

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie des Procédés

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master
Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux
Filière : Génie des Procédés

THEME

Caractérisation rhéologique des fluides de forage combiné à la sciure du bois en présence de la Nanosilice

Réalisé Par :

BOUDEMARENE Amel
HAFIANE Maroua

Proposé et suivi par :

Pr. SAFI B.

Résumé

Les boues de forage sont généralement à la base des polymères organiques utilisés en tant que viscosifiant ou réducteur de filtrat de boue. Ces polymères sont coûteux et font souvent augmenter le coût de l'opération de forage des puits de pétrole. Pour cela, une boue de forage à base d'eau sera conçue en utilisant de la Nanosilice et de la poudre de bois (taille des particules (315µm) par substitution des polymères organiques utilisés couramment dans le fluide de forage à savoir le Carboxylate méthyle cellulose (CMC) et le Polyanionique cellulose (PAC). Le présent travail est consacré à l'étude de l'effet du déchet de bois dopé à la Nanosilice sur les propriétés rhéologiques des boues de forage à base d'eau.

Keywords : Sciure de bois, Nanosilice, boue de forage à base d'eau, CMC, yield point, viscosité, comportement rhéologique.

Abstract

Drilling muds are usually the basis of organic polymers used as viscosifier or mud filtrate reducer. These polymers are expensive and often increase the cost of operating oil well drilling. For this, a water-based drilling mud will be designed using Nanosilica and wood powder (particle size (315µm) by substitution of the organic polymers commonly used in drilling fluids, namely Carboxylate methyl cellulose (CMC) and Polyanionic cellulose (PAC) The present work is devoted to the study of the effect of wood waste doped with Nanosilica on the rheological properties of water-based drilling muds.

Keywords: Sawdust, Nanosilica, water-based drilling mud, CMC, yield point, viscosity, rheological behavior.

المخلص

يعتبر طين الحفر عادةً قاعدة للبوليمرات العضوية المستخدمة كعوامل مثخنة أو مخفضة لترشيح الطين. وتعتبر هذه البوليمرات مكلفة وتزيد في كثير من الأحيان من تكلفة حفر بئر النفط. ولذلك، سيتم تصميم طين حفر قائم على الماء باستخدام نانوسليكا ومسحوق الخشب (بحجم جسيمات قدره 315 ميكرومتر) كبديل عن البوليمرات العضوية المستخدمة عادةً في سوائل الحفر. وتحديداً الكربوكسيل ميثيل سليولوز (CMC) والبولي انيونيك سليولوز (PAC).

يهدف العمل الحالي إلى دراسة تأثير إضافة نفايات الخشب المختلطة بنانوسليكا على الخصائص الريولوجية لطين الحفر قائم على الماء.

الكلمات الرئيسية: نشارة الخشب، نانوسليكا، طين الحفر قائم على الماء، CMC، نقطة المطاوعة، اللزوجة، سلوك ريولوجي.

REMERCIEMENTS

Ce stage pour le mémoire de Master 2 a été réalisé au sein de l'Institut Algérien de Pétrole (IAP).

Nous tenions à remercies le DIEU qui nous a donné la force et donné la volonté et le courage afin de réaliser ce travail.

Tout d'abord, Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance envers notre professeur encadreur Monsieur SAFI Brahim, Professeur à l'Université M'Hamed Bougara Boumerdes (UMBB), Faculté de Technologie (FT) pour sa précieuse guidance, son soutien inestimable et ses conseils avisés tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'être examinateurs de ce manuscrit.

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

DÉDICACES

Je dédie ce travail premièrement à moi-même,

*Pour ma fatigue et ma persévérance dans tout mon parcours
universitaire,*

Et à ma petite famille,

Ma mère, qui m'encourage toujours à étudier,

Mon père, grâce à qui je suis maintenant ici,

Mes sœurs : Soumia, Selma, et mon petit frère Abdou,

Et Aymen qui m'encourage et me soutient toujours.

Merci

MAROUA

DÉDICACES

Je dédie ce travail à mes parents,

à mon père qui est la raison de ce que je suis devenu aujourd'hui,

à ma mère qui m'a toujours soutenu et qui a été là pour moi,

*à mes sœurs Khadidja et Sara, et à mes frères Abdnour et Islam mes
compagnons de vie, pour Leur présence et leur soutien.*

*J'adresse également mes remerciements à mon oncle Touazi Mustapha,
que j'admire,*

*à ma meilleure amie Oumina qui a été là pour moi depuis le début,
ainsi qu'à mes meilleures amis Nessrine et Zineb qui m'ont
accompagné tout au long de ce parcours.*

AMEL.

Sommaire

Table des matières

CHAPITRE I : LES FLUIDES DE FORAGE

Introduction Générale	12
I.1. Introduction :	13
I.2. Définition du fluide de forage :	13
I.3. Les fonctions du fluide de forage :	13
I.4. Concept des fluides de forage :	14
I.5. Contrôle et caractérisation des propriétés :	14
I.6. Paramètres physiques et chimiques :	15
I.6.1. Densité :	15
I.6.1.1. Le rôle de la densité :	15
I.6.1.2. Le matériel :	16
I.6.2. La filtration :	16
1.6.2.1. Principe fondamental de la filtration :	16
1.6.2.2. La filtration statique :	16
1.6.2.2.1. Equation de la filtration :	17
1.6.2.3. La filtration dynamique :	17
I.6.2.4. Rôle du filtrat :	17
I.6.2.5. Le matériel :	17
I.6.3. Le pH :	18
I.6.4. L'alcalinité :	18
I.6.5. Définition de la rhéologie :	19
I.6.6. Paramètres rhéologiques :	19
I.6.6.1. Viscosité plastique (V_p) :	19
I.6.6.2. La contrainte seuil « Yield value » (Y_p) :	19
I.6.6.3. Gels:	19
II. Notion de mouvement laminaire de cisaillement :	20
II.1. Définition :	20
II.2. Contrainte de cisaillement :	20
II.3. Déformation et vitesse de cisaillement :	21
II.4. Equation d'état :	22
II.5. La viscosité :	22
II.5.1. La viscosité cinématique ν :	22

II.5.2. La viscosité relative, spécifique, intrinsèque :	23
II.5.3. Le matériel :	23
II.6. Typologie de l'écoulement :	24
II.6.1. Les fluides indépendants de temps :	24
II.6.1.1. Fluides à contrainte critique :	26
II.6.1.2. Fluides sans contrainte critique :	27
II.6.2. Les fluides dépendants du temps :	28
II.6.2.1. Fluides thixotropes :	28
II.7. Classification des fluides de forage :	29
I.7.1. Les fluides à base d'huile :	29
II.7.2. Les fluides à base d'eau :	31
II.7.3. Les fluides de forage gazeux :	31
II.8. Filtration et endommagement des formations :	32
CHAPITRE II. DECHETS DE BOIS ET SON UTILISATION DANS LES FLUIDES DE FORAGE.	
I.1. Introduction :	37
I.1. Définition du bois :	37
I.3. Composition chimique du bois :	37
I.3.1. Constituants élémentaires :	37
I.3.2. Composants principaux :	37
I.3.2.1. La cellulose :	38
I.3.2.2. La lignine :	38
I.3.2.3. Les hémicelluloses :	38
I.3.2.4. L'extractibles :	39
II. Les propriétés mécaniques :	39
II.1. Densité :	40
II.2. Humidité :	40
II.3. Anisotropie :	41
II.4. Temps :	41
II.5. Température :	42
III. Etat de l'art :	42
III.1. L'importance des polymères dans les fluides de forage et le potentiel des déchets de bois comme alternative durable :	42
III.2. Substitution du CMC, PAC et XCD par de la poudre de bois :	43
III.2.1. Substitution de PAC et CMC :	43

CHAPITRE III METHODOLOGIE DU TRAVAIL ET CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1. Méthodologie du travail :	47
III.2. Caractérisations des matériaux :.....	47
III.2.1. La bentonite :.....	47
III.2.1.1. Caractérisation de la bentonite :	47
III.2.1.2.Composition chimique :	48
III.2.2.Le Barazane :	48
III.2.2.1.Les avantages :	48
III.2.3. La Carboxyméthylcellulose (CMC) :	48
III.2.3.1. Les avantage :.....	48
III.2.4. Polyanionique Cellulose:.....	49
III.2.4.1. Applications :.....	49
III.2.4.2. Avantages :.....	49
III.2.4. Déchets de Bois :.....	49
III.2.5. La Nanosilice :.....	50
III.3. Détails des boues de forage étudiées :.....	51
III.3.1. Procédure et protocole de préparation de la boue :	51
III.3.1.1.Boue à base d'eau normale:	51
III.3.1.2. Boue avec Nanosilice et poudre de bois :.....	51
III.4.Composition des différentes boues :.....	51
III.4.1. Formulation de la boue à base d'eau couramment utilisée :	51
III.4.2.Formulations des boues; à différent dosage des déchets et Nanosilice fixe : en tant viscosifiant par substitution des polymères :.....	52

CHAPITRE IV RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1. Utilisation du déchet de bois combiné à la Nanosilice :	56
IV.1.1.Paramètres Rhéologiques :.....	56
IV.1.2. Comportement rhéologiques :.....	58
IV.1.3. Résultats des tests rhéologiques par Viscosimètre VT500 :	60
IV.1.4. Paramètre rhéologiques à une vitesse de cisaillement ($400S^{-1}$) :.....	61
Conclusion Générale	64
Référence	66

Liste des figures

Chapitre I : Les fluides de forage

Figure I.1 : Cycle du fluide sur le site de forage	14
Figure I.2: Densimètre pressurisé.....	17
Figure I.3: Densimètre Classique	17
Figure I.4: Filtre-presse API, Filtre-presse haute pression et haute	19
Figure I.5 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines	21
Figure I.6 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans.....	22
Figure I.7 : Viscosimètre Marsh	24
Figure I.8 : Viscosimètre Fann	25
Figure I.9 : Courbes d'écoulement des principaux comportements	26
Figure I.10 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.	27
Figure I.11 : Schéma d'état de la matière en solution avant et après cisaillement.	28
Figure I.12 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.	29
Figure I.13 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes.....	30
Figure I.14 : Les différentes zones de pénétration du fluide de forage en circulation	35

Chapitre II : Déchets de bois et son utilisation dans les fluides de forage

Figure II.1 : La molécule de cellulose	38
Figure II.2 : unités phénolpropane à la base des lignines et alcools cinnamique (monolignols).....	38
Figure II.3: pentoses, hexoses, acides uroniques et désoxyoses constituant les hémicelluloses du bois	39
Figure II.4 : Variation du module d'élasticité et de la contrainte de rupture avec l'humidité. .	40
Figure II.5 : Influence de la pente de fil [KOL-75]	41
Figure II.6 : PAC _{ul} et CMC substitués par substitués par poudre de bois (PB de taille = 300 µm) à différentes concentrations.	44

Figure II.7 : Principaux paramètres rhéologiques des boues étudiées : substitution de PAC-ul et CMC. 44

FigureII.8: Evolution des paramètres rhéologiques (Y_p et V_p) des boues en fonction de la taille de la poudre du bois 45

Chapitre III : Méthodologie de travail et caractérisation des matériaux

Figure III.1 : Déchet de bois sous forme poudre. 50

Figure III.2 :Nanosilice utilisée. 50

Figure III.3 : dispositif de préparation de la boue. 51

Figure III.4: Boue à base d'eau. 52

Figure III.5 : Boue à base d'eau avec différents dosage de bois-Nanosilice..... 54

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Figure IV.1 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur les paramètres rhéologiques. 57

Figure IV.2 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur les paramètres rhéologiques. 58

Figure IV.3 : Comportement rhéologiques des boues à différent dosage du bois-Nano-Silice.59

Figure IV.4 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur la viscosité des boues étudiées. 60

Figure IV.5: effet de la teneur du Bois--Nanosilice sur la contrainte de cisaillement des boues étudiées. 61

Figure IV.6 : Viscosité et la contrainte par rapport le dosage de bois-NS. 62

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Les Fluides de forage

Tableau I.1 : Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante.....	22
Tableau I.2 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique.	27
Tableau I.3: types, caractéristiques, compositions et domaines d'utilisation des boues à l'huile.....	31

Chapitre III Méthodologie du travail et caractérisation des matériaux

Tableau III.1 : Caractéristiques de la bentonite.....	48
Tableau III.2 : Composition chimique de la bentonite.....	48
Tableau III.3 : caractérisation de la boue à base d'eau.....	52
Tableau III.4 : formulation de boue à 20kg bois.....	53
Tableau III.5 : formulation de boue à 30kg bois.....	53
Tableau III.6 : formulation de boue à 40kg bois	53

Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.1 : Paramètres Rhéologiques.....	56
Tableau IV.2 : Paramètres Rhéologiques.....	57
Tableau IV.3 : Lectures des vitesses de cisaillement des boues à l'aide du Rhéomètre Fann.	58
Tableau IV.4 : variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité à 400 s-1.	61

Introduction Générale

L'utilisation de polymères conventionnels tels que le carboxyméthylcellulose (CMC) et la cellulose polyanionique (PAC) comme agents de viscosité dans les boues de forage à base d'eau est courante. Cependant, dans le but de trouver des alternatives durables et économiques, cette étude se concentre sur l'utilisation de la poudre de bois (déchets de la boiserie) combinée à la Nanosilice en tant qu'agents de viscosité ou réducteur de filtrat dans la formulation des boues de forage, afin de substituer totalement les polymères importés.

L'objectif principal de cette recherche, est d'évaluer l'efficacité économique et écologique de l'utilisation de la poudre de bois combinée à la Nanosilice en tant qu'agents de viscosité ou réducteur de filtrat dans les boues de forage à base d'eau. Pour atteindre cet objectif, nous avons préparé différentes formulations de boues de forage en remplaçant les polymères conventionnels par ces matériaux renouvelables.

Les principaux paramètres rhéologiques des boues de forage, telles que le yield point (connue sous le nom seuil d'écoulement), la contrainte de cisaillement et la viscosité plastique, ont été mesurées pour chaque formulation. Les tests rhéologiques ont été réalisés à l'aide d'un rhéomètre de FANN (rhéomètre de chantier) et aussi un viscosimètre. En utilisant des différentes concentrations de la poudre de bois avec une granulométrie fixe (315 μ m) combinée à la Nanosilice à une quantité maintenue constante (0.8g).

Les résultats de ces tests nous ont permis d'évaluer et de comparer les performances des boues de forage modifiées avec la poudre de bois et la Nanosilice par rapport aux boues de forage conventionnelles contenant des polymères tels que le CMC et le PAC. Cette approche alternative présente un double avantage économique et écologique en réduisant les coûts liés à l'utilisation de polymères coûteux et en diminuant l'impact environnemental de l'industrie du forage.

Les prochains chapitres exploreront en détail différents aspects de notre recherche. Le premier chapitre se concentrera sur les fondements théoriques des fluides de forage, tandis que le deuxième examinera l'utilisation des déchets de bois dans ces fluides. Le troisième chapitre décrira la méthodologie de travail et la caractérisation des matériaux, tandis que le quatrième présentera les résultats obtenus et leur interprétation.

CHAPITRE I

Les Fluides de forage

I.1.Introduction :

Le 27 août 1859, l'américain EL Drake réalise le premier forage pétrolier à Titusville (Pennsylvanie). Le forage est un ensemble des procédés qui permet de forer un puits d'un diamètre compris entre 1 et 1,8 mètre, utilisé pour l'extraction de l'eau, pétrole ou gaz naturel. Le fluide de forage est préparé dans des bassins à boues (eau – bentonite), il est en circulation continue, il est injecté des tiges à l'intérieur des tiges jusqu' à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire (Figure 1), chargé des déblais formés au front de taille, il subit différents traitements, dilution, tamisage, ajout des produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physicochimiques à leurs valeurs initiales ; il est ensuite réutilisé[1].

