8.92838	7.585052
724	11.31409	10.56933	10.28992	9.322372	7.912765
759	11.78507	11.03217	10.72665	9.726199	8.24831
793	12.24004	11.4801	11.1488	10.11687	8.572602
828	12.70586	11.93953	11.58131	10.51744	8.904799
862	13.15605	12.38428	11.99957	10.90509	9.225991
897	13.61719	12.8406	12.42826	11.3027	9.555143
931	14.06303	13.28247	12.84295	11.68759	9.873506
966	14.51988	13.73593	13.26813	12.08248	10.19987
1000	14.96171	14.17512	13.67956	12.46483	10.51563

Tableau 4 : Valeurs du module visqueux G'' , (balayage en contrainte).

τ (Pa)	Module visqueux G'' (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
0.01	1.79	1.48	2.07	1.48	2.07
0.0126	1.78	1.63	2.05	1.63	2.05
0.0159	1.76	1.58	2.02	1.58	2.02
0.0199	1.77	1.63	2.07	1.63	2.07
0.0247	1.75	1.62	2.07	1.62	2.07
0.0314	1.77	1.63	2.11	1.63	2.11
0.0394	1.78	1.63	2.14	1.63	2.14
0.0496	1.8	1.64	2.21	1.64	2.21
0.0625	1.8	1.68	2.24	1.68	2.24
0.0783	1.81	1.7	2.29	1.7	2.29
0.0984	1.82	1.72	2.33	1.72	2.33
0.124	1.82	1.74	2.41	1.74	2.41
0.156	1.86	1.77	2.47	1.77	2.47
0.195	1.88	1.8	2.52	1.8	2.52
0.246	1.91	1.82	2.58	1.82	2.58
0.308	1.95	1.86	2.63	1.86	2.63
0.388	2	1.9	2.69	1.9	2.69
0.487	2.07	1.97	2.8	1.97	2.8
0.612	2.15	2.06	3.01	2.06	3.01
0.769	2.26	2.21	3.37	2.21	3.37
0.966	2.42	2.48	3.88	2.48	3.88
1.21	2.66	2.87	4.26	2.87	4.26
1.52	3.11	3.13	3.98	3.13	3.98
1.9	3.98	2.47	3.16	2.47	3.16
2.34	4.22	1.43	2.25	1.43	2.25
2.83	2.11	0.661	1.17	0.661	1.17
3.56	0.711	0.355	0.473	0.355	0.473
4.68	0.366	0.27	0.264	0.27	0.264
5.94	0.278	0.225	0.217	0.225	0.217
7.51	0.229	0.201	0.193	0.201	0.193
9.46	0.205	0.188	0.18	0.188	0.18
9.55	0.199	0.185	0.177	0.185	0.177
9.43	0.197	0.183	0.175	0.183	0.175

Tableau 5 : Valeurs du module élastique G' , (balayage en contrainte).

τ (Pa)	Module élastique G' (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
0.01	7.4	5.16	7.72	5.16	7.72
0.0126	7.51	5.24	7.88	5.24	7.88
0.0159	7.76	5.39	8.06	5.39	8.06
0.0199	7.83	5.44	8.27	5.44	8.27
0.0247	7.96	5.58	8.45	5.58	8.45
0.0314	8.19	5.56	8.52	5.56	8.52
0.0394	8.38	5.61	8.57	5.61	8.57
0.0496	8.53	5.67	8.61	5.67	8.61
0.0625	8.7	5.71	8.69	5.71	8.69
0.0783	8.83	5.71	8.65	5.71	8.65
0.0984	8.95	5.74	8.6	5.74	8.6
0.124	9.07	5.74	8.52	5.74	8.52
0.156	9.16	5.71	8.39	5.71	8.39
0.195	9.19	5.69	8.27	5.69	8.27
0.246	9.23	5.67	8.13	5.67	8.13
0.308	9.23	5.67	8.01	5.67	8.01
0.388	9.21	5.69	7.91	5.69	7.91
0.487	9.2	5.74	7.79	5.74	7.79
0.612	9.2	5.79	7.58	5.79	7.58
0.769	9.23	5.8	7.17	5.8	7.17
0.966	9.27	5.61	6.35	5.61	6.35
1.21	9.25	4.95	4.91	4.95	4.91
1.52	8.89	3.5	3.12	3.5	3.12
1.9	7.52	1.64	1.75	1.64	1.75
2.34	4.45	0.524	0.904	0.524	0.904
2.83	0.937	0.03	0.24	0.03	0.24
3.56	0.0842	0	0.0269	0	0.0269
4.68	0	0	0	0	0
5.94	0	0	0	0	0
7.51	0	0	0	0	0
9.46	0	0	0	0	0
9.55	0	0	0	0	0
9.43	0	0	0	0	0

Tableau 6 : Valeurs du module visqueux G'' (balayage en fréquence).

