

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie des Procédés

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de

Master/Start-Up

**Valorisation d'un biopolymère dans la formulation d'un
fluide de forage pétrolier à base d'eau WBM
(SONATRACH - HASSI MESSAOUD)**

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

MENAI May-Hadil

CHARCHARI Amani

Sous la direction de :

Dr. BENDJABALLAH Malek

Juin 2023

Remerciements

Tout d'abord, On commence par remercier et rendre grâce à ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'entamer et de terminer ce modeste travail. Également nous remercions infiniment nos parents pour nous avoir permis de poursuivre nos études dans les meilleures conditions.

*En second lieu, nous remercions notre encadrant **Dr. BENDJABALAH. Malek** Pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion, et pour ses orientations et son encouragement pour mener à bien ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements et reconnaissances à **Mr M. GHORAB** directeur de la direction laboratoires et carothèque centrale -DLCC-SONATRACH - HASSI MESSAOUD et à **Mr HAZEM** Chef Service Huiles et Gaz qui nous ont permis d'effectuer notre stage dans les meilleures conditions.*

*Aussi nous tenons à remercier chaleureusement tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'enrichissement et au bon déroulement du stage pratique en particulier: **M^{me} BENSETTI Khalida**, **Mr KAFI Hamza**, **Mr AYAD Hichem** et **M^{me} BENHISSEN Affaf**.*

*Sans oublier à remercier le spécialiste Italien **Giovanni. CRECENZI** pour nous avoir partager sa grande expérience dans le domaine des boues de forage ; ses précieux conseils et orientations nous ont été très bénéfiques.*

En fin, nous tenons à remercier tous les enseignants de département de Génie des procédés qui ont énormément contribuer à notre formation.

Dédicace

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect la reconnaissance...

Je dédie ce modeste travail

*A ma très chère maman **NORA**, la flamme de ma vie*

*Au meilleur des pères **ZIDANE***

Qui sont ma source de vie, d'amour et de bonheur, pour leurs soutiens, leurs patiences,

leurs encouragements durant mon parcours scolaire.

*A mon cher et unique frère **RABIE**, qui est ma source d'espoir et de motivation.*

*A ma meilleure copine **KAWTHER**,*

A tous mes amis et collègues de la promo de génie des procédés.

A tous mes enseignants.

A tous qui sont chères.

MAYHADIL

Dédicace

*Grace à Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la force pour
réaliser ce mémoire.*

Je dédie ce modeste travail

A vous mes chers parents

*Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils, assistance et
soutient morale, en témoignage de nos reconnaissances et nos affections, dans l'espoir
que vous en serrer fiers*

A mes chères sœurs

Wiem, Mayssoune et Djouri à qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite

A ma cher amie Lydia

*A Tous les enseignants et tous mes camarades de Département de génie des procédés
À tous ceux qui me connaissent*

AMANI

Résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet START UP de l'université 8Mai45 Guelma.

Actuellement dans le domaine du forage des puits du pétrole, la recherche a la tendance à utiliser des nouvelles technologies en incluant des composants alternatifs pour les fluides de forage. Parmi les composés qui peuvent être utilisés dans les fluides de forage, les noix de caroube. L'aspect de ce projet a été inséré dans un volet de valorisation des déchets agricoles afin de minimiser la dégradation du milieu naturel. Cette partie du travail a porté sur la valorisation d'un biopolymère issu des noix de caroube à cause de ses propriétés techno-fonctionnelles (stabilisant, épaississant, agglomérant et gélatinant). Dans le but de valoriser ces graines de caroube, il a été procédé à des traitements préliminaires : Décorticage par voie acide (macération), opérations de lavage, trempage, séchage et broyage.

Au cours de ce travail, nous avons voulu vérifier la conformité et étudier les performances de la gomme de caroube, qui est un biopolymère biodégradable, d'origine végétale issu de la biomasse, procuré localement, que nous substituons aux autres produits conventionnels dans le domaine de fluide de forage pétrolier à base d'eau.

En particulier, nous avons étudié l'effet de la gomme de caroube en tant qu'un réducteur de filtrat au lieu de la cellulose polyanionique (PAC LV), et en tant qu'un viscosifiant au lieu de la gomme de Xanthane qui sont des biopolymères importés. Ces polymères font souvent augmenter le prix de revient d'une opération de forage.

Enfin une boue de forage à base d'eau formulée en utilisant la gomme de caroube écologique et à faible coût a été développé par substitution totale de biopolymère de la gomme de Xanthane et partielle de (PAC LV) donnant de meilleures propriétés rhéologiques et de contrôle de perte de fluide exigences nécessaires pour un bon fonctionnement de forage de puits de pétrole.

Mots clés : Forage, Fluide de forage, biopolymères, rhéologiques.

Abstract

This study is part of the START UP project of the University 8 May 45, Guelma.

Currently in the field of oil well drilling, research tends to use new technologies including alternative components for drilling fluids. Among the compounds that can be used in drilling fluids, carob nuts. The aspect of this project has been inserted into a section for the recovery of agricultural waste in order to minimize the degradation of the natural environment. This part of the work focused on the development of a biopolymer derived from carob nuts because of its techno-functional properties (stabilizer, thickener, binder and gelatinizer). In order to enhance the carob grains, preliminary treatments were carried out: Acid shelling (maceration), washing, soaking, drying and grinding operations. During this work, we wanted to check the conformity and study the performance of locust bean gum, which is a biodegradable biopolymer of plant origin derived from biomass, obtained locally, that we are substituting for other conventional products in the field of water-based Muds drilling fluids.

In particular we have studied the effect of carob gum as a filtrate reduction instead of polyanionic cellulose (PAC LV), and as a viscosifying instead of Xanthane gum which are imported biopolymers. These polymers often increase the cost price of a drilling operation.

Finally A water-based drilling mud formulated using environmentally friendly and low-cost locust bean gum has been developed by substituting total and partial biopolymer of Xanthan Gum (PAC LV) giving better rheological properties and flow control. fluid loss requirements necessary for proper oil well drilling operation.

Keywords: Drilling, Drilling fluid, Biopolymers, Rheological.

هذه الدراسة جزء من مشروع STARTUP جامعة 8 ماي 1945 قالمة

حاليًا في مجال حفر آبار النفط ، يميل البحث إلى استخدام تقنيات جديدة بما في ذلك المكونات البديلة لسوائل الحفر .ومن بين المركبات التي يمكن استخدامها في سوائل الحفر ، الخروب .تم إدراج جانب هذا المشروع في قسم لاستعادة المخلفات الزراعية من أجل تقليل تدهور البيئة الطبيعية .ركز هذا الجزء من العمل على تثمين البوليمر الحيوي المشتق من حبات الخروب لما له من خواص تقنية وظيفية (مثبت ، مثخن ، رابط ، جيلاتينيزر.)من أجل تعزيز بذور الخروب ، تم إجراء المعالجات الأولية :التقشير الحمضي (النقع) ، الغسيل ، النقع ، التجفيف والطحن . خلال هذا العمل ، أردنا التحقق من الامتثال ودراسة أداء صمغ حبوب الخروب ، وهو بوليمر حيوي قابل للتحلل الحيوي ، من أصل نباتي من الكتلة الحيوية ، يتم شراؤه محليًا ، والذي نستبدله بالمنتجات التقليدية الأخرى في مجال التنقيب عن البترول القائم على الماء..

على وجه الخصوص ، درسنا تأثير صمغ حبوب الخروب كمخفض ترشيح بدلاً من السليلوز متعدد الأيونات ، وكمادة لزوجة بدلاً من صمغ الزانثان الذي يتم استيراده من البوليمرات الحيوية .غالبًا ما تزيد هذه البوليمرات من سعر تكلفة عملية الحفر.

أخيرًا ، تم تطوير طين حفر قائم على الماء تم صياغته باستخدام صمغ حبوب الخروب الصديق للبيئة ومنخفض التكلفة عن طريق الاستبدال الكلي للبوليمر الحيوي لصمغ الزانثان والجزئي السليلوز متعدد الأيونات مما يعطي خصائص ريولوجية وتحكم أفضل لمتطلبات فقدان السوائل اللازمة للتشغيل السليم لـ حفر آبار النفط.

الكلمات المفتاحية: الحفر ، سائل الحفر ، البوليمرات الحيوية ، الريولوجيا

Table des matières

| | |
|---|----------|
| Remerciements | II |
| Dédicace | III |
| Résumé | V |
| Table des matières | VIII |
| Liste des figures | XII |
| Liste des tableaux | XIV |
| Liste des Abréviations | XV |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Généralités sur les fluides de forage | |
| Introduction | 5 |
| I.1.Historique | 5 |
| I.2.Définition de fluide de forage | 5 |
| I.3.Les fonctions des fluides de forage | 6 |
| I.4.Caractérisation des fluides de forage | 7 |
| I.4.1. La densité | 7 |
| I.4.2. Le pH | 7 |
| I.4.3. Caractéristiques rhéologiques | 8 |
| I.4.3.1. La viscosité | 8 |
| I.4.3.2. La contrainte seuil (Yield point ou Yield Value) | 8 |
| I.4.3.3. La thixotropie | 9 |
| I.4.3.4. Le gel 0 | 9 |
| I.4.3.5. Le gel 10 | 9 |
| I.4.4. La formation du cake | 9 |
| I.5.Différents types de fluide de forage | 9 |
| I.5.1. Boues à base d'eau | 10 |
| I.5.2. Boues à base d'huiles | 10 |
| I.5.2.1.Classification des boues à l'huile | 11 |
| I.5.2.2.Les produits des boues à base d'huile | 11 |
| | VIII |

| | |
|--|----|
| I.6. Les argiles | 18 |
| I.6.1 Généralités | 18 |
| I.6.2. Echange de base dans les argiles | 18 |
| I.6.3. Phénomène de gonflement | 19 |
| I.6.4. Mécanisme de gonflement | 19 |
| I.6.4.1. Hydratation de surface | 19 |
| I.6.4.2. Hydratation osmotique | 20 |
| I.7. Écoulement dans le milieu poreux | 20 |
| I.7.1. Définition d'un milieu poreux | 20 |
| I.7.2. Propriétés des milieux poreux | 20 |
| I.7.2.1. Porosité | 20 |
| I.7.2.2. Surface spécifique | 21 |
| I.7.2.3. La composition chimique | 21 |
| I.7.2.4. La perméabilité | 21 |
| I.7.2.5. Distribution des dimensions des pores et surface spécifique | 21 |
| I.8. Filtration et endommagement des formations | 21 |
| I.8.1. Colmatage des roches réservoirs | 24 |
| I.8.2. Signification physique de l'effet de la paroi | 25 |
| Conclusion | 25 |

Chapitre II : Les polymères et les biopolymères

| | |
|--|----|
| II.1. Généralités sur les polymères et les biopolymères | 27 |
| II.1.1. Les polymères | 27 |
| II.1.1.1. Définition | 27 |
| II.1.1.2. Classification générale des polymères | 28 |
| II.1.1.3. Polymères utilisés dans les fluides de forage | 32 |
| II.1.1.4. Adsorption des polymères | 35 |
| II.1.1.5. Mode d'action des polymères avec les particules argileuses | 36 |
| II.1.1.6. Rhéologique des polymères utilisés dans la boue de forage | 37 |
| II.1.1.7. Hydratation des polymères | 37 |
| II.1.2. Les biopolymères | 38 |

| | |
|--|----|
| II .1.2.1. Définition | 38 |
| II.1.2.2. Différentes familles de biopolymères | 38 |
| II.1.3. Les biopolymères utilisés dans le fluide de forage | 44 |
| II.1.3.1. La gomme de Xanthane (Xanthane Gum) | 44 |
| II.2. Le caroubier | 46 |
| II.2.1. Description | 46 |
| II.2.2. Production de caroube en Algérie | 46 |
| II.2.3. La gousse de caroubier | 46 |
| II.2.3.2 Graines de caroube | 48 |
| II.3. La gomme de caroube | 50 |
| II.3.1. Description | 50 |
| II.3.2. Composition de la gomme | 50 |
| II.3.3. Propriétés | 51 |
| II.3.4. Utilisation de la gomme de caroube | 51 |
| II.3.5. Propriétés physicochimiques de la gomme de caroube | 52 |
| II.3.5.1. Masse moléculaire de la gomme de caroube | 52 |
| II.3.5.2. Solubilité de la gomme de caroube | 53 |
| II.3.5.3. Viscosité de la gomme de caroube | 53 |
| Conclusion | 53 |

Chapitre III : Partie Expérimentale

| | |
|--|----|
| III.1. Matériels et méthodes d'analyses | 56 |
| III.1.1. Boue de forage utilisée | 56 |
| III.1.2. Extraction de la gomme de caroube | 56 |
| III .1.2.1. Étapes d'extraction de la gomme de caroube | 57 |
| III.1.3. Equipements et matériels utilisés | 58 |
| III.1.3.1. Agitateurs | 58 |
| III.1.3.2. Viscosimètre Fann35 | 59 |
| III.1.3.3. Filtre-presse API | 60 |
| III.1.3.4. Distillateur a boue | 61 |
| III.1.3.5 Densimètre pressurisé | 63 |

| | |
|--|-----|
| III.1.3.6 Mesure du pH | 63 |
| III.1.3.7. Four rotatif (HOT ROLLING) | 64 |
| III.1.4. Formulation de la boue | 64 |
| III.1.5. Caractérisation physico-chimique des fluides de forage utilisés | 65 |
| III.1.6. Méthodes d'analyses | 65 |
| III.1.6.1 Etude de conformité | 65 |
| III.2. Résultats et discussions | 67 |
| III .2.1. Utilisations de la gomme de caroube | 67 |
| III.2.1.1. Viscosifiant | 67 |
| III.2.1.2. Réducteur de filtrat | 77 |
| III .3. Etude économique | 81 |
| Conclusion | 83 |
| Conclusion générale Et perspectives | 84 |
| Références bibliographiques | 87 |
| ANNEXE1 | 95 |
| ANNEXE 2 | 120 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I. 1 : Etapes de forage : a) Outils de forage ; b) Circulation de la boue | 6 |
| Figure I. 2: Schéma d'une molécule amphiphile | 12 |
| Figure I. 3: a. Emulsion directe H/E b. Emulsion inverse E/H | 14 |
| Figure I. 4: Les différentes zones de pénétration du fluide de forage en circulation | 23 |
| Figure II. 1 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible (défloculant) et à haut (floculant) poids moléculaire | 31 |
| Figure II. 2 : Structure chimique CMC | 33 |
| Figure II. 3: Structure chimique du polyacrylamide partiellement hydrolysé et sa forme de sel de sodium correspondante | 34 |
| Figure II. 4: Motif constitutif d'une cellulose et d'une hydroxyéthylcellulose | 35 |
| Figure II. 5 : Schéma d'absorption d'une chaîne de polymère sur une surface | 35 |
| Figure II. 6 : Représentation schématique d'une chaîne de cellulose | 40 |
| Figure II. 7 : Libération contrôlée des principes actifs | 44 |
| Figure II. 8 : Structure moléculaire d'un monomère chimique de Xanthane | 45 |
| Figure II. 9 : Représentation de structure chimique de l'amylopectine (A) et d'amylose (B) | 45 |
| Figure II. 10 : L'arbre de caroubier | 46 |
| Figure II. 11 : Gousse de caroube en moi de Décembre | 46 |
| Figure II. 12 : A : Gousse de caroube ; B : Coupe transversal de la gousse | 47 |
| Figure II. 13: Les graines de caroube [63]. | 49 |
| Figure II. 14: Graines de caroube décortiquées et séparées | 49 |
| Figure II. 15 : Structure des galactomannanes de GC | 50 |
| Figure III. 1 : Produits de formulation de boue de forage utilisée | 56 |
| Figure III. 2 : Le produit de l'état brut à l'état final. | 57 |
| Figure III. 3 : Etapes de l'extraction de la gomme de caroube | 58 |
| Figure III. 4: Mixeur Hamilton Beach | 59 |
| Figure III. 5 : Viscosimètre Fann35 | 59 |
| Figure III. 6 : Filtre-presse API | 60 |
| Figure III. 7 : Distillateur de fluides de forage | 62 |
| Figure III. 8: Densimètre pressurisé | 63 |
| Figure III. 9: Four rotatif | 64 |
| Figure III. 10 : Une boue très pâteuse | 68 |

| | |
|---|----|
| Figure III. 11 : Variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING. | 70 |
| Figure III. 12 : Variation de la Viscosité apparente et plastique en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING. | 71 |
| Figure III. 13: Variation de taux de cisaillement en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING. | 71 |
| Figure III. 14 : Variation du taux de cisaillement en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING. | 73 |
| Figure III. 15: Variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING. | 73 |
| Figure III. 16: Variation de la Viscosité apparente et plastique en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING. | 74 |
| Figure III. 17 : Comparaison de la variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant et après vieillissement | 74 |
| Figure III. 18 : Boues de forage avec différent concentration de PAC LV | 80 |
| Figure III. 19: Variation de volume de filtrat API en fonction de la concentration de PAC LV | 80 |
| Figure III. 20 : Cake filtrat API | 81 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I. 1 : Relation entre le diamètre des gouttelettes et la forme d'une émulsion | 16 |
| Tableau I. 2: Aspect des émulsions selon la dimension des particules dispersées | 17 |
| Tableau I. 3 : Caractéristiques du milieu filtrant | 23 |
| Tableau II. 1 : Groupes polaires | 29 |
| Tableau II. 2 : Résumé des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales | 29 |
| Tableau II. 3 : Classes de biopolymères | 39 |
| Tableau II. 4: Composition chimique de la pulpe | 48 |
| Tableau II. 5: Composition chimique de la gomme | 51 |
| Tableau II. 6 : Différentes utilisations industrielles de la gomme | 51 |
| Tableau III. 1 : Formulation de boue de forage à base d'eau. | 56 |
| Tableau III. 2 : Produits chimiques utilisés dans le fluide de forage à base d'eau. | 64 |
| Tableau III. 3 : les paramètres rhéologiques et de filtration de référence. | 66 |
| Tableau III. 4 : Composition de la formulation I | 67 |
| Tableau III. 5 : Résultats des analyses rhéologiques | 68 |
| Tableau III. 6: Composition de la formulation II | 69 |
| Tableau III. 7 : Résultats avant vieillissement (avant HOT ROLLING). | 70 |
| Tableau III. 8: Résultats après vieillissement (HOT ROLLING à 250°F pendant heures). | 72 |
| Tableau III. 9 : Résultats des analyses de la concentration optimum | 75 |
| Tableau III. 10 : Compositions de la formulation III | 77 |
| Tableau III. 11: Composition la formulation IV | 78 |
| Tableau III. 12: Compositions de la formulation V | 79 |
| Tableau III. 13: Résultats de volume de filtrat après vieillissement | 79 |
| Tableau III. 14 : Formulation de référence | 82 |
| Tableau III. 15 : Formulation obtenue par la gomme de caroube | 82 |

Liste des Abréviations

| Symboles | Signification |
|----------|---|
| DLCC | Direction laboratoires et cartothèque centrale |
| API | American Petroleum Institute |
| FAO | Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture |
| UIPAC | Union international de chimie pure et appliquée |
| HLB | La balance hydrophile lipophile |
| HMD | Hassi Messaoud |
| LPLT | Low Pressure Low Temperature |
| WBM | Water-Based-Muds/Boue à base d'eau |
| OBM | Oil-Based-Muds/Boue à base d'huile |
| PAC | Cellulose polyanionique |
| CMC | Carboxyméthylcelluloses |
| PAM | Polyacrylamide |
| HEC | Hydroxyéthylcellulose |
| HPC | Hydroxypropyl cellulose |
| H/E | Rapport huile, eau. |
| Xc | Xanthane |
| PG | Polyglycol |
| Gc | Gomme de caroube |
| PEG | Polyéthylène glycol |
| PHA | Polyhydroxyalcanoates |
| PLA | Poly acide lactique |

| | |
|---------------------------------|---|
| HPMC | Hydroxypropylméthyl cellulose |
| PHPA | Polyacrylamide partiellement hydrolysé |
| KCL | Chlorure de potassium |
| BaSO ₄ | Barite (sulfate de barium) |
| NaOH | Soude caustique (Hydroxyde de Sodium) |
| Na ₂ CO ₃ | Sodium carbonate |
| CMC | Concentration micellaire critique |
| Nomenclature | |
| Va | Viscosité apparente (cP) |
| VP | Viscosité plastique (cP) |
| YP(YV) | Yield point ou Yield Value (contrainte seuil) (lb /100ft ²) |
| Gel 0 | Gel à 10 secondes (lb /100ft ²) |
| Gel 10 | Gel à 10 minutes (lb /100ft ²) |
| L ₃₀₀ | Lecture Fann correspond à la vitesse de rotation 300 tr /mn. |
| L ₆₀₀ | Lecture Fann correspond à la vitesse de rotation 600 tr /mn. |
| D | Densité de la boue |
| V _F | Volume du filtrat (cm ³) ou (ml) |
| K | Perméabilité du cake (mD) |
| Rw | Rayon du puits en m. |
| Ka | Perméabilité de la zone endommagée. |
| Ra | Rayon de la zone endommagé en m. |
| η | Viscosité du fluide à la température de fonds en cp. |
| Q | Débit du fluide en m ³ / j. |
| H | Épaisseur perméable utile en m. |
| ΔPs | Effet pariétal en bar. |
| t | Temps (s) |
| tr/min | Tour par minute |
| Unités | |
| d : diamètre | Cm |

| | |
|--|---|
| °F | Degré Fahrenheit |
| Taux de cisaillement | $\gamma \text{ (s}^{-1}\text{)} = 1,7 \text{ N (tr/min)}$. |
| Pa = | 2,0885. lb/100 ft ² . |
| 1cp = | 10 ⁻³ Pa.s |
| T (°C) = | [T(°F) – 32] / 1,8 |
| 1 Livres / 100 pied carrés (lb/100 ft ²) = | 47,88 Pascal (Pa) |
| Psi | Livre par pousse carre |
| 7 bars= | 100 psi |
| Densité | (g /cm ³) Système (SP.GR) |
| Viscosité | Cp : Centipoise |

❖ Introduction générale

Introduction générale

Le forage est une opération déterminante pour la prospection et l'exploitation des gisements d'hydrocarbure. Le fluide de forage utilisé, bien qu'il ne représente que 7 à 10% des coûts totaux de l'opération, est un facteur clef du succès techniques et économique d'un forage.

Pour assurer les fonctions essentielles qui leur sont demandées, les fluides de forage doivent présenter des caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques bien définies.

Ainsi, le fluide doit assurer une pression hydrostatique pour prévenir les éruptions, avoir une viscosité suffisante pour rendre possible la remontée des déblais forés à la surface et présenter un caractère thixotrope permettant le maintien des déblais en suspension lors des arrêts de circulation. Il doit encore limiter l'invasion des formations forées par la création d'un cake faiblement perméable sur les parois du puits et assurer la stabilité.

Les fluides de forage utilisés sont à base d'eau ou à base d'huile, ces derniers étant des émulsions inverses dont la phase dispersante est généralement constituée de gazole. Ce type de fluide est principalement employé pour les forages profonds où la température de fond rend impossible l'utilisation des fluides à base d'eau traditionnels ou encore pour le forage des zones argileuses. Néanmoins, dans un souci croissant de protection de l'environnement, la législation tend à limiter l'emploi des fluides à base d'huile et il est désormais nécessaire de développer des formulations non polluantes à base d'eau. Celles-ci sont principalement constituées d'argile, à des concentrations de 30 à 60 g/l, à laquelle sont ajoutés des additifs et des électrolytes qui permettent au fluide de remplir ses différentes fonctions en conditions de puits (haute température, forte salinité, etc.).

Les additifs généralement utilisés sont des macromolécules d'origines diverses :

- Les polymères synthétiques, comme les polyacrylamides, ou semi synthétiques, comme les polymères dérivés de la cellulose, sont couramment employés dans ces formulations. Cependant, les performances de ces composés peuvent être variables d'un lot à un autre et leur emploi n'est pas recommandé dans les conditions de fortes salinités et en particulier en présence du calcium.

- Les polymères d'origine naturelle comme l'amidon ou la gomme de guar sont parfois utilisés, mais ils sont peu stables à des températures supérieures à 100 °C et leur qualité est encore moins constante que celle des polymères synthétiques.
- Enfin, des polysaccharides d'origines bactériennes sont souvent employés car ils constituent une alternative simple et prometteuse au problème précédemment exposé.

Malgré tout, l'usage de ces polysaccharides microbiens dans les fluides de forage est actuellement restreint. Le Xanthane est un bon viscosifiant mais ses capacités en tant qu'agent thixotrope est réducteur de filtrat sont limitées. Le sclérogucane, qui est en cours de développement, présente des propriétés rhéologiques et de stabilité thermique très intéressantes, mais son coût reste trop élevé pour envisager une utilisation à grande échelle. Cependant l'avantage de ces polysaccharides est qu'ils ne présentent aucun problème vis à vis de l'environnement.

Pour toutes ces raisons, notre étude consiste à évaluer les potentialités d'application en forage d'un autre type de polymères, il s'agit d'un polymère d'origine naturelle, la gomme de caroube issu des déchets des noix de caroube obtenus localement de la région de Bejaia. Ce biopolymère dont le coût de revient devrait être faible en production à grande échelle. Nous substituons aux autres produits conventionnels. En particulier, nous étudierons l'effet de la gomme de caroube sur le filtrat et sur les propriétés rhéologiques du fluide de forage formulé avec ce biopolymère.

Notre mémoire est organisé comme suit :

I. Une partie bibliographique comportant deux chapitres :

- Le premier chapitre traitera des généralités sur les différents types de fluides de forage, historique et ses principales fonctions, ainsi leurs caractéristiques (densité, pH, la rhéologiques).
- Le deuxième chapitre traite quelques détails sur les polymères et les biopolymères : définitions, comment sont-ils classés, les plus utilisés dans le fluide de forage, ainsi leurs propriétés. Une synthèse bibliographique sur notre nouvel additif qui est la gomme de caroube (son origine, sa production en Algérie, ses propriétés, ses différentes utilisations...).

II. Une partie expérimentale dont on a définis les différent matériaux et équipements utilisées, le protocole d'extraction de la gomme de caroube suivi d'une série des tests préliminaires afin de pouvoir nous orienter vers l'effet prédominant de notre biopolymère soit la réduction du filtrat ou bien la viscosité.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus durant cette étude et qui met en évidence les avantages techniques et les intérêts économiques de l'utilisation des fluides de forage à base de biopolymères biodégradables pour le forage des puits pétroliers.

❖ Chapitre I

Généralités sur les fluides de forage

Introduction

Le fluide de forage, qui était à l'origine, considéré uniquement comme un véhicule de transport des débris jusqu'à la surface, est maintenant reconnu comme l'un des facteurs majeurs pour le succès d'une opération de forage. La vitesse d'avancement, le rendement, la sécurité et le prix de revient du forage dépendent des qualités du fluide de forage utilisé.

La technologie des fluides de forage est dominée par trois facteurs principaux : la performance, la rentabilité, et le souci environnemental et sécuritaire. Il est clair que l'objectif principal du fluide de forage est de réaliser les meilleures performances qui permettront de mener à bien la totalité des opérations de construction et d'exploitation du puits. Cependant, il doit être disponible, rentable, et non nuisible, que ce soit pour la santé et la sécurité des utilisateurs qu'à l'environnement.

Le succès technique et économique du forage d'un puits de pétrole repose en grande partie sur la qualité du fluide de forage utilisé. Il faut savoir que le coût du fluide de forage proprement dit est relativement faible par rapport au coût global des opérations mais l'optimisation de la composition du fluide en fonction des caractéristiques de la formation à forer peut réduire efficacement le coût global des opérations de forage.

I .1.Historique

En 1900, alors qu'ils formaient un puits de pétrole à Spindeletope au Texas, des ouvriers ont conduits un troupeau de bovins dans une fosse remplie d'eau. La boue ainsi obtenue, un lisier boueux et visqueux composé d'eau et d'argile, a été déversée dans le puits [1]. D'où la découverte des boues de forage qui à présent sont devenues un facteur déterminant du succès du forage.

I.2.Définition de fluide de forage

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments).

Le fluide de forage était déjà présenté en 1933 lors du premier congrès mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications [2].

Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par Evans Et Reid. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille (cuttings). Avant d'être recyclé, le fluide subit, à la sortie du puits, différents traitements (tamisage, dilution, ajout de produit) de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales (Figure I.1). Les boues de forage forment un domaine extrêmement vaste tant en raison de leur nombre ou du nombre de leurs constituants qu'en raison de nombreux facteurs physiques et chimiques qui peuvent les modifier d'une manière réversible ou irréversible. Pour n'en citer que quelques-uns, l'influence des additifs dans la formulation des boues de forage a un impact important [3].

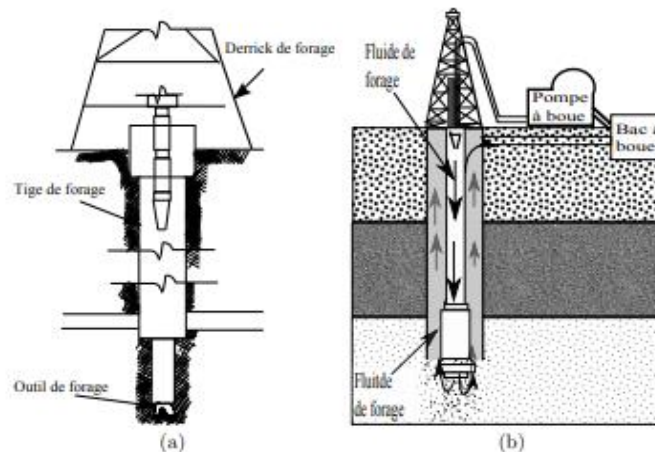


Figure I. 1 : Etapes de forage : a) Outils de forage ; b) Circulation de la boue [3].

I.3. Les fonctions des fluides de forage

La réussite technique et économique d'un forage dépend en grande partie du fluide de forage utilisé, non pas pour le coût qu'il présente, mais parce qu'il permet de réduire le temps d'opération et d'améliorer les conditions du forage [4].

Ainsi l'environnement difficile des opérations de forage a encouragé les initiatives de recherche et développement en vue de concevoir des fluides pouvant remplir plusieurs fonctions essentielles :

- Nettoyer le fond du puits et remonter les déblais jusqu'à la surface pour éviter les problèmes de coincement de la tige et le bourrage de l'outil [5].
- Refroidir l'outil de forage et diminuer les frottements de la garniture [6].

- Remonter les informations géologiques sur les formations traversées.
- Le courant de boue est porteur d'énergie qui entraîne les moteurs d'attaque hydraulique (turbo foreuses, moteur volumétrique) [5].
- Le contrôle des fluides des formations traversées.
- Maintenir les parois du puits par sa pression hydrostatique qui pare les éboulements [5].
- Maintenir les déblais en suspension durant les arrêts de circulations, pour éviter les problèmes de coincements au redémarrage [7].

I.4. Caractérisation des fluides de forage

Le fluide de forage doit présenter un certain nombre de propriétés incontournables, les principales caractéristiques des fluides de forage sont de nature physico-chimique qui désignent les caractéristiques de leur structure ; c'est-à-dire des relations qui existent entre les liquides de base, les composés dissous et les particules solides en suspension [8]. Les paramètres caractérisant les fluides de forage sont les suivants :

I.4.1. La densité

C'est le rapport de la masse volumique d'un corps à la masse volumique d'un corps de référence (l'eau pour les liquides et les solides et l'air pour les gaz) dans des conditions définies de pression et de température [8].

La densité est un paramètre important des boues de forage, elle doit être suffisamment élevée pour que la pression hydrostatique exercée par la boue sur la formation empêche les venues d'eau d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions ainsi que le fluage des argiles. Dans la mesure où la densité dépasse la limite de résistance des roches, ces dernières se fracturent provoquant des pertes de circulation de boue. Les fluides de forage couramment employés ont une densité variant dans une plage comprise entre 0,9 et 2,4 [9].

I.4.2. Le pH

Le pH est une propriété chimique de la boue qui est souvent liée à sa stabilité et également à son aptitude à disperser facilement les matériaux argileux dont elle se charge au cours du forage.

La détermination du pH fournit la concentration en ions H^+ (ou OH^-) libres, les boues de forage sont également basiques, leur pH peut varier suivant le cas de 8 à 10.

Certains traitements chimiques ne peuvent être efficaces que dans une gamme donnée de pH. La dispersion des argiles est une fonction croissante de l'augmentation du pH, mais par

contre l'efficacité des fluidifiants organiques est accrue lorsque l'on augmente le pH. Dans ce cas, il faut trouver un compromis situé généralement vers un pH de 10.

La tendance actuelle consiste à travailler avec un pH compris entre 7 et 10 [10].

I.4.3. Caractéristiques rhéologiques

I.4.3.1. La viscosité

La viscosité est définie comme étant la mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement. Plus la viscosité est forte [11], meilleure est l'évacuation des déblais à partir du fond. D'autre part, son augmentation rend la pression de la circulation plus grande, ce qui altère le fonctionnement du trépan, réduit l'avancement et la vitesse mécanique. Généralement ; la viscosité d'une boue non alourdie est maintenue au niveau de 35 à 50 stocks, et d'une boue alourdie ; à moins de 80 stocks.

a. La viscosité apparente

C'est la résistance totale à l'écoulement d'un fluide ; on introduit la notion de viscosité apparente comme étant la viscosité dynamique qu'aurait le fluide non-Newtonien s'il était considéré comme Newtonien dans les mêmes conditions d'écoulement.

b. La viscosité plastique

La viscosité plastique dépend de la teneur en solide de la boue et elle est liée à la taille et à la forme des particules, elle dépend également de la densité de la boue. Dans le cas général ; cette donnée ne représente qu'un accroissement moyen de la tension de cisaillement par unité d'accroissement de la vitesse de déformation [12].

I.4.3.2. La contrainte seuil (Yield point ou Yield Value)

C'est la tension limite au-delà de laquelle il y a écoulement. Elle est due surtout aux interactions physiques ou chimiques existant entre particules en suspension.

Une Yield Value faible est souvent prise comme critère de bon équilibre chimique d'une boue. Cependant, ces interactions vont dépendre aussi de la distance entre particules, donc de leur nombre, donc de la teneur en solides ; forme et taille de la particule vont aussi agir sur la Yield Value. Il est admis que la Yield Value varie à peu près comme le carré de la teneur en solide [10].

I.4.3.3. La thixotropie

C'est un phénomène réversible et non instantané apparaissant dans certaines suspensions colloïdales ; ces suspensions se présentent au repos sous forme de gel qui se liquéfie par agitation et sont de nouveau régénérés par repos [13].

I.4.3.4. Le gel 0

Il traduit la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue [10].

I.4.3.5. Le gel 10

Il traduit la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes [10].

I.4.4. La formation du cake

Le fluide de forage qui est constitué d'une phase liquide et de produits argileux en suspension, est soumis à la pression hydrostatique tout en étant en contact avec les formations poreuses et perméables. Si le diamètre des pores est supérieur à celui des argiles en suspension, la formation absorbera le fluide dans son intégralité. Le cas extrême est celui des pertes totales ou le débit de fluide est entièrement absorbé par la formation, il n'y a donc aucun retour de boue en surface, en revanche si le diamètre des pores est inférieur à une partie des éléments en suspension il y a filtration c'est-à-dire dépôt de ces éléments sur la paroi « constitution d'un cake » et envahissement par le liquide de base « filtrat » de la formation. Le volume du filtrat enregistré est fonction de plusieurs paramètres tels que les caractéristiques de la formation, la nature des polymères utilisés dans la formulation des boues, le temps de contact boue-formation, la pression différentielle appliquée, la viscosité du fluide et la température. Les propriétés de filtration sont évaluées et contrôlées par des tests normalisés de l'American Petroleum Institut (API) [8].

I.5. Différents types de fluide de forage

Les fluides de forage, souvent appelés boues dans le jargon pétrolier en raison de leur aspect ; peuvent être à base d'huile ou à base d'eau. Durant de nombreuses années les boues à base d'huile ont été très utilisées dans les zones difficiles, notamment pour le forage des argiles et pour le forage des zones à haute température.

Cependant dans un souci de protection de l'environnement ; la législation sur le rejet des boues à base d'huile devient de plus en plus stricte et les pétroliers se doivent d'élaborer des fluides à base d'eau non polluantes.

I.5.1. Boues à base d'eau

Ce sont des fluides où le milieu dispersif est une eau industrielle dont la concentration en électrolyte varie de celle d'une eau douce (< 10g/l) jusqu'à la saturation (350g/l). A cette eau de base plusieurs produits sont ajoutés pour satisfaire aux caractéristiques recherchées de la boue. Parmi les principaux produits, on note : Les argiles (souvent des bentonites), à laquelle sont ajoutés des dispersant (polyacrylates ou polymères sulfonés) ; des alourdissant (barityne ou carbonate de calcium) ; des viscosifiants (Xanthane, scléroglycane, hydroxyéthylcellulose (HEC) ; polyacrylamide (PAM)) ; des réducteurs de filtrat (cellulose polyanionique (PAC) ; carboxyméthylcellulose (CMC) ; amidon ; polymères synthétiques sulfonés). Des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles : KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA).

La nature des électrolytes et leurs concentrations sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation forcée [14].

I.5.2. Boues à base d'huiles

Jugeant que les couches pouvaient être plus sensibles à une invasion par l'eau que par l'huile ; les boues à l'huile furent utilisées pour le forage des horizons productifs, ces boues se sont révélées très efficaces pour résoudre les problèmes engendrés par l'utilisation des boues à base d'eau comme le gonflement des argiles et le coincement. Les boues à base d'huile sont utilisées pour :

- Le forage et le carottage des niveaux producteurs ;
- Les reprises et entretiens de puits productif ;
- D'une manière générale, pour tous les travaux au droit des horizons productif [8].

Les fluides de forage à base d'huile « OBM » possèdent de nombreux avantages qui nous ont conduit à les utilisés durant toute notre étude, parmi ces avantages nous citons :

- Contrôle aisé des caractéristiques ;
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau ;
- Très bonnes caractéristiques de filtration ;
- Cake mince et soluble dans le brut ;
- Meilleur calibrage du trou, réduction des frottements de la garniture ;
- Augmentation de la durée de vie des outils à molettes ;
- Endommagement limité des formations [15].

I.5.2.1. Classification des boues à l'huile

Les premières boues à l'huile contenant quelque pour cent d'eau seulement ont été alors proposées ; elles se sont révélées d'une très grande susceptibilité à l'égard des venues d'eau ; 10 à 15 % d'eau les rendaient inutilisables ; alors on essaya de mettre au point de nouvelles formules qui tolèrent des pourcentages élevés d'eau tout en gardant l'avantage d'une phase externe constituée par de l'huile ; on en arriva ainsi aux premières boues inverses [12]. Il existe donc deux catégories de boues à base d'huile ; celles contenant une certaine quantité d'eau émulsionnée et les boues inverses.

a. Boues à l'huile

Cette boue est un mélange de 95 à 98 % d'huile très asphalténique et 2 à 5 % d'eau ; viennent s'ajouter des agents émulsionnants (tensioactifs) pour assurer la stabilité de l'émulsion dans le mélange en plus des autres produits tels que : le réducteur de filtrat, le viscosifiant ; la chaux et parfois aussi de la baryte [12].

b. Boues inverses

Ce sont des fluides de forage, constitués d'une phase continue d'huile et d'une phase dispersée aqueuse qui arrive jusqu'à 50 % du volume ; ils ont les mêmes caractéristiques que les boues à l'huile, mais permettent de pallier certains inconvénients de celles-ci [12].

I.5.2.2. Les produits des boues à base d'huile

a. Huile de base

L'huile de base constitue la phase liquide continue de la boue dans laquelle les autres constituants sont émulsionnés ou mis en suspension. Le choix de l'huile utilisée dépendra du type de boue et de la nature des additifs ; allant de l'huile diesel à de l'huile brute très asphaltique.

b. Eau

Toutes les boues à l'huile contiennent un pourcentage d'eau ; cette eau est émulsionnée dans l'huile et ne s'en sépare pas ; de ce fait elle ne risque pas d'endommager les formations.

c. Alourdissant

On utilise comme pour les boues à base d'eau :

- Le carbonate de calcium pour les faibles alourdissements ;
- Le sulfate de baryum pour les densités élevées ;
- La galène pour les densités très élevées.

d. Agents fluidifiants

Le but de l'utilisation de ces produits est de réduire la viscosité de la boue, ces produits peuvent être : des acides gras à longue chaîne, des bases azotées à long radicaux, alcools fortement sulfatés ou des composés hétéro polaires solubles dans l'huile.

e. Agents de neutralisation de l'eau

La chaux vive est employée dans ce but. Le sel joue aussi ce rôle car l'eau salée s'émulsion mieux que l'eau douce [16].

f. Agents plastifiants

Ce sont des produits utilisés pour le contrôle de la filtration et de la viscosité de la boue ; ces produits peuvent être : des acides naphthéniques, noir de fumée, silicate de soude, sans oublier les produits les plus utilisés, les argiles organophiles [16]. Les argiles organophiles, agissent généralement par substitution cationique. Les cations se fixent en surface des feuillets amenant à une transformation profonde des propriétés de l'argile qui devient alors capable de fixer l'eau mais peut, par contre se disperser dans les liquides organiques polaires ou non [17].

g. Les agents tensio-actifs

Les tensio-actifs sont utilisés dans l'industrie pétrolière depuis l'extraction du pétrole brut jusqu'à l'obtention des produits finis. Parmi les usages les plus importants ; la rupture des émulsions d'eau et d'huile de naphta.

Les agents de surface sont utilisés aussi comme mouillants et dispersants dans les fluides de forage pour suspendre les particules solides et comme agents anti-corrosif

Les agents de surface ; encore appelés surfactifs sont des substances naturelles ou synthétique de structure particulière. Ces molécules sont formées de deux parties d'affinité opposées ; une partie est hydrophile ou polaire, l'autre partie est hydrophobe, lipophile ou apolaire [18].

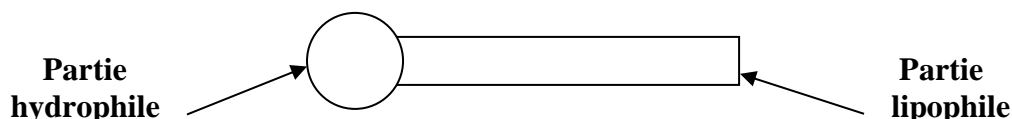


Figure I. 2: Schéma d'une molécule amphiphile [19].

De par leur double polarité, ces molécules sont appelées substances amphiphiles.

g.1. Classification

Il existe quatre classes d'agents de surface qui sont :

- Les agents de surface anioniques ;
- Les agents de surface cationiques ;
- Les agents de surface amphotères ;
- Les agents de surface non-ioniques [20].

g.2. Caractéristiques

Grâce à leur comportement aux interfaces, leurs propriétés physico-chimiques en solution et leur propension à former des agrégats, les tensioactifs présentent un certain nombre de propriétés intéressantes qui se traduisent par leurs différents pouvoirs.

- **Pouvoir mouillant** : le pouvoir mouillant d'une solution est défini comme son degré d'aptitude à la mouillance, ou tendance qu'elle possède à s'étaler sur une surface.
- **Pouvoir dispersant** : le pouvoir dispersant est la propriété que possède un agent de surface de maintenir des particules solides en suspension dans un liquide.

Une dispersion désigne en effet le mélange de deux phases non miscibles, l'une étant répartie en fines particules au sein de l'autre. Les émulsions, les suspensions et les aérosols sont des dispersions.

- **Pouvoir émulsionnant** : le pouvoir émulsionnant est le degré d'aptitude d'un produit à faciliter la formation d'une émulsion. Les émulsions sont des systèmes hétérogènes à deux ou plusieurs phases liquides, constituées par un liquide et au moins un deuxième liquide, dispersé dans le premier sous forme de fines gouttelettes.
- **Pouvoir solubilisant** : le pouvoir solubilisant est le degré d'aptitude d'un agent de surface en solution à solubiliser certains corps peu solubles dans le solvant pur.

g.3. Définition d'une émulsion

Une émulsion est un système hétérogène et thermodynamiquement instable ; constitué par une dispersion d'un liquide sous forme de fines gouttelettes dans un autre liquide ; les deux liquides considérés étant insolubles ou très peu solubles l'un dans l'autre. Dans la plupart des cas, l'une des deux phases considérées est l'eau [21].

On classe les émulsions en trois catégories :

- Emulsions directe huile dans l'eau (H/E) : ou la phase dispersée est l'huile et la phase dispersante est l'eau [22].
- Emulsion inverse eau dans l'huile (E/H) : ou la phase dispersée est eau et la phase dispersante est l'huile [23].
- Emulsion multiple (E/H/E) : dont la phase continue est hydrophile et la phase lipophile contient des sphérules hydrophiles plus petites.

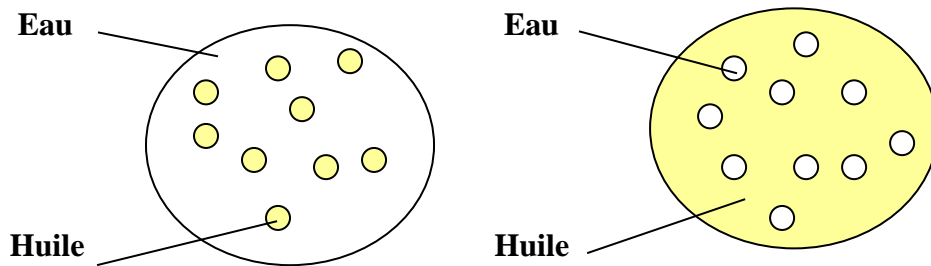


Figure I. 3: a. Emulsion directe H/E b. Emulsion inverse E/H [24].

g.4. Notion de tension interfaciale

Il est généralement admis que la tension interfaciale entre les deux phases, doit être faible pour que les émulsions puissent se former, bien qu'il existe des émulsions stables dont la tension interfaciale entre les deux phases est très élevée et inversement. Cependant ; plus la tension interfaciale est faible, plus sera faible l'énergie à développer pour former cette émulsion [25].

Il est connu que pour qu'une émulsion soit stable il faut que la surface entre les deux phases soit grande. Pour augmenter une interface d'une surface dS il faut fournir au système une quantité d'énergie dE tel que :

$$dE = \gamma \cdot dS \quad (I.1)$$

g.5. Concentration micellaire critique

L'évolution des propriétés physiques des solutions aqueuses d'agents de surface en fonction de leur concentration présente tout un point singulier dans une certaine zone de concentration très faible [26], des agrégats sont formés spontanément pour une concentration suffisante appelée concentration micellaire critique (CMC).

A une concentration plus faible que la CMC les agents de surface se trouvent généralement sous forme de monomère. Au-dessus de la CMC il existe un équilibre dynamique entre les monomères qui ont une tendance à s'associer pour former des structures organisées appelées micelles [10].

g.6. Notion de HLB

La balance hydrophile lipophile (HLB) est une caractéristique des surfactifs. Elle est étroitement liée à la structure de leur molécule. Elle est censée représenter l'équilibre entre les groupements hydrophiles et lipophiles et sa valeur est d'autant plus élevée que le surfactif est plus hydrophile.

Ce système, imaginé par Griffin en 1949, consiste à attribuer à chaque agent de surface, une valeur illustrant son HLB. Le HLB varie de 0 à 20 étant attribué à un produit totalement hydrophobe et 20 à un produit totalement hydrophile [27].

g.7. Formation des émulsions

Pour que les émulsions puissent se former, il est généralement admis que la tension interfaciale entre les deux phases doit être faible, bien qu'il existe des émulsions stables dont la tension interfaciale entre les deux liquides est très élevée et inversement. Cependant, il faut noter que plus la tension interfaciale est faible, plus faible sera l'énergie à développer pour former cette émulsion.

La pratique confirme qu'une émulsion est moins stable à chaud qu'à froid, la viscosité diminuant avec l'augmentation de température. Une faible tension interfaciale n'est pas suffisante et l'on doit considérer que, dans tous les cas, chaque particule dispersée doit se trouver entourée d'un film plus ou moins rigide évitant ainsi l'agglomération des particules.

g.8. Différents types d'émulsions

Le choix du type d'émulsion et la teneur en phase dispersée se décident cas par cas, en fonction des contraintes techniques, environnementales, économiques, et autres imposées par l'industrie utilisatrice.

Dans les systèmes de fluide de forage à base d'huile, c'est l'émulsion eau dans huile, qui est généralement utilisée. L'huile présente de nombreux avantages dans les conditions imposées par le puits (inertie chimique).

Les émulsions ayant des concentrations en phases dispersées importantes sont en général plus stables. Ceci se traduit souvent dans la pratique par l'utilisation d'émulsion mère que l'on dilue à l'emploi.

g.9. Influence des agents émulsifiants

Le choix du tensioactif est primordial pour assurer l'émulsification. Il détermine largement la nature de la phase continue ; c'est en général la phase où le tensioactif est soluble (règle de Bancroft) [18].

g.10. Classification des émulsions

Les émulsions se distinguent entre elles, indépendamment de la forme sous laquelle sont dispersées les deux phases non miscibles (E/H ou H/E), par leurs finesses et également selon l'homogénéité propre des phases dispersées qui peuvent être elles même des émulsions. Une micro émulsion se reconnaît à :

- Sa transparence ou son opalescence ;
- Sa bonne résistance à la centrifugation. La distinction entre une émulsion, une solution micellaire et une microémulsion se décide par la taille des particules dispersées.

Tableau I. 1 : Relation entre le diamètre des gouttelettes et la forme d'une émulsion [17].

| Type d'émulsion | Diamètre de gouttelettes en (nm) |
|---------------------|----------------------------------|
| Solution micellaire | < 10 |
| Microémulsion | 10 à 100 |
| Emulsion | 100 à 1000 |

g.11. Propriétés rhéologiques des émulsions

La détermination des propriétés rhéologiques constitue le meilleur moyen pour l'étude de l'influence des paramètres de formulation et de l'influence du procédé de fabrication. C'est aussi une méthode de contrôle de la reproductibilité et de l'appréciation globale des changements qui se produisent au sein des émulsions.

Les méthodes rhéologiques appliquées à l'étude des systèmes émulsionnés font souvent appel aux mesures sous cisaillement continu, à l'aide de viscosimètre à cylindres coaxiaux ou à plateaux et cône.

La plupart des émulsions, à l'exception des systèmes dilués, ont un comportement viscoélastique aux faibles vitesses de cisaillement. Celui-ci est dû à l'état de floculation des globules et/ou aux structures cristallines responsables de la consistance [28]. La viscosité est par définition la propriété que possède un matériau, à résister à un mouvement relatif interne.

Sa connaissance sous différentes expressions suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique.

La viscosité d'une émulsion dépend de plusieurs facteurs notamment [29] :

- La viscosité de la phase continue ;
- La fraction de volume de la phase dispersée ;
- La viscosité de la phase dispersée ;
- La taille moyenne des particules et leur distribution granulométrique ;
- Le taux de cisaillement ;
- La nature et la concentration de l'agent émulsifiant ;
- La distribution de la taille des micelles.

Tableau I. 2: Aspect des émulsions selon la dimension des particules dispersées [18].

| Dimension en micromètres | Aspect de l'émulsion |
|--------------------------|---------------------------|
| Supérieure à 1 | Blanche laiteuse |
| De 1 à 0,1 | Blanche à reflets bleutés |
| De 0,1 à 0,05 | Grise semi -transparente |
| Inférieure à 0,05 | Transparente |

g.12. Effet des solides sur les émulsions

L'effet d'un solide sur la stabilité et la consistance d'une émulsion peut être marqué par plusieurs actions. Le mécanisme par lequel les particules solides divisées stabilisent l'émulsion est simple. Les particules solides adsorbées à l'interface eau/ huile exigent une extension donnée de l'interface. Créée à la suite d'une agitation, la dispersion sous forme de gouttelettes induit une interface plus importante que nécessaire. La coalescence va donc réduire progressivement l'aire interfaciale, rendant de plus en plus dense la couverture des particules solides. Lorsque le minimum possible est atteint, une réduction supplémentaire de l'interface exigerait d'en retirer des particules solides, ce qui est une opération énergiquement défavorable : la coalescence s'arrête alors [18].

I.6. Les argiles

I.6.1 Généralités

L'argile est une matière première utilisée depuis longtemps dans les différentes activités de la vie humaine. Le mot argile vient du grec argile dérivée de « argos » ou du latin « argilos » qui veut dire blanc. Les argiles sont des roches constituées de variétés de minéraux très fins plus ou moins bien définis, et dont la forme est généralement aplatie ; ils sont constitués par des minéraux spécifiques dits : argileux, mais on y trouve aussi des espèces dont les plus fréquentes sont la silice, des silicates non phyllie, des oxydes, des hydroxydes cristallisés ou amorphes et des carbonates.

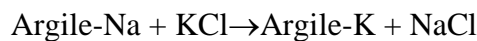
Les minéraux argileux sont surtout des silicates d'alumine dont la forme cristallographique se traduit par l'existence d'empilements de feuillets ou agrégats fibreux, dont la dimension moyenne est de 2μ environ.

Les minéraux argileux possèdent certaines caractéristiques qui les distinguent en tant que groupe, l'analyse chimique est une caractéristique importante car elle montre que l'argile est composée essentiellement de Silice, d'Alumine, d'Eau et souvent de quantités non négligeables de Fer, Magnésium, et de plus faibles quantités de Sodium et de Potassium.

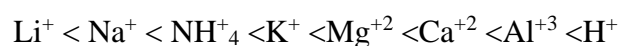
D'autres caractéristiques peuvent être citées comme la grande superficie et la réactivité chimique à la surface [30].

I.6.2. Echange de base dans les argiles

La mise en contact d'une certaine quantité de matière argileuse modifie la composition cationique de la solution. On peut écrire par exemple :



Il y a donc échange entre les ions inclus dans la structure solide et ceux de la solution, la plupart des cations sont échangeables mais l'échange ne modifie pas la structure du minéral considéré. L'échange des cations se traduit par la désorption d'un ion suivi de l'adsorption du cation échangé. On admet en général l'ordre suivant :



(Le Na^+ est beaucoup plus facile à déplacer que les ions Al^{+3})

La facilité de l'échange de cations dépendra considérablement de la nature du couple de cations considéré, plus la valence d'un cation est élevée plus il aura de la force à déplacer un

ion et plus la substitution sera solide. Lorsque la teneur en ion échangeable décroît à la surface d'une argile il devient de plus en plus difficile de l'en déplacer. A valence égale, plus le rayon ionique du cation est grand plus sa force relative est grande.

I.6.3. Phénomène de gonflement

Mise en suspension aqueuse, l'argile et plus particulièrement la montmorillonite fixe une quantité notable d'eau sous différentes formes :

- Eau libre : ou intermicellaire, c'est l'eau qui n'a aucun lien avec l'argile elle s'élimine par évaporation aux conditions atmosphériques normales.
- Eau liée : elle comprend l'eau d'imbibition et l'eau interfeuille.

En ce qui concerne l'eau d'imbibition ou eau d'humidité, le grain présente une surface chargée électriquement autour de laquelle s'orientent les dipôles d'eau. Par chauffage, cette eau sera éliminée d'autant plus facilement que sa distance à la surface est grande. Quant à l'eau interfeuille, c'est l'eau qui pénètre dans le grain entre chaque feuille et augmente ainsi la distance réticulaire.

I.6.4. Mécanisme de gonflement

Le mécanisme de gonflement retenu actuellement est celui de Van Olphen qui a proposé deux mécanismes distincts :

- Le gonflement par hydratation de surface ;
- Le gonflement par hydratation osmotique.

I.6.4.1. Hydratation de surface

Dans ce cas l'eau est absorbée en monocouches successives sur les surfaces des argiles. Par surface des argiles il faut distinguer la surface de la particule argileuse de celle du feuille argileux. Au cours du gonflement intermicellaire, l'eau pénètre entre les particules argileuses tandis que pour le gonflement intramicellaire, l'eau pénètre également entre les feuilles. Trois facteurs contribuent à la force de répulsion totale entre les feuilles d'une argile gonflante, ce sont :

- L'attraction de Van Der Waals;
- L'interaction électrostatique entre les feuilles chargés et les cations compensateurs ;

- L'énergie d'hydratation due à l'adsorption de l'eau à la surface de l'argile (due aux liaisons hydrogène entre molécules d'eau et les oxygènes de surface du feuillet argileux, ainsi qu'à l'hydratation des cations compensateurs).