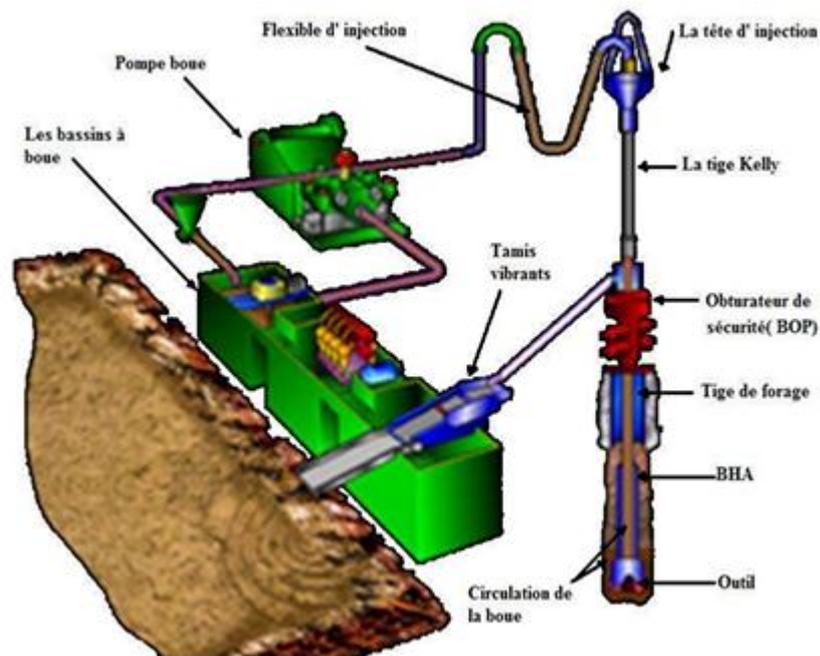


Figure I-1: cycle du fluide sur le site de forage [2].

I.2. Définition du fluide de forage :

Le fluide de forage ou boue de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile, ...) gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais, ciments, ...). C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastique, le plus souvent thixotropes [3].

I.3. Les fonctions du fluide de forage :

La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits [4], En général, les principaux rôles du fluide de forage sont :

- Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu'à la surface en raison de la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire .

- Maintenir les déblais en suspensions lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais grâce à la nature thixotropique du fluide afin de redémarrer le forage sans coincement.
- 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 qui est en général supérieure à la pression des formations forées ce qui permet d'empêcher la déstabilisation des terrains et de contrôler la venue des fluides de formation traversée.

Du fait de cette différence de pression le fluide va filtrer dans les formations perméables et dépose un film à 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 à moins que ce film ne doive pas être épais à fin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil.

- Remonter les informations géologiques sur les formations traversées lors du forage en raison de l'évolution des propriétés physico-chimiques du fluide (température, pH, teneur en gaz, chlore, ...).
- Enfin la boue ne doit pas être corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et ne risque pas de risques d'incendies.

I.4. Concept des fluides de forage :

Les boues de forage sont des formulations extrêmement complexes comprenant des additifs multifonction. Pour éviter des problèmes de reproductibilité sur chantier, la profession a normalisé la préparation et la caractérisation des fluides de forage. Les normes sont éditées par l'API (American Petroleum Institute) et concernant aussi bien la formulation sur site qu'en laboratoire pour la caractérisation des propriétés. La formulation proprement dite de la boue est optimisée (généralement par le fournisseur des produits), le temps et l'ordre d'agitation de chaque produit étant défini. En laboratoire sont utilisés des agitateurs normalisés (exemple, Hamilton Beach mixé pour les boues à base d'eau) alors que sur site le mélange se fait dans des bacs à boues soumis à agitation.

Chaque formulation spécifique est caractérisée et optimisée en laboratoire avant d'être utilisée, toutefois la boue subit au cours de sa circulation dans le puits de nombreuses contraintes et peut être affectée par des événements liés au forage (venues d'eau, venues de gaz...), il est donc important de contrôler les propriétés en cours de forage et en particulier les propriétés rhéologiques à savoir la viscosité et la yield point.

I.5. Contrôle et caractérisation des propriétés :

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API. Là aussi, il faut employer un appareillage spécifique (plus robuste que précis) et des protocoles particuliers. Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et

d'autres selon le coût et les possibilités du forage (taux de gaz, alcalinité). Sur site, un responsable boue (appelé le « boueux ») est chargé du contrôle de la qualité de la boue. A partir des mesures réalisées et de ses connaissances, il ajuste si nécessaire la composition de la boue en « temps réel » en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue. Les outils disponibles pour contrôler sur site la rhéologie de la boue sont de deux types, tout d'abord un outil encore très largement utilisé est le viscosimètre Marsh, le deuxième type d'appareil utilisé sur chantier est un rhéomètre rotatif FANN 35 réalisant une mesure de contrainte pour 2 ou 6 valeurs du cisaillement selon les appareils. A partir de ces mesures, les normes API imposent de calculer trois paramètres correspondant à un modèle de Bingham : (viscosité plastique)VP, (contrainte seuil)YP et (viscosité apparente)VA. Deux autres mesures sont réalisées afin de caractériser la « thixotropie » de la boue : Gel0 et Gel10 qui sont des mesures de contrainte à très faible vitesse normalisée après respectivement 10 secondes et 10 minutes de repos. Ces mesures sont nécessaires et doivent être réalisées si on envisage une application chantier pour une formulation de boue.

Les conditions existantes sur site doivent être prises en compte lors du contrôle des propriétés et amènent des difficultés supplémentaires. Deux exemples peuvent être donnés, tout d'abord l'information tirée de la mesure est une information « retardée ». En effet la boue circule dans le puits et une modification éventuelle de la rhéologie du fluide dans le puits ne sera détectée qu'au moment de la mesure en surface, il faut donc prendre en compte ce temps de remontée de la boue. D'autre part, la circulation dans le puits impose des valeurs élevées de pression et de température, il est donc nécessaire de mesurer ou prévoir la rhéologie des fluides aux hautes températures et pressions ainsi que la tenue des additifs soumis à ces conditions [5].

I.6. Paramètres physiques et chimiques :

Les paramètres de forage jouent un rôle important en aidant les foreurs :

I.6.1. Densité :

La densité est un paramètre important des boues de forages. 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. Il ne faut pas également qu'elle dépasse la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et pour cause avoir une perte de boue au cours de circulation.

La boue exerce une pression sur les parois du puits donnée par l'expression suivante [6] :

$$P = \frac{h \cdot d}{10}$$

Où :

P : Pression de la formation ; en (Kgf/cm²) ;

h : Profondeur de la couche traversée ; en (m) ;

d : Densité de la boue.

I.6.1.1. Le rôle de la densité :

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, la barite (BaSO₄) a été utilisée dès 1922[7].

I.6.1.2. Le matériel :



Figure I-2 : densimètre pressurisé [8].

Figure I.3 : Densimètre Classique [8].

I.6.2. La filtration :

1.6.2.1. Principe fondamental de la filtration :

Les fluides de forage sont des suspensions composées d'une phase liquide et des particules solides. La filtration se réfère à la phase liquide du fluide de forage forcé à travers la formation perméable causé par la différence de pression. Durant ce processus les particules solides sont retenues à la surface de la paroi, formant un cake de filtration. La perméabilité c'est la capacité d'un fluide à s'écouler a travers une formation poreuse. Deux sortes de filtrations ont lieu pendant le forage : la filtration statique pendant arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide et qui entraîne une érosion du cake formé. Le volume du filtrat est fonction :

De la nature de la formation ;

- Du temps ;
- De la pression différentielle ;
- De la viscosité du fluide ;
- De la température ;
- De la distribution en taille des particules.

Les propriétés de filtration des fluides de forage sont évaluées et contrôlées par des tests API. Ce sont des tests en régime statique utilisant un filtre presse standardisé. Ces mesures peuvent être faites en conditions de haute pression et haute température.

De nombreux travaux et études ont été entrepris ayant trait au phénomène de filtration et l'évolution de ses paramètres sous différentes conditions inhérentes au forage.

1.6.2.2. La filtration statique :

Le processus de filtration statique des suspensions classiques des particules solides dans un liquide est d'une manière générale bien connu ; Fergusson et Klotz ont étudié plus

particulièrement le cas des boues de forage. Ils ont montré que la filtration de ces fluides ne suit qu'en partie la théorie classique résumée comme la forme, suit [9] :

$$V = K.t^{1/2}$$

Avec :

- V : volume filtré de liquide ;
- K : perméabilité du cake ;
- t : temps mesuré du début de la filtration.

1.6.2.2.1. Equation de la filtration :

Lors de la filtration statique, le cake s'épaissit continuellement au cours du processus. D'après la loi de Darcy, la vitesse de filtration à travers un cake de porosité donnée par approximation est de la forme suivante :

$$dV/dt = K.\Delta P/\eta.e.A$$

Où :

- ΔP : pression ;
- A : surface (cm²) ;
- η : viscosité (Cp) ;
- V : volume filtré pendant un temps (cm³) ;
- e : épaisseur du cake après un temps (cm) ;
- t : temps (s) ;
- K : perméabilité du cake (1 darcy = 1 μm^2).

1.6.2.3. La filtration dynamique :

La filtration dynamique est significativement différente de la filtration statique, souvent avec des taux de filtration plus considérables. Il n'existe aucune corrélation directe entre les mesures de filtration statique API et HTHP et la filtration dynamique.

L'expérience a montré qu'une boue qui offre de bonnes caractéristiques de filtration statistiques et de stabilité va donner des performances satisfaisantes sous les conditions de forage actuel, indiquant que les pertes de fluide en dynamique sont dans une marge satisfaisante.

Aussitôt que le trépan est en contact avec une roche perméable la filtration dynamique débute.

1.6.2.4. Rôle du filtrat :

Le filtrat est essentiel dans le forage, il doit être suffisamment élevé pour augmenter la vitesse d'avancement, suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les coulages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaire, dolomie, grès, etc.). Il ne doit pas envahir les formations productives, car il peut occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ses formations etc. Fixé le filtrat que doit posséder la boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage [4].

I.6.2.5. Le matériel :



Figure I.4: Filtre-presse API, Filtre-presse haute pression haute [8].

I.6.3. Le pH :

Une solution aqueuse peut contenir divers ions ; elle contient toujours, plus ou moins grande quantité, des ions H^+ et OH^- dissociés [4].

Pratiquement le pH des boues de forage couramment utilisées varie entre 6 et 13,5 environ. Les boues dont le pH est inférieur à 10,5 sont dites à bas pH, celles dont le pH est supérieur à 10,5 sont dites à pH élevé [6].

Le pH est mesuré :

- ✓ Soit par une méthode colorimétrie (papier pH ou indicateurs colorés) ;
- ✓ Soit par une méthode électrométrie (pH-mètre), au moyen d'électrodes en verre.

I.6.4. L'alcalinité :

La mesure du pH, utile qu'elle soit mais elle est insuffisante pour permettre un bon contrôle de la boue de forage. Elle est d'ailleurs parfois délicate contrôler, surtout aux pH élevés, cas où elle manque de sensibilité [6].

Une mesure complémentaire s'avère nécessaire est celle des alcalinités. Lorsque le pH apporte la concentration en ions H^+ (ou OH^-) libres, la mesure des alcalinités donne les concentrations en bases solubles ou insolubles. Dans les boues de forages, ces bases sont principalement des carbonates, bicarbonates et hydroxydes et à un degré moindre, les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques [4].

Trois alcalinités sont mesurées en pratique : pb, pf, Mf ; ou b signifie boue, f filtrat, p phénolphtaléine, M méthylorange, le virage à la phénolphtaléine se produit à pH égale à 8,2 et celui du méthylorange est de 4,2.

- **L'alcalinité pb :**

C'est la quantité d'acide H_2SO_4 , N/50 nécessaire pour neutraliser 1 cm^3 de boue, dilué avec de l'eau distillée. Le dosage doit être très rapide, car ce dosage a pour but de déterminer la teneur de la boue en $Ca(OH)_2$, en présence souvent de carbonates.

- **L'alcalinité pf et Mf :**

Elle est déterminée de la même façon que l'alcalinité pb, sauf qu'on utilise 1 cm³ de filtrat de la même boue. Une boue à l'amidon, à pH élevé, doit effectivement contenir des ions OH⁻. C'est une garantie contre la fermentation de l'amidon [6].

I.6.5. Définition de la rhéologie :

La rhéologie est la science des déformations et écoulements de la matière, des contraintes qui en résultent et des efforts qu'il faut appliquer pour les obtenir [10].

L'objet de la rhéologie est de déterminer les contraintes et les déformations en chaque point d'un milieu [11].

I.6.6. Paramètres rhéologiques :

La connaissance du comportement rhéologique des boues de forage est d'une importance capitale pour bien cerner tout à propos de son écoulement et par quelle loi rhéologique cette boue est-elle régit. La loi de comportement la plus simple est représentée par le modèle dit Newtonien. Tandis que les autres types de fluides sont qualifiés Non Newtoniens. Les caractéristiques les plus recherchés par l'étude rhéologiques sont :

I.6.6.1. Viscosité plastique (Vp) :

Elle dépend avant tout de la teneur en solides contenue dans la boue. Une augmentation de viscosité plastique ne pourra être donc combattue que par l'élimination des solides. Par ailleurs, la viscosité plastique est également liée à la taille des particules, et à leur forme [4], l'expression suivante :

$$\begin{aligned}V_a &= L_{600} / 2 \text{ (cp)} \\V_p &= L_{600} - L_{300} \text{ (cp)}\end{aligned}$$

I.6.6.2. La contrainte seuil « Yield value » (Yp) :

Les solides présents dans la boue de forage influencent un autre paramètre autre que la viscosité plastique qui est la contrainte seuil plus connus sous nom de yield value ou yield point. La contrainte seuil est la mesure de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées sur ou près de 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, la concentration de ces solides, et le type et la concentration des autres ions ou sels qui peuvent être présents,

$$Y_p = L_{300} - V_p \text{ (lb/100ft}^2\text{)}$$

I.6.6.3. Gels:

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 réversible et non instantané.

Le caractère thixotropie d'une boue est évalué en mesurant d'une part le gel 0 et d'autre part le couple après un repos de la boue de 10 min, ce qui est le gel 10 [4].

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 [12].

- **Le gel 0** : Il représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Il est mesuré à l'aide du viscosimètre du type FANN35 à une vitesse de 3 tr/min. il est exprimé en lb/100ft².
- **Le gel 10** : Il représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes, la mesure est faite de la même manière que pour le gel 0. Il est exprimé en lb/100ft².

II. Notion de mouvement laminaire de cisaillement :

II.1. Définition :

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

II.2. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement (figure I.5) [13].

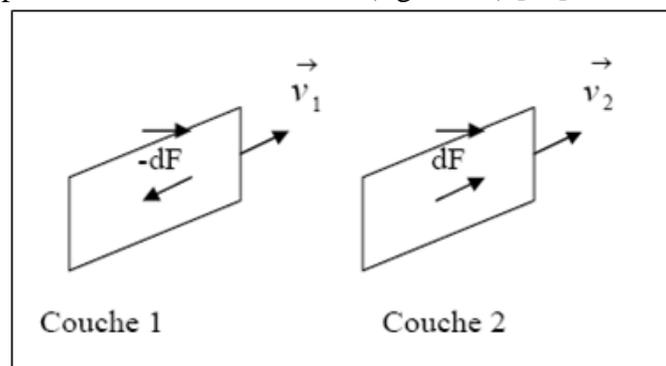


Figure I.5 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines [13].

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse v_1 supérieure à la vitesse v_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la

couche (1), une force de cisaillement – dF tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement l'équation suivante:

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

τ : représente une force par unité de surface, elle s'exprime en N/m^2 ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

II.3. Déformation et vitesse de cisaillement :

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. La déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile (figure I.6).

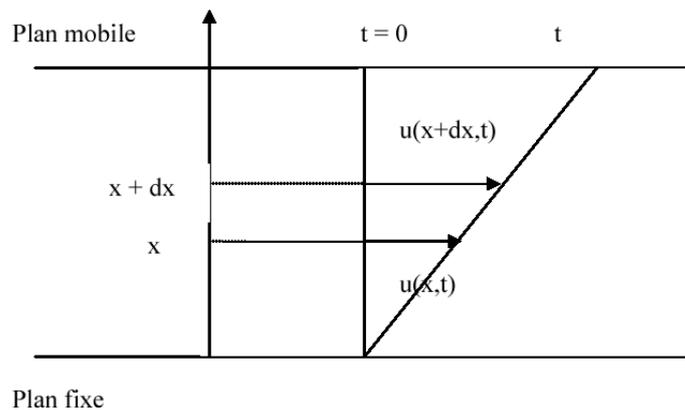


Figure I.6 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles [13].

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l'instant $t = 0$ dans une section droite. A l'instant t postérieur, les particules auront parcouru la distance $u(x, t)$ pour la particule située à l'abscisse x et $u(x+dx,t)$ pour la particule située à l'abscisse $x+dx$.