ω (rd/s)	Module de perte G'' (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
100	8.08	7.36	8.18	8.43	7.79
63.1	6.62	5.04	5.69	5.52	6.38
39.8	3.9	3.71	3.41	3.88	4.02
25.1	3.05	2.82	2.53	3.03	3.31
15.8	2.39	2.55	1.94	2.5	2.81
10	1.98	1.98	1.52	2.12	2.48
6.31	1.7	1.7	1.22	1.83	2.29
3.98	1.41	1.5	0.995	1.59	2.06
2.51	1.25	1.33	0.883	1.45	1.91
1.58	1.12	1.21	0.772	1.32	1.81
1	1.01	1.11	0.703	1.21	1.73
0.631	0.934	1.04	0.639	1.13	1.65
0.398	0.87	0.993	0.639	1.07	1.58
0.251	0.821	0.964	0.619	1.01	1.54
0.158	0.806	0.95	0.633	0.975	1.5
0.1	0.816	0.951	0.657	0.958	1.45
0.0631	0.834	0.947	0.74	0.946	1.42
0.0398	0.865	0.971	0.858	0.979	1.41
0.0251	1.04	1	1.07	1.1	1.47
0.0158	1.14	1.01	1.55	1.25	1.47
0.01	1.66	0.992	2.81	1.88	1.96

Tableau 7 : Valeurs du module élastique G' (balayage en fréquence).

ω (rd/s)	Module de stockage G' (Pa)				
	0%	0.5%	0.75%	1%	1.2%
100	18.6	1.79	24.5	9.03	8.97
63.1	21.1	7.27	23.1	11.5	10.8
39.8	22.5	9.32	21.2	11.9	12.6
25.1	22.8	10	21.1	12.1	13
15.8	22.6	9.82	20.8	11.8	12.7
10	22.3	9.56	20.6	11.3	12.2
6.31	21.9	9.2	20.3	10.9	11.6
3.98	21.5	8.83	20.2	10.5	11
2.51	21.2	8.5	20	10.1	10.5
1.58	20.9	8.18	20	9.71	10
1	20.8	7.9	20	9.4	9.52
0.631	20.6	7.66	20.2	9.1	9.07
0.398	20.5	7.46	20.5	8.83	8.66
0.251	20.6	7.34	21.1	8.61	8.3
0.158	20.7	7.34	22	8.45	8.04
0.1	21.1	7.49	23.5	8.38	7.92
0.0631	21.8	7.86	25.9	8.45	7.95
0.0398	22.1	8.54	28.5	8.68	8.27
0.0251	22.4	9.69	32.9	9.33	9.62
0.0158	23.8	11.3	41.1	12.2	14.2
0.01	25.3	12.8	59.8	20.2	21.8

Tableau 8 : Valeurs de la pression dynamique pour la suspension bentonitique de base (0% en PEG).

Position (m)	Pression dynamique (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.0197334	0.07897126	0.31590092	1.26232612
0.00629637	0.01940889	0.07767303	0.31070942	1.24163187
0.0119631	0.01777279	0.0711245	0.28451985	1.13719809
0.01706315	0.01559418	0.06240082	0.24962811	0.99796861
0.0216532	0.01318	0.05273488	0.2109672	0.84360033
0.02578425	0.01075955	0.04304478	0.17220578	0.68874598
0.02950219	0.00848791	0.03395171	0.13582744	0.54335541
0.03284834	0.00645948	0.02583384	0.10334577	0.41349885
0.03585987	0.00472233	0.01888342	0.07553323	0.30227807
0.03857025	0.00329126	0.01315907	0.05262809	0.2106543
0.04100959	0.00215857	0.00862927	0.03450591	0.13813984
0.043205	0.00130242	0.00520606	0.02081413	0.08333705
0.04518086	0.00069309	0.00277015	0.01107366	0.04434077
0.04695914	0.00029746	0.00118876	0.00475146	0.01902585
0.04855959	8.2013E-05	0.00032771	0.00130966	0.00524377
0.05	1.6412E-05	6.5565E-05	0.00026197	0.00104875