I.6.4.2. Hydratation osmotique

A partir de quatre couches de molécules d'eau entre feuillets, l'énergie d'hydratation n'est plus le facteur important. Elle est dépassée par la répulsion électrique des doubles couches (interaction électrostatique entre les feuillets et les cations compensateurs).

Donc s'il y a assez d'eau, les cations mobiles de la surface qui ont une grande affinité pour l'eau peuvent se solvater et se séparer de la paroi : il y a alors ionisation superficielle et formation d'une couche diffuse. La séparation des cations de la paroi provoque une charge négative et les ions séparés se trouvent soumis à deux forces :

- Une force de rappel : l'attraction électrique due à la charge de la paroi.
- Une force d'expansion : la pression osmotique due à l'agitation thermique.

I.7. Écoulement dans le milieu poreux

I.7.1. Définition d'un milieu poreux

Un milieu poreux est simplement défini comme étant un solide qui contient un grand nombre de vides sous forme de pores dispersés d'une façon régulière ou au hasard ; toute fois un bloc de métal avec quelques trous percés à travers n'est pas un milieu poreux. Les pores que contient le milieu poreux se trouvent curieusement dans un petit volume [31].

I.7.2. Propriétés des milieux poreux

Dans cette partie nous définirons quelques termes qui sont très utilisés pour caractériser un milieu poreux :

I.7.2.1. Porosité

La fraction du volume total occupé par le vide est appelée porosité d'un milieu poreux. Une distinction peut être faite entre les pores qui sont interconnectés et ceux qui sont totalement isolés. La porosité absolue ou porosité totale est la fraction de tout le volume occupé par les pores connectés ou non ; la porosité effective est la fraction du volume occupé par les pores interconnectés [32].

I.7.2.2. Surface spécifique

La surface spécifique est définie comme étant l'aire des surfaces internes par unité de volume des milieux poreux. Les hautes surfaces internes sont responsables de plusieurs caractéristiques des milieux poreux ; elles jouent un rôle important dans les procédés entraînant l'adsorption des matériaux ; à partir de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux, c'est aussi un paramètre important dans les procédés de filtration, échange d'ions, et les procédés qui entraînent une réaction chimique entre le solide et l'écoulement du fluide. La surface spécifique a aussi une influence directe sur la perméabilité du milieu [32].

I.7.2.3. La composition chimique

La composition chimique du milieu poreux peut être très importante dans les procédés entraînant des échanges de matières entre les grains solides et l'écoulement d'un fluide ; tel serait le cas quand le matériel formant le solide poreux se dissout dans le fluide ou qu'une réaction chimique se produit entre le solide et le fluide.

I.7.2.4. La perméabilité

La perméabilité est la mesure de la conductivité d'un fluide à travers un milieu poreux. On peut considérer la perméabilité comme une grandeur caractérisant la dimension moyenne des pores. Cette grandeur est définie par la loi de Darcy reliant le débit Q d'un fluide de viscosité μ à travers un milieu poreux de section A et sous un gradient de pression égale à $\Delta P/L$, suivant la relation.

$$Q = \frac{K.A.\Delta P}{\mu.L} \quad (I.2)$$

Où K est la perméabilité du milieu au fluide considéré [33].

I.7.2.5. Distribution des dimensions des pores et surface spécifique

C'est la mesure des dimensions moyennes des pores et la variation des dimensions de ces pores ; elle est déterminée par la méthode BET par injection d'azote sous pression.

I.8. Filtration et endommagement des formations

La connaissance des causes et l'importance du phénomène de colmatage des abords des puits par la boue de forage présente un intérêt évident. Cela doit permettre de prévenir

l'endommagement de la roche par le choix d'un fluide adéquat. Une littérature importante a été publiée sur ce thème. 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, caractéristiques rhéologiques et à ses éléments de filtration, au gâteau : épaisseur, perméabilité, résistance mécanique, taille des particules et au filtrat : nature, propriétés chimiques.

Lorsque le fluide de forage se trouve en contact avec une surface nouvellement forée, il pénètre immédiatement dans celle-ci. Puis, la pénétration est limitée, certains pores sont 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 la formation du gâteau 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 gâteau interne dépend des caractéristiques du milieu filtrant. Pour réaliser une obstruction efficace du milieu poreux, la boue doit contenir :

- Des particules de dimensions comprises entre :
 - Une valeur légèrement inférieure à l'ouverture des pores les plus larges.
 - Une valeur égale à environ le tiers de cette ouverture.
- Des particules plus petites atteignant le domaine colloïdal, susceptibles 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 susceptibles de la provoquer est plus élevée. A titre indicatif, les données suivantes sont proposées par la littérature.

Tableau I. 3 : Caractéristiques du milieu filtrant [3].

| Milieu filtrant | Diamètre des particules provoquant l'obstruction | Concentration en particules à 2,5 cm (kg/cm ³) |
|-----------------------------------|--|--|
| Roche non consolidé $K < 100$ mD | < 2 | - |
| Roche consolidée $0,1 < K < 1D$ | 10 | 2,85 |
| Sable non consolidé $1 < K < 10D$ | 74 | 14 à 28 |

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'extérieur, le long de la paroi, en constituant le gâteau externe.

Comme la montre (Figure I.4), différentes zones de pénétration du fluide peuvent être distinguées du puits vers la formation :

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

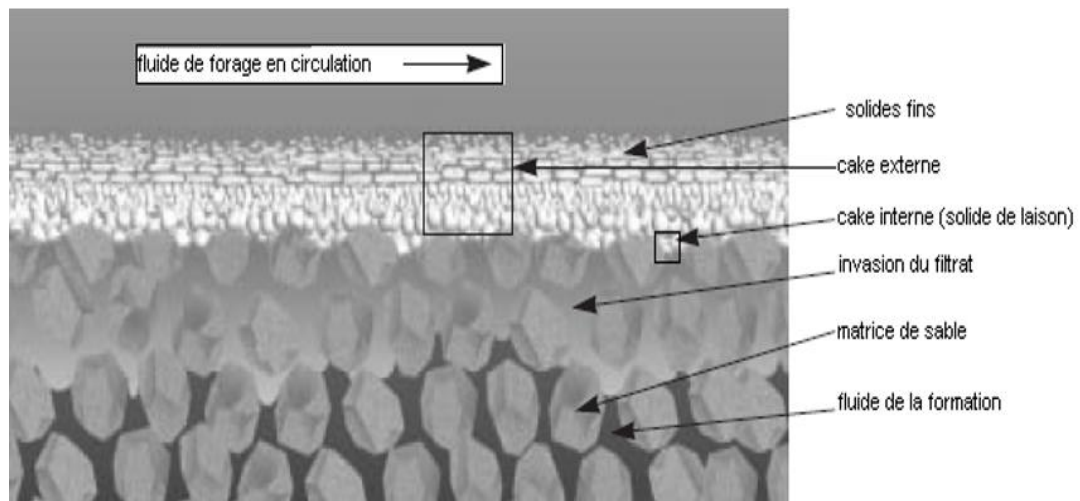


Figure I. 4: Les différentes zones de pénétration du fluide de forage en circulation [34].

D'après les travaux d'Outmans (1963), la diminution de perméabilité par les fines particules ne serait pas sensible lors de la pénétration initiale, mais le deviendrait après quelques heures, par suite probablement de leur migration provoquant un blocage des pores.

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 gâteau de faible perméabilité sur la paroi est importante pour prévenir une invasion des particules solides et le filtrat et obtenir un minimum d'endommagement.
- L'épaisseur du gâteau 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 gâteau ne se forme, le filtrat est contrôlé par la perméabilité de la roche. La force responsable de l'approche et de l'adhésion des particules à la surface est fonction de la vitesse de filtration. Si le milieu filtrant est de faible perméabilité, il est possible que le taux de filtration soit si faible qu'aucune particule ne puisse se déposer.
- Dans ce cas, aucun gâteau externe ne sera formé et le filtrat sera directement contrôlé par le milieu filtrant. On peut donc, parler d'une perméabilité critique de la roche en dessous de laquelle aucun gâteau externe ne peut être formé pour un taux de cisaillement donné. En général, cette perméabilité critique se situe entre 0,1 et 1 Md [34].

-

I.8.1. Colmatage des roches réservoirs

Le colmatage est l'expression de la variation de pression consécutive à une diminution de perméabilité. Cette chute de pression additionnelle est appelée « effet pariétal » ou « effet du colmatage en débit ».

L'expression simplifiée donne :

$$\Delta P_s = 18,6. (\eta \cdot Q) / H \cdot S \quad (I.3)$$

Avec S coefficient d'effet partiel qui vaut :

$$S = (K - K_a) / K_a \cdot \log (R_a / R_w) \quad (I.4)$$

K : perméabilité de la formation en mD.

R_w : rayon du puits en m.

K_a : perméabilité de la zone endommagée.

R_a : rayon de la zone endommagée en m.

η : viscosité du fluide à la température de fonds en cp.

Q : débit du fluide en m³/j.

H : épaisseur perméable utile en m.

ΔP_s : effet pariétal en bar.

I.8.2. Signification physique de l'effet de la paroi

Le rayon R_a et la perméabilité K_a de la zone endommagée sont reliés au coefficient de paroi S par l'expression suivante :

$$S = (K - K_a) / K \cdot \log (R_a / R_w) \quad (I.5)$$

On voit que S sera positif dans le cas où la perméabilité de cette zone est inférieure à celle du reste de la formation ; il y a endommagement.

Lorsque les perméabilités sont égales S sera nul, il n'y a pas d'endommagement.

Enfin, lorsque la perméabilité de paroi est plus grande que dans la formation (cas d'une acidification réussite), S sera négative.

Conclusion

Au terme de ce chapitre, les différentes propriétés physico- chimiques et rhéologiques de fluide de forage ont été abordées. Leurs différents types avec leurs composants et classifications ont été définies.

En général, la formulation des fluides de forage a beaucoup évolué afin d'apporter de meilleures solutions aux problèmes soulevés et assurer une amélioration continue des opérations de forage.

❖ **Chapitre II**

Les polymères et les biopolymères

Introduction

Pendant les années 30 les polymères sont employés dans les fluides de forage, leur addition est devenue essentielle pour améliorer les performances techniques des fluides de forage. Depuis cette date, les polymères sont devenus très spéciaux et leur utilisation a augmenté en conséquence.

Les biopolymères représentent l'une des variétés de polymères tant utilisés dans l'industrie pétrolière, qui sont des molécules produites par des cellules biologiques, notamment bactéries, et des cellules de plantes et d'animaux. Les biopolymères produits par les bactéries et par d'autres micro-organismes ont un vaste champ d'application dans la résolution des problèmes industriels.

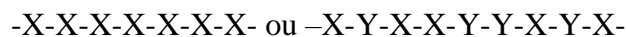
II.1. Généralités sur les polymères et les biopolymères

II.1.1. Les polymères

II.1.1.1. Définition

Un polymère est un système formé constitué d'une série de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande taille, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités. Ces macromolécules sont également appelées chaînes macromoléculaires ou chaînes polymères. Les chaînes macromoléculaires ainsi définies ont des dimensions moléculaires très supérieures à celles des molécules simples. Ils peuvent se présenter :

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



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

Lorsque ces polymères présentent des groupements de charges anioniques ou cationiques, on les appelle des polyélectrolytes [34].

II.1.1.2. Classification générale des polymères

Les polymères en fluides de forage peuvent être classés de trois manières :

a. Selon leur origine [34]

On peut les classer en trois catégories :

- **Les polymères naturels (Biopolymères)**

Sont issus des règnes végétal ou animal ; les exemples les plus connus, la famille des polysaccharides (Cellulose, Amidon, Xanthane, Guar...) celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc... Considérés comme biodégradables.

- **Les polymères artificiels (Semi-synthétiques)**

Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, les esters cellulosiques ont toujours connu une certaine importance économique. Des exemples sur les polymères organiques modifiés CMC, PAC

- **Les polymères synthétiques**

Totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.

b. Selon leur chimie

La réactivité chimique dépend essentiellement du type de groupes qui sont attachés à la molécule et de leur nombre. Il y'a souvent plus d'un type de groupes réactifs. La distribution des groupes sur le polymère affecte aussi la réactivité et les propriétés. Souvent en raison de la nature complexe des polymères on ne connaît pas les détails de la structure ; mais les diverses conditions de réaction peuvent produire des différences dans la structure qui peut influencer sur les performances de polymères. [35]

Les groupes qui peuvent être reliés au polymère sont divisés à 03 :

- Non anioniques.
- Anioniques ou chargés négativement.
- Cationiques ou chargés positivement.

Tableau II. 1 : Groupes polaires[36].

| Classe | Groupe | |
|-------------|-----------------|--|
| | Nom | Forme |
| Non ionique | - Hydroxyle, | O-H |
| | - liaison-éther | R-O-R |
| | - OH phénolique | -O-CH ₃ |
| Anionique | - Carboxyle | C ₆ H ₅ OH-C ₆ H ₅ O-COOH-COO ⁻ |
| | - sulfonique | -SO ₃ H -SO ₃ ⁻ |
| | - phosphate | -PO ₃ H- -PO ₃ |
| Cationiques | - amine | -NH ₃ ⁻ -NH ₄ ⁺ |

c. Selon leur fonction

Le tableau II. 2 ci-dessous présenté les principales fonctions des polymères utilisés dans le domaine du forage :

Tableau II. 2 : Résumé des relations entre les fonctions d'un polymère dans un fluide de forage et ses structures générales [37].

| Fonction | Caractéristiques principales |
|-------------------------------------|---|
| Viscosité | Poids moléculaire élevé |
| Viscosité et gélation | Poids moléculaire élevé et structure à haute ramification ou agent de réticulation. |
| Viscosité dans des solutions salées | Poids moléculaire élevé et types non ioniques ou anioniques à haute substitution. |

| | |
|---|--|
| | |
| Déflocculation, dispersion, ou fluidification | Poids moléculaire faible, chargé négativement à des valeurs de pH alcalines. |
| Floculation | Poids moléculaire élevé avec groupes chargés pour adsorption aux argiles. |
| Surfactant | Groupe hydrophobe et groupes hydrophiles sur la même molécule. |
| Additif de filtrat | Particules à forme colloïdale. |

- **Viscosifiants**

Les propriétés visqueuses conférées à l'eau par la solution d'un polymère sont dues aux interactions eau/polymère et polymère/polymère. Plus les molécules sont longues, plus il est difficile de séparer les molécules les unes des autres et plus elles deviennent enchevêtrées. Ces forces qui engendrent la viscosité peuvent être interrompues par l'apport d'énergie ou de cisaillement. Il en résulte que, plus le taux de cisaillement est élevé plus la viscosité est diminuée. Les molécules linéaires, comme celles dérivées de la cellulose, tendent à être plus sensibles à la dégradation mécanique que les polymères à ramifications plus importantes comme les polysaccharides bactériens. Des conditions de haute température, haute teneur en oxygène et haute alcalinité tendraient à rendre la plupart des polymères organiques plus sensibles à une dégradation chimique.

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

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

- **Défloculants**

Les défloculants ou fluidifiants dans les systèmes à base d'argiles alcalines, permettent d'obtenir généralement des résultats par adsorption du polymère chargé négativement sur les plaquettes d'argile, neutralisant ainsi les charges positives et créant une charge négative globale. Ceci est illustré en (Figure II. 1) Ainsi, les fluidifiants sont caractérisés par leur charge négative et leur poids moléculaire faible. Si le polymère est trop long, il liera les particules entre elles et manifestera une action de floculation.

Le tanin est utilisé dans les boues à base d'eau douce. Dans les boues salées, on utilise les lignosulfonates de fer et chrome (FCL) [7].

- **Floculants**

Les floculants sont principalement caractérisés par un poids moléculaire élevé, ce qui permettra au polymère de former des liaisons de particule à particule. Les molécules de groupe ionique peuvent adsorber plus fortement sur les sites ioniques et ainsi floculer de façon plus efficace. (La Figure II. 1) tente de montrer comment un polymère avec les mêmes groupes réactifs peut agir comme un défloculant, avec un poids moléculaire élevé.

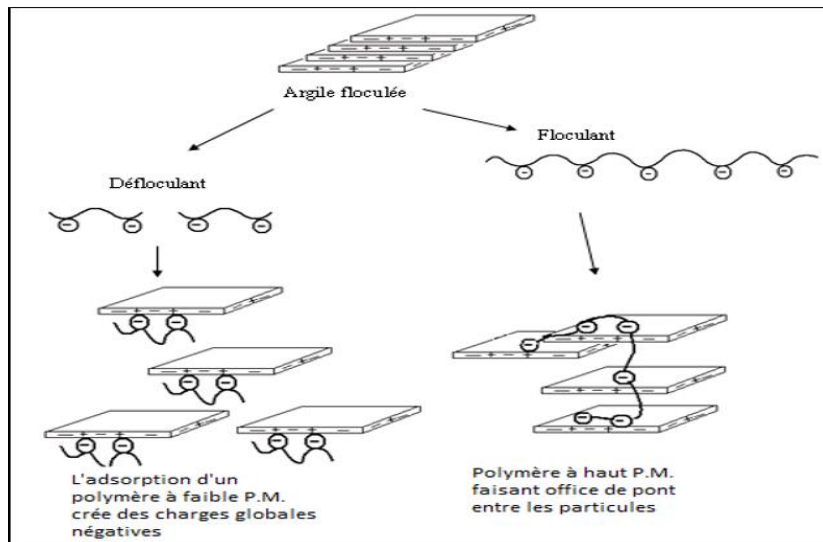


Figure II. 1 : Schéma illustrant le rôle de défloculation des polymères à faible (défloculant) et à haut (floculant) poids moléculaire [37].

- **Surfactants**

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

La propriété particulière des surfactants utilisés dans les fluides de forage est la capacité de ces molécules à exister à l'interface des surfaces hydrophobes et hydrophiles.

- **Additifs de filtrat**

Souvent, l'opération du forage s'accompagne d'une perte de fluide à travers les pores ou fracture de formation. Le filtrat est généralement défini comme la migration de la portion liquide de la boue de forage dans les formations. Le filtrat est indésirable parce qu'il diminue la stabilité des formations [38].

II.1.1.3. Polymères utilisés dans les fluides de forage

a. Les celluloses polyanioniques (PAC)

Le PAC est un polymère cellulosique de type carboxyméthylcellulose ayant une conformation en pelote flexible, opposée à celle du xanthane qui est un polysaccharide se présentant sous forme d'une hélice semi-rigide. Les celluloses polyanioniques sont employées principalement comme réducteurs de filtrat pour les boues à base d'eau douce et d'eau de mer, mais agissent également en tant que viscosifiants dans ces systèmes. Le PAC est disponible en deux catégories (viscosité élevée et faible), de ce qui donnent le même degré de réduction de filtrat mais différant degrés de viscosité.

Une caractéristique du PAC est le degré de substitution (DS) du groupe carboxyméthyl qui est supérieur à 0,8. La stabilité thermique du PAC est de 149 °C et il n'est pas sensible à dégradation bactérienne [39].

b. 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 selon sa longueur de chaîne. La CMC est un polymère linéaire anionique à base de cellulose partiellement greffée

par des groupes $-OCH_2COO-$ selon un certain degré de substitution (DS) [3]. Et a un certain nombre de propriétés importantes comprenant la solubilité, la rhéologie, l'adsorption sur des surfaces, etc [40].

La fabrication du CMC consiste en deux étapes

- Dans la première étape, la cellulose est suspendue dans une suspension alcaline pour couper les liaisons entre les chaînes de cellulose
- Ensuite, la cellulose réagit avec le monochloroacétate de sodium pour produire le CMC Na [41].

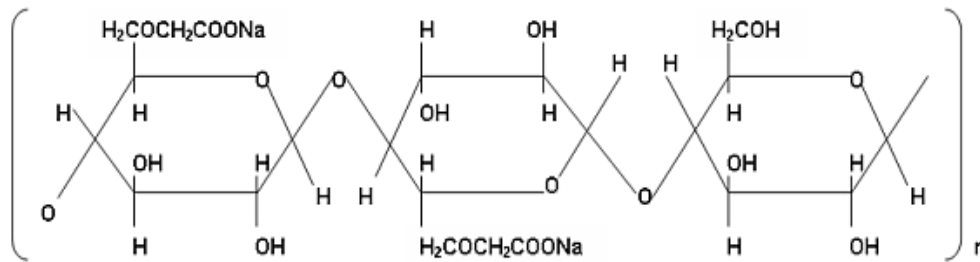


Figure II. 2 : Structure chimique CMC[6].

c. Polymères synthétiques PHPA

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

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

Une classe de base d'eau emploie le polyacrylamide partiellement hydrolysée (PHPE) comme additif fonctionnel, Pour l'encapsulation des déblais et la stabilisation des argiles. Le PHPA joue aussi le rôle de viscosifiant, réducteur de friction et floculant lorsqu'il apporte une réduction du filtrat. Le KCl est employé comme un inhibiteur d'argile dans la plupart des boues de PHPA conçus [42,43].

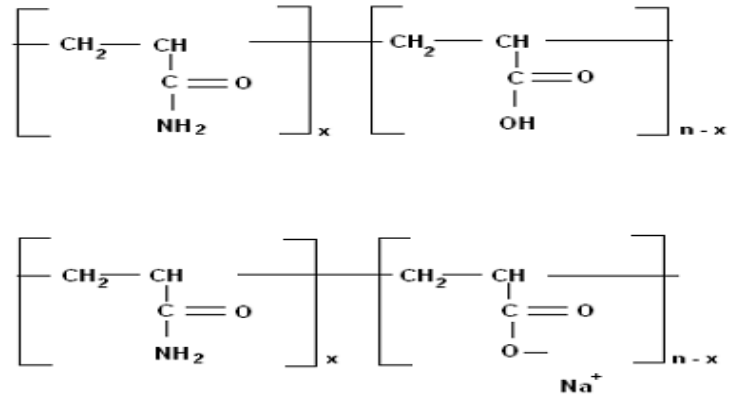


Figure II. 3: Structure chimique du polyacrylamide partiellement hydrolysé et sa forme de sel de sodium correspondante [44].

d. Le glycol

Dans le domaine du forage, PG (polyglycol) ou PEG (polyéthylène glycol) désigne souvent un ensemble de composés à base de glycol (ou glycérol). La première référence relative à l'utilisation du glycol dans le domaine des fluides de forage est donnée par Canon en 1940 pour le contrôle du gonflement des argiles. Actuellement, les (Poly-) glycérols et les (poly-) glycols généralement notés simplement glycérols et glycols sont largement utilisés pour le forage des argiles [45].

e. Hydroxyéthylcellulose (HEC)

L'hydroxyéthylcellulose (HEC) est l'un des dérivés de cellulose. Elle diffère de la cellulose par le fait que les groupes hydroxyles, en rouge, du motif glucose sont remplacés par des groupes hydroxyéthyl éther (Figure II.4). Ces groupes se mettent en travers quand le polymère essaie de cristalliser. Comme elle ne peut pas cristalliser, le polymère HEC est soluble dans l'eau [46]. Il peut coexister avec d'autres polymères et sels parce qu'il ne contient pas des groupements actifs.

D'après Raines. Russell H [47], le HEC est utilisé comme réducteur de filtrat ; il a une substitution molaire (SM) de 1,1 à 1,6. Sa viscosité apparente, dans l'eau, est d'au moins 15 cps. L'utilisation du HEC comme viscosifiant est attribuée à sa SM qui est supérieure à 2.

Lorsque la SM augmente, la viscosité s'accroît ; le filtrat diminue entre 0,75 à 2. La solution de HEC présente un comportement pseudoplastique.

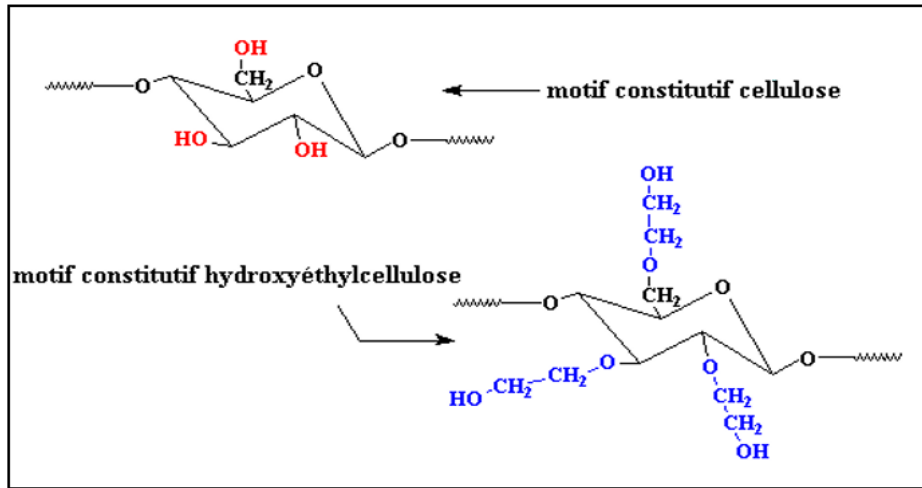


Figure II. 4: Motif constitutif d'une cellulose et d'une hydroxyéthylcellulose [46].

II.1.1.4. Adsorption des polymères

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

L'étude statistique d'une chaîne isolée adsorbée a été l'objet de nombreux travaux dans les années 60. Hovee et Silberberg distinguent les **boucles**, les **trains** et les **queues** (Figure II.5).

Les boucles sont constituées par les portions de chaînes situées entre deux monomères en contact avec la surface, tandis que les queues sont les portions terminales de chaîne, situées entre un bout libre et le plus proche monomère en contact avec la surface.

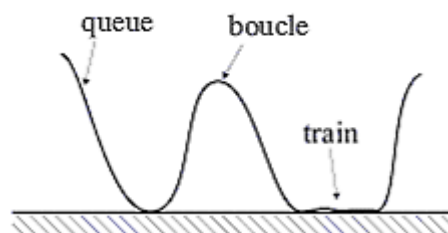


Figure II. 5 : Schéma d'absorption d'une chaîne de polymère sur une surface [48].

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

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

Il convient également de souligner que dans la plupart des situations, l'adsorption d'un polymère sur une surface minérale est limitée par le temps d'accès d'une molécule de polymère vers la surface ; cet accès est contrôlé, suivant le système considéré, soit par la diffusion du polymère soit par la convection [34].

II.1.1.5. Mode d'action des polymères avec les particules argileuses

Les polymères classés comme polysaccharides représentent le groupe le plus utilisé dans les fluides de forage.

L'unité de base est le glucose qui contient seulement des atomes de carbone, hydrogène et oxygène. Le type et la nature des polymères conditionnent leur action en tant que viscosifiant ou réducteur de filtrat :

- Concernant la viscosité ou la fluidification :

Dans les systèmes argileux, les polymères réagissent par adsorption par les charges négatives sur les particules argileuses qui présentent des charges positives.

L'utilisation de polymères comme le xanthane qui présente des conformations en bateau menant à l'enchevêtrement de ses molécules et formant ainsi une couche rigide et visqueuse. De même que le polymère de type PHPA va engendrer par effet de masse (masse moléculaire élevée) un épais film visqueux.

- Pour ce qui est du mécanisme de réduction de filtrat :

Il est lié à la présence de particules colloïdales comme celles de l'amidon qui se compriment et bouchent les pores du cake empêchant la filtration. Par ailleurs, les molécules du PAC ou CMC

déflocculent les particules de bentonite formant un cake tassé en une couche plus mince imperméable [49].

II.1.1.6. Rhéologique des polymères utilisés dans la boue de forage

De nombreuses solutions de polymères présentent un comportement rhéofluidifiant. Elles s'écoulent sous une contrainte faible mais ils ont une viscosité effective qui diminue lorsque la contrainte croît. A des températures supérieures à 60 °C, l'amidon fondu présente un comportement pseudoplastique.

Du point de vue rhéologique, les solutions concentrées en polymères ont souvent un comportement pseudoplastique ou rhéofluidifiant.

D'après K. Benyounes et Al, les solutions de Xanthane ont un comportement non newtonien avec une contrainte seuil. Pour des faibles vitesses de cisaillement, la viscosité apparente est remarquablement élevée. Ainsi, la viscosité et la contrainte seuil augmentent au fur et à mesure que la concentration de xanthane augmente.

Tandis que les solutions de CMC ont un caractère rhéofluidifiant avec une absence de contrainte seuil.