La déformation de cisaillement est définie par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx}$$

Cette grandeur est sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement $u(x,t)$ lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment

L'expression de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) est donnée par l'équation précédente, il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad [s^{-1}]$$

$\dot{\gamma}$: la dimension de l'inverse d'un temps et s'exprime en s^{-1} .

II.4. Equation d'état :

La détermination de ces deux grandeurs (contrainte de cisaillement et déformation ou vitesse de cisaillement) permet de définir l'équation rhéologique d'état du matériau, c'est-à-dire la relation les unissant ($\gamma = f(\tau)$ ou bien $\dot{\gamma} = f(\tau)$). Les rhéogrammes sont les courbes traduisant graphiquement l'équation rhéologique d'état du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement avec celle de la vitesse de cisaillement.

La détermination de ces paramètres permet entre autres d'obtenir la viscosité du fluide étudié (dans le cas des fluides newtoniens), grandeur suffisant bien souvent à caractériser de manière précise le comportement rhéologique du matériau étudié. La viscosité s'exprime en Pa.s, elle est notée μ . Le tableau 1 donne des valeurs de viscosité de substances usuelles à température ambiante.

Tableau I.1: Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante. :

Matériau	Viscosité (Pa.s)
Air	10^{-5}
Eau	10^{-3}
Huile d'olive	10^{-1}
Glycérine	1
Miel	10
Polymères fondus	10^3

II.5. La viscosité :

La notion de viscosité traduit une résistance à la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluide les unes par rapport aux autres.

C'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. On définit différent coefficient de viscosité :

C'est le rapport de la contrainte par la vitesse de cisaillement correspondante :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [N.s/m^2] \text{ ou } [Pa.s]$$

II.5.1. La viscosité cinématique ν :

$$\nu = \frac{\mu_a}{\rho} [\text{m}^2/\text{s}]$$

ρ : masse volumique du fluide.

II.5.2. La viscosité relative, spécifique, intrinsèque :

Elle est utilisée souvent dans l'étude des solutions ou des suspensions pour déterminer les influences respectives du soluté et du solvant sur le comportement rhéologique. On utilise fréquemment les viscosités suivantes :

- **Viscosité relative :** $\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_s}$
- **Viscosité spécifique:**
$$[\mu] = \lim \left[\frac{\mu_{sp}}{C} \right]$$
- **Viscosité intrinsèque:** $c \rightarrow 0$
 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$

Avec :

μ et μ_s : représentent respectivement la viscosité dynamique de la solution et du solvant ;

C : représente la concentration de solution ;

μ_{rel} et μ_{sp} : sont des grandeurs sans dimension ;

$[\mu]$: est homogène à l'inverse d'une concentration.

II.5.3. Le matériel :



Figure I.7 : Viscosimètre Marsh[8].



Figure I.8 : Viscosimètre Fann[8].

II.6. Typologie de l'écoulement :

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse trouver, dans ce cas, vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement sont reliés par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant la rhéogramme est la viscosité du fluide.

Tous les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espèces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien (gaz, liquides usuels et solutions de molécules de faible poids moléculaire).

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

Il est possible d'effectuer une classification rhéologique des fluides suivant la nature des paramètres influençant leur comportement rhéologique.

Nous distinguons trois catégories principales de fluides :

- Les fluides indépendants du temps ;
- Les fluides dépendants du temps ;
- Les fluides viscoélastiques.

II.6.1. Les fluides indépendants de temps :

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement τ est fonction seulement de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien, nonnewtonien et fluide viscoélastique.

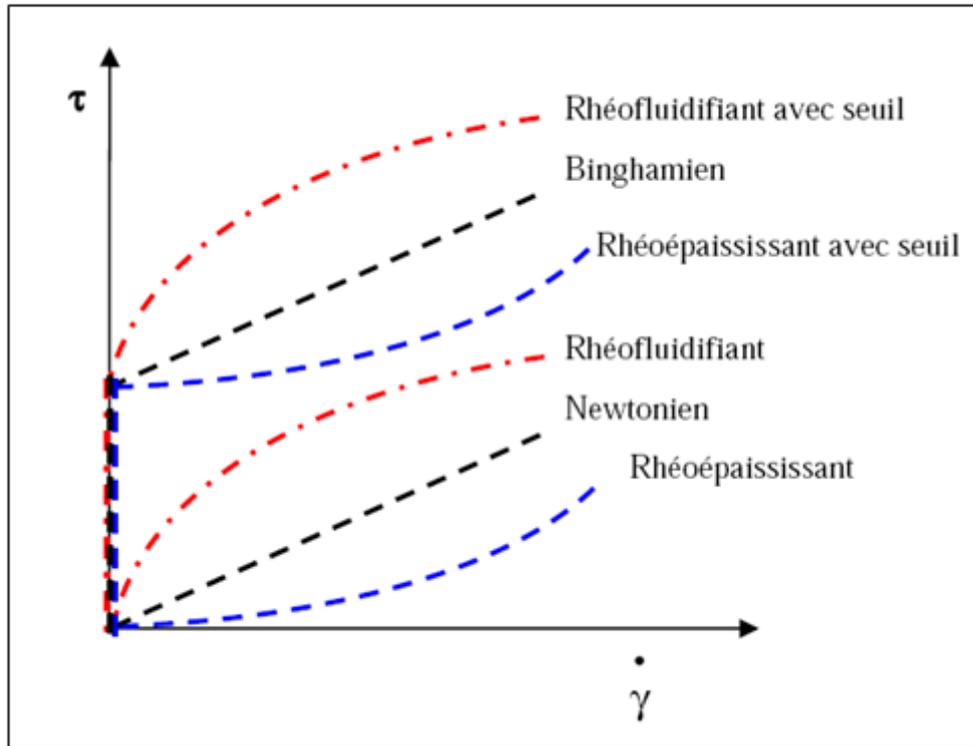


Figure I.9: Courbes d'écoulement des principaux comportements [14].

❖ **Les fluides newtoniens :**

Les fluides idéaux ou normaux appartiennent à ces systèmes. Ils présentent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement, τ , et le gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$. Le coefficient de proportionnalité, η , tel que $\tau = \eta \dot{\gamma}$, définit la viscosité absolue du fluide. Il est constant, indépendant de la contrainte de cisaillement et du gradient de vitesse [14]. La rhéogramme d'un tel fluide est donc une droite passant par l'origine, sa viscosité dynamique est constante.

Ils sont caractérisés par l'équation rhéologique d'état :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

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

μ : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

❖ **Les fluides non newtoniens :**

Ce sont tous les fluides pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ n'est pas proportionnelle. Les raisons du caractère non newtonien d'un fluide sont liées à la taille de particules, leurs concentrations dans la phase continue, leur nature, leur forme, leur aptitude à la déformation ou bien encore la réactivité physico-chimique de la phase continue notamment dans le cas de suspensions colloïdales. Ils sont caractérisés par la relation générale:

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma}$$

Avec :

μ_a : la viscosité apparente dépendant de la vitesse de déformation [Pa.s].

On distingue deux catégories principales de fluides non newtoniens indépendants du temps :

- Les fluides à contrainte critique (seuil) d'écoulement.
- Les fluides sans contrainte critique (seuil) d'écoulement.

II.6.1.1. Fluides à contrainte critique :

Cette catégorie de fluides est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique, la figure II.4 donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale appelée seuil d'écoulement τ_c . (Figure I.10).

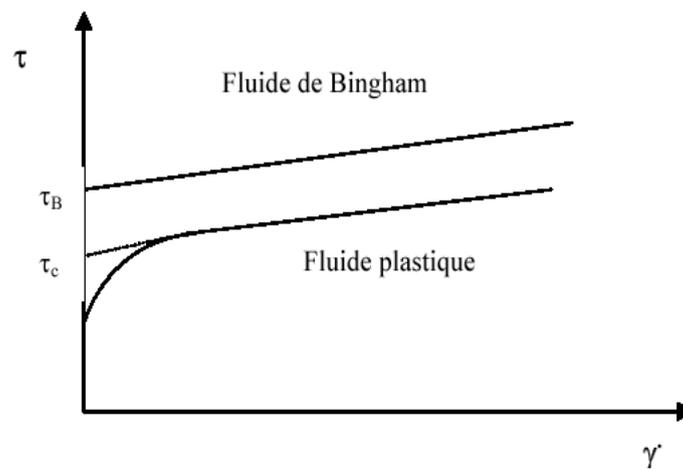


Figure I.10 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.

Le tableau I.2 récapitule les principales lois d'écoulement rhéologiques utilisées pour décrire le comportement de tels fluides.

Le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques, la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée.

Tableau I.2 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique.

Modèle	Loi rhéologique
Bingham	$\tau = \tau_B + \mu_B \cdot \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_H + K \cdot \dot{\gamma}^n$
Casson général	$\tau^n = \tau_C^n + (k_c \cdot \dot{\gamma})^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_C^{1/2} + (k_c \cdot \dot{\gamma})^{1/2}$

Le modèle de Bingham est le plus simple de ces modèles, le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_B est dépassé. Ce modèle permet de décrire le comportement rhéologique de nombreux matériaux (boues de forage, peintures à l'huile, certaines graisses...).

Les systèmes étudiés dans le présent manuscrit sont des fluides rhéofluidifiants qui obéissent au modèle d'Herschel-Bulkley, le comportement rhéofluidifiant se caractérise par une viscosité qui diminue quand le gradient de cisaillement augmente (shear thinning ou pseudoplastique), les produits rhéofluidifiants présentent souvent un comportement newtonien pour les gradients de cisaillement très élevés.

Les suspensions, émulsions, polymères en solution sont constitués au repos de particules de formes irrégulières, gouttelettes ou chaînes emmêlées qui constituent une viscosité élevée car ayant une forte résistance à l'écoulement. Soumis à une contrainte, l'écoulement s'accélère, les particules s'orientent, les chaînes se démêlent parallèlement à la force d'entraînement et opposent ainsi une résistance plus faible. La viscosité diminue.

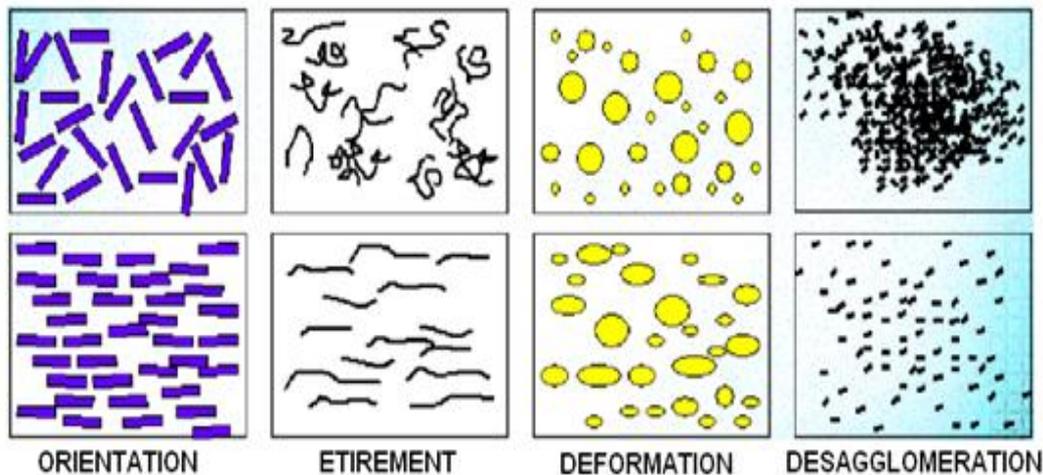


Figure I.11 : Schéma d'état de la matière en solution avant et après cisaillement.

II.6.1.2. Fluides sans contrainte critique :

La figure I.12 présente les courbes d'écoulement des deux principales catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques (ou rhéofluidifiants) et les fluides dilatants (ou rhéoépaississants).

Pour les fluides pseudoplastiques, le rapport $\tau / \dot{\gamma} = \mu_{app}$ (viscosité apparente) est à peu près constant pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut μ_0 . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente (d'où le nom de rhéofluidifiant), jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (μ_∞).

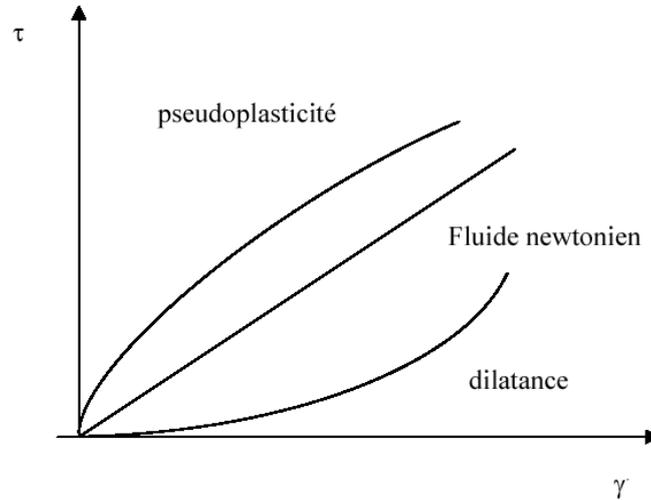


Figure I.12 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.

II.6.2. Les fluides dépendants du temps :

Le comportement des fluides dépendants du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne. Cette modification peut être très rapide, dans ce cas le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Par contre si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencés par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : « le temps ».

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropes;
- Les fluides rhéopexes.

II.6.2.1. Fluides thixotropes:

La thixotropie est la propriété physique de certains fluides de présenter une viscosité dépendante du temps. Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante à condition que le phénomène soit réversible. Dans ces conditions, la viscosité dynamique n'est plus fixée pour une valeur de contrainte ou de vitesse de déformation, mais dépend également d'un autre paramètre : le temps. Ainsi, lorsqu'on trace dans un même système d'axes les courbes d'écoulement pour un cisaillement croissant, puis pour un cisaillement décroissant [14].

La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluides consiste le plus souvent en l'application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente (cisaillement croissant-cisaillement constant-cisaillement décroissant).

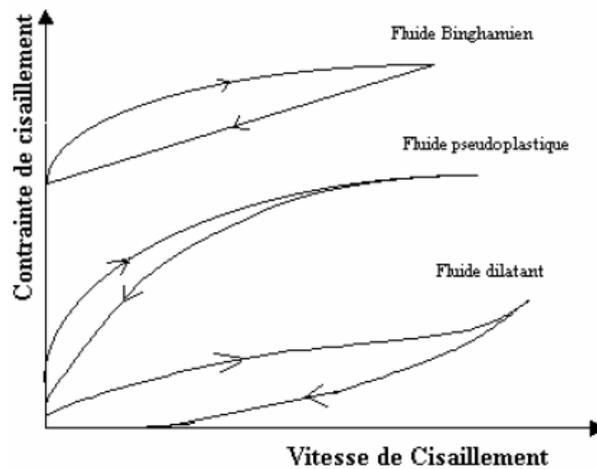


Figure I.13 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes.

II.7. Classification des fluides de forage :

Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories en accord avec le fluide de base utilisé dans leur préparation sont: l'air, l'eau et l'huile.

I.7.1. Les fluides à base d'huile :

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute.

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 [2].

Les boues à l'huile sont choisies pour leur stabilité à des hautes températures, lubrification et attributs stabilisants du trou de puits bien que les boues à l'huile aient des propriétés uniques il est difficile de les assortir qu'avec ceux des boues à l'eau, leur utilisation occasionne également quelques difficultés, comme les coûts élevés, la manipulation spéciale et les soucis environnementaux [15].

Ce sont des émulsions inverses dont la phase continue est une huile organique ou minérale (pétrole brut, gaz oil, ...) et la phase dispersée (discontinue) est une solution aqueuse de 50% en volume au maximum tout en gardant l'avantage d'une phase externe constituée par l'huile [16]. Des agents viscosifiants, émulsifiants, stabilisants, fluidifiants et alourdissants sont alors additionnés. Ces fluides présentent une insensibilité aux contaminants (NaCl, KCl, Argile, ...), une réduction du frottement de la garniture sur les parois du puits et un endommagement limité de la formation d'où une meilleure productivité à moins qu'ils posent des problèmes écologiques (polluantes), ils peuvent contaminer le laitier de ciment et ils sont très coûteux.

Actuellement, des fluides à base d'huile non toxique (huiles végétales) sont de plus en plus utilisés ainsi que les fluides à base d'eau.