Tableau 9 : Valeurs de la pression dynamique de la suspension bentonitique de base + 0.5% en PEG.

position (m)	Pression dynamique (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.0187857	0.07518096	0.30074164	1.20193899
0.00629637	0.01847678	0.07394501	0.29579923	1.18222666
0.0119631	0.01691932	0.06771074	0.27086619	1.08275402
0.01706315	0.01484546	0.0594058	0.23764861	0.95015293
0.0216532	0.01254731	0.05020384	0.20084268	0.8031497
0.02578425	0.01024316	0.04097889	0.16394114	0.65569806
0.02950219	0.00808063	0.03232234	0.12930849	0.51726872
0.03284834	0.0061496	0.02459416	0.0983858	0.39363715
0.03585987	0.00449582	0.01797736	0.07190835	0.28775299
0.03857025	0.00313342	0.01252775	0.05010277	0.2005285
0.04100959	0.00205506	0.00821532	0.03285047	0.1314977
0.043205	0.00123997	0.00495635	0.01981574	0.07932892
0.04518086	0.00065987	0.0026373	0.01054258	0.04220771
0.04695914	0.00028321	0.00113176	0.00452363	0.01811043
0.04855959	7.8083E-05	0.00031199	0.00124686	0.00499144
0.05	1.5626E-05	6.2423E-05	0.00024941	0.00099828

Tableau 10 : Valeurs de la pression dynamique de la suspension bentonitique de base + 0.75% en PEG.

position (m)	Pression dynamique (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.01743516	0.06977956	0.27913505	1.11581326
0.00629637	0.01714845	0.06863238	0.27454773	1.09750402
0.0119631	0.01570304	0.06284592	0.25140613	1.00511766
0.01706315	0.01377845	0.05513762	0.22057521	0.88198024
0.0216532	0.01164564	0.04659679	0.1864135	0.74548751
0.02578425	0.00950722	0.0380347	0.15216295	0.60859537
0.02950219	0.00750017	0.03000019	0.12001826	0.48009267
0.03284834	0.00570793	0.02282735	0.0913172	0.3653357
0.03585987	0.00417297	0.01668599	0.06674218	0.2670579
0.03857025	0.00290844	0.01162791	0.04650351	0.18610291
0.04100959	0.00190753	0.00762527	0.03049086	0.122036
0.043205	0.00115096	0.00460039	0.01839259	0.07361992
0.04518086	0.0006125	0.0024479	0.00978554	0.03916971
0.04695914	0.00026288	0.00105049	0.00419885	0.01680673
0.04855959	7.248E-05	0.00028959	0.00115736	0.00463209
0.05	1.4505E-05	5.794E-05	0.00023152	0.00092641

Tableau 11 : Valeurs de la pression dynamique de la suspension bentonitique de base + 1% en PEG.

position (m)	Pression dynamique (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.01519979	0.06083772	0.24337049	0.9731155
0.00629637	0.01494986	0.05983749	0.23937079	0.95713681
0.0119631	0.01368991	0.0547924	0.21919385	0.87651747
0.01706315	0.01201234	0.04807194	0.19231276	0.76908344
0.0216532	0.01015316	0.0406257	0.16252753	0.65001929
0.02578425	0.008289	0.03316097	0.13266493	0.5306266
0.02950219	0.00653929	0.02615623	0.10463888	0.41856575
0.03284834	0.00497677	0.0199027	0.07961578	0.31850192
0.03585987	0.0036385	0.01454837	0.05819041	0.23281385
0.03857025	0.00253597	0.01013841	0.04054568	0.1622337
0.04100959	0.00166326	0.00664859	0.0265851	0.10638023
0.043205	0.00100359	0.0040112	0.01603696	0.06417341
0.04518086	0.00053408	0.00213441	0.00853242	0.0341428
0.04695914	0.00022923	0.00091597	0.00366121	0.01464952
0.04855959	6.3202E-05	0.00025251	0.00100918	0.00403748
0.05	1.2649E-05	5.0523E-05	0.00020188	0.00080748

Tableau12 : Valeurs de la pression dynamique de la suspension bentonitique de base + 1.2% en PEG.