Le Xanthane présente une viscosité élevée à faible cisaillement, même à faible concentration. La viscosité constante et indépendante du pH (pour des pH compris entre 1 et 11) jusque à des températures inférieures à 120 °C. Il présente un comportement pseudo-plastique et thixotropique [37].

II.1.1.7. Hydratation des polymères

La plupart des polymères utilisés dans le domaine du forage sont soluble dans l'eau. Les facteurs qui influent sur l'hydratation des polymères sont :

- Ramifications ou réticulations dans la structure.
- Concentration et type des groupes de molécules pH de la solution, changeant le caractère ionique des molécules, et par conséquent, les
- pH de la solution, changeant le caractère ionique des molécules, et par conséquent, les forces de répulsion et d'attraction entre les molécules.
- La teneur ionique. Et son effet sur la répulsion électrostatique entre les charges. L'effet sur un polymère chargé négativement est de changer la configuration d'un polymère étiré en eau douce (où les charges de répulsion étirent la molécule) en une structure semblable à une bobine compacte dans une solution saline où les forces de répulsion

sont plus faibles. Le changement de la forme moléculaire modifie les propriétés physiques du polymère dans la solution. On peut voir que le polymère ainsi “torsade “ présente une surface moindre à l’eau ou aux autres molécules de polymères. Ces réactions étant à l’origine du développement des propriétés visqueuses, on comprendra qu’une augmentation du sel réduira la viscosité d’un polymère chargé.

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

Les ions multivalents peuvent agir comme des agents de liaison par réaction ou par complexification avec plus d’un groupe chargé de la molécule. La liaison peut réduire la solubilité et la viscosité. Le degré de la réaction dépend de la concentration des ions multivalents et du pH de la solution [37].

II.1.2. Les biopolymères

II .1.2.1. Définition

Depuis quelques années, les termes biopolymère, polymère biosourcé ou encore polymère biodégradable sont au cœur de notre société mais il convient de ne pas les confondre. A ce sujet, une publication récente de l’IUPAC permet de clarifier cette terminologie. Ainsi, un biopolymère est défini comme étant constitué par un genre de biomacromolécules, elles-mêmes formées par des organismes vivants. C’est le cas des protéines, des acides nucléiques ou encore des polysaccharides. Lorsque l’on parle de polymère biosourcé, le terme biosourcé signifie que le polymère est composé ou issu en partie ou complètement de la biomasse. Cette caractéristique présente un avantage certain puisqu’elle limite l’utilisation des ressources fossiles [50].

II.1.2.2. Différentes familles de biopolymères

a. Biopolymères d’origine biologique : peuvent être classés en trois familles :

- Les polymères issus directement des ressources végétales et animales comme les polysaccharides, les protéines et les polynucléotides ;
- Les polymères issus d’origine bactérienne comme les Polyhydroxyalcanoates (PHA) ;
- Les polymères obtenus indirectement par polymérisation de monomères eux-mêmes issus de ressources végétales comme l’acide lactique, résultant de la fermentation de sucres ou encore des composés monomères réactifs dérivés d’huiles végétales. [50]

b. Biopolymères synthétiques

Ils sont Obtenus par voie fermentaire, on les appelle biopolymères synthétiques ou chimiosynthétiques en raison de leur mode de fabrication. En effet, celui-ci consiste en une polycondensation (chauffage) de monomères naturels ou identiques aux naturels. Le plus connu est le PLA (Poly Acide Lactique) [50].

Tableau II. 3 : Classes de biopolymères [51].

| Classes | Descriptions | Exemples de biopolymères |
|--|--|--|
| Polysaccharides (plantes/animaux) | Glucides ou sucres complexes constitués de plusieurs | Amidon, Cellulose, Alginate, Chitosane, Agar, Pectine, Gommés, Carraghénane. |
| Polysaccharides (Issus des bactéries) | Monosaccharides (glucides ou sucres simples) liés entre eux. | Xanthane, Dextrane, Gellane, Curdlan, Pullulane, Elsinane. |
| Protéines et polypeptides | Macromolécules biologiques composées d'une ou plusieurs chaînes d'acides aminés liés entre eux par des liaisons peptidiques. | Polyacide aminé, Collagène, Gluten, Caséine, Soja, Glycoprotéine, Zéine. |
| Polyesters (Synthétisés par des bactéries) | Polymères dont les motifs répétitifs de la chaîne principale contiennent la fonction ester. | Poly (acide lactique) (PLA) Polyhydroxyalcanoate (PHA) |
| Polyphénols | Molécules présentant plusieurs groupements phénoliques. | Lignines, Tanins, Acides humiques |
| Polynucléotides et nucléotides | Molécules composées de plusieurs nucléotides. Certains nucléotides forment la base de l'ADN et l'ARN. | Adénosine-5'-triphosphate (ATP) Adénosine-5' monophosphate (AMP) |

b.1. Les polysaccharides

Les polysaccharides en particulier constituent la famille de biopolymères les plus répandus et les plus utilisés. Ils entrent dans la composition de la plupart des cellules (végétales, animales, et microbiennes). Parmi les plus connus, on peut citer la cellulose, l'amidon, l'alginate, la chitine, et le chitosane.

Les polysaccharides sont composés de longues molécules linéaires ou ramifiées à glucides simples. Ces derniers sont encore appelés hydrates de carbone à cause de leur formule générique de base $C_nH_{2n}O_n$, sont des molécules organiques caractérisées par la présence de chainons carbonés porteurs de groupements hydroxyles, et de fonctions aldéhydes ou cétoniques, et éventuellement de fonctions carboxyles ou amines [52,53].

- **La cellulose**

La cellulose représente la molécule biologique la plus abondante sur notre planète. Cette macromolécule glucidique est un élément structural de premier ordre pour la grande majorité des parois végétales. Élément constitutif majeur du bois, la cellulose est également un constituant majoritaire du coton et des fibres textiles telles que le lin, le chanvre, le jute ou la ramie. La cellulose est un homopolymère linéaire de résidus glucose de configuration D, connectés selon une liaison glycosidique β , (1 \rightarrow 4) (Figure II.6). La masse molaire de la chaîne de cellulose varie de 50000 à $2,5 \times 10^6$ g.mol⁻¹, en fonction de son origine et du traitement d'extraction utilisé.

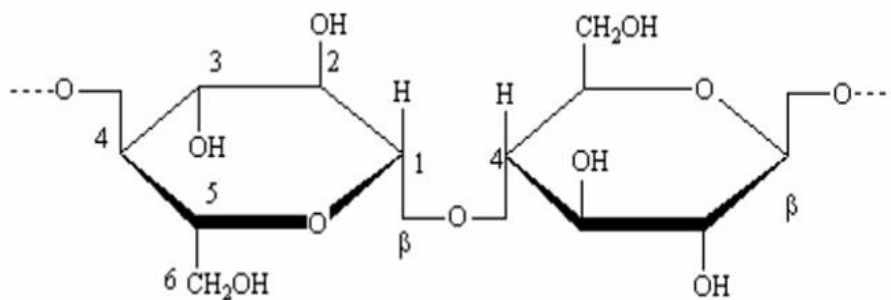


Figure II. 6 : Représentation schématique d'une chaîne de cellulose [54].

A cause des interactions très fortes entre les chaînes, la cellulose native est fortement cristalline et insoluble dans l'eau. Pour améliorer sa solubilité dans l'eau et lui conférer des propriétés filmogènes, la cellulose peut être estérifiée ou étherifiée au niveau des fonctions hydroxyles libres pour aboutir à certains dérivés cellulosiques comme carboxyméthyl cellulose (CMC), hydroxypropyl cellulose (HPC), hydroxypropylméthyl cellulose (HPMC). La cellulose est très utilisée pour la formation de films flexibles et transparents, présentant des propriétés

barrières à l'humidité et à l'oxygène non négligeables. Citons par exemple la cellophane qui domine le marché des emballages transparents. La cellophane est constituée de cellulose régénérée, obtenue par extrusion d'une dispersion visqueuse alcaline de xanthate de cellulose dans un bain acide. Le film est obtenu après traitement avec un agent plastifiant (glycérol) et séchage [54].

II.1.2.3. Classification des biopolymères

« Biopolymères » c'est un terme générique qui regroupe trois grandes catégories sur la base des matières premières d'origine et des caractéristiques de dégradation biologique. On différencie ainsi :

- Les biopolymères provenant de matières premières renouvelables et biodégradables.
- Les biopolymères provenant de matières premières renouvelables non biodégradables.
- Les biopolymères provenant de matières premières fossiles et biodégradables.

Chacune de ces catégories se divise elle-même en plusieurs classes. La catégorie la plus intéressante et par conséquent la plus importante, est celle des plastiques biodégradables provenant de matières premières renouvelables. Du fait qu'ils ne présentent aucune réaction impliquant le CO₂ et qu'ils peuvent être compostés, les produits de cette catégorie sont des « plastiques biologiques » authentiques. On distingue plusieurs groupes à l'intérieur de cette catégorie :

- Les biopolymères provenant de matières premières renouvelables, biodégradables, synthétisées par les micro-organismes

Acide poly lactique (PLA) → extrusion

Polyhydroxyalcanoate (PHB) → moulage par injection

Les autres poly hydroxydes d'acides gras (PHF) → moulage par injection

- Les biopolymères biodégradables provenant de matières végétales

Dérivés de l'amidon → extrusion et moulage par injection

Mélanges de cellulose (CA) → moulage par injection

Base lignine → moulage par injection

- Les biopolymères biodégradables d'origine animale

Chitine et chitosane → procédés de moulage à sec

Biopolymères biodégradables d'origine fossile

Polyester → extrusion

Ethanol (PVA) [55].

II.1.2.4. Les propriétés des biopolymères

De par leur structure chimique, les biopolymères présentent des propriétés particulières et intéressantes utilisés dans des domaines très variés tels que l'emballage, l'agriculture, la construction, l'automobile, l'électronique et le textile. Ils sont également employés pour des applications à forte valeur ajoutée dans le domaine médical (implants vasculaires, fils de suture, vis et broches, ligaments artificiels...) [54].

a. La biodégradabilité

Le terme biodégradable a d'abord été employé à tort, dans les années 1980, pour des matériaux plastiques issus de la pétrochimie rendue fragmentables par ajout d'un additif peroxydant (photodégradable) ou d'une charge biodégradable comme l'amidon (fragment biodégradable), dans le but de résoudre le problème des déchets engendrés par les matières plastiques et de leur pollution.

A ce jour, le terme biodégradable est donné aux polymères d'origine naturelle c'est-à-dire réservé aux biopolymères qui ont la capacité de se dégrader sous l'action de microorganismes. Leurs décompositions moléculaire et chimique conduisent à la formation de CO_2 et d' H_2O en présence d'oxygène (ou à la formation de CH_4 , CO_2 et d' H_2O en milieu anaérobie, plus une nouvelle biomasse. La biodégradation d'un biopolymère dépend de différents facteurs que l'on peut regrouper en trois grandes catégories :

- **Les paramètres physico-chimiques du milieu de dégradation** : La température favorise l'activité microbienne ; la teneur en eau du milieu doit être suffisante pour permettre aux fonctions des micro-organismes de s'exprimer. Le pH, la présence d'oxygène et l'action des UV vont également influencer sur le phénomène. On comprend aisément que la dégradation ne sera pas la même dans un désert, en haute montagne ou dans un marécage.
- **Les paramètres microbiologiques du milieu de dégradation** : selon le matériau considéré, la nature et l'abondance des micro-organismes présents sur le site vont avoir un impact sur la vitesse de dégradation.
- **La structure chimique et la morphologie du polymère constituant le matériau** : Un matériau hydrophile, poreux et possédant une faible masse molaire aura une vitesse de dégradation supérieure à celle d'un matériau massif et dense. Pour être conformes aux normes et respecter les temps de dégradation imposés, certains produits ne peuvent parfois pas dépasser quelques dizaines de microns d'épaisseur. La cristallinité du

polymère, qui dépend de sa structure mais aussi des conditions de mise en œuvre, a également une influence sur sa biodégradabilité. Les plastifiants et autres additifs vont également modifier les caractéristiques du matériau et influencer sur son aptitude à la biodégradation [54].

b. Perméabilité à la vapeur d'eau

La plupart des biopolymères comme l'amidon, la cellulose et les protéines sont hydrophiles, ce qui leur confère des propriétés de perméabilité à la vapeur d'eau. Ces propriétés sont dues notamment à la présence de fonctions polaires hydroxyle et/ou amine qui ont une forte réactivité avec l'eau par formation de ponts hydrogènes ; ce qui leur confère aussi une propriété antistatique.

La perméabilité à la vapeur d'eau pourrait être un inconvénient dans certaines applications, notamment pour les emballages alimentaires. Par exemple, les viennoiseries ne peuvent pas se trouver dans un endroit trop humide pour conserver leur fraîcheur. Par contre, pour certains types d'emballage, elle est avantageuse. En effet, en évitant les condensations, la durée de conservation des produits frais est allongée. Cette propriété trouve également une application dans les emballages des produits humides leur laissant la possibilité de continuer de sécher pendant les étapes de stockage et de transport [54].

c. Biocompatibilité et biorésorbabilité

Un matériau biocompatible est un matériau qui est capable d'assurer une fonction avec une réponse appropriée et sans effets indésirables sur l'environnement biologique dans lequel il est appelé à fonctionner. La réponse biologique d'un matériau dépend de 3 facteurs : ses propriétés, la caractéristique de l'hôte et la demande fonctionnelle pour le matériau.

Les biopolymères par leur origine naturelle, remplissent logiquement cette fonction et les implants médicaux en matériau inerte comme les céramiques sont de plus en plus remplacés par des polymères d'origine naturelle.

En plus de la biocompatibilité, on recherche également pour des applications médicales spécifiques des matériaux biorésorbables pouvant se décomposer tout naturellement dans l'organisme humain pour être remplacés après par un tissu vivant. Les biopolymères sont dégradés naturellement dans l'organisme humain par hydrolyse (enzymatique) et libèrent des molécules assimilables et non toxiques. En pharmacologie, les médicaments à libération

contrôlée sont des exemples d'application où la biorésorbabilité des polymères joue un rôle important comme illustrée à la (Figure II.7) [54].

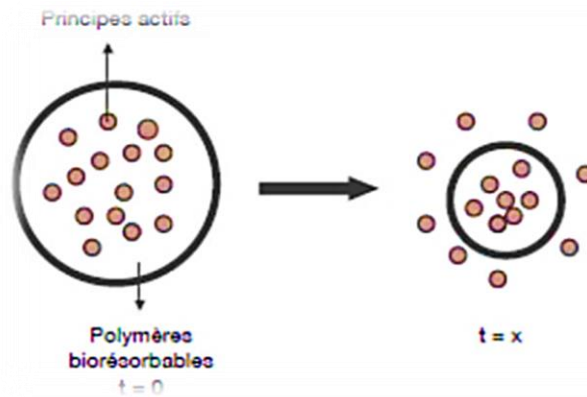


Figure II. 7 : Libération contrôlée des principes actifs [54].

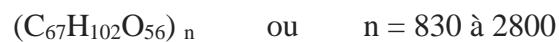
II.1.3. Les biopolymères utilisés dans le fluide de forage

II.1.3.1. La gomme de Xanthane (Xanthane Gum)

Le Xanthane est un hétéropolysaccharide anionique ramifié, extracellulaire, produit par voie microbienne, par *Xanthomonas campestris*, une bactérie inoffensive. Ce biopolymère hydrosoluble possède des propriétés rhéologiques exceptionnelles et trouve des applications industrielles nombreuses et variées [40,6].

L'industrie pétrolière l'utilise pour la récupération assistée du pétrole en tant qu'agent viscosifiant [41].

Sa formule brute moyenne est approximative [42] :



Le Xanthane est largement utilisé en tant que viscosifiant vu sa qualité rhéologique, sa résistance vis-à-vis de la salinité, et sa biodégradabilité [6]. Son domaine de stabilité thermique est 120 à 138 °C [34].

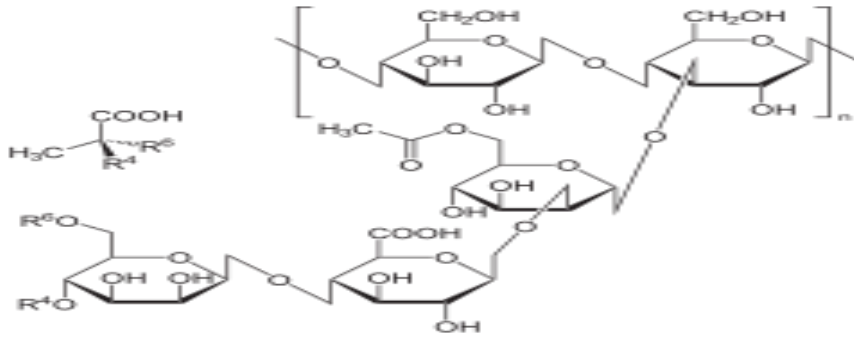


Figure II. 8 : Structure moléculaire d'un monomère chimique de Xanthane [56].

II.1.3.2. L'amidon

L'amidon est présent dans les plantes, formée à partir d'un polysaccharide appelé amylopectine. A l'intérieur de la coquille se trouve des faisceaux d'un polysaccharide linéaire en forme de bobine : L'amylose.

L'amidon peut être modifié pour former un agent très efficace de réduction de filtrat, particulièrement dans les fluides salés floculés en formant des particules colloïdales gonflables à l'eau qui vont boucher les pores du cake.

L'amidon est ajouté aux boues de forage douces ou salées pour réduire le filtrat. Son emploi exige que l'une des deux conditions suivantes soit satisfaite.

D'autre part l'amidon est sensible à l'action de la température qui provoque une dégradation résultant d'une coupure des chaînes linéaires ou ramifiées. Un bon amidon doit, dans des conditions de pressions normales de fond de puits, résister à 150°C soit environ 4500 mètres de profondeur. La présence de calcium soluble nuit à l'efficacité de l'amidon. La (Figure II.9) représente la structure chimique de l'amylose et de l'amylopectine [3].

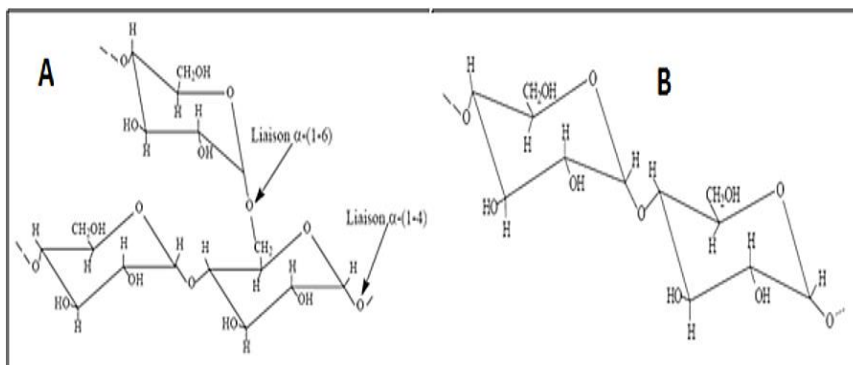


Figure II. 9 : Représentation de structure chimique de l'amylopectine (A) et d'amylose (B) [57].

II.2. Le caroubier

II.2.1. Description

Le caroubier appartient à la famille des légumineuses (Fabacées) de l'ordre des Rosales, de la sous-famille des césalpiniacées (Figure II.10). C'est un arbre de croissance lente, d'une longévité importante dépassant souvent les 200 ans [58]. Il est largement cultivé dans les régions méditerranéennes à des fins ornementales et industrielles et nécessite peu d'entretien.



Figure II. 10 : L'arbre de caroubier [59].

II.2.2. Production de caroube en Algérie

Selon les statistiques fournies par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production de caroube en Algérie est passée de 3 952 tonnes en 2000 à 4 043 en 2017. Selon le Faostat (2019), la production mondiale totale de caroube est estimée à 136 539 tonnes [60].

II.2.3. La gousse de caroubier

La gousse de caroube est principalement composée de deux éléments : la pulpe et les graines qui représentent respectivement, 90% et 10% du poids de la gousse. L'arbre de caroubier commence à produire des gousses à partir de l'âge de 6 ans. Le fruit se développe très lentement nécessitant 9 à 10 mois pour atteindre la maturité [58].



Figure II. 11 : Gousse de caroube en moi de Décembre [61].

La couleur de la gousse de caroube est verte avant d'atteindre la maturité (Figure II.11). A maturité, elle devient brun foncé à noire et parfumées (Figure II.12). Les gousses sont comestibles et deviennent indéhiscentes après maturité. Elle est sinueuse sur les bords, aplatie, droite ou arquée et présente une surface ridée (péricarpe), luisante, comprimée, recourbée ou non suivant les espèces, épaissie aux sutures, de longueur allant de 10 à 30 cm, une largeur variée entre 1,5 et 3,5cm et une épaisseur moyenne de 1 cm (Figure II. 12A). Certains auteurs ont rapporté que la gousse du caroubier peut renfermer entre 12 à 16 graines. Ces graines se trouvent à l'intérieur de la gousse dans des petits compartiments du mésocarpe (tissu pulpeux sucré) et qui sont séparés par des cloisons pulpeuses. Les graines se caractérisent par une texture très dure, comprimées, ayant la forme ovale oblongue, une couleur brunâtre et brillante, dont la longueur et la largeur varie de 8 à 10 mm et de 7 à 8 mm et de 3 à 5 mm d'épaisseur (FigureII.12B) [62].



Figure II. 12 : A : Gousse de caroube ; B : Coupe transversal de la gousse [64,65].

II.2.3.1. Composition de la pulpe

La pulpe sucrée de la caroube est employée depuis longtemps comme nourriture pour les bétails. La pulpe du fruit de caroube contient des glucides sucrés, ainsi que des fibres alimentaires, des tanins et des polyphénols. La caroube broyée est traitée industriellement et vendus dans les grands magasins et les marchés locaux comme un substitut du cacao. La pulpe des gousses de caroube contient des teneurs élevées en sucre (saccharose, fructose et glucose) et peut être utilisé comme matière première pour la production des sirops et du saccharose cristallisé pour l'industrie alimentaire. La composition chimique de la pulpe varie en fonction des cultivars, de l'origine géographique, du temps de la récolte et des facteurs environnementaux. Ainsi, Thomson (1971) a trouvé dans 40 cultivars un taux de sucres de 37 à 62%, des protéines brutes de 2,2 à 6,6%, des fibres brutes de 4,2 à 9,6% et une teneur en cendre

de 1,5 à 2,4%. Alors que d'autres auteurs ont rapporté un contenu riche en polyphénols (16-20% essentiellement des tanins) et en fibres alimentaires (jusqu'à 39,8) ont rapporté des taux élevés en glucides (>50%) avec une faible quantité de protéines (1-2 %) et des teneurs négligeables en matières grasses (0,5-0,7), et environ 18% de cellulose et de l'hémicellulose, et une teneur appréciablement minérale [62].

Tableau II. 4: Composition chimique de la pulpe [58].

| Constituants | Pourcentage (%) |
|----------------------------|-----------------|
| Le total en sucre | 48-56 |
| Saccharose | 32-38 |
| Glucose | 5-6 |
| Fructose | 5-7 |
| Inositol | 5-7 |
| Tanins concentrés | 18-20 |
| Non-amidon polysaccharides | 18 |
| Cendre | 2-3 |
| Graisse | 0,2-0,6 |

II.2.3.2 Graines de caroube

La graine est composée essentiellement d'antioxydants et de polysaccharides. Elle est utilisée depuis l'antiquité comme mesure des pierres précieuses et semble également, avoir été utilisée Synthèse bibliographique 20 par les pharmaciens pour peser leurs ingrédients (le carat). Les graines de caroube sont constituées de trois différentes parties mais fortement liées. Il s'agit, de l'extérieur vers l'intérieur, une enveloppe (cuticule marronne, 30-33%), un endosperme (blanc et translucide, 42-46%) un embryon ou un germe (23-25%) [62].



Figure II. 13: Les graines de caroube [63].

a. Cuticule

La cuticule ou l'enveloppe contient des antioxydants. Ces antioxydants naturels n'est autre que les polyphénols naturellement présentes dans l'enveloppe de la graine, qui sont valorisables dans l'industrie alimentaire [62].

b. Endosperme

La partie la plus intéressante de la graine de caroube est l'endosperme qui est constitué de 2 téguments enrobant un germe (Figure II.14). Sa composition chimique est pauvre en minéraux en fibres et en protéines. Par contre elle contient une quantité appréciable de lipides [62].



Figure II. 14: Graines de caroube décortiquées et séparées [63].

Cette partie de la graine est obtenue par décorticage afin de séparer les enveloppes et le germe des graines. Une fois broyés, les téguments donnent la gomme de caroube non purifiée [62].

c. Germes

La farine de germes est très riche en protéines (50%), en glucides (27%). Elle est principalement utilisée dans les aliments pour les enfants. Elle est également utilisée dans

l'alimentation diététique humaine ou comme ingrédient potentiel dans les aliments dérivés des céréales pour les personnes cœliaques [62].

II.3. La gomme de caroube

II.3.1. Description

La gomme de caroube est fabriquée à partir de l'endosperme de la graine après élimination de la cuticule et du germe. Elle est composée de polysaccharides.

Ce polysaccharide est utilisé dans l'industrie alimentaire (additif naturel E 410 dans les crèmes glacées, mayonnaises, sauces, produits de boulangerie, etc.), ou nonalimentaires (industries pharmaceutiques, cosmétique, photographie, béton, explosifs, peinture, encre, cirage, textiles et du papier, produits antidiarrhéiques, etc.). Cette large utilisation est due à ses propriétés épaississantes, émulsifiantes et stabilisantes. En plus, son prix est faible par rapport aux autres polysaccharides utilisés dans l'industrie. Également, il est exploité pour sa propriété synergiste avec le carraghénane, l'agar et la gomme de xanthane, même à des faibles concentrations. Le galactomannane conduit à une augmentation de la rigidité finale du gel ou favorise la gélification pour former des gels plus forts et plus élastiques.

II.3.2. Composition de la gomme

Le GC est un polysaccharide dont son poids moléculaire varie d'environ 50000 à 3 000000. Constitué principalement de galactomannanes ; mannose et galactose constitués d'une chaîne principale de résidus D-mannopyranoses liés en β -(1→4) sur laquelle se greffent des résidus D-galactopyranoses uniques grâce à une liaison de type α -(1→6) (Figure II.15) [66,67].

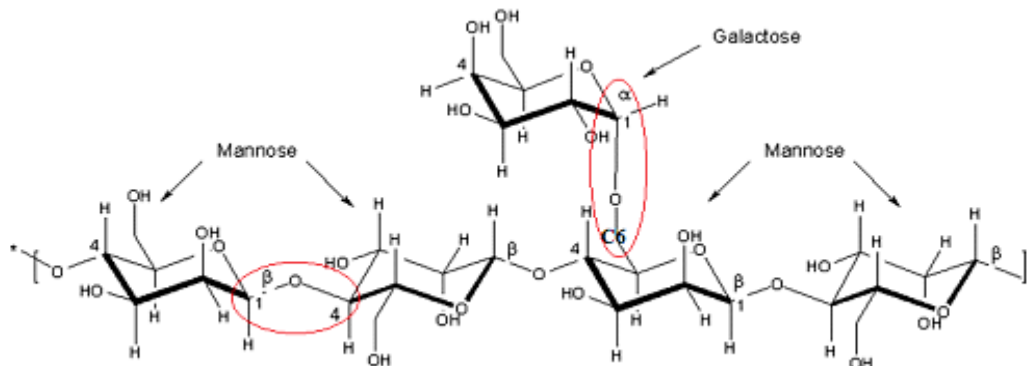


Figure II. 15 : Structure des galactomannanes de GC [68].

La gomme de caroube commerciale contient environ 5-12% d'humidité, 1,7-5% de cendres solubles dans l'acide, 0,4-1,0% de cendres et 3 à 7% de protéines. Alors que la gomme

de caroube (purifiée) présente un pourcentage d'humidité de 3 à 10%, 0,1 à 3% de matières solubles dans l'acide, 0,1 à 1% de cendres et 0,1 à 0,7% de protéines.