Avantage :

- Permet de résoudre les problèmes rencontrés avec la boue à base d'eau ;
- Pas d'hydratation des argiles ;
- Pas de dissolution des sels ;
- Pas de filtration ;
- Pas d'endommagement des réservoirs ;
- Lubrifiant ⇒réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits ou diminution couple de torsion et de l'usure de la garniture ;
- Caractéristiques plus faciles à maintenir ;
- Moins sensible aux contaminants ;
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO₄, ciment, argile) ;
- Excellentes caractéristiques de filtration statique en température et pression, cake très mince ;
- Réduction des risques de bourrage d'outil et d'accumulation des déblais sur les drill-collars et diminution du "pistonage" lors des manœuvres ;
- Diminution du collage par pression différentielle.

Inconvénients :

- Polluant ;
- Inflammable (risque d'incendie) ;
- Santé du personnel ;
- Problèmes pour de propreté des zones de travail ⇒accidents ;
- Coût de fabrication et de destruction généralement plus élevé que celui des boues à base d'eau ;
- Difficulté pour "voir" les hydrocarbures (dans les déblais et avec certains outils de logging) ;
- Détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures ;

On distingue deux catégories de boues à base d'huile :

Les boues conventionnelles (95 à98 % d'huile)et les boues à émulsion inverse, tableau (I)

Classe de la boue	Type de la boue	Caractéristiques de la boue	composition	Cas principaux d'utilisation
Boues à l'huile	Boues conventionnelles	Filtrat faible	Huile 95-98 % Eau 2-5 % agent plastifiant agent émulsifiant agent fluidifiant alourdissant	Forage d'une couche productrice Forage du sel massif Reprise et entretien du puits Argiles gonflantes et à fort pouvoir de dispersion Problèmes de coincement
	Boues à émulsion inverse	Filtrat faible Prix de revient mois élevé	Huile 80 à 30 % Eau 20 à 70 %	Forage d'une couche productrice Problèmes de forage à haute température Problèmes de déviation Grande épaisseur de sels ou d'anhydrite Forage dans des zones trop froides

Tableau I.3:types, caractéristiques, compositions et domaines d'utilisation des boues à l'huile.

II.7.2. Les fluides à base d'eau :

Ce type de fluide est les plus utilisées dans le domaine de forage. Ils sont généralement constitués par des suspensions d'argile (bentonite, ...), des solides inertes (carbonates, ...) dont les caractéristiques rhéologiques sont ajustées par addition de polymères viscosifiants (Xanthane, ...). Des réducteurs de filtrat entre également dans la composition (carboxyméthylecellulose, polymères synthétiques) [1].

Ces fluides sont moins coûteux et moins polluants ; à moins que la dégradation thermique des polymères utilisés dans ces formulations présente un inconvénient majeur pour le bon déroulement d'une opération de forage.

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

- Boues douces (boues bentonitiques) ;
- Boues salées.
- Boues salées saturées.

II.7.3. 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 [2]:

► 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.

► 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.

► 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.

II.8. Filtration et endommagement des formations :

La connaissance des causes et l'importance du phénomène de colmatage des abords du puits par la boue de forage présente un intérêt évident. Elle doit permettre en effet dans la mesure du possible de prévenir l'endommagement catastrophique par le choix d'un fluide adéquat et de conditions de mise en œuvre convenable.

Nous rappelons ici que concernant le colmatage, les facteurs à prendre en compte sont liés :

- A la roche (perméabilité, porosité, répartition des pores, nature minéralogique, mouillabilité) ;

- Aux fluides qu'elle contient (nature, propriétés chimiques, caractéristiques physico-chimiques, pression, température) ;
- A la boue elle-même (composition, caractérisation rhéologiques) et à ses éléments de filtration, au cake (épaisseur, perméabilité, résistance mécanique, grosseur des particules) et au filtrat (nature, propriétés chimiques et physico-chimiques).

Lorsque le fluide de forage se trouve en contact avec une surface nouvellement foré, il pénètre immédiatement dans celle-ci. Puis, la pénétration est limitée, certains pores étant obstrués par des particules en suspension dans le fluide et celles résultant du broyage de la roche par l'outil c'est-à-dire lors de formation du cake interne. Cette obstruction dépend des dimensions relatives du pore et de la particule.

- Si ce dernier est plus grand que l'ouverture du pore, elle est balayée par le courant du fluide de forage ;
- Si elle est petite par rapport à l'ouverture, elle pénètre librement dans le pore, si elle possède une certaine dimension critique, elle s'agglutine à d'autres particules dans le goulot d'étranglement que constitue l'entrée du pore et l'obstrue ;
- Il est évident que la formation du cake interne dépend des caractéristiques du milieu filtrant.
- Des particules de dimensions comprises entre :
 - a. Une valeur légèrement inférieure à l'ouverture de pores les plus larges ;
 - b. Une valeur égale à environ le tiers de cette ouverture.
 - c. Des particules plus petites, atteignant le domaine colloïdal, susceptible de boucher les pores les plus fins et les interstices entre les fractions les plus grossières déjà déposées.

L'obstruction du milieu poreux est d'autant plus rapide que la concentration en particules susceptible de la provoquer est plus élevée.

Une fois l'obstruction amorcée, les éléments les plus fins sont à leur tour retenus. Seule la phase liquide envahit la formation, tandis que la phase solide se dépose à l'extérieure, le long de la paroi, en constituant le cake externe.

Comme la montre la figure I.2 différentes zones peut être distinguée du puits vers la formation :

- Le cake externe qui tapisse la paroi ;
- Le cake interne qui s'étend sur une épaisseur équivalente à quelques diamètres des grains ;
- La zone envahie par le filtrat lors de la pénétration immédiate.

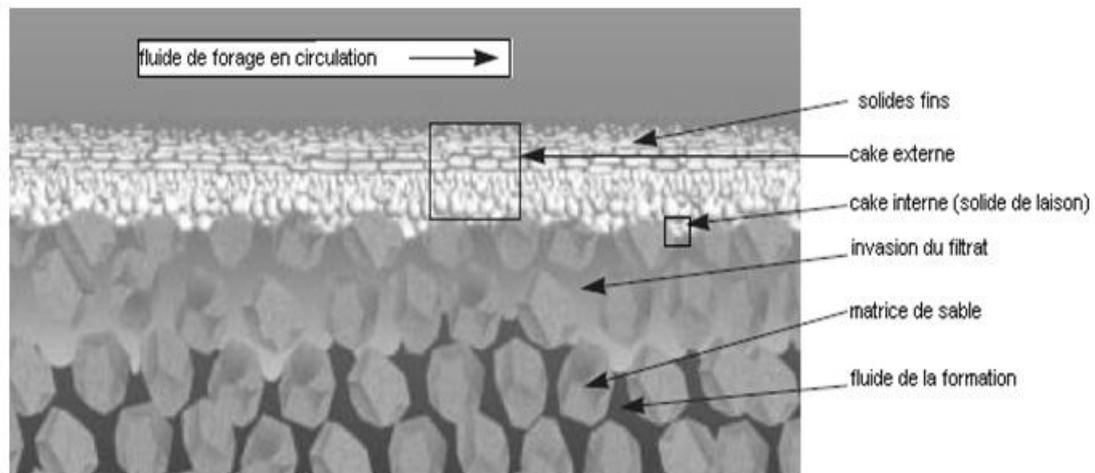


Figure I.14 : Les différentes zones de pénétration du fluide de forage en circulation [17].

Un des paramètres critiques pour la prédiction de l'invasion de la formation par la boue est la perméabilité du cake, et sa variation avec la pression. Des tests de filtration dynamique sur roche réalisées avec des boues à base d'eau, montrent que :

- La formation d'un cake de faible perméabilité sur la paroi est importante pour prévenir une invasion de la formation par les particules solides et le filtrat et obtenir un minimum d'endommagement ;
- L'épaisseur du cake externe dépend de la viscosité de la suspension, du taux de cisaillement et de la perméabilité de la roche ;
- Au tout début de la filtration, avant que le cake ne soit formé, le filtrat est contrôlé par la perméabilité de la roche. La force responsable de l'adhésion des particules à la surface est fonction de la vitesse de filtration. Si le milieu filtrant à une très faible perméabilité, il est possible que le taux de filtration soit si faible qu'aucune particule ne puisse se déposer. Dans ce cas aucun cake externe ne sera formé et le flux de filtrat sera directement contrôlé par le milieu filtrant. On peut donc parler d'une perméabilité critique de la roche en dessous de laquelle aucun cake externe ne peut être formé pour un taux de cisaillement donné. En général, cette perméabilité critique se situe entre 0,1 et 1 mD.

De la même façon, quand la perméabilité de la roche est très grande, il n'y a pas non plus de formation de cake externe.

La perméabilité critique est considérée réduite quand la pression différentielle augmente. Cela peut être particulièrement utile si l'on veut limiter l'invasion d'un milieu par les particules solides.

Il existe également une pression différentielle critique en dessous de laquelle aucun cake ne se forme ce qui résulte en une invasion plus profonde du milieu par les particules solides et le filtrat. Cette influence est marquée pour les roches de faible perméabilité ($K < 1 \text{ mD}$).

Lors des opérations de forage, une différence de pression juste supérieure à la pression différentielle critique peut assurer la formation d'un cake externe et résulter en une invasion minimale de la formation par le fluide.

CHAPITRE II

**Déchets du bois et son
utilisation dans les
fluides de forage**

I.1. Introduction :

Historiquement, Le bois a été utilisé dans les constructions sur la base de connaissances empiriques et en fonction de traditions locales, est une matière première naturelle renouvelable écologique pour autant que le milieu dans lequel il se développe soit géré de façon appropriée[18].Il possède certaines caractéristiques particulières, notamment en ce qui concerne son comportement et sa durabilité, qu'il est nécessaire de connaître si l'on désire le mettre en œuvre de manière adéquate[19].il convient de savoir si ses caractéristiques physiques mécaniques et technologiques la rendent apte à l'emploi auquel on la destine.

Le bois est un matériau polyvalent qui est apprécié pour son prix abordable, son respect de l'environnement. Ses propriétés structurelles uniques en font un choix populaire dans de nombreuses applications.

I.1. Définition du bois :

Le bois est un polymère complexe qui possède une organisation micro-structurelle extrêmement élaborée [18]. Il est constitué par un tissu végétal formant la plus grande partie du tronc des plantes ligneuses, l'examen permet de reconnaître les bois et les classer en deux groupes : les résineux (structure simple) et feuillus (structure complexe) [20].

I.3. Composition chimique du bois :

I.3.1.Constituants élémentaires :

La composition chimique élémentaire du bois varie très peu d'une essence à l'autre. En moyenne elle se répartit, en cent du poids anhydre, de la façon suivante [19] :

• Carbon C	50
• Oxygène O	43
• Hydrogène H	6
• Azote N	1
• Cendres (silice, phosphates, potassium, calcium).	< 1.

A partir de ces éléments, les trois principaux composants qui forment les parois cellulaires du bois sont :

• Le cellulose	40
• L'hémicellulose	20-40
• La lignines	20-30
• Autres molécules organiques	0-10

I.3.2.Composants principaux :

Le bois est composé de quatre polymères principaux que sont la cellulose, la lignine et les hémicelluloses et l'extractibles.

I.3.2.1. La cellulose :

La cellulose (figure II.1), polymère à haute masse molaire dont l'élément de base est un motif cellobiose (deux glucoses), se présente sous forme de fibrilles et constitue la structure de la paroi cellulaire du bois. Elle représente de 40 à 50 % de la masse de matière sèche [21].

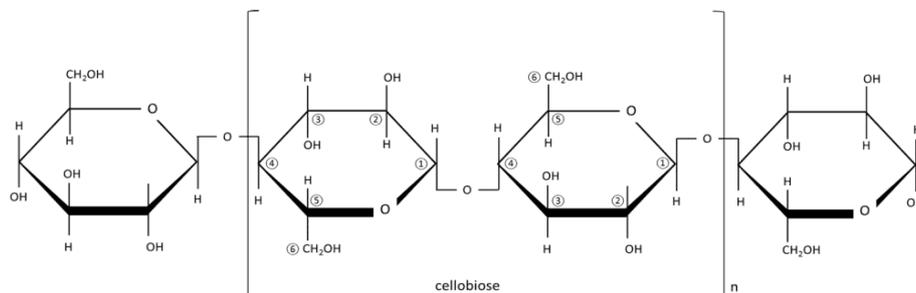


Figure II.1 : La molécule de cellulose [22].

I.3.2.2. La lignine :

La lignine (figure II.2), c'est une macromolécule amorphe et complexe, non linéaire, constituée d'un système aromatique et phénolique [23], constitue la matrice de cette paroi cellulaire et représente de 23 à 33 % de la masse sèche chez les résineux et de 16 à 23 % chez les feuillus [21].

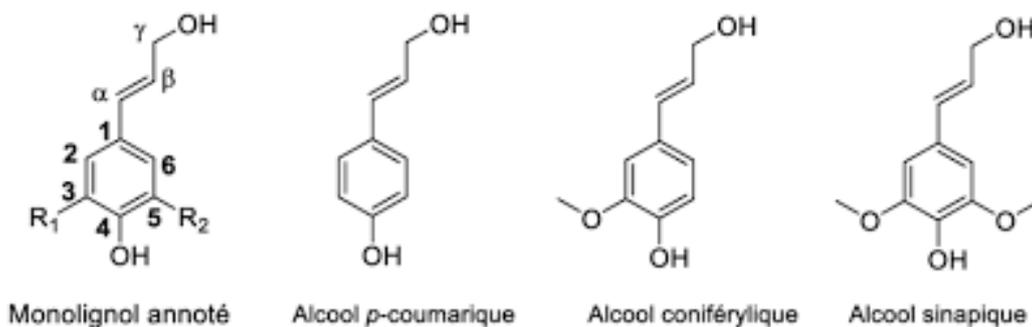


Figure II.2 : unités phénolpropane à la base des lignines et alcools cinnamiques (monolignols) [23].

I.3.2.3. Les hémicelluloses :

Les hémicelluloses, polymères ramifiés à basse masse molaire, sont constituées de sucres en C5 (pentoses) ou C6 (hexoses) et peuvent représenter de 10 à 30 % de la masse de matière sèche [21].

Ils sont des hétéropolymères (plusieurs monomères) ramifiés (présence de chaînes secondaires) de différents sucres. Hémicellulose signifie (à moitié cellulose), autrement dit (presque de la cellulose). Dans la paroi, les hémicelluloses sont étroitement associées à la cellulose et assurent les liaisons chimiques entre l'armature de cellulose et la matrice de lignine [22].

La structure des chaînes des hémicelluloses est très voisine de celle de la cellulose [21].

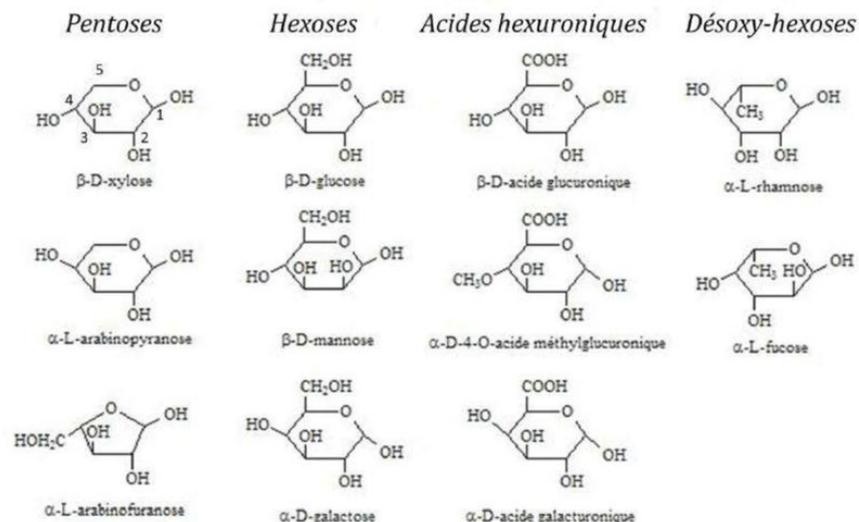


Figure II.3: pentoses, hexoses, acides uroniques et désoxyoses constituant les hémicelluloses du bois [23].

Les hémicelluloses du bois sont souvent divisées en deux catégories, suivant leurs sucres constitutifs dominants (obtenus par hydrolyse) : les hexosanes et pentosanes [23].