position (m)	Presstion dynamique (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.0082011	0.03283444	0.13136899	0.52509993
0.00629637	0.0080663	0.0322945	0.12920974	0.516487
0.0119631	0.00738694	0.0295716	0.11831732	0.47302496
0.01706315	0.00648249	0.02594515	0.10380601	0.41509008
0.0216532	0.00547981	0.02192709	0.087727	0.3508648
0.02578425	0.00447419	0.01789895	0.07160693	0.28644547
0.02950219	0.00353013	0.01411887	0.05647942	0.22596943
0.03284834	0.00268687	0.01074401	0.04297389	0.17195934
0.03585987	0.00196451	0.00785409	0.0314107	0.1257032
0.03857025	0.00136931	0.00547365	0.02188776	0.08759921
0.04100959	0.00089813	0.00358971	0.01435255	0.05744343
0.043205	0.00054195	0.00216583	0.00865855	0.03465391
0.04518086	0.00028842	0.00115251	0.00460705	0.01843788
0.04695914	0.00012379	0.00049462	0.00197696	0.00791128
0.04855959	3.4134E-05	0.00013636	0.00054496	0.00218043
0.05	6.8317E-06	2.7286E-05	0.00010903	0.00043608

Tableau 13 : Valeurs de la vitesse axiale de la suspension bentonitique de base (0% en PEG).

position (m)	Vitesse axiale (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.00617217	0.01234732	0.02469525	0.04936553
0.00629637	0.00607916	0.01216132	0.02432337	0.04862401
0.0119631	0.00582729	0.01165731	0.02331554	0.04661353
0.01706315	0.00546445	0.010931	0.02186312	0.04371464
0.0216532	0.00502749	0.01005638	0.02011411	0.04022198
0.02578425	0.0045448	0.00909027	0.01818196	0.03636197
0.02950219	0.00403791	0.00807581	0.01615284	0.03230708
0.03284834	0.003523	0.00704541	0.0140915	0.02818698
0.03585987	0.00301198	0.00602299	0.0120459	0.02409763
0.03857025	0.0025135	0.00502583	0.01005081	0.02010842
0.04100959	0.00203362	0.00406602	0.00813064	0.01626814
0.043205	0.00157639	0.00315166	0.00630172	0.0126095
0.04518086	0.00114437	0.00228779	0.00457408	0.00915287
0.04695914	0.00073891	0.00147711	0.00295305	0.00590911
0.04855959	0.00036049	0.00072058	0.00144048	0.00288228
0.05	0	0	0	0

Tableau 14 : Valeurs de la vitesse axiale de la suspension bentonitique de base + 0.5% en PEG.

position (m)	Vitesse axiale (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.00602214	0.01204737	0.02409543	0.04817029
0.00629637	0.00593139	0.01186588	0.02373259	0.04744642
0.0119631	0.00568565	0.01137411	0.02274922	0.04548393
0.01706315	0.00533165	0.01066545	0.02133207	0.04265448
0.0216532	0.00490534	0.00981208	0.01962553	0.03924578
0.02578425	0.0044344	0.00886945	0.0177403	0.03547886
0.02950219	0.00393985	0.00787964	0.01576045	0.03152199
0.03284834	0.00343746	0.00687429	0.01374919	0.02750169
0.03585987	0.00293886	0.00587672	0.0117533	0.02351152
0.03857025	0.00245249	0.00490379	0.00980671	0.01961918
0.04100959	0.00198426	0.0039673	0.00793322	0.01587221
0.043205	0.00153814	0.00307515	0.00614873	0.01230253
0.04518086	0.0011166	0.00223226	0.00446305	0.00893
0.04695914	0.00072098	0.00144126	0.00288138	0.0057652
0.04855959	0.00035175	0.0007031	0.00140553	0.00281208
0.05	0	0	0	0

Tableau 15 : Valeurs de la vitesse axiale de la suspension bentonitique de base + 0.75% de PEG.

position (m)	Vitesse axiale (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.00580163	0.01160653	0.02321375	0.04641237
0.00629637	0.0057142	0.01143168	0.02286417	0.04571456
0.0119631	0.00547748	0.0109579	0.0219168	0.04382284
0.01706315	0.00513648	0.01027516	0.02055151	0.04109573
0.0216532	0.0047258	0.00945302	0.01890741	0.03781068
0.02578425	0.00427213	0.00854489	0.01709115	0.03418076
0.02950219	0.00379571	0.00759132	0.01518374	0.03036812
0.03284834	0.00331172	0.00662277	0.01324607	0.02649459
0.03585987	0.00283138	0.00566172	0.01132323	0.02265027
0.03857025	0.00236281	0.0047244	0.0094479	0.01890032
0.04100959	0.00191171	0.00382217	0.00764299	0.01529052
0.043205	0.0014819	0.00296267	0.00592382	0.01185158
0.04518086	0.00107578	0.00215061	0.00429983	0.00860262
0.04695914	0.00069463	0.00138855	0.00277603	0.00555382
0.04855959	0.0003389	0.00067739	0.00135415	0.00270897
0.05	0	0	0	0