Tableau II. 5: Composition chimique de la gomme [69].

| Constituants | Pourcentage (%) |
|------------------------|-----------------|
| Galactomannanes | 88 |
| Autres polysaccharides | 5 |
| Protéine | 6 |
| Cendre | 1 |
| Fibre brute | 0,8-1,0 |

II.3.3. Propriétés

Les propriétés fonctionnelles des galactomannanes, à l'instar des autres polysaccharides, dépendent de leur comportement en milieu aqueux [70]. La GC est partiellement soluble dans l'eau froide. Elle nécessite un chauffage pour une solubilisation complète dans l'eau [71], d'après [72, 73] sa solubilité dépend de la granulation (dimension de la particule). La viscosité de la gomme de caroube dépend de plusieurs facteurs tels que le poids moléculaire, la concentration, la vitesse de cisaillement et le procédé de solubilisation [74].

II.3.4. Utilisation de la gomme de caroube

On alloue à la gomme de caroube plusieurs propriétés à savoir son utilisation dans le domaine alimentaire comme épaississant, stabilisateur et gélifiant naturel. Elle est employée également dans les industries pharmaceutiques (principalement contre les diarrhées), cinématographiques, textiles et cosmétiques (tableau II.6) [58].

Tableau II. 6 : Différentes utilisations industrielles de la gomme [71].

| Utilisations industrielles | Applications |
|----------------------------|--|
| Pharmaceutiques | Contre les diarrhées, dentifrice |
| Cosmétiques | Emulsions et mousse de rasage |
| Textiles | Coloration |
| Papier | Traitement de surface |
| Chimiques | Colle, colorant, polissage, allumettes, pesticides |
| Pétrole | Additif pour augmenter la stabilité |
| Exploitation minière | Produit de flottement |

| | |
|--------------|----------------------------------|
| Absorbant | Absorbe l'humidité |
| Epaississant | Solidifiant, gélifiant |
| Explosifs | Capteur d'eau pour les explosifs |

II.3.5. Propriétés physicochimiques de la gomme de caroube

La gomme de caroube, extraite soit par traitement de la graine de caroube par l'eau bouillante (LBGw) ou par l'acide (LBGa), possède une grande portion d'eau et de protéines, et peu de lipides. Elle possède également des teneurs variables en sucres. La teneur élevée en protéines (7,4 par LBGw et 5,2 par LBGa) est probablement due à la présence de germes de caroube dans le produit fini. En effet, les germes sont riches en protéines (54-67%) ont aussi exploré les teneurs de la gomme de caroube en sucres. Il s'est révélé que les teneurs en mannose et en galactose sont élevées par la technique d'extraction LBGa (respectivement 64,9% et 17,9%) que par la technique d'extraction LBGw (respectivement 51,9% et 14,6%). Contrairement à ces valeurs, ont démontré que la gomme de caroube extraite par LBGw a des teneurs plus faibles en galactose et en mannose, respectivement ~40% et ~10%. La faible teneur de la gomme en rhamnose, arabinose, xylose et glucose est peut-être attribuée à la présence d'un polysaccharide complexe ou à des contaminants de l'enveloppe de la graine. La teneur élevée en glucose, suite à une extraction par LBGw (4,1%) est peut-être due à une contamination probable par des fractions cellulosiques et/ou hemicellulosiques de l'enveloppe de la graine [75].

II.3.5.1. Masse moléculaire de la gomme de caroube

La technique chromatographique d'exclusion (HPSEC) est utilisée pour séparer les différentes fractions de la gomme de caroube selon leur masse moléculaire (MM). D'après l'étude de Dakiaa et al., une différence dans la MM de la gomme de caroube a été observée après traitement de la graine par l'eau bouillante ou par l'acide. En effet, la MM obtenue par LBGw est de $1,024 \times 10^6$ Daltons, alors que celui obtenu par LBGa est de $0,900 \times 10^6$ Daltons. Par la même technique de chromatographie, Richardson et al. (1998) ont déterminé la masse molaire moyenne de la gomme de caroube native (gomme brute) dans l'eau et qui a été estimée à $0,812 \times 10^6$ g/mol. Ils ont aussi déterminé la masse molaire moyenne dans le tampon phosphate pH8 et qui a été estimée à $0,370 \times 10^6$ g/mol. Les valeurs de masse molaire des galactomannanes sont en général artificiellement élevées dans la gomme de caroube en raison

des associations intermoléculaires qui persistent souvent, même à des faibles concentrations ($C = 0,1 \%$) [75].

II.3.5.2. Solubilité de la gomme de caroube

Partiellement soluble dans l'eau froide (~50% à 25°C pendant 1 h), la solubilité de la gomme de caroube augmente avec la température. Sa solubilité maximale, obtenue après un chauffage de 80° durant 30min, est de 70-85%. Généralement, la solubilité de la gomme de caroube ne dépasse pas 90%, mais il arrive qu'elle varie et cela dépendrait en partie de certains facteurs tels que la granulation de gomme de caroube (taille des particules), la température et les forces ioniques [75].

II.3.5.3. Viscosité de la gomme de caroube

Le facteur température exerce une forte influence sur la gomme pure, car elle peut induire une dégradation par rapport à la gomme non pure qui possède des matières protectrices qui évitent la dégradation des galactomannanes. Les composées protéiques semblent jouer ce rôle en raison d'une forte interaction des acides aminés avec les petites chaînes libres qui sont impliquées dans la dégradation de la molécule sous haute température [76].

L'effet épaississant des gommes alimentaires est caractérisé par leur viscosité en solution. Le degré d'épaississement varie avec les types de gommes, et la majorité des gommes développe une grande viscosité à très faible concentration, habituellement inférieure à 1%, grâce à ses fortes capacités de rétention d'eau non assimilable par l'organisme [77].

La gomme de caroube est employée dans une large gamme de produits comme additif, dans les industries alimentaire et non alimentaire, en raison de sa capacité à fournir une viscosité élevée, même à de faibles concentrations (<1%) et à fonctionner comme liant de l'eau. Une augmentation de la concentration des molécules de galactomannanes en solution entraîne une interpénétration des chaînes macromoléculaires, qui sert à la création d'enchevêtrements plus ou moins denses, et favorisent donc l'établissement d'interactions inter chaînes. Tous ces phénomènes aboutissent à une augmentation de la viscosité et expliquent la plus forte dépendance de la viscosité avec la concentration par rapport à d'autres polymères [78].

Conclusion

Dans ce chapitre on a défini les différents polymères et biopolymères, spécifiquement qui sont utilisés dans le domaine de fluides de forage, en particulier le biopolymère de la gomme de caroube qui a des caractéristiques physico- chimiques et rhéologique susceptibles d'être appliqués dans la formulation des boues de forage.

❖ **Chapitre III**

Partie Expérimentale

Introduction

L'utilisation des polymères est très courante dans le domaine de formulation des fluides de forage. Les biopolymères cités dans ce présent travail sont classés comme des polymères biodégradables comme l'amidon, la gomme de xanthane, la cellulose, etc. Ces derniers sont actuellement, utilisés dans la préparation des boues de forage. Mais ils ont certains inconvénients au premier lieu leurs prix de revient est trop cher pour une utilisation à l'échelle industrielle.

Dans notre étude, nous allons étudier l'effet de la gomme de caroube sur un système de fluide de forage à base d'eau comme étant un réducteur de filtrat et/ou un viscosifiant.

Ce système complexe doit satisfaire un ensemble de propriétés physico-chimiques exigés par les opérations de forage, en citant la densité (masse volumique, le volume de filtrat, la viscosité, ...). Afin d'atteindre les spécifications requises, les concentrations des additifs doivent être optimisées et ajustées.

Dans ce travail, tout d'abord, nous allons voir la procédure d'extraction de la gomme de caroube, puis nous allons faire une série des tests préliminaires afin de pouvoir nous orienter vers l'effet prédominant de notre biopolymère soit la réduction du filtrat ou bien la viscosité.

Et finalement, nous allons optimiser la concentration du biopolymère afin de déterminer ses performances et sa rentabilité.

Pour ce faire, plusieurs formulations ont été réalisées au niveau des laboratoires **DLCC SONATRACH HASSI MESSAOUD**.

III.1. Matériels et méthodes d'analyses

III.1.1. Boue de forage utilisée

Pour mener cette étude, les boues à base d'eau choisies sont celles actuellement utilisées pour le forage de puits de pétrole dans le sud Algérien. Les produits utilisés pour la formulation des boues de forage à base d'eau sont les suivants : la bentonite, le barite, Sodium carbonate, la soude caustique, le chlorure de potassium (KCL), la cellulose poly-anionique (PAC LV), et la gomme de Xanthane (XC) et enfin la gomme de caroube qu'on a extraite des graines de caroube. (Tableau III .1)

Tableau III. 1 : Formulation de boue de forage à base d'eau.

| Produits | Quantité (g) |
|------------------|--------------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 22,75 |
| PAC LV | 4,9 |
| Gomme de caroube | - |
| XANTHAN GUM | 0,63 |
| KCL | 14 |
| BARITE | 14 |



Figure III. 1 : Produits de formulation de boue de forage utilisée [63].

III.1.2. Extraction de la gomme de caroube

L'extraction de la gomme de caroube des différentes variétés qui proviennent de Béjaïa, nécessite le suivi de plusieurs étapes, en citant :

1. Ecrasement des gousses et séparation manuelle des graines ;
2. Décorticage par voie acide consistant à faire macérer 200 g de graines de caroube dans l'acide sulfurique dilué de pureté 96% (120/80 ml) H_2SO_4/H_2O pendant 60 minutes à 60°C dans un bain marie tout en agitant périodiquement ;
3. Lavage intensif avec frottement réalisé à travers un tamis métallique de 2 mm pour éliminer la cuticule carbonisée ;
4. Trempage des graines décortiqués dans de l'eau distillée pendant une nuit pour faire gonfler l'endosperme et faciliter sa séparation manuelle du germe ;
5. Lavage et séchage des endospermes dans un four à 105° C pendant 4-5 heures ;

6. Broyage des endospermes avec un broyeur de laboratoire (RETSCH BB55, 0,5 mm) pour obtenir ce qu'on appelle la gamme de caroube non purifiée, ou LBG brut.

III .1.2.1. Etapes d'extraction de la gomme de caroube

Les étapes de l'extraction de la gomme de caroube réalisée au niveau du laboratoire sont illustrées dans les figures ci-dessous :

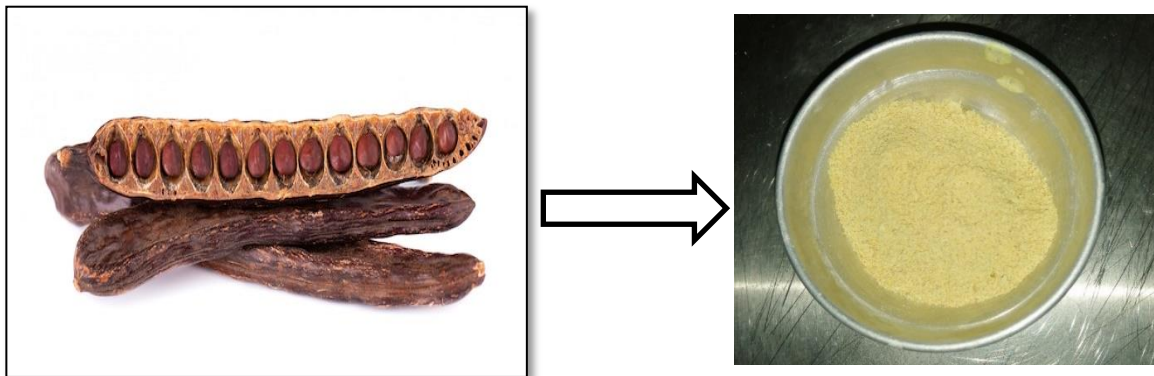


Figure III. 2 : Le produit de l'état brut à l'état final.



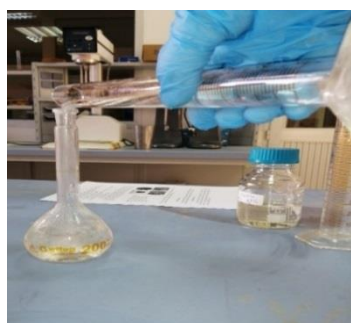
Tri des graines de caroube



Pesée des graines de caroube



Acide sulfurique de pureté 96%



Préparation de la solution 120/80 V (H_2SO_4/H_2O)



Macération des graines de caroube



Macération des graines dans un bain marie



Macération des graines de caroube pendant 60 min



Tamis à 2 mm



Lavage des graines de caroube macérés



Graines de caroube lavés dans l'eau distillée



Graines de caroube gonflés



Séparation des germes de l'endosperme



Graines de caroube séchés



Broyage des germes séchés



Produit final de la gomme de caroube non purifiée

Figure III. 3 : Etapes de l'extraction de la gomme de caroube [63].

III.1.3. Equipements et matériels utilisés

III.1.3.1. Agitateurs

Les agitateurs à boue sont tout simplement des appareils classiques de laboratoire ou même de ménage (Hamilton beach) constitués par un moteur électrique entraînant des couteaux ou une tige terminée par une hélice. Ces appareils permettent de :

- Fabriquer des boues en laboratoire ;
- Faire des essais pilotes sur la boue du sondage ;
- Agiter la boue avant de réaliser certaines mesures [79].



Figure III. 4: Mixeur Hamilton Beach [63].

III.1.3.2. Viscosimètre Fann35

C'est un appareil à cylindres coaxiaux, à six vitesses de rotation (600 - 300 - 200 - 100 - 6 - 3 tr/min), le rotor est entraîné par un moteur électrique. Cet appareil est normalisé par L'API [79,35].



Figure III. 5 : Viscosimètre Fann35 [63].

- **Principe**

Le viscosimètre Fann 35 est l'appareil qui permet de déterminer la rhéogramme du fluide de forage, c'est-à-dire la loi d'écoulement qui est représenté par la fonction $\tau = f(\dot{\gamma})$ avec : $\dot{\gamma}$ taux de cisaillement [80].

- **Mode d'emploi**

- Prendre la boue et l'agiter pendant 5 min à l'aide d'un agitateur, puis remplir le godet du viscosimètre.

- Immerger les cylindres coaxiaux (l'appareil est muni d'un système de coulisse avec une molette de blocage) jusqu'à ce que le trait repère du rotor affleure la surface de la boue ;
- Faire tourner le rotor à 600 tr/min en choisissant la position convenable du bouton de changement de vitesse et de l'interrupteur ;
- Lire la déviation sur le cadran ;
- Sans arrêter l'entraînement du rotor, régler la vitesse de rotation à 300 tr/min ;
- Lire la déviation de la graduation ;
- Faire de même pour les autres vitesses [79,35].

III.1.3.3. Filtre-presse API

Le filtre-presse se compose essentiellement d'un étrier muni d'une vis de serrage permettant le blocage des trois parties du corps du filtre. Ce corps se compose :

- D'une embase percée d'un trou et dotée d'un ajutage par lequel s'écoule le filtrat. Cette embase supporte un tamis métallique de 60 à 80 mesh sur lequel est placé le papier filtre de 90 mm de diamètre (surface de filtration 7 pouces carrés) du type WHATMAN no 50 dont l'équivalent est le type Durieux bleu N° 3 ;
- L'ensemble tamis et papier est placé entre deux joints plats qui assurent l'étanchéité entre l'embase et le cylindre ;
- D'un cylindre de diamètre intérieur 3 pouces (76,2 mm) et de hauteur 5 pouces (128 mm). L'A.P. I recommande au moins 2 ½ pouces de hauteur (64 mm) ;
- D'un couvercle muni d'une arrivée de gaz comprimé dont l'étanchéité avec le cylindre est assurée à l'aide d'un joint plat du même type que ceux placés sur l'embase [80].



Figure III. 6 : Filtre-presse API [63].

- **Principe**

Le principe consiste à mettre la boue à une pression de 7 bars (100 psi) dans un cylindre normalisé muni d'une surface semi-perméable. On note la quantité d'eau qui filtre à travers cette plaque filtrante (imperméable aux colloïdes mais perméable aux liquides), pendant une durée de 30 minutes, à température ambiante.

Les solides déposés par filtration constituent ce que l'on appelle le « cake ». La mesure de l'épaisseur de celui-ci renseigne sur l'état de la boue [81].

- **Mode d'emploi**

- Mettre le joint caoutchouc dans l'encoche prévue dans l'embase inférieure ;
- Mettre le tamis ;
- Mettre de papier filtre sur le tamis ;
- Mettre le joint caoutchouc sur le papier ;
- Fixer l'embase sur le cylindre ;
- Remplir de boue ;
- Monter le couvercle muni de son joint caoutchouc, placer l'ensemble dans la boîte et visser à l'aide du volant ;
- Disposer une éprouvette graduée sous l'ajutage du Filtre Presse ;
- Appliquer une pression de 7 bars, et déclencher le chronomètre ;
- Lire le volume d'eau recueillie dans l'éprouvette après 30 mn de filtration ;
- Purger à l'aide de la vanne de purge. Démontez l'appareil, récupérez le papier filtre et le laver sous le robinet. Le poser sur une surface plane et mesurer l'épaisseur du cake ; puis laver les pièces à l'eau ;
- Le volume du filtrat s'exprime en mL et l'épaisseur du cake en mm [81].

III.1.3.4. Distillateur a boue

Une unité de distillation de boue utilisée pour mesurer la teneur en eau, en huile et en solides d'une boue. Il se compose d'un corps cylindrique muni d'un porte-échantillon de boue, d'une résistance chauffante (ou d'un four) et d'un condenseur en aluminium. Un récepteur en verre gradué capte et mesure les volumes d'eau et d'huile qui se condensent à partir de la boue. Les dispositifs d'autoclave sont disponibles en trois tailles, 10,20 et 50 cm³, qui sont les volumes de boue placée dans la coupelle d'échantillon de l'autoclave. Les données du test sont le pourcentage en volume d'eau, d'huile et de solides de l'autoclave [80].



Figure III. 7 : Distillateur de fluides de forage [63].

- **Principe**

Les distillateurs (rotors) d'huile et d'eau offrent une méthode de lecture simple, facile, précise des pourcentages d'eau, d'huile et de solides qui composent les fluides de forage. Ces appareils sont chauffés électriquement et contrôlés thermostatiquement pour se fermer quand la température prédéterminée ($498\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 21\text{ }^{\circ}$) ($930\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 70\text{ }^{\circ}$) telle que spécifiée par API a été atteinte.

L'eau et le distillat d'huile sont recueillis dans un tube gradué de 100 mL [79].

- **Mode d'emploi**

- Soulever l'assemblage de l'autoclave hors du compartiment de chauffage. En utilisant la spatule comme tournevis, retirez la chambre de fluide de forage de la cuve ;
- Emballer la chambre supérieure avec de la laine d'acier ;
- Remplir la chambre de fluide avec du fluide de forage et replacer le couvercle, ce qui permet à l'excédent de fluide de forage de s'échapper. Essuyer la chambre de fluide de forage et l'extérieur du couvercle pour nettoyer. Assurez-vous qu'il n'y a pas d'air emprisonné dans la chambre. Une charge précise de fluide de forage est très essentielle ;
- Nettoyer et lubrifier les filets de la cuve avec un lubrifiant résistant à haute température ;
- Visser la chambre de fluide de forage avec le couvercle dans la chambre supérieure et serrez à la main ;
- Replacer l'ensemble de la cuve dans le compartiment de chauffage et placez le couvercle isolant en place ;
- Ajouter une goutte d'agent mouillant au tube gradué ou collecteur et placer le sous l'orifice de vidange du condenseur ;

- Allumer le chauffage en branchant la prise d'alimentation ;
- Laisser le rotor chauffer jusqu'à ce que la lampe témoin s'éteigne. Cela indiquera que l'autoclave a atteint la température de distillation. Le thermostat éteindra automatiquement le chauffage de l'autoclave à la bonne température, quelle que soit la tension disponible. La distillation devrait être complète en environ 20 minutes si la tension nominale est de 115 ou 230. Une tension inférieure peut prendre de 25 à 30 minutes, tandis qu'à une tension plus élevée, la distillation peut être achevée en 15 minutes. La distillation utilisant une alimentation de 12 volts prendra plus de temps, de 35 à 45 minutes. Une fois le test terminé, débranchez la prise d'alimentation ;
- Lire le volume d'huile et d'eau. (Une goutte d'agent mouillant à ce moment améliorera souvent le ménisque pour une lecture plus facile) [79].

III.1.3.5 Densimètre pressurisé

Afin de minimiser les erreurs dues au « bullage » de la boue un nouveau type de densimètre pressurisé est normalisé par l'American Petroleum Institute (API) pour les ciments (Figure III.8).

Ce densimètre peut aussi être utilisé avec profit pour les boues. Sa mise en œuvre ne diffère de celle du densimètre à balance (classique) que par la présence d'une pompe manuelle qui permet de comprimer le gaz dans la coupe [80].

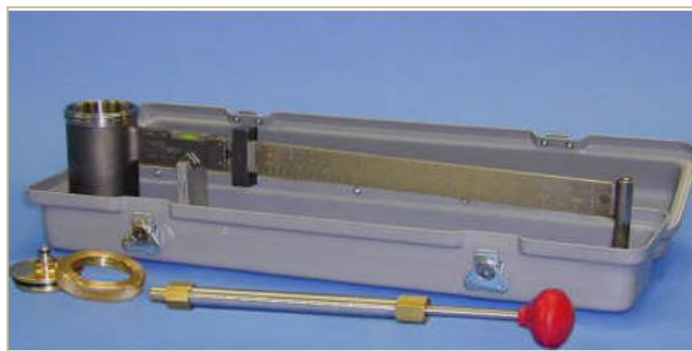


Figure III. 8: Densimètre pressurisé [80].

III.1.3.6 Mesure du pH

Pour déterminer le pH, nous avons utilisés la méthode des indicateurs colorés, basée sur la décolorisation de certaines substances organiques qui est peu précise mais souvent suffisante sur chantier. Cette méthode consiste à mettre au contact de la boue ou du filtrat une bande de papier qui prend rapidement une certaine teinte qu'il faut comparer avec une gamme calorimétrique étalon pour obtenir la valeur de pH [80].

- **Mode d'emploi**

Déposer dessus une goutte de liquide à mesurer (filtrat), ou bien plonger une extrémité du papier dans le liquide. Noter immédiatement le changement de la colorisation du papier et comparer avec le PH indiqué par l'échelle colorimétrique de la boîte [80].

III.1.3.7. Four rotatif (HOT ROLLING)

Responsable du vieillissement des systèmes de fluides de forage ; est un test de simulation utilisé pour pouvoir prévoir le comportement de notre fluide en agitation et à haute température et le résultat de ce comportement sur l'interaction roche/fluide.



Figure III. 9: Four rotatif [63].

III.1.4. Formulation de la boue

Un volume de 325,5 ml d'eau est versé dans un récipient auquel est ajouté les deux argiles (bentonite et barite). Différents types de polymères dans les fluides de forage ont été ajoutés dont les rôles différents comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau III. 2 : Produits chimiques utilisés dans le fluide de forage à base d'eau.

| Produits pour le fluide à base d'eau | Formule/Nom/Famille chimique | Rôle |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Eau adoucie | / | Phase continue (WBM) |
| Sodium carbonate | Na ₂ CO ₃ | Adoucisseur d'eau |
| Soude caustique (Hydroxyde de Sodium) | NaOH | Ajusteur de pH |

| | | |
|----------------------------|---|---------------------------------|
| Bentonite | Minéral argileux | Viscosifiant |
| PAC LV | Glucide | Réducteur de filtrat |
| Gomme xanthane | (C ₆₇ H ₁₀₂ O ₅₆) | Viscosifiant |
| Chlorure de potassium | KCL | Ajusteur de salinité/inhibiteur |
| Gomme de caroube | - | - |
| Barite (sulfate de barium) | BaSO ₄ | Alourdissant |

III.1.5. Caractérisation physico-chimique des fluides de forage utilisés

L'effet de la gomme de caroube come biopolymère ajouté sur les paramètres : rhéologiques, physico-chimiques ainsi que l'étude de filtrat API est examiné.

Afin de caractériser nos formulations des boues de forage ; plusieurs analyses ont été effectuées :

- Mesure de la densité ;
- Mesure de pH pour les fluides de forage à base d'eau ;
- Influence de la température sur nos formulations ;
- Rapport huile/eau pour les fluides de forage émulsionnés ;
- Étude de perte de fluide : Détermination du filtrat API pour les fluides de forage à base d'eau (boues aux polymères) ;
- Étude rhéologique : détermination de la contrainte de seuil (Yield Value : YV), détermination de la viscosité plastique (Vp), détermination de la thixotropie (gel 0/gel 10).

III.1.6. Méthodes d'analyses

III.1.6.1 Etude de conformité

Les essais de conformité sont réalisés selon la norme **API 13B-1**

a. Recommandations de la norme API 13B-1

Les valeurs exigées après la détermination des paramètres rhéologiques et de filtration sont les suivantes :

Tableau III. 3 : les paramètres rhéologiques et de filtration de référence.

| Paramètres | Valeurs |
|--|---------|
| Densité g /cm ³ (SP.GR) | 1,10 |
| La contrainte de seuil YV (lb. /100ft ²) | 18 – 24 |
| Volume de filtrat API (ml) | < 5 |
| pH | 10,5 |
| Gel 0 /10 (lb/100 ft ²) | 14 – 20 |

La lecture à un taux de cisaillement de 600tr/min, 300tr /min ;

- La contrainte de seuil (Yield Value : YV) ;
- Le volume du filtrat pendant 30 min ;
- Les gels (0 /10) lecture après (1 /10) min.

a.1. Détermination de la viscosité apparente (Va)

Pour la boue à base d'eau on lit la valeur correspond à la vitesse de 600 tr/min et on divise cette valeur sur 2 à température ambiante et pression ambiante donc :

$$V_a = \frac{\text{lecture Fann à } 600 \frac{\text{tr}}{\text{min}}}{2} \quad (\text{cp}) \quad (\text{III.1})$$

Avec : 1cp = 10⁻³ Pa.s

a.2. Détermination de la viscosité plastique (Vp)

C'est la différence entre la lecture à 600tr/min et la lecture à 300tr/min donc :

$$V_p = \text{lecture Fann à } 600 \text{ tr/min} - \text{lecture Fann à } 300 \text{ tr/min} \quad (\text{cp}) \quad (\text{III.2})$$

Avec : 1cp = 10⁻³ Pa.s

a.3. Détermination de la contrainte de seuil (Yield Value : YV)

Pour déterminer la Yield (YV), on applique la loi suivante :

$$Y_v = 2 \times (V_a - V_p) \text{ (Livres / 100 pieds carrés)} \quad (\text{III.3})$$

Avec : 1 Livres / 100 pied carrés (lb/100 ft²) = 47,88 Pascal (Pa)

a.4. Détermination le teneur en solides en eau et en huiles

Calcul des pourcentages volumiques d'huile, d'eau et des solides :

- Lecture de volume totale en mL ;
- Pourcentage volumique d'huile = Volume d'huile / Volume totale ;
- Pourcentage volumique d'eau = Volume d'eau / Volume totale ;
- Pourcentage volumique des solides = $100 - (\text{Volume d'huile} + \text{Volume d'eau})$.

III.2. Résultats et discussions

III .2.1. Utilisations de la gomme de caroube

III.2.1.1. Viscosifiant

A. Etude rhéologique

- **Formulation I :**

Nous avons formule une boue de forage (tableau III.1) en réduisant la quantité de la bentonite à la moitié (11,38g au lieu de 22,75) car on a constaté que la boue obtenue est très pâteuse (voir FigureIII.10) et en remplace la cellulose polyanionique (PAC LV) par notre biopolymère.

Tableau III. 4 : Composition de la formulation I

| Produits | Quantité (g) |
|------------------|--------------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 11,38 |
| Gomme de caroube | 5 |
| XANTHAN GUM | 0,63 |
| KCL | 14 |
| BARYTE | 14 |



Figure III. 10 : Une boue très pâteuse [63].

- **Résultats**

Les résultats obtenus des analyses rhéologiques (taux de cisaillement, la viscosité plastique V_p , la viscosité apparente, la contrainte de seuil (Yield Value : YV) sont réalisés à 48,8 °C suivant la norme qui sont mentionnés dans (le tableau III.5) ci-après.

Tableau III. 5 : Résultats des analyses rhéologiques

| Température (°C) | L600 (tr /min) | L300 (tr /min) | YV (lb/100 ft ²) | Vp (cp) | Va (cp) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--|-------------------|-------------------|
| 48,8 | 35 | 27 | 19 | 08 | 17,5 |

- **Discussion**

Les résultats du test de conformité API montrent que la valeur obtenue de la contrainte de seuil (Yield Value : YV) de valeur de 19 (lb/100ft²) est conforme à la norme qui est de 18 à 24 valeur acceptable d'un point de vue rhéologique. On a remarqué aussi que le système de fluide de forage formulé avec la gomme de caroube obtenu est mousseux.