I.3.2.4. L'extractibles :

En plus de ces éléments constituant la structure du bois, le bois peut contenir, en masse, de 5 à 30 % d'extractibles (tanins, huiles résines, gomme, etc.) et jusqu'à 1 % de constituants inorganiques, contenant en particulier du calcium, du sodium, du potassium et de la silice, posant quelques problèmes en valorisation énergétique (fusion des cendres)[21].

La composition du bois varie selon l'essence, mais également selon de multiples paramètres tels que la nature du sol, les conditions de croissance, l'âge de l'arbre ou la période d'abattage [21].

II. Les propriétés mécaniques :

La connaissance des propriétés mécaniques est à la base de la mise en œuvre du matériau bois et du classement pour les emplois de structure. Les contraintes et déformations admissibles, les paramètres influençant le comportement mécanique sont autant de facteurs à maîtriser.

Des essais de qualification normalisés et réalisés sur de petites éprouvettes sans défauts permettent de comparer les essences et d'étudier les paramètres intervenant sur le comportement du bois soumis à sollicitation. Des valeurs numériques des caractéristiques mécaniques (principalement module d'élasticité* E et contrainte maximum de rupture * σ_r) en sont déduites. Compte tenu de la variabilité du bois et de la présence de singularité, ces valeurs seront utilisées avec un fort coefficient de sécurité. Des essais d'utilisation à l'échelle 1 sont également entrepris mais présentent un caractère destructif, aussi cherche-t-on des moyens fiables de contrôle automatique ou de connaissance des caractéristiques mécaniques de chaque produit utilisé en structure ; par ailleurs la littérature fournit des valeurs standards

Nous présentons rapidement l'influence des principaux paramètres sur les caractéristiques mécaniques [24].

II.1. Densité :

La masse volumique*, résultante des variations du bois (essence, accroissement, condition de croissance, degré de duraminisation ...) constitue un facteur prépondérant pour apprécier le comportement mécanique. Le module d'élasticité* parallèle aux fibres E_L est proportionnel à la densité.

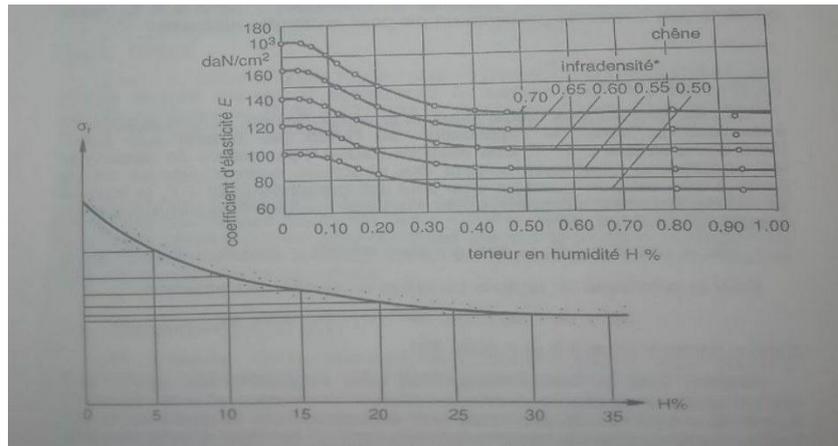


Figure II.4 : Variation du module d'élasticité et de la contrainte de rupture avec l'humidité.

Par contre le module de cisaillement n'est pas corrélé. Que ce soit en traction, compression, flexion statique, cisaillement, une relation linéaire entre la contrainte de rupture* σ_r et la densité est observée, la dispersion des résultats reste cependant importante. Celle-ci est réduite lorsqu'on rapporte σ_r à la masse volumique ρ et on définit la cote de qualité σ_r/ρ . Ainsi une simple mesure de densité permet de donner un excellent renseignement sur les propriétés mécaniques.

II.2. Humidité :

Au-dessus du point de saturation des fibres, la présence d'eau n'affecte ni les qualités de résistance ni les propriétés élastiques. Au-dessous l'influence de l'humidité devient considérable ; aussi est-il nécessaire de ramener tous les résultats à une humidité de référence (12 ou 15%). Les modules d'élasticité comme les contraintes de rupture augmentent lorsque l'humidité diminue (Figure IV.1.) . La relation :

$$\sigma_r H_2 = \sigma_r H_1 (1 - c (H_2 - H_1))$$

Est généralement utilisée, la pente c dépend du type de sollicitation ; la traction longitudinale est la moins influencée par l'humidité alors que la compression longitudinale présente un coefficient c de 5 à 6 %. Dans certains cas la courbe présente un pic pour les faibles humidités.

II.3. Anisotropie :

Les caractéristiques mécaniques et le comportement du bois dépendent fortement du sens de l'application de l'effort par rapport aux directions d'anisotropie L R T. des relations [GUI-87] permettent de déterminer les constants élastiques suivant des directions quelconques. Si on se limite à une rotation φ autour d'un seul axe perpendiculaire à L, le module de Young apparent s'exprime en fonction des modules mesurés suivant les directions $\varphi = 0, 90, 45$:

$$E_{\varphi} = ((\cos^2 \varphi / E_0 - \sin^2 \varphi / E_{90}) \cos 2\varphi + \sin^2 2\varphi / E_{45})^{-1}$$

Pour la contrainte de rupture, on utilise la relation de Hankinson :

$$s_{\varphi} = \sigma_0 \cdot \sigma_{90} / (\sigma_0 \cdot \sin^n \varphi + \sigma_{90} \cdot \cos^n \varphi)$$

Avec n compris entre 1,5 et 2 [KOL-75]

Puisque E ou σ_r sont maximum en sens longitudinal par rapport aux directions transversales, la résistance décroît fortement avec la pente de fil (Figure IV.2.). On remarque que la variation de la pente de fil est moins marquée pour la compression que pour la traction où la flexion est négligeable en cisaillement.

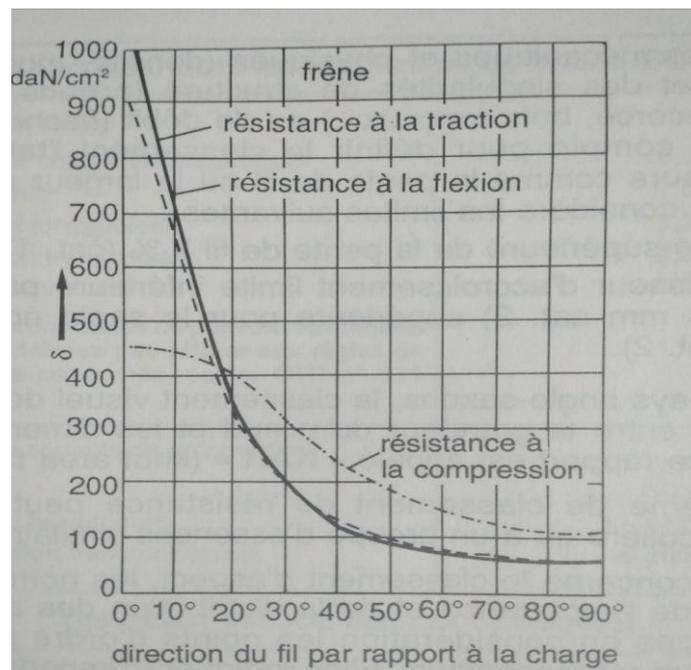


Figure II.5 : Influence de la pente de fil [KOL-75].

II.4. Temps :

Le bois se déforme d'une façon continue lorsqu'il supporte pendant une longue période une charge permanente. La rupture peut se produire pour un effort inférieur de 25% à 40% de la charge maximum. C'est le phénomène de fluage peu important en traction mais très marqué en flexion.

II.5. Température :

Le module d'élasticité comme la contrainte de rupture décroissent lorsque la température augmente (entre -20° et 100°). Lorsque le bois est humide le phénomène est plus complexe compte tenu de la présence de glace. L'influence de la température est en général plus marquée pour le bois de densité élevé ou humide.

III. Etat de l'art :

Cette partie explore l'utilisation des déchets de bois comme alternative aux polymères dans les fluides de forage. Les polymères traditionnellement utilisés présentent des préoccupations environnementales, tandis que l'utilisation de déchets de bois offre une solution écologique. Cette partie examine les études existantes sur l'utilisation de la sciure, des copeaux et de la poudre de bois dans les fluides de forage, mettant en évidence leur potentiel en tant qu'agents de contrôle de filtration et d'ajout de densité. Cette approche présente des avantages économiques et environnementaux, et l'étude expérimentale qui sera présentée dans ce chapitre permettra d'évaluer la viabilité de cette alternative dans l'industrie du forage [25].

III.1. L'importance des polymères dans les fluides de forage et le potentiel des déchets de bois comme alternative durable :

L'utilisation de polymères tels que les dérivés de cellulose est devenue indispensable dans les fluides de forage à base d'eau pour remplacer les boues à base d'huile pour des raisons environnementales. De nombreuses études ont été menées en utilisant différents polymères dans la formulation des boues de forage à base d'eau. Ces études ont montré l'efficacité de certains polymères sur les performances rhéologiques et physico-chimiques du fluide. En comparant les différents polymères, le dérivé de cellulose le plus utilisé, principalement en tant que réducteur de filtrat, est le dérivé de cellulose car il est biodégradable et compatible avec les autres composants de la boue de forage. La carboxyméthylcellulose (CMC) est produite par réaction de la cellulose obtenue à partir de la pâte de bois ou de fibres de coton avec de l'acide chloro-acétique et de la soude (NaOH). Parmi les polymères les plus utilisés en tant que réducteur de perte de fluide dans les boues de forage à base d'eau, on trouve la cellulose polyanionique (PAC) car elle a le pouvoir d'augmenter la viscosité de la suspension. Ce dernier est également considéré comme un modificateur de viscosité du système de boue. Deux types de polymères PAC sont disponibles : à haute viscosité et à basse viscosité. Les deux ont le même degré de contrôle de la perte de fluide, mais des degrés de viscosité différents.

Cependant, la recherche tend à utiliser ou à valoriser certains déchets afin de réduire le coût des opérations de forage. Aujourd'hui, les contraintes environnementales nous poussent à rechercher un composant alternatif pour les fluides de forage qui puisse remplacer les polymères sans perturber les caractéristiques rhéologiques des fluides de forage. Parmi les déchets pouvant être utilisés comme composant des fluides de forage, on trouve les déchets de bois. Selon l'examen de la littérature, on note qu'aucune étude n'a été réalisée sur l'utilisation de la poudre de bois ou de la poussière de bois dans la formulation des fluides de forage. La

sciure de bois désigne tous les déchets de bois obtenus lors de la découpe du bois et produits pendant les opérations d'usinage effectuées sur la matière première (le bois). Les copeaux résultants de la fabrication peuvent être bien récupérés et recyclés dans le domaine de la construction. De nombreuses recherches ont été menées en utilisant de la sciure de bois dans différents domaines et sous différentes formes. Cependant, peu d'études ont été réalisées sur l'utilisation des déchets de bois comme agents de contrôle de filtration et d'ajout de densité dans les boues de forage à base d'eau. Dans ce travail, les auteurs ont constaté qu'un pourcentage optimal en poids de sciure de bois était obtenu, et il est recommandé d'appliquer différentes tailles de sciure de bois si elles doivent servir d'additif de contrôle de poids. Les quantités trouvées sont de 5,9 % en poids de sciure de bois pour 0,5 mm, de 3,8 % en poids de sciure de bois pour 1,0 mm et de 3,5 % en poids pour une sciure de bois supérieure à 1,0 mm. Les auteurs ont également observé que pour un pourcentage en poids supérieur à 5 % de sciure de bois de plus de 1,0 mm, le gâteau de boue était très instable. La réutilisation de différents déchets de bois a également fait l'objet de nombreuses études, mais dans d'autres matériaux que les fluides de forage. Les propriétés structurales du bois et la présence de cavités longitudinales sont intéressantes dans le traitement des eaux usées, en fixant divers éléments indésirables sur les parois du matériau. La sciure de bois, naturelle ou traitée chimiquement, provenant de différentes espèces d'arbres, a fait l'objet de plusieurs études sur leur capacité à fixer différents polluants dans les eaux usées. Cependant, la récupération et l'utilisation de la sciure de bois ou de la poudre de bois en tant que constituant des fluides de forage doivent être étudiées. Pour cela, notre étude se concentrera sur l'utilisation et le recyclage de la poudre de bois par substitution de polymère dans les boues de forage à base d'eau (boues de forage à base d'eau).

III.2. Substitution du CMC, PAC et XCD par de la poudre de bois :

III.2.1. Substitution de PAC et CMC :

Les figures 1 et 2 présentent le comportement rhéologique de la boue de forage à base d'eau étudié avec la substitution de PAC et de CMC par PB à différentes concentrations. D'après les rhéogrammes, toutes les suspensions étudiées présentent un écoulement non newtonien, et leur comportement peut être analysé à l'aide de modèles rhéologiques connus. Les résultats confirment que ces types de boues suivent le modèle de Herschel-Bulkley.

Peu importe la quantité et la taille des particules de bois, le comportement rhéologique des boues étudiées reste cohérent et correspond au modèle de Herschel-Bulkley. En augmentant la teneur en poudre de bois, les contraintes de cisaillement ont tendance à augmenter. De plus, l'ajout de poudre de bois entraîne une diminution de la viscosité à une concentration de 100 kg/L. La substitution de PAC et CMC par de la poudre de bois conduit à une augmentation de la viscosité de 29% qui se stabilise ensuite à des concentrations supérieures. Cependant, au-delà de certains dosages, la valeur de seuil d'écoulement diminue. Ces résultats démontrent que la poudre de bois a un effet viscosifiant et peut être utilisée en remplacement des polymères viscosifiants.

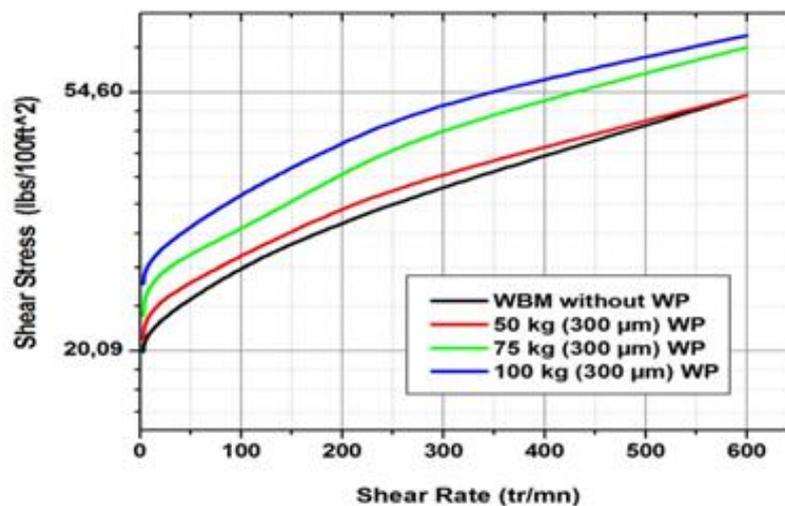


Figure II.6 : PAC_ul et CMC substitués par substitués par poudre de bois (PB de taille = 300 µm) à différentes concentrations.

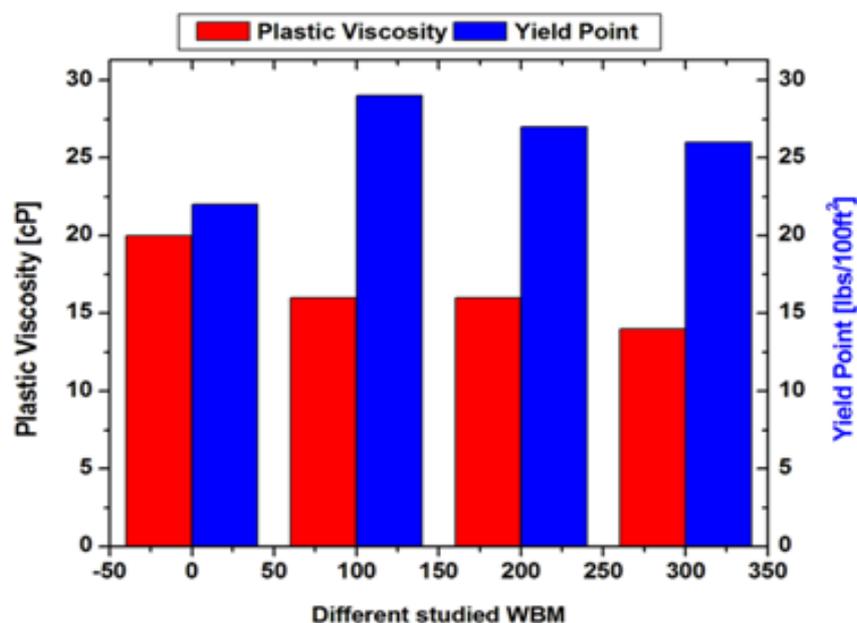


Figure II.7 : Principaux paramètres rhéologiques des boues étudiées : substitution de PAC-ul et CMC.