Tableau 16 : Valeurs de la vitesse axiale de la suspension bentonitique de base + 1% de PEG.

position (m)	Vitesse axiale (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.00541696	0.01083739	0.02167565	0.04334313
0.00629637	0.00533534	0.01067412	0.02134923	0.042691
0.0119631	0.00511434	0.01023172	0.0204646	0.04092333
0.01706315	0.004796	0.00959424	0.01918976	0.03837542
0.0216532	0.0044126	0.00882659	0.01765455	0.03530668
0.02578425	0.00398905	0.00797866	0.0159586	0.03191623
0.02950219	0.00354424	0.00708831	0.01417756	0.02835548
0.03284834	0.00309234	0.00618398	0.01236831	0.02473814
0.03585987	0.00264385	0.00528664	0.01057295	0.02114828
0.03857025	0.00220633	0.00441144	0.00882196	0.01764668
0.04100959	0.00178512	0.00356901	0.00713672	0.01427606
0.043205	0.00138378	0.00276645	0.00553149	0.01106512
0.04518086	0.00100456	0.00200819	0.0040151	0.00803165
0.04695914	0.00064864	0.0012966	0.00259222	0.00518515
0.04855959	0.00031646	0.00063254	0.0012645	0.00252912
0.05	0	0	0	0

Tableau 17 : Valeurs de la vitesse axiale de la suspension bentonitique de base + 1.2% de PEG.

position (m)	Vitesse axiale (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0	0.00397898	0.00796164	0.0159252	0.03183897
0.00629637	0.00391905	0.00784167	0.01568534	0.03136045
0.0119631	0.00375685	0.00751668	0.01503534	0.03006318
0.01706315	0.0035232	0.00704844	0.01409861	0.02819285
0.0216532	0.00324173	0.0064846	0.01297059	0.02593967
0.02578425	0.00293073	0.00586179	0.01172449	0.02344977
0.02950219	0.00260407	0.00520782	0.01041598	0.02083437
0.03284834	0.00227216	0.00454356	0.00908685	0.01817708
0.03585987	0.00194269	0.00388438	0.00776802	0.01553975
0.03857025	0.00162125	0.00324142	0.00648179	0.0129671
0.04100959	0.00131177	0.00262249	0.0052438	0.01049055
0.043205	0.00101688	0.00203282	0.00406449	0.0081312
0.04518086	0.00073822	0.00147567	0.00295035	0.00590216
0.04695914	0.00047668	0.0009528	0.00190486	0.00381043
0.04855959	0.00023257	0.00046483	0.00092923	0.0018586
0.05	0	0	0	0

Tableau 18 : Valeurs de la vitesse moyenne à la sortie de la conduite.

Concentration en PEG (%)	Vitesse moyenne à la sortie (m/s)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0.000000	0.0031006	0.0062013	0.01240283	0.02839644
0.500000	0.00346383	0.00605071	0.01210164	0.02420373
0.750000	0.00291461	0.00582931	0.01165884	0.0233181
1.000000	0.0027215	0.00544308	0.01088637	0.02177314
1.200000	0.0019995	0.00399905	0.00799826	0.01599682

Tableau 5 : Valeurs de la contrainte à la paroi à la sortie de la conduite.

Concentration en PEG (%)	Contrainte à la paroi τ_w (Pa)			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0.000000	0.00671924	0.01343681	0.02687099	0.05375827
0.500000	0.00539166	0.01078206	0.02156233	0.04316901
0.750000	0.00528123	0.01056123	0.0211208	0.04227431
1.000000	0.00429203	0.00858309	0.01716501	0.03437065
1.200000	0.00288261	0.0057645	0.01152793	0.0230617

Tableau 20 : Valeurs des coefficients de perte à des Reynolds variables.

Concentration En PEG (%)	Coefficient de perte λ			
	Re=25	Re=50	Re=100	Re=200
0.000000	5.39707867	2.69811791	1.34887695	1.6222142
0.500000	3.47008627	2.27415401	1.13693978	0.56903335
0.750000	4.80071089	2.39999716	1.19985816	0.60037201
1.000000	4.47483862	2.23709216	1.11842821	0.55985537
1.200000	4.54367354	2.12345892	1.03451356	0.44565925