- **Formulation II**

Quant à cette formulation, nous avons tenté la possibilité de substituer le Xanthane un viscosifiant qui est un biopolymère importé par la gomme de caroube extraite des noix. Un produit qui peut être obtenu localement. Pour ce faire, nous avons étudié la rhéologie de notre système de fluide de forage à base d'eau en incorporant la gomme de caroube à différentes

concentrations toute en réduisant la quantité de la bentonite à 8g lui aussi un agent viscosifiant suscité (Voir le tableau III.6).

Tableau III. 6: Composition de la formulation II

| Produits | Quantité (g) |
|------------------|--------------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 8 |
| Gomme de caroube | A optimiser |
| PAC LV | 4,9 |
| XANTHAN GUM | 00 |
| KCL | 14 |
| BARYTE | 14 |

B. Effet de la température sur la rhéologie

Sachant que les polymères sont thermosensibles, il est nécessaire donc d'étudier le comportement des additifs à haute température qui est un facteur très important car lors de la circulation, le fluide de forage est exposé à des températures qui s'élèvent au fur et à mesure des profondeurs. Dans cette étape, différentes concentrations du biopolymère sont utilisées aux vraies conditions du puits. Ceci est réalisé dans un four rotatif (HOT ROLLING) pendant 16 heures (vieillessement) pour voir l'effet de la température sur la rhéologie.

a. Avant le test de four rotatif (HOT ROLLING)

Tous les tests sont réalisés à une température de 48,8°C en optimisant la concentration du biopolymère (la gomme de caroube).

Tableau III. 7 : Résultats avant vieillissement (avant HOT ROLLING).

| Concentration de GC (g /350ml) Rhéologie | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|----------------|------|----|------|----|------|------|----|------|----|
| | L600 (tr /min) | 52 | 51 | 54 | 55 | 60 | 65 | 65 | 76 | 67 |
| L300 (tr /min) | 33 | 33 | 35 | 35 | 39 | 42 | 42 | 49 | 45 | 54 |
| YV (lb/100 ft ²) | 14 | 15 | 16 | 15 | 18 | 19 | 19 | 22 | 23 | 26 |
| Vp (cp) | 19 | 18 | 19 | 20 | 21 | 23 | 23 | 27 | 22 | 28 |
| Va (cp) | 26 | 25,5 | 27 | 27,5 | 30 | 32,5 | 32,5 | 38 | 33,5 | 41 |

Les résultats obtenus avant vieillissement sont donnés par les graphes ci-dessous.

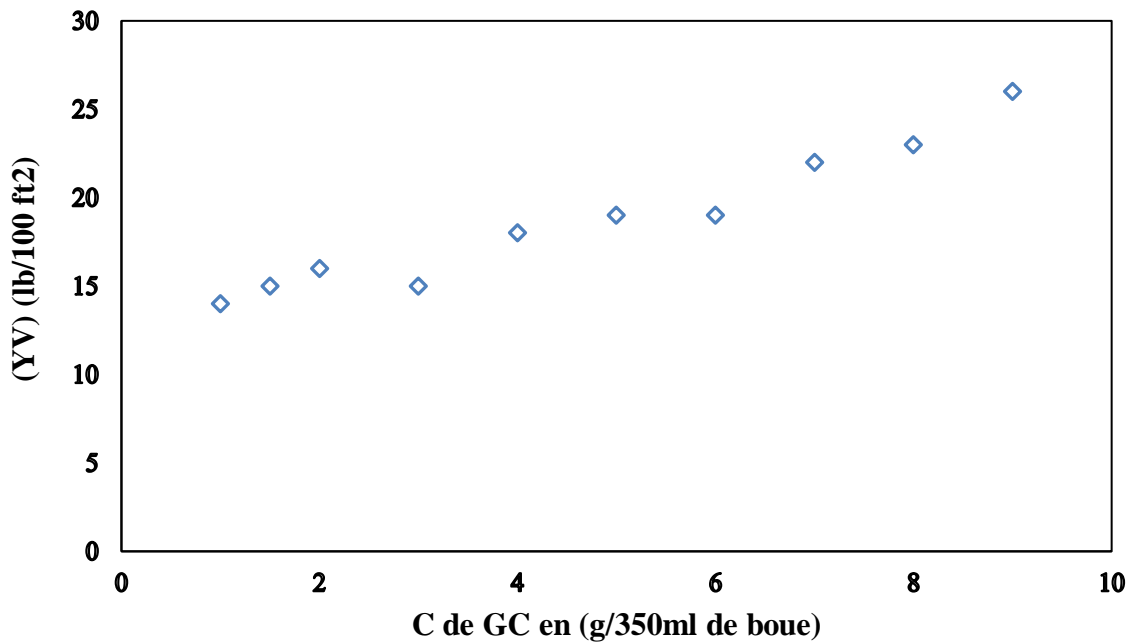


Figure III. 11 : Variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING.

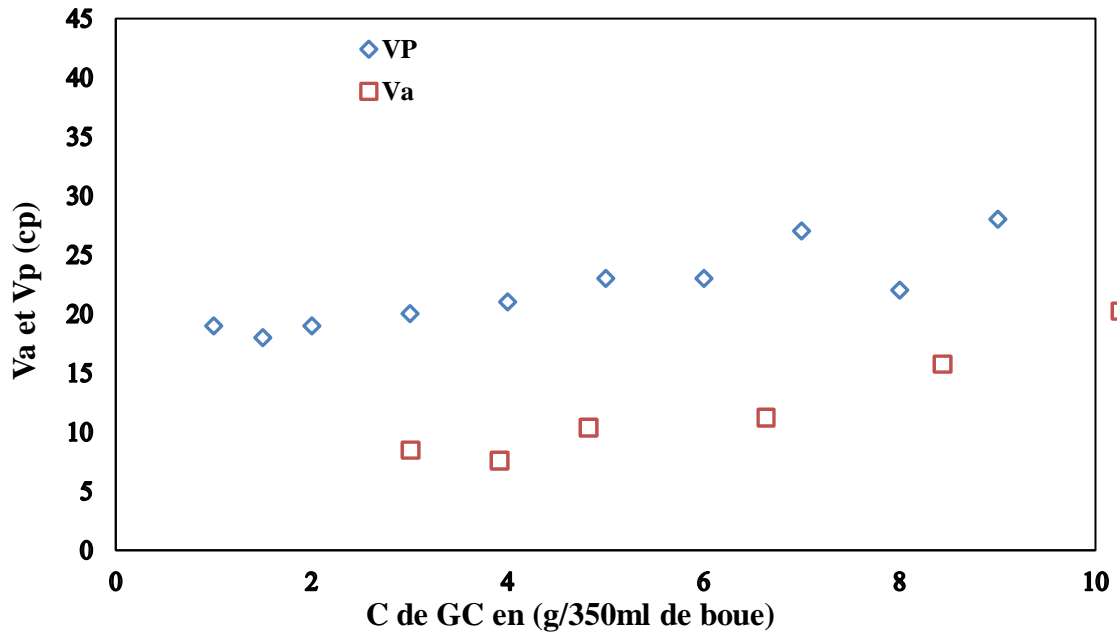


Figure III. 12 : Variation de la Viscosité apparente et plastique en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING.

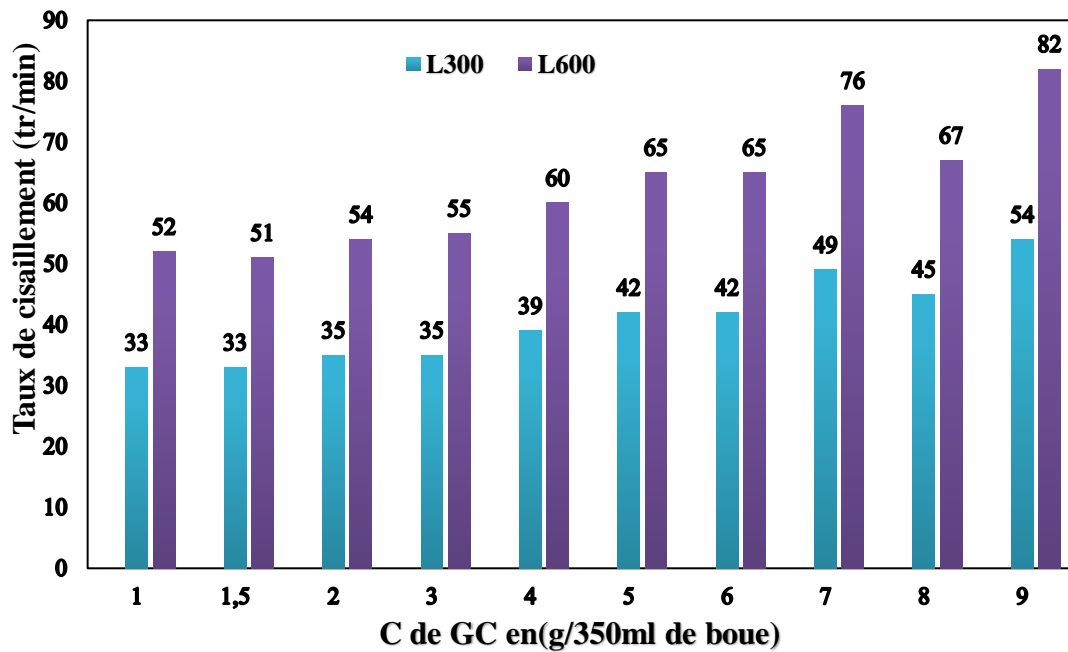


Figure III. 13: Variation de taux de cisaillement en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant HOT ROLLING.

• **Discussion**

On a substitué la gomme de Xanthane par la gomme de caroube, les résultats montrent que parmi les dix concentrations des échantillons de boues étudiées, cinq ont des contraintes de seuils (Yield Value : YV) acceptables dans l'intervalle de 18 à 24 (lb/100ft²) recommandées par la norme.

D'après les courbes on remarque que la contrainte de seuil (Yield Value) pour les différents échantillons augmente avec l'augmentation de la concentration de la gomme de caroube de même pour la viscosité plastique et apparente on constate qu'elles aussi augmentent avec l'augmentation de la concentration de la gomme de caroube.

En dépit de ses résultats on peut dire que la rhéologie de la boue de forage est dans les normes pour l'intervalle de concentration de GC de (4 à 8g/350ml de boue).

b. Après le test de four rotatif (HOT ROLLING)

Tableau III. 8: Résultats après vieillissement (HOT ROLLING à 250°F pendant 16 heures).

| Concentration GC (g /350ml) Rhéologie | 1.5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|------|----|------|------|------|----|----|------|----|
| L600 (tr /min) | 27 | 26 | 37 | 35 | 59 | 40 | 42 | 75 | 56 |
| L300 (tr /min) | 16 | 16 | 22 | 21 | 40 | 25 | 26 | 45 | 40 |
| YV (lb/100 ft ²) | 5 | 6 | 7 | 7 | 21 | 10 | 10 | 15 | 24 |
| Vp (cp) | 11 | 10 | 15 | 14 | 19 | 15 | 16 | 30 | 16 |
| Va (cp) | 13,5 | 13 | 18,5 | 17,5 | 29,5 | 20 | 21 | 37,5 | 28 |

Les résultats obtenus après vieillissement sont donnés par les graphes ci-dessous.

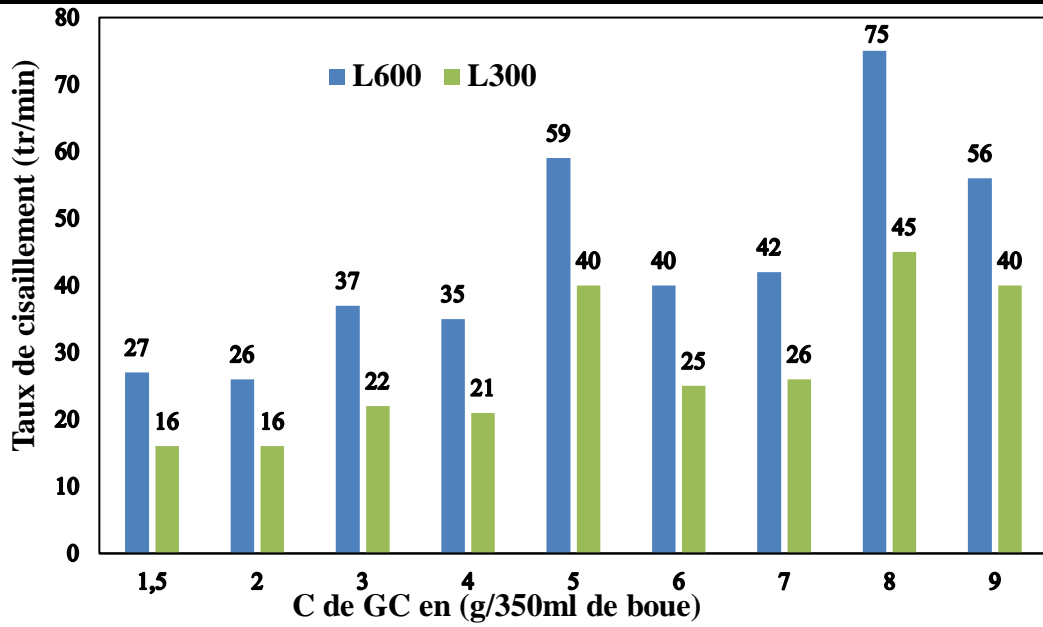


Figure III. 14 : Variation du taux de cisaillement en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING.

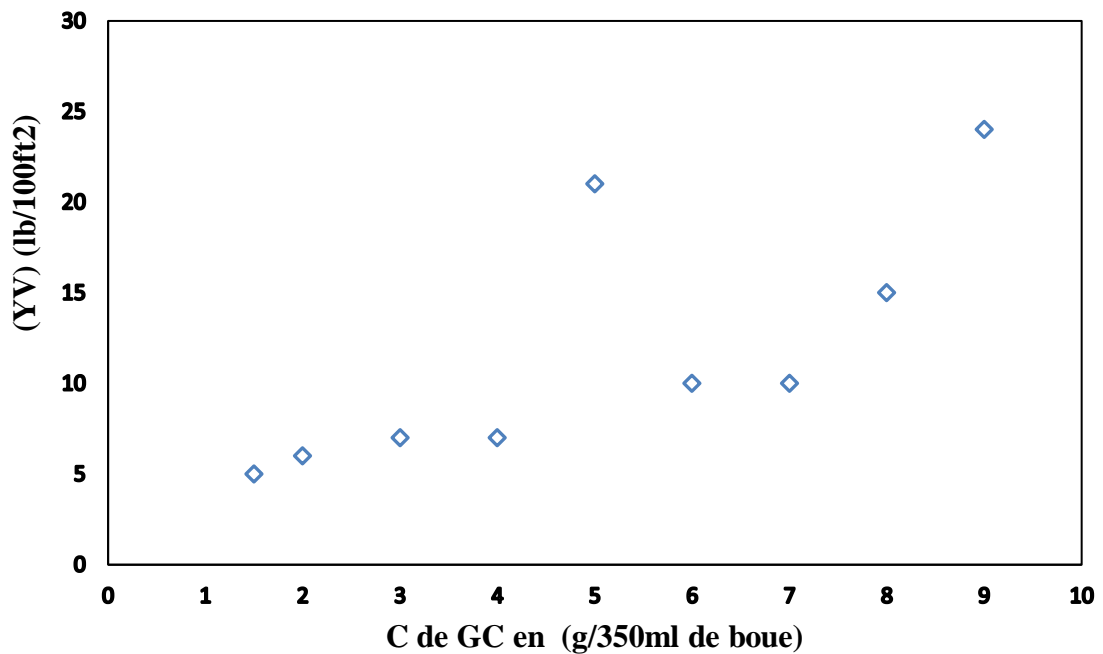


Figure III. 15: Variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING.

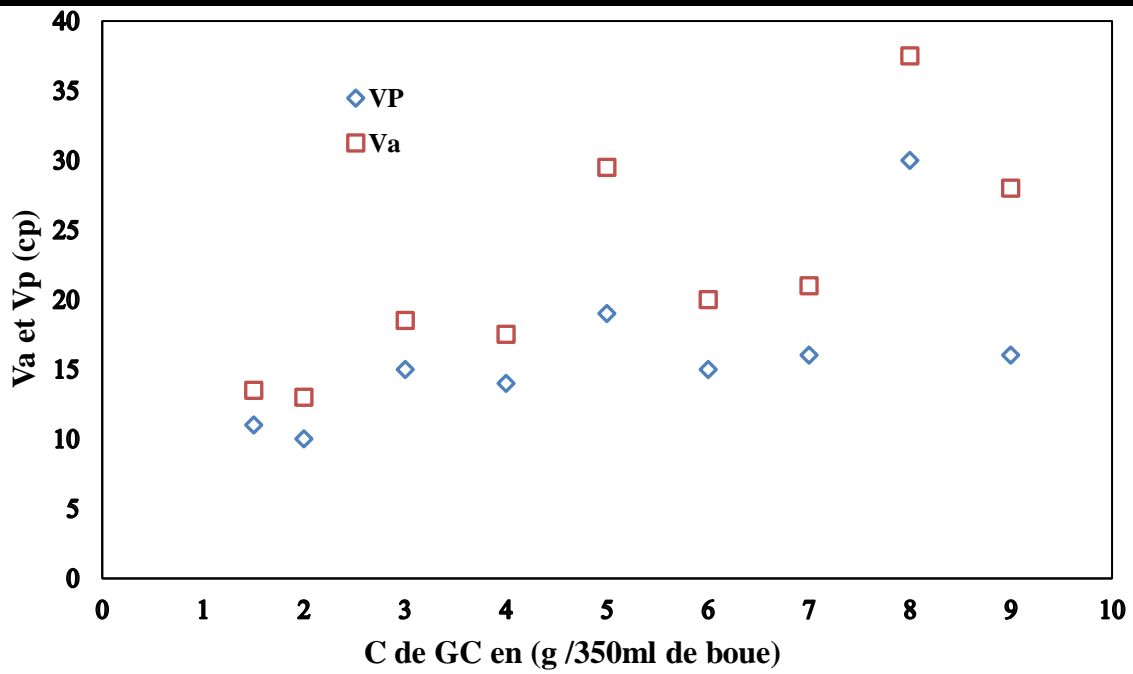


Figure III. 16: Variation de la Viscosité apparente et plastique en fonction de la concentration de la gomme de caroube après HOT ROLLING.

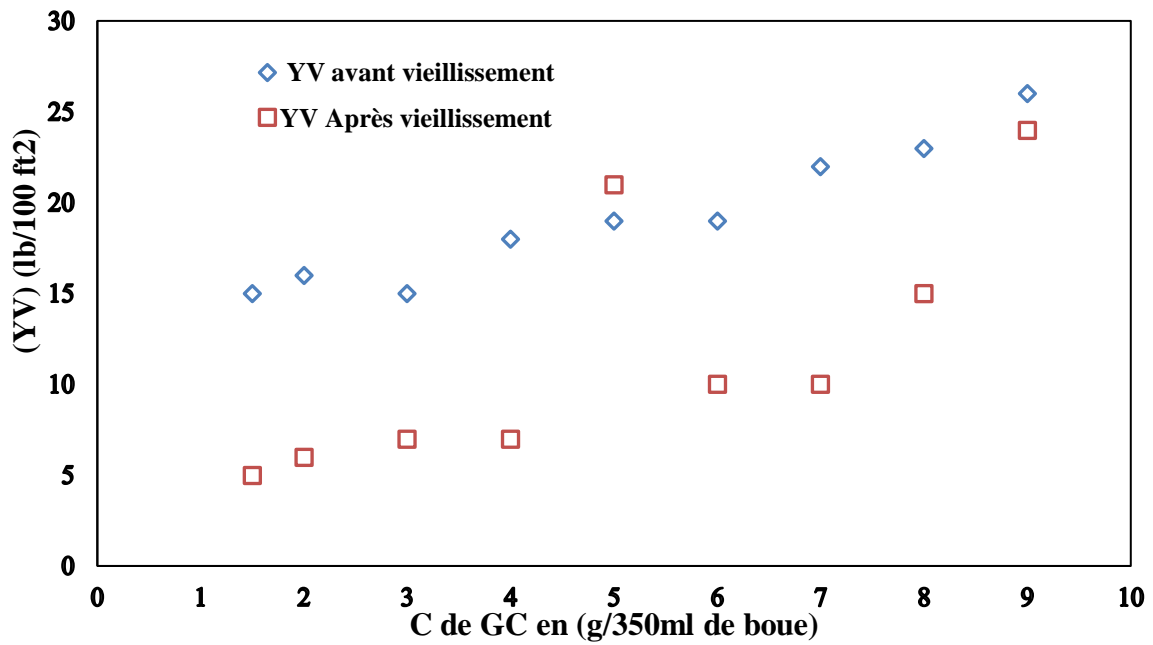


Figure III. 17 : Comparaison de la variation de contrainte de seuil (Yield Value) en fonction de la concentration de la gomme de caroube avant et après vieillissement.

• **Discussion**

D'après les résultats obtenus on remarque qu'un seul échantillon parmi neuf résiste aux tests de four rotatif (HOT ROLLING) en donnant de bons résultats de rhéologie simulés les conditions réelles de puits (après vieillissement) avec une concentration de gomme de caroube de (5g/350ml de boue).

Aussi on a remarqué qu'effectivement la température influence considérablement la rhéologie des boues étudiées ceci est traduit par les valeurs de la contrainte de seuil (Yield Value), la viscosité apparente et plastique qui diminuent par rapport aux valeurs réalisées avant le test de four rotatif (HOT ROLLING) (Tableau III.8).

Quant aux variations de contrainte de seuil (Yield Value), viscosité apparente et plastique en fonction de la concentration de la gomme de caroube (figures III.15 et III.16) on constate qu'elles augmentent avec l'augmentation de la concentration de la gomme de caroube.

D'après la (Figures III.17) relative à la variation de la contrainte de seuil en fonction de la concentration de la gomme de caroube une concentration de (5g/350ml de boue) est la concentration meilleure qu'on a obtenue car elle garde une bonne rhéologie (Yield Value égale 21(lb/100 ft²)) même après le vieillissement résistant ainsi à la haute température.

c. Résultats des analyses de la concentration optimum après le test de four rotatif (HOT ROLLING).

Tableau III. 9 : Résultats des analyses de la concentration optimum

| | |
|---------------------------------|-------|
| Concentration (g/350ml de boue) | 5 |
| Gel0 (lb/100 ft ²) | 4 |
| Gel10 (lb/100 ft ²) | 3 |
| Densité (g /cm ³) | 1 |
| pH | 9 |
| Rapport (huile/eau) | 1 /99 |

- **Calcul de rapport huile/eau pour les fluides de forage émulsionnés**

Volume d'eau = 81 ml, Volume d'huile = 01 ml

Volume solide = 100 – (Volume d'huile + Volume d'eau).

Volume solide = 100 – (1+81) = 100 – 82

Volume solide = 18 ml

$V_T = 81 + 1 = 82$ ml

% eau = $V \text{ d'eau} / V_T = 81/82 = 99\%$

% d'huile = $V \text{ d'huile} / V_T = 01/82 = 1\%$

Donc le rapport : huile/eau = 1/99

• **Discussion**

Pour les résultats physico-chimiques on remarque que :

-La formulation obtenue a une densité très proche à la densité de référence qui égale à $1,10 \text{ g/cm}^3$ (SP.GR) ; on peut dire que c'est une densité dans les normes. Elle ne doit pas provoquer des pertes de circulation.

-Le pH mesuré est égal à 9 légèrement inférieur au pH de la boue de référence qui égale à 10,5 qui est dû à l'effet acide de la gomme de caroube suite probablement a une réaction avec le soude caustique.

-Concernant le rapport huile/eau qui égale à 1/99 on peut dire que notre formulation est vraiment à base d'eau et dans les normes parce qu'elle contient 81 ml de volume d'eau et 01 ml de volume d'huile.

Pour les résultats de rhéologie, on remarque que : la valeur obtenue des gels 0 et gels 10 qui égale à $4 - 3 \text{ (lb/100 ft}^2\text{)}$ est hors norme qui devrait être $14 - 20 \text{ (lb/100 ft}^2\text{)}$ on peut dire qu'il n'a pas un pouvoir statique.

A la lumière de ces essais, on conclut qu'on peut remplacer la gomme de Xanthane étant viscosifiant dans la formulation des boues de forge par la gomme de caroube du moment que ce dernier a les mêmes propriétés rhéologiques dans certaines conditions.

III.2.1.2. Réducteur de filtrat

A. Étude de perte de fluide

Formulation III

Nous avons préparé un système de fluide de forage à base d'eau (WBM) en remplaçant la cellulose polyanionique (PAC LV) par notre biopolymère (la gomme de caroube) pour la détermination du volume de filtrat API. (Voir le tableau III.10)

Tableau III. 10 : Compositions de la formulation III

| Produits | Quantité |
|------------------|----------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 22,75 |
| Gomme de caroube | 4,9 |
| XANTHAN GUM | 0,63 |
| KCL | 14 |
| BARYTE | 14 |

- **Résultats**

Afin de tester l'effet de notre biopolymère (gomme de la caroube) sur la réduction du filtrat, nous avons effectué une analyse de filtration API LPLT. D'après les mesures des volumes de filtrat (V_F API) de référence qui devrait être inférieur à 5ml, nous avons obtenu un volume de filtrat décroché V_F API supérieur à 16 ml.

- **Discussion**

Nous pouvons dire dans cette formulation que notre biopolymère n'a pas d'effet significatif sur la réduction de filtrat de temps plus le fluide de forage obtenu à un aspect pâteux.

Formulation IV

Dans cette partie nous avons préparé un système de fluide de forage à base d'eau (WBM) en ajoutant une concentration de 2g de PAC LV avec la gomme de caroube pour tester si notre biopolymère comme additif en synergie peut être réducteur de filtrat (tableau III.11).

Tableau III. 11: Composition la formulation IV

| Produits | Quantité |
|------------------|----------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 22,75 |
| Gomme de caroube | 5 |
| PAC LV | 2 |
| XANTHAN GUM | 00 |
| KCL | 14 |
| BARYTE | 14 |

- **Résultats**

Après le vieillissement (HOT ROLLING) nous avons effectué une analyse de filtration API LPLT qui nous a donné un volume de filtrat V_F API qui égale à 8 ml.

- **Discussion**

Comme un résultat préliminaire on peut dire que notre biopolymère comme additif avec le PAC LV en synergie peut avoir un rôle de réducteur de filtrat.

- **Formulation V**

Dans cette formulation on va faire varier la concentration du PAC LV et fixer la concentration du biopolymère (la gomme de la caroube) à 5g concentration optimale obtenue lors des résultats précédents de rhéologie en éliminant complètement la concentration de la gomme de Xanthane (tableau III.12).

Tableau III. 12: Compositions de la formulation V

| Produits | Quantité |
|------------------|-------------|
| Eau | 325,5 |
| SODA ASH | 0,175 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 |
| BENTONITE | 8 |
| Gomme de caroube | 5 |
| PAC LV | A optimiser |
| XANTHAN GUM | 00 |
| KCL | 14 |
| BARYTE | 14 |

- **Résultats**

Après avoir effectué une analyse de filtration API LPLT. Les résultats de volume de filtrat après vieillissement (HOT ROLLING à 250°F pendant 16 heures) sont donnés au (Tableau III.13).

Tableau III. 13: Résultats de volume de filtrat après vieillissement

| Concentration du PAC LV (g/350ml de boue) | V FILTRAT API (ml) |
|--|--------------------|
| 3 | 3,9 |
| 4 | 5,6 |
| 4,9 | 5,9 |
| 7 | 5,9 |
| 8 | 6,2 |



Figure III. 18 : Boues de forage avec différent concentration de PAC LV [78].

Les résultats obtenus du test de filtration avec les six (06) concentrations de la cellulose polyanionique (PAC LV) après vieillissement (HOT ROLLING) en fonction des volumes de filtrat API sont donnés par les graphes ci-dessous.