Dans une autre étude, il a été démontré que par la substitution totale des polymères par la poudre de bois on a obtenu des résultats qui sont satisfaisants et qui montrent que six boues ont présenté des bonnes propriétés physiques et rhéologiques en précisant le yield point, ces boues sont celles avec 40, 50 et 100 g/l, et avec des tailles de particules de 160 µm ; celles avec 50 et 100g/l, avec des dimensions de particules de 315 µm ; et la boue avec 100g/l et des de taille de 610µm.

Il est à noter aussi que la viscosité plastique elle diminue avec l'augmentation de la concentration de la poudre de bois etcela pour les différentes dimensions des particules de

bois mais reste toujours acceptable. Concernant le Ph on constate qu'il est un peu acide, il est autour du 6.

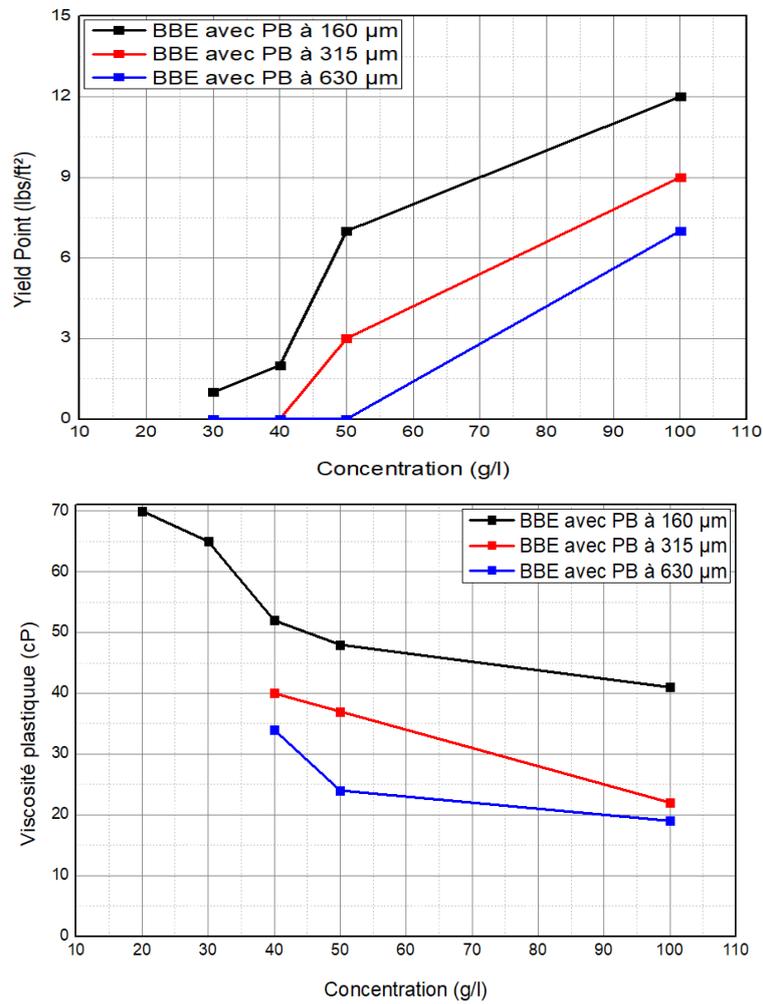


Figure II.8 : Evolution des paramètres rhéologiques (Yp et Vp) des boues en fonction de la taille de la poudre du bois.[25]

CHAPITRE III

**Méthodologie du travail et
caractérisation des matériaux**

Méthodologie du travail et caractérisation des matériaux

Afin d'évaluer l'effet du déchet de bois combiné à la nanosilice sur les comportements rhéologiques de des fluides de forage, des formulations des boues à base d'eau ont été élaborées. Les boues étudiées dans notre travail, ont été choisies selon les systèmes de boue utilisés actuellement pour le forage des puits du pétrole au sud d'Algérie. Pour cela, la méthodologie suivit et les différentes caractéristiques des constituants utilisés dans les formulations des boues, seront présentées dans ce chapitre. Les matériaux utilisés dans cette étude sont la bentonite et les polymères (CMC, PAC-L), Il est nécessaire pour un travail de recherche de réaliser et de déterminer les caractéristiques de ces matériaux.

III.1. Méthodologie du travail :

Pour réaliser notre travail, nous avons procédé à la méthodologie suivante :

1. Caractérisation des matériaux utilisés : Bentonite, Xanthane, CMC, Bois, PAC, Nanosilice ;
2. Formulation de la boue à base d'eau couramment utilisée ;
3. Formulation boues à base de la Nanosilice et à différent dosages des déchets du bois par substitution du polymère CMC et PAC-uL.
 - ✓ Effet des déchets de bois sur paramètre rhéologique des boues étudiées ;
 - ✓ Effet des déchets de bois sur paramètre physico-chimiques des boues étudiées.

III.2. Caractérisations des matériaux :

III.2.1. La bentonite :

III.2.1.1. Caractérisation de la bentonite :

Les caractéristiques sont regroupées dans le tableau :

Paramètres	Exigences de la norme API
Teneur en humidité	10% maximum
Lecteur à 600 tr/mn	22 min
Y _v (lb/100ft ²)	3×V _p max
Filtrat (ml)	15ml max.
PH	9,5 max

Tableau III.1 : Caractéristiques de la bentonite.

III.2.1.2. Composition chimique :

Les compositions chimiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Oxy de	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	PAF/520 °C
%	55-65	12-19	1-3,4	1-3	0,5-1,8	2-3,4	1-2	0,20	8,20

Tableau III.2 : Composition chimique de la bentonite.

III.2.2. Le Barazane :

Dans les fluides de forage, le xanthane est largement utilisé en tant que viscosifiant vu sa qualité rhéologique, sa résistance vis-à-vis de la salinité, sa bonne stabilité thermique et sa biodégradabilité. Le xanthane est un polysaccharide produit par une bactérie appelée "Xanthomonas campestris" intervenant dans le métabolisme de certains végétaux. L'obtention du xanthane suit un processus complexe. Les différentes étapes de mise en œuvre conditionnent les propriétés finales du polymère: composition finale de la poudre, masse molaire, composition chimique du motif, rhéologie, etc.

III.2.2.1. Les avantages :

- ✓ Aide à se disperser facilement dans les boues d'eau douce et les saumures ;
- ✓ Aide à fournir des propriétés thixotropes et des caractéristiques d'écoulement non newtoniennes sur une large plage de salinité à des faibles concentrations ;
- ✓ Aide à fournir une excellente suspension sans avoir besoin d'argile ;
- ✓ Stable à 250°F (121°C) ;
- ✓ Aide à minimiser le potentiel de dommages à la formulation.

III.2.3. La Carboxyméthylcellulose (CMC) :

La carboxyméthylcellulose (CMC) a été employée depuis 1947 dans divers fluides de forage à base d'eau comme réducteur de filtrat ou comme viscosifiant. La CMC est un polymère linéaire anionique à base de cellulose partiellement.

III.2.3.1. Les avantages :

- ✓ Polymère largement disponible et à faible coût pour contrôle de perte de fluide ;

- ✓ Il est efficace en assurant le contrôle de la filtration dans la plupart de l'eau basé sur les fluides de forage ;
- ✓ Il est efficace en faibles concentrations ;
- ✓ Il est Non toxique.
- ✓ Peut améliorer la fabrication de boue volume, réduire les pertes de filtration ;
- ✓ La boue contenue avec CMC a une bonne stabilité, il ne peut perdre de l'eau même si la température est supérieure à 150 °C.

III.2.4. Polyanionique Cellulose:

Polyanionique Cellulose connu sous le nom PAC, est l'un des polymères utilisés dans les fluides de forage. Il soluble dans l'eau polymère conçue pour contrôler la perte de liquide et augmente la viscosité dans des boues à base d'eau.

III.2.4.1. Applications :

Le polyanionique cellulose (PAC) contrôle la perte de liquide dans l'eau douce, l'eau de mer, KCL et les boues salées forme une mince, résistance et à faible gâteau de filtration de la perméabilité qui minimise le risque différentiel et l'invasion de filtrat de solides de la boue. PAC résiste aux attaques bactériennes-Rial, éliminant le besoin de biocides ou conservateurs. Il est efficace à de faibles concentrations avec le traitement normal de perte de fluide allant à 0,71 à 2,85 kg/m³, (0,25 à 1 lb/bbl). PAC développe également une viscosité à un degré qui dépend de la concentration de 1,90 kg/m³ (0,67 lb /bbl) va produire une boue à l'eau douce 15 CP de viscosité sans supplément des solides, 2,86kg/m³ (1.0 lb/bbl) de PAC-L va produire aussi un 15CP de viscosité dans un chlorure de sodium saturé. Le PAC-L est un polymère anionique qui va s'attacher et encapsuler schistes et déblais de forage exposée. Ce polymère de protection "enveloppe" et inhibe la dispersion de schiste découpées permet de limiter les interactions fluides avec des schistes exposés.

III.2.4.2. Avantages :

- Contrôle des pertes des fluides.
- Assure la viscosité convenable.
- Efficace à de faibles concentrations pour contrôler la perte de fluide, et bâtiment viscosité.
- Encapsule les particules de schiste inhibé l'enflure et la dispersion.
- Résiste à l'attaque bactérienne, nécessite pas de biocides ou préservatifs.
- Fonction sur une large gamme de niveau salinité, la dureté et le Ph.
- Applicable à toutes les boues à base d'eau, allant de faible teneur en solides, non dispersé systèmes polymères à haute densité et les systèmes dispersés.
- Compatible avec tous les additifs de boue.
- No toxique.

III.2.4. Déchets de Bois :

Dans cette étude, nous avons préparé la poudre de bois de taille 315 micromètres en utilisant la technique de tamisage. Le bois utilisé a été récupéré auprès d'une menuiserie. L'objectif de cette préparation était d'explorer si cette poudre de bois pourrait remplir le même rôle que le

Carboxyméthylcellulose (CMC) et le Polyanionique Cellulose (PAC). En substituant ces polymères synthétiques par la poudre de bois, nous avons cherché à évaluer si elle pourrait offrir des performances comparables en termes de propriétés rhéologiques, de filtration et de contrôle de la viscosité.



Figure III.1 : Déchet de bois sous forme poudre.

III.2.5. La Nanosilice :

La Nanosilice(NS) est une forme amorphe de dioxyde de silicium qui se présente sous la forme de particules très fines, généralement inférieures à 100 nanomètres. Elle a une grande surface spécifique et peut former des suspensions colloïdales stables. Grâce à sa petite taille, la Nanosilice a la capacité de renforcer les matériaux, et d'améliorer leur résistance mécanique.

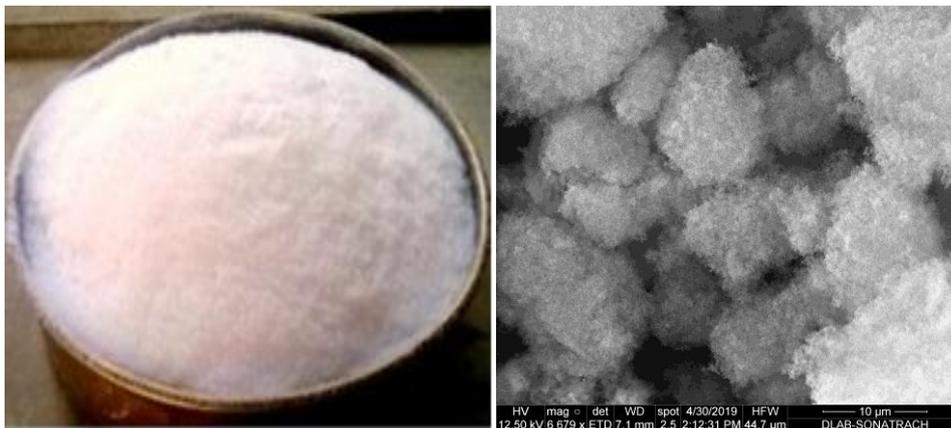


Figure III.2: Nanosilice utilisée.

III.3. Détails des boues de forage étudiées :

III.3.1. Procédure et protocole de préparation de la boue :

III.3.1.1. Boue à base d'eau normale:

- Dans 400 ml d'eau en ajoute la soude caustique et mélanger dans le mixeur pendant 5 minutes ;
- Ajouter le carbonate de sodium et mixer pendant une autre 5 minutes ;
- Ajouter la bentonite dans le mélange tout en agitant continuellement pour obtenir une dispersion uniforme pour 20 minute ;
- Ajouter le PAC-uL et mixer pour 5 minute ensuite ajouter le PAC-r en continue l'agitation ;
- Après 5 minute en ajoute le CMC, ensuite le XCD en agitant pendant 10 minute ;
- A la fin, ajouter le KCL et continuer l'agitation pendant 10 minute ;
- Laisser le mélange pendant 24 heures avant de commencer l'étude rhéologique



Figure III.3 : dispositif de préparation de la boue.

III.3.1.2. Boue avec Nanosilice et poudre de bois :

Après avoir préparé le mélange de déchet de bois avec 2.0% de Nanosilice, une procédure de préparation des boues à base d'eau en tenant compte de la substitution des polymères importés par le mélange du déchet de bois dopé par la Nanosilice.

- Suivre les étapes de la boue à base d'eau normale jusqu'à la bentonite ;
- En ajoute la poudre de bois combinée à la Nanosilice qui remplacent le CMC et le PAC UL pendant 10 minute ;
- Après en ajoute le PAC-r, XCD et le KCL respectivement.

III.4. Composition des différentes boues :

III.4.1. Formulation de la boue à base d'eau couramment utilisée :

Formulation à base d'eau : 400 ml

Une densité requise à la formation géologique est nécessaire. Une densité pour assurer une pression hydrostatique afin d'équilibrer la pression exercée à la couche géologique.

Densité égale à 1.04 sg

PH : 10

Tableau III.3 : caractérisation de la boue à base d'eau

Constituants	Concentrations [kg/m ³]
Soude caustique	0.4
Carbonate de sodium	0.28
Bentonite	0.8
PAC-uL	2.28
PAC-r	0.28
CMC	2.4
XCD	0.28
KCL	16



Figure III.4: Boue à base d'eau.

III.4.2. Formulations des boues; à différent dosage des déchets et Nanosilice fixe : en tant viscosifiant par substitution des polymères :

❖ **Dosage 20kg :**

Formulation à base d'eau 400 ml

Densité : 0.95sg

PH : 8

Tableau III.4 : formulation de boue à 20kg bois.

Constituants	Soude caustique	Carbonate de sodium	Bentonite	Bois	Nanosilice	PAC-R	XCD	KCL
Dosage kg/m ³	0.4	0.28	0.8	20	0.8	0.28	0.28	16

❖ **Dosage 30kg :**

Formulation à base d'eau 400 ml

Densité 1.02 sg

PH :8

Constituant	Soude caustique	Carbonate de sodium	Bentonite	Bois	Nanosilice	PAC-r	XCD	KCL
Dosage kg/m ³	0.4	0.28	0.8	30	0.8	0.28	0.28	16

Tableau III.5 : formulation de boue à 30g bois

❖ **Dosage 40kg :**

Formulation à base d'eau 400 ml

Densité 0.92 sg

PH :8

Tableau III.6 : formulation de boue à 40kg bois

Constituant	Soude caustique	Carbonate de sodium	Bentonite	Bois	Nanosilice	PAC-R	XCD	KCL
Dosage kg/m ³	0.4	0.28	0.8	40	0.8	0.28	0.28	16

La figure ci-dessous montre les échantillons des boues formulées dans cette étude.



Figure III.5 : Boues à base d'eau avec différents dosages de bois-Nanosilice.

CHAPITRE IV

Résultats et Interprétations

Résultats et Interprétations

Ce chapitre traitera l'étude des principales propriétés rhéologiques et physicochimiques de la boue contenant des différents dosages de poudre de bois combinée à la Nanosilice fixe par substitution des polymères CMC et PAC-uL habituellement utilisés. Dans ce même chapitre, les interprétations de l'ensemble des résultats obtenus à travers de cette étude

Afin de voir l'effet du déchet de bois (à différents dosage choisis) combiné à la Nanosilice (quantité fixe) sur les propriétés des boues de forage en substituant les polymères d'agent de viscosité et réducteur de filtrat (CMC et PAC), des boues ont été élaborées. Pour voir aussi l'effet de dosage de la poudre de bois, nous avons une taille obtenue par tamisage du déchet de bois récupéré de lamenuiserie et qui est 315 μm . A cet effet, des essais rhéologiques et des tests physico-chimiques ont été effectués sur ces boues. Les résultats de ces essais ont été comparés avec une boue de forage de référence utilisée actuellement pour le forage des de pétrole à Hassi Messaoud/Sud d'Algérie.

IV.1. Utilisation du déchet de bois combiné à la Nanosilice :

IV.1.1. Paramètres Rhéologiques :

La figure IV.1 montre l'évolution des principaux rhéologiques des boues en fonction du dosage de déchets de bois dopé à la Nanosilice (Bois-NS). D'après ces résultats, on remarque clairement qu'une diminution des paramètres rhéologiques Yield point (Yp) et viscosité plastique (Vp) est enregistrée après substitution totale des polymères à 10 kg/m³ de mélange Bois-NS. Cependant, une augmentation considérable de la Yield point et Viscosité plastique avec l'augmentation du dosage Bois-NS.

Tableau IV.1 : Paramètres Rhéologiques.

Dosage [kg /m ³]	Vp [cP]	Yp[1b/100ft ²]
0	37	60
20	7	21
30	10	60
40	44	145

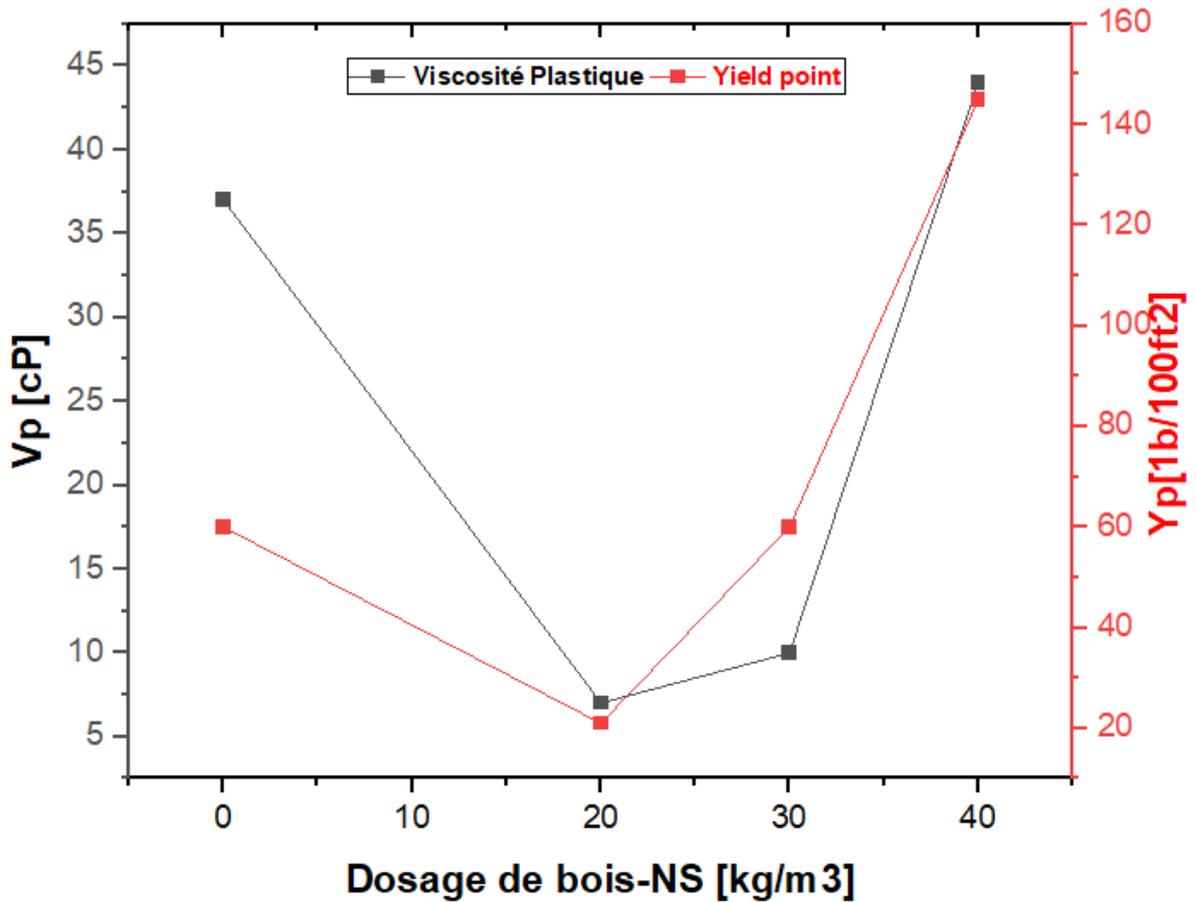


Figure IV.1 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur les paramètres rhéologiques.

La Figure IV.2 montre la variation de la viscosité plastique (Vp) et viscosité apparente (Va) des boues en fonction du dosage Bois-NS. Il est remarquable que la viscosité Vp diminue de 37 à 7 cP pour dosage de 0 à 20 kg/m³, puis au-delà elle augmente légèrement à 44 cP pour dosage de 40 kg/m³. Il est remarquable d'après cette figure que la viscosité apparente Va a diminuée de 67 à 17,5 pour dosage 0 à 20 kg/m³ du Bois-NS, puis il augmente à 40 cP ensuite diminue à 11,65 cP enregistré de dosage 40 kg/m³.

Tableau IV.2 : Paramètres Rhéologiques.

Dosage [kg/m ³]	Vp [cP]	Va [cP]
0	37	67
20	7	17.5
30	10	40
40	44	11.65

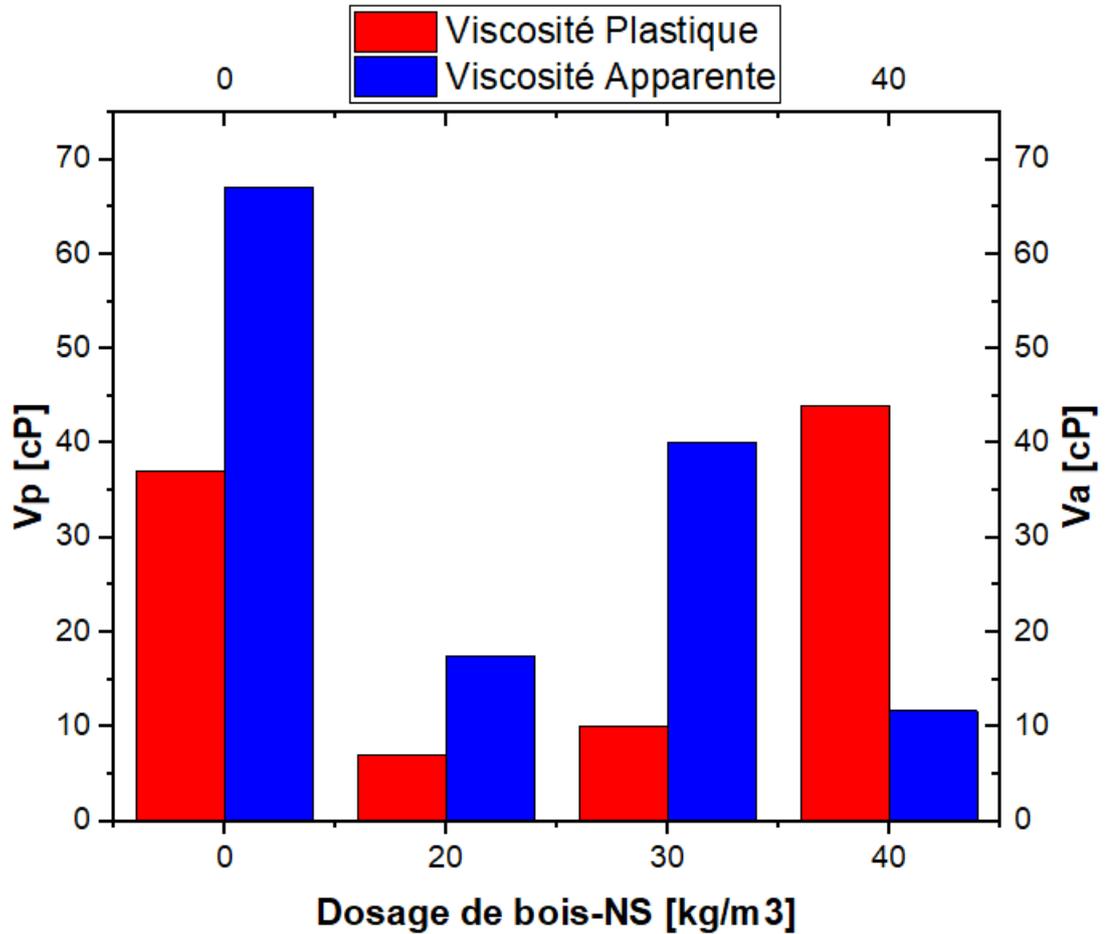


Figure IV.2 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur les paramètres rhéologiques.

IV.1.2. Comportement rhéologiques :

Pour pouvoir identifier le comportement rhéologique de boue étudiées nous avons tracé la courbe rhéologique qui représente la relation contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement. Le résultat obtenu est donné dans le tableau ci-dessus et sous forme de rhéogramme la figure.

Tableau IV.3 : Lectures des vitesses de cisaillement des boues à l'aide du Rhéomètre Fann.

Lecteur	0kg/m ³	20kg/m ³	30kg/m ³	40kg/m ³
600	134	35	80	233
300	97	28	70	189
200	79	25	54	149
100	57	20	42	109
60	45	15	35	84
30	33	12	29	57
6	15	7	19	28

La **figure IV.3** montre le comportement rhéologique des boues étudiées. D'après les rhéogrammes, toutes les boues montrent un écoulement non-Newtonien. Le comportement de ces boues peut être identifié par l'utilisation des modèles rhéologiques existants dans la littérature. En effet, la **figure IV.3** montre clairement que ces boues ont un seuil d'écoulement ce qui prouve qu'elles ont un comportement non-Newtonien suit le modèle de Bingham. D'après plusieurs chercheurs qui ont constaté que le comportement de ces types des boues suit le modèle de Herschel Bulkely.

Il est connu que le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques (fluides à seuil). Il s'agit en fait d'une loi de puissance à laquelle on a ajouté le terme τ_s .

$$\tau = \tau_s + k\dot{\gamma}^n$$

Où n l'indice d'écoulement et k la consistance du fluide.

Si $n = 1$, le fluide a un comportement Binghamien,

Si $n < 1$, le fluide est dit rhéo-fluidifiant avec seuil,

Si $n > 1$, le fluide est dit rhéo-épaississant avec seuil.

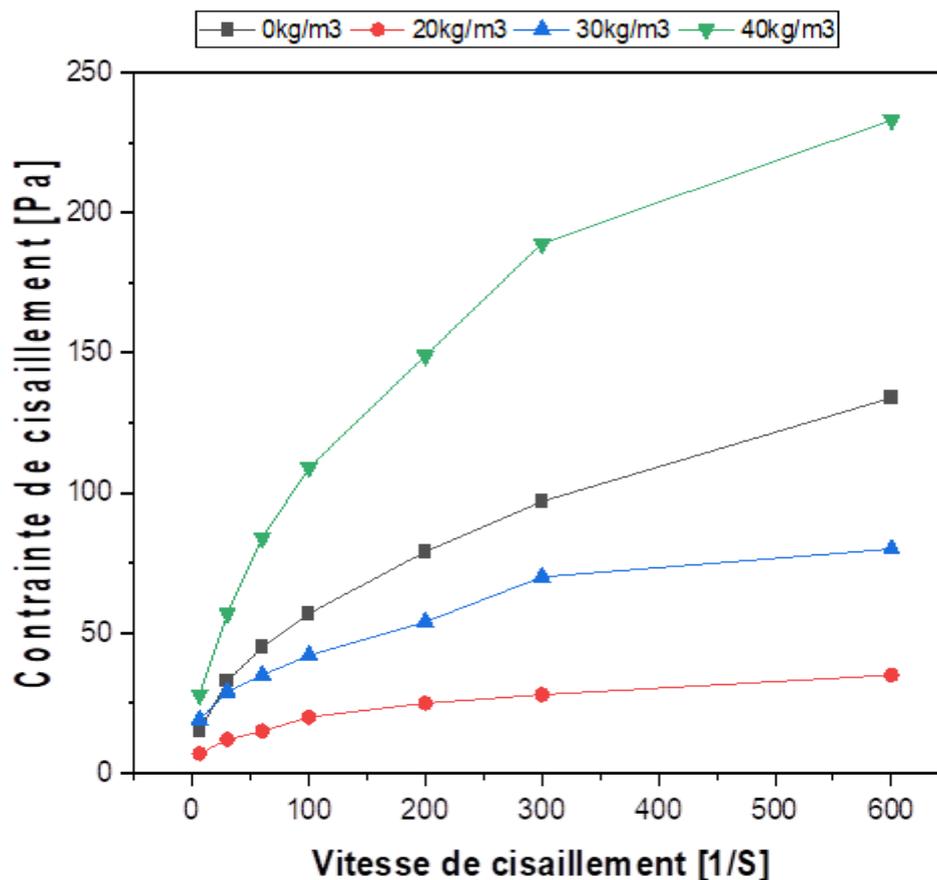


Figure IV.3 : Comportement rhéologiques des boues à différent dosage du bois-Nano-Silice.

IV.1.3. Résultats des tests rhéologiques par Viscosimètre VT500 :

La figure IV.4 représente l'évolution la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des boues à différents dosages de Bois-NS. On observe en général une augmentation de la contrainte de cisaillement au fur à mesure le dosage du Bois-NS augmente. Comparons les courbes pour chaque dosage, il est clairement remarquable que la contrainte de cisaillement augmente de manière significative avec la substitution totale des polymères par le mélange Bois-NS.

Cette augmentation est due à l'accroissement de la concentration de particules de bois-NS et vue la nature hygroscopique du bois qui absorbe beaucoup d'eau et aussi la surface spécifique de la Nanosilice. Cette augmentation de la concentration de particules de bois renforce la résistance à la déformation lors de l'application d'une force de cisaillement, ce qui se traduit par une augmentation de la contrainte de cisaillement observée.

La recherche menée par Haider Soumia confirme ça selon laquelle l'augmentation du dosage de bois dans la formulation de la boue de forage entraîne une augmentation significative de la contrainte de cisaillement.

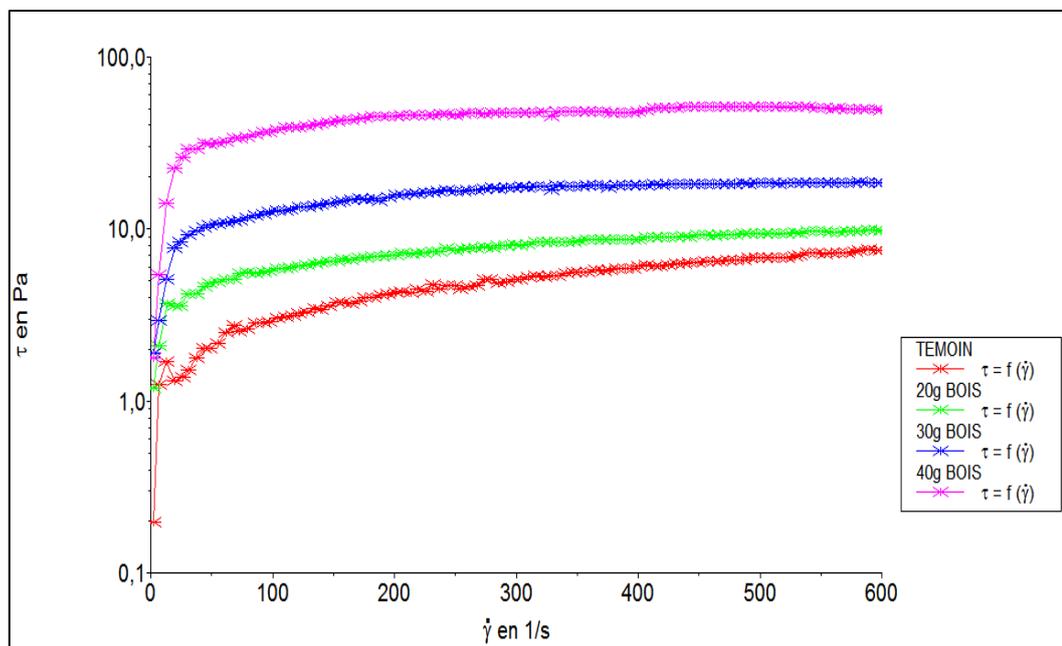


Figure IV.4 : Effet de la teneur du Bois-Nanosilice sur la viscosité des boues étudiées.