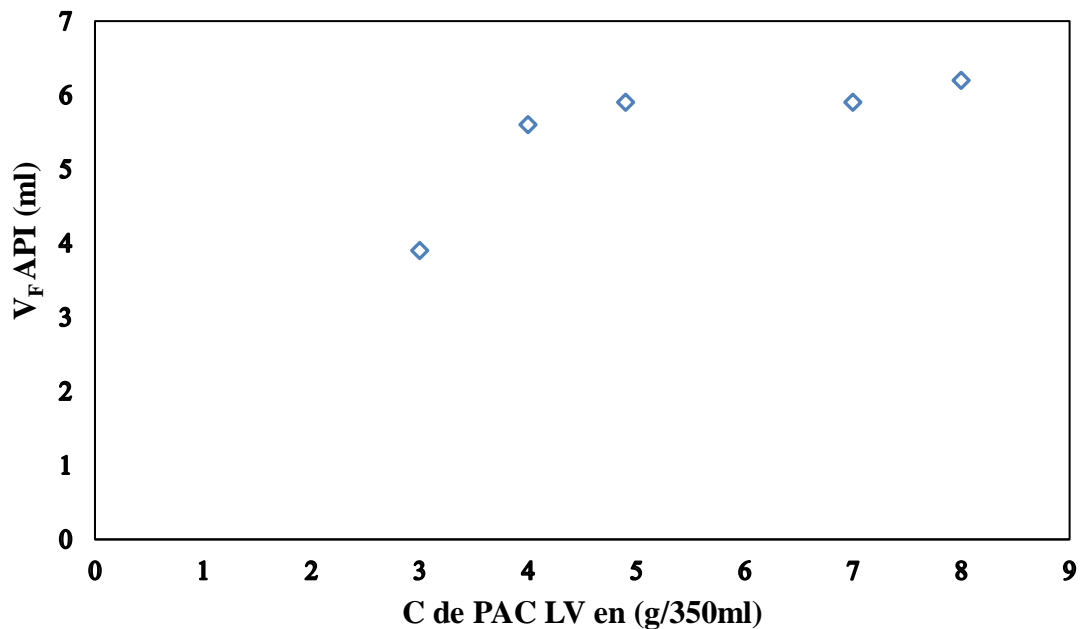


Figure III. 19: Variation de volume de filtrat API en fonction de la concentration de PAC LV

- **Discussion**

La courbe de la variation du volume de filtrat à chaque concentration augmente avec l'augmentation de la concentration du PAC LV. D'après les mesures des volumes de filtrat V_F API enregistrées, on remarque qu'une seule concentration du PAC LV est dans les normes qui égale à 3 g/350ml de boue et qui donne un volume de filtrat de 3,9 ml nettement inférieur à

celui de référence qui doit être pour rappeler inférieur à 5ml. Alors on peut dire que c'est la concentration optimale.

B. Résultat de cake filtrat

La formulation de boue de forage avec (5g de gomme de caroube et 3g de PAC LV) a donné un cake filtrat API d'épaisseur (1/32) inch = 0,08mm.



Figure III. 20 : Cake filtrat API [63].

- **Discussion**

On remarque que le filtrat cake API est rigide et élastique. On peut dire alors que c'est un filtrat cake acceptable une indication de la capacité de perméabilité de fluide de forage dans le trou pendant sa circulation.

III .3. Etude économique

En faisant une comparaison entre le prix de revient d'une boue à base d'eau actuellement utilisée dans le forage des puits de pétrole au sud algérien (d'après le marché de site Ali Baba et Amazon) [82,83], et celle contenant notre gomme de caroube, on remarque que ces biopolymères peuvent être utilisés pour remplacer les polymères synthétiques, au moins comme agent viscosifiant ou agent réducteur de filtrat pour la boue de forage sans perturber les propriétés rhéologiques, physiques et chimiques de la boue.

Tableau III. 14 : Formulation de référence

| Produits | Quantité (g/350ml de boue) | Prix en EUR (€) |
|--------------|----------------------------|----------------------|
| Eau | 325,5 | / |
| SODA ASH | 0,175 | 0,00211925 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 | 0,00475125 |
| BENTONITE | 22,75 | 0,0884975 |
| PAC LV | 4,9 | 0,01042795117 |
| XANTHAN GUM | 0,63 | 0,4536 |
| KCL | 14 | 0,21742 |
| BARYTE | 14 | 0,003238494 |
| La somme | / | 0,78005444517 |

Tableau III. 15 : Formulation obtenue par la gomme de caroube

| Produits | Quantité (g/350ml de boue) | Prix en EUR (€) |
|------------------|----------------------------|---------------------|
| Eau | 325,5 | / |
| SODA ASH | 0,175 | 0,00211925 |
| CAUSTIC SODA | 0,525 | 0,00475125 |
| BENTONITE | 8 | 0,03112 |
| PAC LV | 3 | 0,0063844599 |
| Gomme de caroube | 5 | 0,2796 |
| XANTHAN GUM | 00 | / |
| KCL | 14 | 0,21742 |
| BARITE | 14 | 0,003238494 |
| La somme | / | 0,5446334539 |

Remarque : le calcul des prix des produits est défini dans l'ANNEXE 2.

Commentaire

On trouve que le coût de formulation de la boue de forage à base de la gomme de caroube est **inférieur** à celle de référence avec une différence de cout égale à :

0,23542099127 € = 34,6932 DA/350ml de boue.

Conclusion

Le rôle d'un additif doit être considéré à 2 niveaux :

- Au cours du procédé, il peut être ajouté dans le but de faciliter certaines opérations unitaires de confection du produit. Dans le cas contraire, s'il n'a qu'un rôle fonctionnel dans le produit fini, il faudra néanmoins considérer l'impact des propriétés qu'il confère au produit, en cours d'élaboration, sur ces opérations unitaires ;
- Dans le produit fini, comme agent conférant une fonctionnalité (agent stabilisant, agent viscosifiant et réducteur de filtrat...). La gomme de caroube, seule ou en synergie avec d'autres additifs, a un ensemble de propriétés caractéristiques. Dans chaque application, une ou plusieurs de ces propriétés seront mises à profit. La gomme de caroube est en compétition avec d'autres additifs, notamment les autres polysaccharides. Ceux-ci sont essentiellement d'origine végétale (Xanthane, amidon, cellulose...), mais elle devance de très loin les autres polysaccharides microbiens (curdlan, acide hyaluronique, succinoglycane, gellane, pullulane...). Pour mettre en compétition ces polysaccharides (ou autres polyacrylamides...), l'utilisateur considère la valeur d'usage des produits, c'est-à-dire le couple prix unitaire-concentration du polysaccharide correspondant à l'optimum de la propriété recherchée.

Par ailleurs, le prix d'achat des matières premières est primordial et donne lieu à des négociations avec les fournisseurs. La variation des prix agricoles a un impact important sur le prix de la gomme de caroube. L'intégration sur des matières premières est un atout. Pour conclure et d'après les résultats obtenus de rhéologie et de la réduction de filtrat on conclut que notre formulation obtenue qui contient 3 g/350ml de boue du PAC LV et 5g/350ml de boue de gomme de caroube économiquement est moins cher que la formulation de référence avec une différence de coût égale à : **0,23542099127 € = 34,6932 DA/350ml de boue.**

❖ Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Cette étude a permis de dégager plusieurs points essentiels concernant la valorisation d'un déchet issu de l'agriculture qui est la gomme de caroube issues de ses graines dans le domaine pétrolier. Cela ouvre de réelles perspectives d'applications dans le domaine des fluides de forage qui une première. Les domaines d'utilisations de la caroube sont certes concentrés dans d'autres secteurs cités précédemment en particulier l'agroalimentaire.

Le présent travail nous a permis en premier lieu de maîtriser des termes essentiels des fluides de forage, leurs fonctions, leurs types et classification, leurs propriétés physico-chimiques et rhéologiques leurs écoulements dans le milieu poreux.

Il faut noter que la réalisation de la partie pratique est effectuée au laboratoire **DLCC SONATRACH HASSI MESSAOUD**, cette partie nous a permis d'effectuer un suivi des analyses sur les différentes formulations des boues de forage à base d'eau.

Le principal objectif de notre étude est d'arriver à une formulation optimum de boue de forage à base d'eau, en optimisant les concentrations de la gomme de caroube et du PAC LV et en appliquant le test de four rotatif (HOOT ROLLING) pour voir l'effet de température en respectons les conditions réelles de puits.

A partir les résultats obtenus nous concluons que la gomme de caroube a de bonnes propriétés rhéologiques et physico- chimiques qui le permettent de remplacer un biopolymère importé d'un coût très élevé qui est la gomme de Xanthane et de réduire la quantité de polymère du PAC LV. Alors on peut dire qu'on peut utiliser la gomme de caroube dans la formulation de boue de forage en tant qu'un viscosifiant et en tant qu'un réducteur de filtrat.

La gomme de caroube présente un réel potentiel d'application intéressant en tant que viscosifiant et réducteur de filtrat pour les boues à base d'eau. Elle présente une stabilité acceptable par rapport aux ions divalents. De plus les résultats obtenus à haute température ont montrés une bonne tenue du caractère réducteur de filtrat du moins jusqu'à 250 °F en présence d'ions monovalents.

Perspectives

Il serait intéressant de compléter cette étude par une série d'essais à plus haute température. En outre, l'efficacité de la gomme de caroube en tant qu'agent viscosifiant et a moins degré réducteur de filtrat est vraisemblablement due à sa capacité de former des gels. Il serait également nécessaire de compléter ce travail par une étude de stabilité thermique et d'introduire d'autres électrolytes tels que les ions divalents.

Le produit que nous avons utilisé la gomme de caroube non purifiée est brut, c'est-à-dire qu'il n'a subi aucun traitement mis à part une attaque acide, ce qui est économiquement avantageux. Le développement de la gomme de caroube en tant qu'additif pour fluides de forage sera d'autant plus important que le prix de revient de ce biopolymère sera faible. Il est donc nécessaire d'optimiser la biosynthèse de ce biopolymère dans ce déchet pour arriver à un rendement de récupération supérieur.

❖ **Références bibliographiques**

- [1] Document interne d'AVA « Drilling fluids Manual ».
- [2] **BELHABIB, A. BELLA, F.** Les fluides de forage à base d'huile « Impacts sur l'environnement et technique de traitement ». Mémoire de master professionnel. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [3] **KHODJA, M.** « Les fluides de forage : étude des performances et considérations environnementales ». Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, École doctorale : Science des procédés. Université Louis Pasteur Strasbourg France, 2008.
- [4] [Fluide de Forage | PDF | Forage | Chaux \(scribd.com\)](#)
- [5] **WILIAMSON, D.** « Drilling Fluids Basics », Schlumberger; Spring 2013.
- [6] **FARAHAT, M.S.** « Drilling Fluids ».
- [7] **NGUYEN, J.P.** « technique d'exploitation pétrolière, le forage ». Livre ; Institut Français du Pétrole ; 1993.
- [8] **GARCIA, C. PARIGO, P.** « Boues de Forages », institut Français du Pétrole (I.F.P), société des éditions Technip ; Rueil-Malmaison ,1968.
- [9] **MOUMNI, L.** Cours fluides de forage, Génie minier ENIGAFSA. (Scribd)
[Cours Fluide Forage PDF | PDF | Boue | Filtration \(scribd.com\)](#)
- [10] **KHOJA, M. CANSÉLIER, J. P. COHAUT, N. and BERGAYA, F.** « Drilling Fluid Technology: Performances and Environmental Considerations ». Sonatrach ; Division Technologies et Innovation.
- [11] **BOUDOUR, R.** « Cours of drilling fluid » Ecole de Boumerdes (IAP). Algérie
- [12] **AMARA, R.** « Modélisation d'écoulement des fluides de forage dans un forage conventionnel ». Mémoire de Magistère, Ecole nationale supérieure polytechnique, département hydraulique, 2008.
- [13] **RAGOUILLIAUX, A.** « Etude théophysique de systèmes émulsions inverses/argile organophile, Applications aux boues de forage pétrolier ». Thèse de doctorat, de l'Université pierre et Marie Curie, Spécialité Physique des liquides ; 2007.
- [14] document interne de Schlumberger Company « Completion Fluids Manual »

Références bibliographiques

- [15] **ZAHOUANI, N.** « Etude comparative entre deux systèmes de boue de forage utilisée dans la phase 12 ¼ (champs Hassi-Messaoud) ». Mémoire de master académique, Université KASDI-MERBAH Ouargla ;2017-2018.
- [16] **PORE, J.** « Emulsion Et Micro-Emulsion, Emulsion Multiple », Editions Technique des Industries des Corps Gras, 1992.
- [17] **BROCHETTE, P** « Emulsification, Elaboration Et Etude Des Emulsions ». Technique de l'ingénieur, traité Génie des procédés, J 2 150 ; 1999.
- [18] **VEILLON, D.** « la liaison couche-trou », école du pétrole et des moteurs, Edition technip, France, p557 ; 2001
- [19] **SALAGER, J.** « Formulation concept for the emulsion maker. Pharmaceutical emulsions and suspensions », New York, Marcel Dekker, 2000.
- [20] **CIVAN, F.** « Reservoir formation damage: fundamentals, modeling, assessment, and Mitigation », Universit2 de Oklahoma,Gulf Publishing Company,760 p ;2000
- [21] Chapitre01Description Champ Hassi Messaoud (Scribd)
<https://www.scribd.com/document/.../Chapitre01Description-Champ-Hassi-Messaoud>
Publication de l'institut français du pétrole, Les fluides de forage, collection colloques et Séminaires 9, Edition technip, 1968.
- [22] **FUQUAN, T.** « Emulsion stabilization with janus particles », University of Pennsylvania, 2015.
- [23] **TADROS T, F.** « Emulsion Formation, Stability, and Rheology. In Emulsion formation and stability », Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [24] **COLLIAT-DANGUS, P.** « Complexation interfaciale de polymères : Propriétés et stabilité d'émulsions millimétriques. Thèse de doctorat, Université pierre et marie curie, 2015.
- [25] **LAURIER L. SCHARMM,** « Emulsion Fundamentals and Applications in The Petroleum Industry», Edition American chemical society, Washington DC, 1992.
- [26] **BOGNOLO, G.** « Tensioactifs non ioniques- Mise en œuvre industrielle », Techniques de l'ingénieur, 2004.
- [27] **FICHEUX, F. BONAKDAR, L. LEA-CALDARON, F. BIBETTE, J.** « Some stability criteria for double emulsions », Langmuir, 1998.

- [28] **F. PUISIEUX, M. SEILLER.** « Les Systèmes Dispersés, Agents de Surface et Emulsion », Galenica 5, 1983.
- [29] **LAURIER, L.** « Emulsion Fundamentals and Applications in The Petroleum Industry », Edition American chemical society, Washington DC, 1992.
- [30] **CAILLIERE, C.** « Minéralogie des argiles.1 classification et nomenclature » Edition. Masson ,1982.
- [31] **NONO, F.** « Caractérisation polyphasique de la zone de transition dans un réservoir pétrolier Carbonaté ». Thèse de doctorat, ENSAM de Bordeaux, 17-59, 2014.
- [32] **DELACHE, A.** « Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieux poreux : comparaison avec l'expérience ». Thèse de doctorat, Université des sciences et Technologie de Lille ; Décembre 2005.
- [33] **O. SERRA,** « Diagraphie différée -basse de l'interprétation », Tome 1, 1985.
- [34] **FOURAR, K.** « Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères ». Mémoire de magister. Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes, 2007.
- [35] Rapport interne de SONTRACH (DTD), Boumerdes 2015.
- [36] Document interne de SONATRACH « produits à boue division de forage », juillet 2009.
- [37] **CHALAH, K.** « Influence de l'ajout des polymères (PAC, HEC) et de la température sur le comportement rhéologique et les propriétés électrocinétiques des fluides de forage à base d'eau ». Mémoire de magister. Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes, 2011-2012.
- [38] **RAINES, R H.** « Use of low M.S. hydroxyethyl cellulose for fluid loss control in oil well applications ». Patent 4629573, Issued on December 16, 1986.
- [39] **SENTHIL KUMAR, A. VICAS, M. & V- P, SHARMA.** « Behaviour of organic polymers on the rheological properties of Indian bentonite-water based drilling fluid system and its effect on formation damage ». Indian Journal of Chemical technology.10; September 2003; pp. 525- 530.
- [40] **ROSNAH, M-S. GAPOR, A-B. TOP, M-D.** « Production of carboxymethyl cellulose (CMC) from oil palm empty bunch (EFB) ». MPOB information serie, ISSN.12; june2004; pp 1511-7871.
- [41] **HOEFLER, A-C.** « Sodium Carboxymethyl Cellulose: Chemistry, Functionality, and Applications ». Food Ingredients Group, Hercules Incorporated Wilmington, Delaware 19808.

- [42] **CLARK, P-K. & al.** « Polyacrylamide-Potassium Chloride Mud for Drilling Water sensitive Shales ». Journal of Petroleum Technology ;1986.
- [43] **FRASER, L-J.** « New Method Accurately Analyzes PHPA's in Mud, Oil & Gaz ». Journal ;1987.
- [44] **BOUAZIZ, M-A.** « Introduction aux polymères hydrosolubles ». IAP ; Mai 2001.
- [45] **YOSHIKI, F.** « The rheological properties and characterization of bentonite dispersions in the presence of non-ionic polymer PEG ». Journal of materials science. Clays Clay Min 32, 320; 1984.
- [46] **M'BODJ, O. ARIGUIB, N-K, M. AYADI, T. & MAGNIN, A.** « Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay-water-electrolyte-xanthane ». Journal of Colloid and Interface Science. 273; 2004; pp 675-684.
- [47] **CELLOSIZETM.** « Hydroxyethyl cellulose (HEC) Polymers For Use In Oilfield Cementing Applications ». Trademark of The Dow Chemical Company Form No. 325.00001-0805 AMS; 2005.
- [48] **BARBARA, K.** « Properties and applications of xanthan gum. Polymer Degradation and stability ». Elsevier Science Limited .59; 1998; pp 81-84.
- [49] **BELHOUARI, I. LADJ, H.** « Etude de conformité de la bentonite par dopage avec différents polymères dans la préparation des boues de forage ». Mémoire de master. Université de Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015-2016.
- [50] **BOUZIDI, L. CHANOUNE, S.** « Elaboration et Caractérisation d'un Composite Totalement Biodégradable ». Mémoire de master. Université de Abderrahmane Mira, Bejaia, 2017.
- [51] **JARROUX, N.** « Les biopolymères : différentes familles, propriétés et applications ». Techniques de l'ingénieur. Traité AM 3580. 2012.
- [52] http://sites.univ-provence.fr/~wabim/d_polycops/d_tele_bioch/glucides.pdf.
- [53] **PATTERSON, C.A.** « Polysaccharides d'origine végétale ». PhD, Pag The Pathfinders Research & Management Ltd; 2008; Canada.
- [54] **MOKRANI, N.** « Préparation et étude du comportement de membranes biopolymères alginate de sodium/chitosane ». Mémoire de magister. Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes ,2012-2013.

- [55] <https://france.sumitomo-shidemag.eu/t> .
- [56] [Xanthan Gum Chemical Structure. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)(Consulté le 1 juillet 2023).
- [57] **TARA, A.** « Modification chimique de l'amidon par extrusion réactive ». Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale – Sciences Exactes et Naturelles. Université de Reims Champagne-Ardenne, 2005.
- [58] **BATLLE I. et TOUS J.** « Carob tree, Ceratonia siliqua L ». Livre.Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 17. Institute of Plant Genetic and Crops Plant Research. Gatersleben/International Plant Resources Institute. Rome, Italy ; 1997.
- [59] <https://jardinage.ooreka.fr/plante/voir/356/caroubier> (Consulté le 25 mai 2023)
- [60] https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.reporters.dz/une-campagne-de-plantation-lancee-la-semaine-prochaine-premiere-experience-pilote-de-la-culture-de-caroubier/&ved=2ahUKEwiFiJy755D_AhWTVqQEHQCMAv0QFnoECA4QBQ&usg=AAOvVaw1qZ19S8munT1zeheiaVJIS (Consulté le 25 mai 2023)
- [61] <https://www.jardiner-malin.fr/fiche/arbuste/caroubier.html> (Consulté le 25 mai 2023)
- [62] **HADDARAH, A.** « L'influence des cultivars sur les propriétés fonctionnelles de la caroube libanaise ». Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale des Sciences et Technologie. Université Libanaise et Université de Lorraine (France) ,12 Décembre 2013.
- [63] Laboratoire DLCC SONATRACH HASSI MESSAOUD.
- [64] https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&id=D807CB0A542B3649BAA15854C9F19550577BE6F5&thid=OIP.YyObpwMMiTp7s0sSgYAWqgHaE7&mediaurl=https%3A%2F%2Fimg.freepik.com%2Fphotos-gratuite%2Fgousses-fruits-caroube-sec-isolated-on-white_161301-2051.jpg%3Fsize%3D626%26ext%3Djpg&cdnurl=https%3A%2F%2Fth.bing.com%2Fth%2Fid%2FR.63239ba7030c893a7bb34b12818016aa%3Frik%3D9eZ7V1CV8clUWA%26pid%3DImgRaw%26r%3D0&expf=417&expw=626&q=gousse+de+caroube+&form=IRPRST&selectedindex=17&vt=4&sim=1 (Consulté le 25 mai 2023)
- [65] <https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=p3p3hm7BM&id=52C6FE1EC7E9E71F947888312A3AA24DFD9FADD2&thid=OIP.p3p3hm7BM11KAA YnAul2eCwHaDw&mediaurl=https%3A%2F%2Fimg.freepik.com%2Fphotos-gratuite%2Fgousses-caroube->

mures-haricots-isoles_157837-1203.jpg%3Fsize%3D626%26ext%3Djpg&cdnurl=https%3A%2F%2Fth.bing.com%2Fth%2Fid%2FR.a77a619bb04cd752800189c0ba5d9e0b%3Frik%3D0q2f%252fU2iOioxiA%26pid%3DImgRaw%26r%3D0&expw=317&expw=626&q=gousse+de+caroube+&simid=608038494796391888&form=IRPRST&ck=A9FCE62354AFCAEC2095D2533E876234&selectedind ex=5&ajaxhist=0&ajaxserp=0&vt=0&sim=11&pivotparams=insightsToken%3Dccid_1PF8ae9R*cp_0252719F9C5914136703A687BBBBB61A*mid_CAEDCEA3CDADE621B6C6FBCB250A75DD3E49A98E*simid_608009177363413193*thid_OIP.1PF8ae9Rs-K7AeqwazutuwHaEZ&iss=VSI&ajaxhist=0&ajaxserp=0 (Consulté le 25 mai 2023)

[66] **YOKO KAWAMURA, Ph.D.** « Carob bean gum: chemical and Technical Assessment (CTA) ». Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2016. For the 69th JECFA; 2000.

[67] **EI BATAL, H. HASIB, A. OUATMANE, A. JAOUAD, A. NAIMI, M.** « Rheology and influence factor of Locust Bean Gum solution ». Revue de génie industriel.8; 2012; pp 55-62.

[68] **SITTKIJYOTHIN, W. TORRES, D. & GONCLAVES M-P.** « Modelling the rheological behavior of galactomannan aqueous solutions ». Article in International Scientific Journal. Carbohydrate Polymers. 59; 2005; pp .339-350

[69] **BELITZ, H-D. GROSCH, W. SCHIEBERLE, P.** « Food Chemistry ». livre.4th revised and extended edition; 1999.

[70] **BARAK, S. MUDGIL, D.** « Locust bean gum: Processing, properties and food applications ». International Journal of Biological Macromolecules. 66; 2014; pp 74–80.

[71] **DAKIA, P-A. BLECKERB, C. ROBERTA, C. WATHEKETA, B. PAQUOTA, M.** « Composition and physicochemical properties of locust bean gum extracted from whole seeds by acid or water dehulling pre-treatment ». Article scientifique in International Journal of Biological Macromolecules.Food Hydrocolloids. 22 ;2008; pp 807–818.

[72] **HERALD, C-T.** « Food Hydrocolloids ». Livre, chapitre 5: Locust/carob bean gum.1st edition. Martin.Glicksman; 1986; pp 161–170.

[73] **Pollard, M-A. Kelly, R. Wahl, C. Windhab, E. Eder, B. & Amado, R.** « Investigation of equilibrium solubility of a carob galactomannan ». Institute for Food Science and Nutrition, Swiss Federal Institute of Technology. Food Hydrocolloids. 21(5- 6); 2007; pp 683–692.

- [74] **BARAK, S. MUDGIL, D.** « Locust bean gum: Processing, properties and food applications ». *International Journal of Biological Macromolecules*. 66; 2014; pp 74–80.
- [75] **MNIF, W. INES ZIDI, I. BOUAZUZ, A.** « La gomme de caroube : trésor industriel ». *Microbiol. Hyg. Alim.*72. Mars 2013 ; pp 20-23.
- [76] **KOK M. S., HILL S. E., et al.** (1999). « A comparison of the rheological behaviour of crude and refined locust bean gum preparations during thermal processing ». *Carbohydrate Polymers* 38(3), 1999, 261-265.
- [77] **BATAL, H.E., HASIB, A., OUATMANE, A., BOULLI, A., DEHBI, F., and JAOUAD, A.** « Yield and composition of carob bean gum produced from different Moroccan populations of carob ». (*Ceratonia siliqua L.*). 6. 2013.
- [78] **DAKIA P.A., WATHELET B. & PAQUOT M.** « Influence of galactose content on interactions phenomena and on galactomannans physicochemical properties in solution. *Biotechnol* ». *Agron. Soc. Environ.* 14(1), 2010 .213-223.
- [79] **DADOU.M.** Document interne de Sonatrach « les caractéristiques physiques de la boue de forage », juillet 2009.
- [80] **BELHADJ CHEIMK, M.** « Caractérisation physico-chimique d'une boue de forage et leur impact sur l'environnement : cas Hassi Ilatou-ADRAR » Mémoire de master. Université Ahmed Daïa, Adrar, 2021-2022
- [81] **Baker, H.** « Fluid Facts ». *Engineering Handbook ; Technical communications Group ; USA , March 1998.*
- [82] <https://french.alibaba.com/>
- [83] <https://www.amazon.fr/>

❖ ANNEXES

❖ ANNEXE 1

Projet START-UP

Carte d'information
(À propos de l'équipe d'encadrement du groupe de travail)

1.Équipe d'encadrement

| Équipe d'encadrement | |
|--|---------------------------------------|
| Encadrant principal : BENDJABALLAH Malek | Spécialité : Génie chimique |
| Co-encadrant 01 :/..... | Spécialité :/..... |
| Co-encadrant 02 :/..... | Spécialité :/..... |

2.Équipe de projet

| Équipe de projet | Faculté | Spécialité |
|---|--------------------------------|-----------------------|
| Le porteur N°01 de projet MENAI May-Hadil | Science et Technologie. | Génie chimique |
| Le porteur N°02 de projet CHARCHARI Amani | Science et Technologie. | Génie chimique |



❖ Index Contenu

Table des matières

Premier axe : Présentation du projet

1. L'idée de projet (la solution proposée)
2. Les Valeurs suggérées
3. L'équipe
4. Les Objectifs du projet
5. Le planning de réalisation du projet

Deuxième axe : Aspects innovants

1. La nature des innovations
2. Les domaines d'innovation

Troisième axe : Analyse stratégique du marché

1. Le segment du marché
2. La mesure de l'intensité de la concurrence
3. La stratégie marketing

Quatrième axe : Plan de production et organisation

1. Le processus de production
2. L'approvisionnement
3. La main d'œuvre
4. Les principaux partenaires

Cinquième axe : Plan financier

1. Etude économique

Sixième axe : Prototype expérimental

❖ **Le premier axe**

Présentation du projet

Premier axe : (Présentation du projet)

1. L'idée de projet (solution proposée)

Comme le pétrole et le gaz seront toujours la forme d'énergie dominante pour soutenir le développement de la société, la réalisation d'un forage du pétrole efficace et respectueux de l'environnement est toujours un objectif à long terme des scientifiques, industriels et des chercheurs. Pour y parvenir, l'utilisation de biopolymères comme additifs alternatifs aux constituants conventionnels pour divers fluides est utile car elle peut améliorer la récupération du pétrole, ainsi que réduire le coût du forage, de l'hydrofracking et du traitement des eaux usées engendrées.