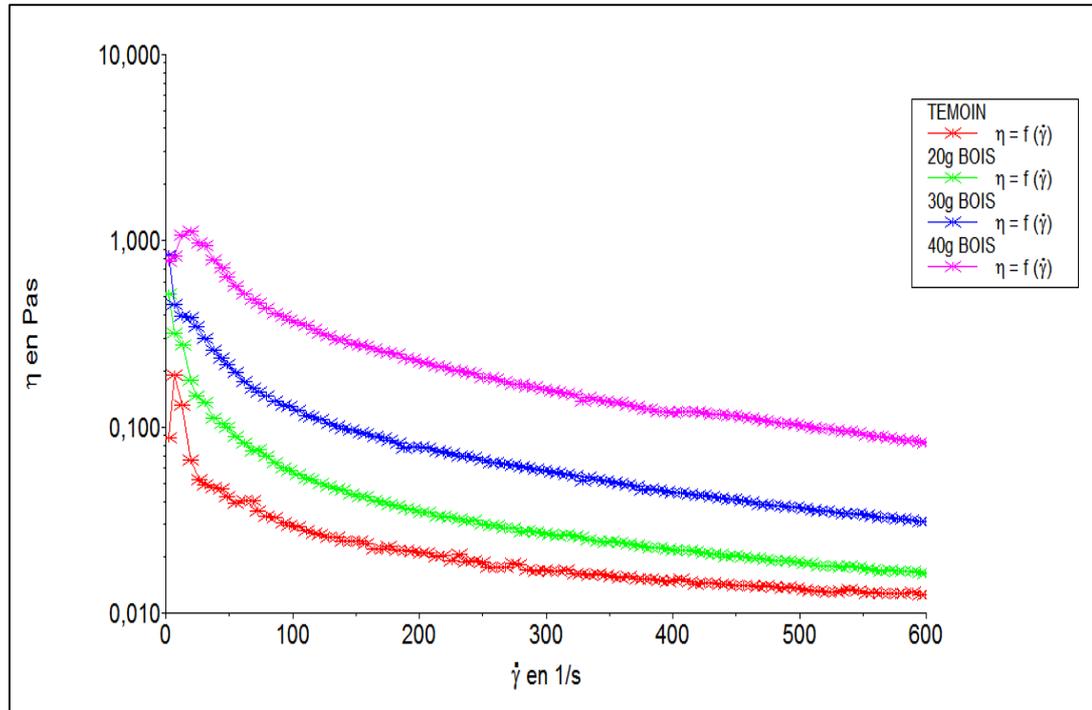


Figure IV.5: effet de la teneur du Bois--Nanosilice sur la contrainte de cisaillement des boues étudiées.

IV.1.4. Paramètre rhéologiques à une vitesse de cisaillement ($400S^{-1}$) :

Afin de mieux comprendre l'effet du dosage Bois-NS sur les paramètres rhéologiques de la boue, nous avons déterminé ces paramètres à une vitesse de cisaillement fixée à $400S^{-1}$ qui correspond à une circulation de la boue dans le puits de forage. Les résultats sont représentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : variation de la contrainte de cisaillement et de la viscosité à $400 s^{-1}$.

Bois-NS	Contrainte de Cisaillement	Viscosité
0	6.0444	0.0151
20	8.7381	0.0218
30	17.8704	0.0447
40	47.9610	0.1199

Il est remarquable d'après les histogrammes de la figure IV.6, que plus le dosage Bois-NS augmente plus les paramètres de la boue augmentent. Ce qui prouve que le déchet de bois dopé à Nanosilice a fait augmenter la contrainte et la viscosité par leur nature et surface spécifique.

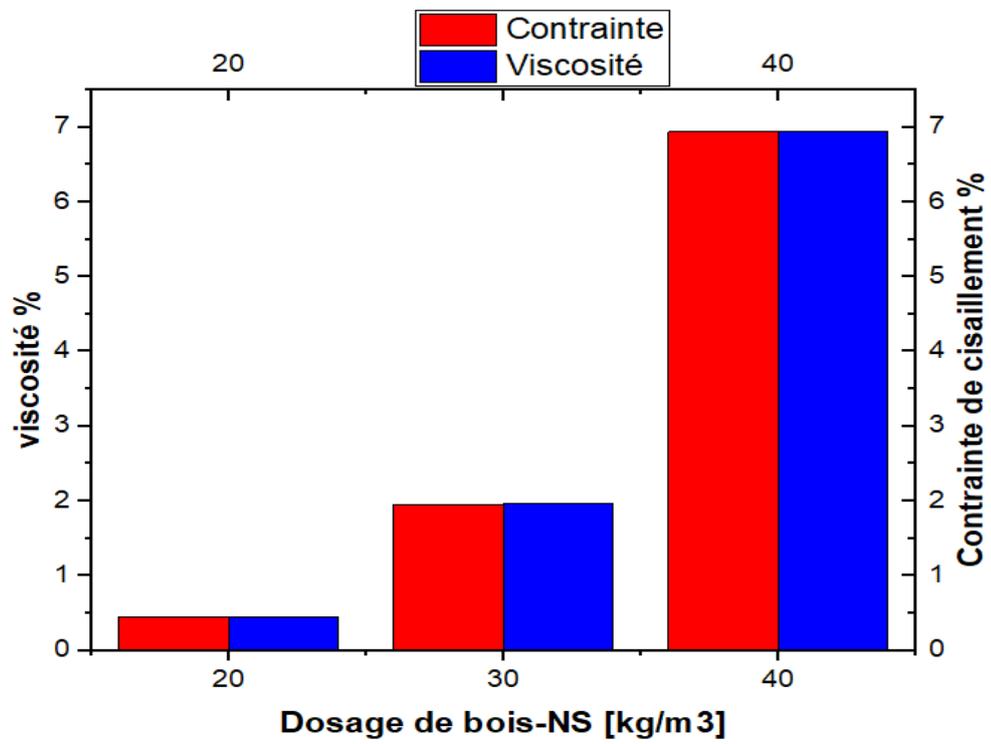


Figure IV.6 : Viscosité et la contrainte par rapport le dosage de bois-NS.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était le recyclage et la valorisation de la poudre de bois (déchets de lamenerie de bois) dans la formulation des boues de forage à base d'eau en tant que viscosifiant (par substitution totale du polymère CMC) et comme réducteur de filtrat (par substitution totale du polymère PAC-ul) qui sont très coûteux et font souvent élever le coût de l'opération de forage des puits pétroliers.

L'utilisation de déchet de bois à différents dosages (20, 30, 40 Kg/m³) combiné à la nanosilice (0.8g). Après l'obtention et traitement des résultats, il en résulte que :

- Les propriétés rhéologiques (Y_p , V_p) des boues étudiées ont nettement améliorées en présence des déchets de bois avec un dosage 20 au 40 Kg/m³ quelque soit les fractions utilisées. Cependant, au-delà 40 Kg/m³ de bois les boues présentent des propriétés rhéologiques très élevées ayant une viscosité qui peut freiner l'opération de la circulation du fluide dans le puits ;
- Les boues étudiées ont un comportement non-Newtonien quelque soit le dosage des déchets de bois ;
- Il est à noter que la viscosité et la contrainte de cisaillement augmentent en augmentant le dosage de BOIS-NS.

En conclusion, il est évident que les propriétés rhéologiques s'améliorent avec l'augmentation de dosage de BOIS-NS dans ces boues de forage. Cela signifie qu'elles sont meilleures, voire plus performantes, que les boues de forage traditionnelles utilisées dans les opérations de forage. De plus, elles offrent l'avantage d'être plus économiques, car elles utilisent des déchets de bois. En utilisant cette approche novatrice, non seulement nous pouvons améliorer l'efficacité des opérations de forage, mais nous pouvons également contribuer à la gestion durable des ressources en utilisant des matériaux recyclés.

Références bibliographie

Référence Bibliographique

Référence :

- [1] : Landroit, G. (1968). Fluide de forage, édition Technip, France.
- [2] : Khodja, M. (2008). Les fluides de forage: étude des performances et considérations environnementales (Doctoral dissertation).
- [3] : Nguyen, J. (1993). P.,«fluide de forage». Technique d'exploitation pétrolière, le Forage Technip.
- [4]: Garcia, C., & Parigot, P. (1968). Boues de forage (Les). Editions Technip.
- [5] :Gray, G. R., & Darley, H. C. (1980). Composition and properties of oil well drilling fluids.
- [6] : Ricard, G. (1958). Introduction à la technique des boues de forage. Soc. des éd.Technip.
- [7] :Stroud, B. K. (1925). Use of Barytes as Mud Laden Fluid.OilWeekly, 29-30.
- [8] : Daddou, M. (2009). Les caractéristiques physiques de la boue de forage, SONATRACH Algérie.
- [9] :Ferguson, C. K., & Klotz, J. A. (1954). Filtration from mud during drilling.Journal of PetroleumTechnology.
- [10] : Groupe Français de Rhéologie. (1990). "Dictionnaire de rhéologie", Groupe français de rhéologie, volume 56 p.
- [11] : Persoz, B. (1969). "La rhéologie", Monographie Masson et Cie.
- [12] : Coussot, P. Piau, M. (1993). L'écoulement des Boues. La recherche, 24(258), 1084-1091.
- [13] : Abouaziz. M, « introduction aux polymères hydrosolubles » IAP, 16. Mai.2001.
- [14] :Fraser L.J. (1987). "New Method Accurately Analyzes PHPA's in Muds". Oil Gas J.:(United States), 85(27).
- [15] :Caenn, R. Chillingar, G. V. (1996). Drilling fluids: State of the art.journal of petroleum science and engineering, 14(3-4), 221-230.
- [16] : De lamballerie, G. (1969). Boue à base d'huile. Collection Colloques et Séminaires IFP, Edition Technip.
- [17] :American Petroleum Institute. (1969). Principles of Drilling Fluid Control, 12th ed., I, University of Texas, Continuing Education Petroleum Extension service, Austin.
- [18] :J,Natterer.J-L, Sandoz. M,Rey.(1996). Construction en bois Matériau technologie et dimensionnement, EPFL Press.
- [19] : Dupraz, P. A., Mooser, M., &Pflug, D. (2009). Dimensionnement des structures en bois: Aide au calcul basé sur la norme SIA 265" Constructions en bois". PPUR presses polytechniques.

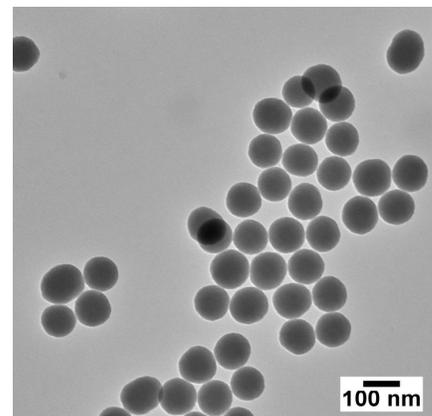
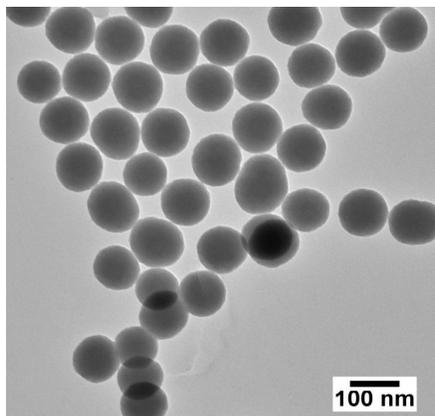
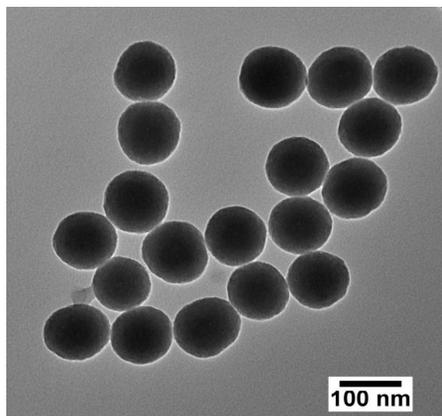
Référence Bibliographie

- [20] : Bailleur, E. Heurtematte, J. (1972). Industries du bois. Techniques et normalisation. Paris.
- [21] : Deglise, X. Donnot, A. (2004). Bois énergie. Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique, (BE8535).
- [22] : Trouy, M-C. (2015). Anatomie du bois :formation, fonctions et identification. Éditions Quae.
- [23] : Stevanovic, T. Perrin, D. (2009). Chimie du bois. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [24] : Patrick, M. Cépadués-Editions. (1992). BOIS ET PRODUCTIQUE.
- [25] : Haider, S. (2021). Valorisation des déchets de bois dans la formulation des fluides de forage à base d'eau. Univesité-M'hamedbougara Boumerdes. Mémoire de doctorat.

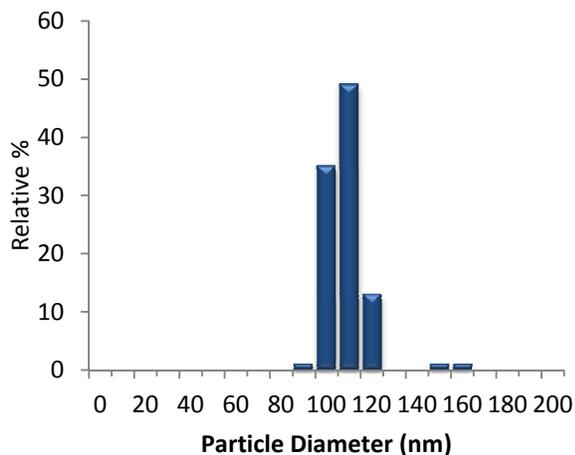
100 nm Non-Functionalized NanoXact™ Silica

Lot Number: JEA0234

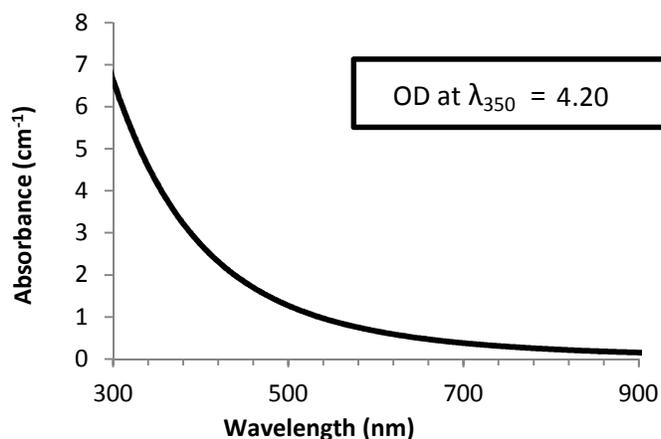
Diameter (TEM):	104 ± 9 nm	Hydrodynamic Diameter:	111 nm
Coefficient of Variation:	8.6 %	Zeta Potential:	-59 mV
Surface Area (TEM):	25.9 m ² /g	pH of Solution:	7.4
Mass Concentration (SiO₂):	10.5 mg/mL	Particle Surface:	Silanol
Particle Concentration:	8.1E+12 particles/mL	Solvent:	Milli-Q Water



Size Distribution



Optical Properties



Characterization Instrumentation

Diameter and Size Statistics:

Mass Concentration:

Spectral Properties:

Hydrodynamic Diameter/Zeta Potential:

JEOL 1010 Transmission Electron Microscope

Gravimetric Analysis- AND HM-202

Agilent 8453 UV-Visible Spectrometer

Malvern Zetasizer Nano ZS.

Shake vigorously before use. Bath sonicate if needed. Storage: 25°C. DO NOT FREEZE.