L'idée de projet a commencé à partir des problèmes dus aux opérations de forage pétrolier tel que le coût élevé de cette opération plus la pollution engendrée par les différents composants utilisés dans les fluides de forage. Sachant que le forage est une opération déterminante pour la prospection et l'exploitation des gisements d'hydrocarbure. Le fluide de forage utilisé, bien qu'il représente 7 à 10% des coûts totaux de l'opération, est un facteur clef du succès techniques et économique d'un forage. Actuellement dans le domaine du forage des puits du pétrole, la recherche a la tendance à utiliser des nouvelles technologies en incluant des composants alternatifs pour les fluides de forage qui utilisent des composés synthétiques et dans la majorité est importée de l'étranger en devises alourdit ainsi la facture d'importation par des composés d'origine agricole et moins cher pour diminuer la pollution et réduire au minimum le coût de l'opération de forage. Parmi les déchets agricoles qui peuvent être revalorisés dans le domaine des fluides de forage, les noix de caroube qu'on extrait un biopolymère bon marché à cause de ses propriétés techno-fonctionnelles (stabilisant, épaississant, agglomérant et gélifiant). Rares les travaux qui se sont intéressés à valoriser ses déchets de caroubiers, nous avons focalisé notre travail sur la gomme de caroube en tant que constituants dans les fluides de forage. Le but essentiel est d'une part revaloriser ce déchet agricole et d'autre part améliorer les caractéristiques de ces fluides de forage.

Ce présent projet se fait par la construction en premier, d'une unité pilote de production et d'extraction de ce biopolymère en utilisant des matières premières de ressources naturelles végétal locales qui sont les déchets de noix de caroube. En seconde, la création de petites entreprises et associations de collectes de ses déchets agricoles.

Cette unité de production sera installée à proximité de la culture des arbres caroubiers. On peut dénombrer certaines régions très connues par la culture et la plantation et la production

de caroube telles que Bejaia et Tlemcen et un méga futur projet nationale de plantation de 10 millions de caroubier à l'horizon de 2035. Notre wilaya de Guelma dispose de 230 hectares des arbres de la caroube implantée à Ain Ben Beida.

2. Les valeurs proposées

Les valeurs proposées ou livrées aux clients peuvent être identifiées conformément aux éléments suivants :

- Notre produit qui s'agit d'un nouveau biopolymère de ressources naturelles à base des noix de caroube disponibles au niveau local qui sera un composé compétitif et alternatif aux autres constituants des fluides de forage.
- Ceci va réduire au maximum les coûts des opérations de forage pétroliers.
- La valorisation des déchets des noix de caroube dans la formulation de fluide de forage.
- Mettre notre produit à la disposition des clients tels que la société nationale des hydrocarbures SONATRACH qui a toujours cherché à diminuer la facture d'importation de ses matières premières.
- Notre nouveau biopolymère vu ses propriétés et caractéristiques qui sont nettement meilleures par rapport aux propriétés des composants des fluides de forage qui sont dans la majorité importés de l'étranger apportent une satisfaction à notre client qui est la SONATRACH.
- Dans un souci croissant de protection de l'environnement, la législation tend à limiter l'emploi des fluides à base d'huile et il est désormais nécessaire de développer des formulations non polluantes à base d'eau. La boue de forage à base d'eau formulée en utilisant la gomme de caroube écologique et à faible coût a été développée c'est une boue respectueuse à l'environnement car elle contient un biopolymère biodégradable.

3. Équipe de travail

L'équipe de projet est composée des membres suivants :

- Le docteur BENDJABALLAH Malek enseignant chercheur dans le domaine des fluides de forage.
 - Le porteur de projet N°01 / MENAI May Hadil : a suivi des formations dans le domaine de Design Thinking et le BMC, a un niveau B2 dans la langue française, a un aspect de communication avec les clients, a l'esprit de remarquer et d'analyser les petits détails, a une grande volonté pour réaliser ses objectifs plus de L'esprit d'initiation et de réalisation des projets.
 - Le porteur de projet N°02 / CHARCHARI Amani : a suivi des formations dans le domaine de Design Thinking et le BMC, à l'esprit de responsabilité et de travail en groupe et le sens de communication, et d'initiative.
- **Le rôle des deux étudiantes**

Dans le but de développer l'idée du projet, une étude expérimentale sur la possibilité de valorisation de notre produit dans la formulation de fluide de forage a été effectuée au niveau des laboratoires centrales DLCC **SONATRACH HASSI MESSAOUD** pour examiner l'effet de l'ajoute de notre nouveau produit sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques de fluide de forage suivi d'une étude comparative avec l'effet des polymères synthétiques classique utilisées. De plus le rôle de diriger le projet et étudier la stratégie de marketing et chercher les meilleures conditions pour la satisfaction des clients.

4. Objectifs du projet

Les objectifs du projet :

Suite à l'extraction de notre biopolymère qui est la gomme de caroube issu des déchets des noix de caroube, une petite entreprise va être créée dans ce sens.






Notre objectif est de devenir le premier producteur de la gomme de caroube en Algérie au cours des cinq premières années.

Par la suite le produit final caractérisé et qui a donné de bons résultats en formulation des fluides de forage va être vendu aux différents consommateurs industriels en premier la SONATRACH, et plus tard aux entreprises pétrolières étrangères tell que AVA et SCHLUMBERGER et autres...

La création de plusieurs unités de productions à travers le pays pour réduire le taux de chômage. L'usage des fluides à base de notre biopolymère permettent l'optimisation des conditions d'exploitation par le choix du fluide idéal ayant des propriétés ajustables et/ou contrôlables. En plus de l'amélioration de la qualité et la performance des fluides de forage pétrolier.

5. Calendrier de réalisation du projet

Une durée totale de 31 mois est prévue pour ce Projet

| Étape | Mois 1-4 | Mois 5-8 | Mois 9-13 | Mois 14-18 | Mois 19-23 | Mois 24-28 | Mois 29-31 |
|---|---|---|--|---------------|---------------|---|---------------|
| Collecte et extraction de la gomme de caroube |  | | | | | | |
| Caractérisation des additifs des fluides de forage |  | | | | | | |
| Formulation et optimisation des fluides de forage | |  | | | | | |
| Extrapolation de ces nouvelles formulations à l'échelle pilote. | | |  | | | | |
| Exploitation, synthèse et valorisation des résultats | | | | | |  | |

- **Taches effectuées**

Tâche 1 (04 Mois) : **Caractérisation des additifs des fluides de forage** (Sur la base de la formulation de fluide de forage, plusieurs additifs conventionnels seront caractérisés du point de vue physico-chimique, en plus des additifs spéciaux qui seront intégrés (gomme de caroube).

Tâche 2 (06 Mois) : **Formulation et Optimisation des fluides de forage** (Après le choix des additifs ciblés, plusieurs formulations de fluides seront caractérisées et évaluées sur la base des propriétés requises pour chaque cas de fluides : Rhéologie, stabilité, filtration, compatibilité, biodégradabilité...).

Tâche 3 (05 Mois) : **Evaluation des potentialités et les performances d'application en forage de ces biopolymères.** Pour le fluide de forage et après la récolte de données relatives aux différentes formulations, nous allons sélectionner les formulations optimales pour

améliorer la performance des fluides. Trois actions seront ciblées à savoir : le type d'additif et sa concentration, les paramètres de forage, et les conditions in-situ.

Tâche 4 (10 Mois) : **Elaboration de nouveaux biomatériaux** : Collecte, extraction, modification et caractérisation des polymères naturels, Essais à l'échelle du laboratoire, Applications à l'échelle pilote.

Tâche 5 (06 Mois) : **Exploitation, Synthèse et Valorisation des Résultats** (Les tests réalisés et les résultats obtenus seront exposés devant les acteurs concernés pour critique, amélioration, et accompagnement pour éventuelle valorisation et applications) et Faisabilité économique.

❖ Deuxième axe

Aspects innovants

Deuxième axe :(Aspects innovants)

1.Nature des innovations

La nature des innovations adoptées dans le projet doit être précisée selon les propositions données dans le schéma suivant :

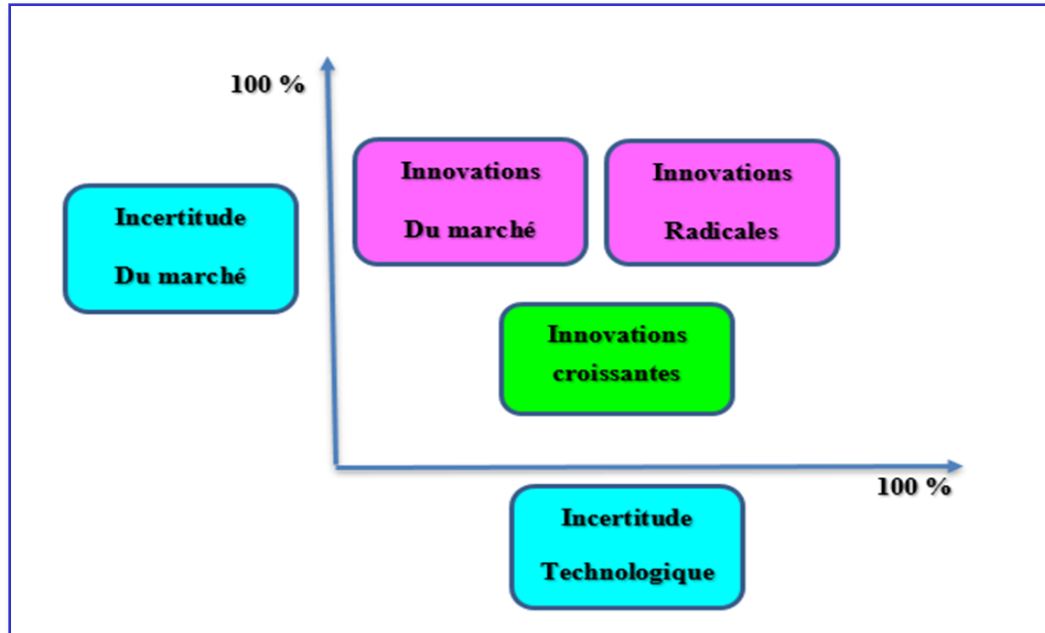


Figure 1 : La nature d'innovation

- **Innovation radicale** : notre idée n'a jamais existé auparavant pour la revalorisation de ce type de biopolymère dans la formulation de fluide de forage.
- **Innovation de marché** : on a remplacé un produit importé par un produit local donc on a réduit le cout a un certain pourcentage.

2. Domaines d'innovation

L'aspect de ce projet a été inséré dans un volet de valorisation des rejets industriels sous forme de biopolymères afin de minimiser la dégradation du milieu naturel.

La technologie des fluides et celle des additifs utilisés pour le forage proprement dit et pour les formulations de ses fluides, sont en constante évolution pour améliorer les performances. Les résultats expérimentaux visent à déterminer la formulation optimale (type d'additifs et concentration) à utiliser, pour obtenir de bonnes propriétés petro-physiques et améliorer leurs effets d'épaississement, de réticulation, d'adsorption et réducteur de filtrat.

Ce projet s'inscrit dans cette optique à établir de nouvelles formulations de fluides de forage par additifs de biopolymères et le traitement des effluents pétroliers.

Les biopolymères polysaccharides sont considérés comme des biomacromolécules dérivées de ressources renouvelables, sous une forme brute ou chimiquement modifiée. Ils sont avantageux pour une large gamme d'applications dans les secteurs différents. En raison de leurs comportements physiques polyvalents, de leurs multiples fonctions, de leur prix relativement bas, de leur durabilité et de leur sécurité environnementale. Le marché mondial des biopolymères devrait atteindre 10 milliards de dollars en 2022, avec un taux de croissance annuel de 17 %.

Depuis la création de l'industrie pétrolière, les polymères polysaccharidiques ont été utilisés dans presque tous les secteurs de l'industrie pétrolière pour réduire les coûts de récupération et améliorer l'efficacité des opérations. En plus d'exiger généralement que les polymères soient fiables et efficaces, l'industrie pétrolière met davantage l'accent sur l'économie des polymères, surtout lorsque le pétrole et le gaz naturel sont à bas prix. Par conséquent, les opérations de l'industrie pétrolière et gazière préfèrent les polymères sous leurs formes composites naturelles, peu ou pas modifiées, aux polymères ultrapurs.

Ajouter à cela la biodégradabilité de la gomme de caroube, ce qui est un avantage pour diminuer la pollution engendrée par les fluides de forage classiques et la réduction des coûts de traitement.

Dans ce cadre, prévoir des possibilités d'amélioration des propriétés des produits valorisés est au même titre que d'obtenir des phénomènes inverses. Une maîtrise de la nature, de la composition des produits, et des mécanismes mises en jeu peuvent guider énormément à justifier les voies à développer.

En dehors des entreprises pétrolières intéressées par notre nouveau produit le domaine agroalimentaires est aussi intéressé par ce nouveau biopolymère.

❖ **Troisième axe**

Analyse stratégique du marché

Troisième axe :(Analyse stratégique du marché)

1. Le segment du marché

- **Le marché potentiel** : les entreprises d'exploitation des gisements des hydrocarbures, en particulier les entreprises pétrolières.
- **Le marché cible (le segment)** : les entreprises de forage pétrolier comme par exemple SONATRACH. Ce segment a été choisi par ce que l'entreprise de SONATRACH a un manque des produits chimiques et elle se basant sur l'importation pour fournir les produits utilisés, alors que notre produit on peut le produire localement.
De plus on peut ajouter plus tard d'autre secteur a notre marché parce que notre produit la gomme a plusieurs utilisations dans des différents domaines comme : le secteur agro-alimentaire, le secteur chimique et cosmétique.
- Et on a la possibilité de conclure des contrats d'achat avec SONATRACH par ce que notre analyse qui définit l'efficacité de notre produit sont déjà effectuée au niveau de laboratoires de DLCC HASSI MESAOUUD SONATRACH, et sa c'est un facteur très important pour le succès de produit.

2. Mesure de l'intensité de la concurrence

Nos concurrents directs sont les fournisseurs des produits de boue de forage et les spécialistes de production des fluides de forage tel que :

- **SARL GLOBAL FLUIDES** : c'est une entreprise à la région de Hussein Dey Alger qui est spécialisé de production de fluides industriels, fluides de forage, fluides hydrauliques, environnement fluide...etc.
- **PETRO INDUSTRI Sarl** : c'est une entreprise à la région de Oran pour la production des produits de fluides de forage.

De plus les fournisseurs de la gomme de caroube en Algérie pour l'utilisation au secteur cosmétique et agro-alimentaire.

Plus que les concurrents indirects qui sont les principaux acteurs opérant sur le marché des fluides de forage et de complétion en Afrique tels que : Halliburton Company, Baker Hughes company, Waterford International PLC.

3. La stratégie marketing

Nous devons appliquer la stratégie marketing suivante :

Plus tard on va acheter une application numérique pour distribuer les produits et gérer les commandes des clients et en mettre sur cette application tous les informations et les caractéristiques de notre produit pour attirer les clients. Cette application permet d'enregistrer les réclamations et les propositions des clients pour être satisfaite et pour l'amélioration de notre service de marketing à partir des avis et besoins des clients. Donc notre objectif est de faciliter la communication avec les clients.

De plus la commercialisation de notre produit va être par des publicités sur les réseaux sociaux ou sur les sites web et les e-mails.

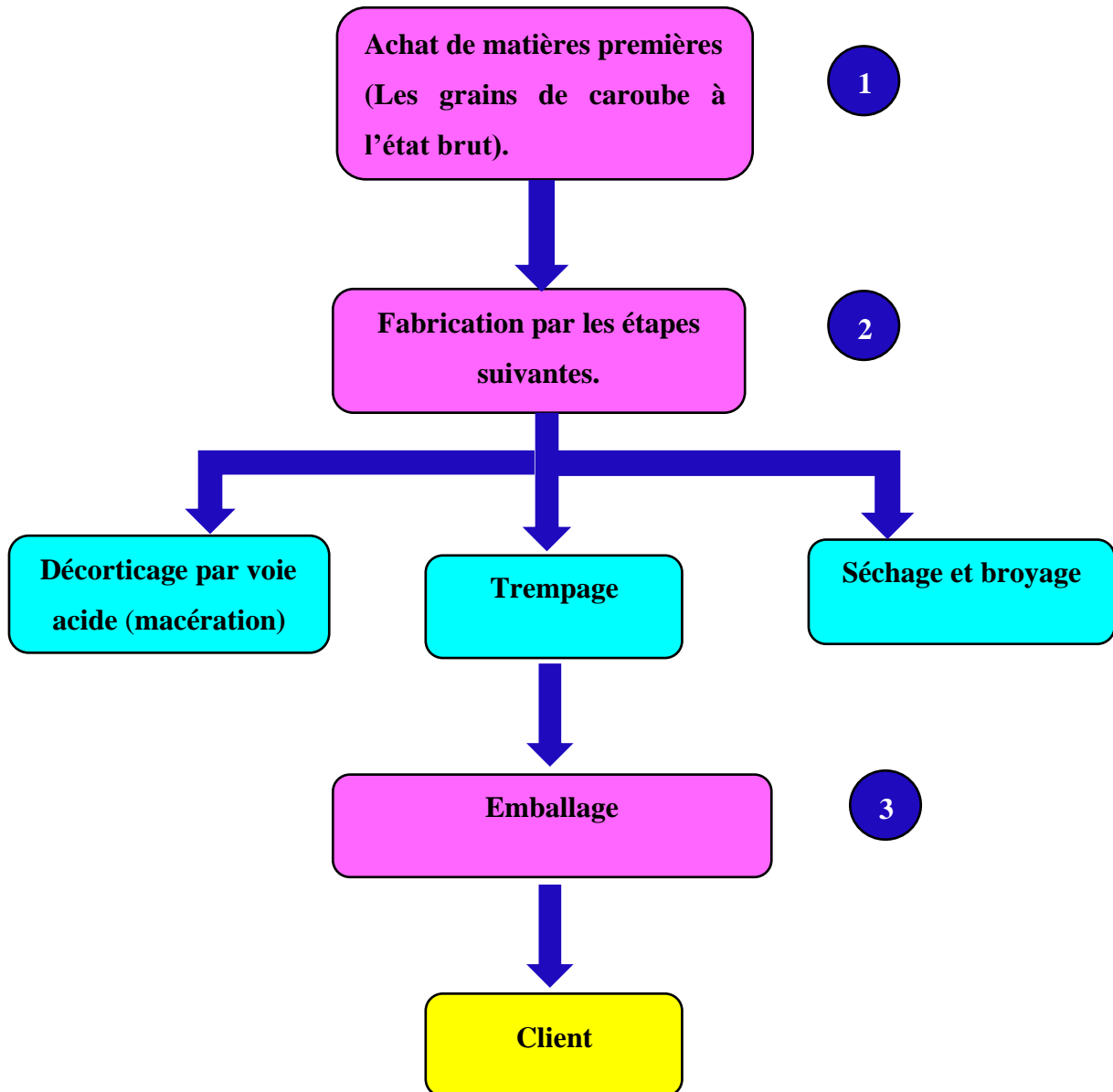
❖ **Quatrième axe**

Plan de production et d'organisation

Quatrième axe :(Plan de production et d'organisation)

1. Le Processus de production

Le schéma suivant explique les étapes du processus de production :



2. L'approvisionnement

- Dans la politique d'achat, nous traitons directement avec les principaux fournisseurs, et parmi les fournisseurs les plus importants on a :(les fournisseurs des matières premières et des matériaux et équipements)
- Dans la politique de paiement doit être en ligne ou par CCP, et les délais de réception sont après la confirmation des commandes par des versement primaire.

3.La main d'œuvre

Notre projet va créer du premier lieu environ de 40 postes d'emplois directs et près de 60 postes d'emplois indirects.

Nous avons besoins d'un ingénieur de comptabilité, un ingénieur de marketing et des spécialistes dans le domaine de boue de forage et pour les postes qui reste on ne nécessite pas de spécialisations précises car son rôle doit être simple pour les premières simples étapes de productions.

4. Les Principaux partenaires

Les acteurs qui peuvent aider à la réalisation du projet et apporter le complément par l'accompagnement et l'intégration sont : les fournisseurs des matières premières, les fournisseurs des matériaux et équipements, les incubateurs universitaires, les laboratoires de la boue de forage de SONATRACH pour plus tard continuer les analyses nécessaires pour l'amélioration de notre produit jusqu'arriver à un produit plus développé à un état parfait.

Les agriculteurs de culture de caroubier, les entreprises de stockage. En fin n'oublier pas les entreprises de livraison et de transport.

❖ Cinquième axe

Plan financier

Cinquième axe :(Plan financier)

1.Etude économique

| Formulation de référence | Produits | Quantité (g/350ml de boue) | Prix en EUR (€) |
|------------------------------|------------------|----------------------------|-----------------|
| | | Eau | 325,5 |
| | SODA ASH | 0,175 | |
| | CAUSTIC SODA | 0,525 | |
| | BENTONITE | 22,75 | |
| | PAC LV | 4,9 | |
| | XANTHAN GUM | 0,63 | |
| | KCL | 14 | |
| | BARITE | 14 | |
| Formulation avec biopolymère | Eau | 325,5 | 0,5446334539 |
| | SODA ASH | 0,175 | |
| | CAUSTIC SODA | 0,525 | |
| | BENTONITE | 8 | |
| | PAC LV | 3 | |
| | Gomme de caroube | 5 | |
| | XANTHAN GUM | 00 | |
| | KCL | 14 | |
| | BARITE | 14 | |

Commentaire

On trouve que le coût de formulation de la boue de forage à base de la gomme de caroube est **inférieur** à celle de référence avec une différence de coût égale à :

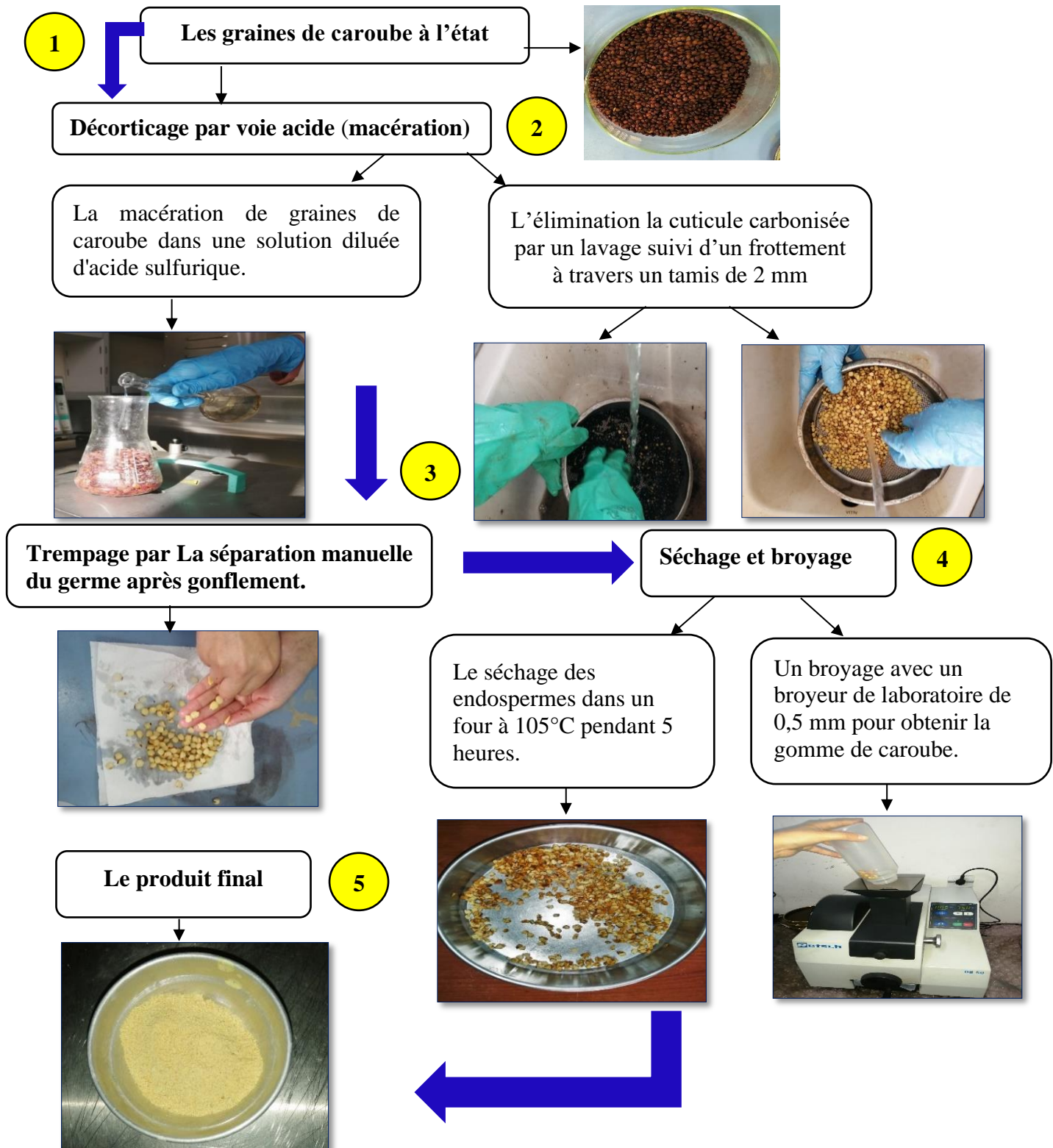
0,23542099127 € = 34,6932 DA /350ml de boue.

❖ Sixième axe

Prototype expérimental

Sixième axe :(Prototype expérimental)

Le prototype expérimental qui été réalisés par les importants étapes suivant



Modèle d'affaires (BMC)

5.Principaux partenaires

- Les fournisseurs des matières premières.
- Les fournisseurs des matériaux et des équipements.
- Les incubateurs universitaires.
- Les entreprises de livraison et de transport.
- Les agriculteurs de culture de caroubier
- Les entreprises de stockage.

6.Activités clés

- L'extraction de notre produit qui est la gomme de caroube à partir des noix de caroube.

7.Ressources clés

- Les équipements.
- Les produits chimiques utilisés dans l'extraction du produit.
- Les employés.
- Local.

2.Propositions de valeurs

- Réduire le Coût
- Réduire la pollution par l'avantage de la biodégradabilité.
- La valorisation des déchets des noix de caroube dans la formulation de fluide de forage et améliorer ses caractéristiques.

4.Relation client

- Par une application numérique pour la communication avec les clients en appliquant le service après-vente pour suivis les propositions des clients
- Les e-mails.
- Les évènements

3.Canaux

- Par des publicités sur les réseaux sociaux.
- Les sites web.

1.Segment de clientèle

- Les entreprises de forage pétrolier comme par exemple SONATRACH.

8.Coûts

- Les matières premières
- Les équipements utilisés
- Stockage
- Emballage
- Locale

9.Revenus

Le produit va être vendu aux différents consommateurs industriels en premier la SONATRACH.

❖ ANNEXE 2

Calcul de coût des produits des formulations :

BARITE

1tonne=1000000g \longrightarrow 231,3210 € 14g = 0,003238494 €
 14g \longrightarrow X €

CAUSTIC

1000g \longrightarrow 9,05 €
 0,525 g \longrightarrow X €

SODA

0.525 g = 0,00475125 €

SODA

1000g \longrightarrow 12,11 €
 0,175 g \longrightarrow X €

ASH

0.175 g = 0,00211925 €

KCL

1000g \longrightarrow 15,53 €
 14 g \longrightarrow X €

14 g=0,21742 €

XANTHAN GUM

100 g \longrightarrow 72 €

0,63 g=0,4536 €

0,63 g \longrightarrow X €

Gomme de caroube (graines de caroube + acide sulfurique H₂SO₄)

120 ml (H₂SO₄) \longrightarrow 30 g (graines de caroube) H₂SO₄ =20 ml

X ml (H₂SO₄) \longrightarrow 5g (graines de caroube)

Graines de caroube

1000g \longrightarrow 9,88 €

5g= 0,0494 €

5g \longrightarrow X €

Acide sulfurique H₂SO₄

1000 ml → 11,51€ 20 ml=0,2302€

20 ml → X €

Gomme de caroube = 0,0494 € + 0,2302€

Gomme de caroube = 0,2796 €

BENTONITE de formulation de référence

1000g → 3,89 € 22,75 g =0,0884975 €

22,75 g → X €

BENTONITE de formulation qui est dans les normes optimales

1000g → 3,89 € 8 g = 0,03112 €

8 g → X €

PAC LV de formulation de référence

1tonne= 1000000 g → 2128,1533 € 4,9 g = 0,01042795117 €

4,9 g → X €

PAC LV de formulation qui est dans les normes optimales

1tonne =1000000 g → 2128,1533 € 3g = 0,0063844599 €

3g → X €