

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES**

**Faculté de Technologie**  
**Département Génie des Procédés**

**MEMOIRE DE MASTER**

Filière : Génie des Procédés  
Spécialité : Génie des Polymères

**THEME**

**ÉTUDE COMPARATIVE DE COMPORTEMENT  
RHÉOLOGIQUE DE DEUX POLYMÈRES  
UTILISÉS DANS LES FLUIDES DE FORAGE**

Présenté par : HOCINE Amira et KEDIRA Narimane

Supervisé par : Dr. BENOUADAH Nacera

Soutenu le 26/10/2020 devant le membre de jury :

**Le président : Mr ZERIZER Abdellatif professeur à UMBB**  
**La promotrice : Mme BENOUADAH Nacera MCB à UMBB**  
**L'examineur : Mr BENOTMANE Bènamar professeur à UMBB**

**Promotion 2019-2020.**

# *Remerciement*

*En premier lieu, nous tenant à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre promotrice Mme BENOUDAH Nacéra pour nous avoir diligentées durant ce travail.*

*Nous présentons nos chaleureux remerciements à tous nos enseignants.*

*On tient aussi à remercier Mrs BELOUNIS Abderahim ingénieure au CRD, et Mme BENAMARA Nassima docteur en chimie pour leurs aides et soutiens.*

*Notre respect aux membres de jury, qui nous feront l'honneur d'accepter et de juger se modeste travail.*

*Nos derniers remerciements et ce ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.*

*Amira et Narimane*

# *Dédicace*

*Ce travail est l'aboutissement d'une longue aventure universitaire, je le dédie à mes parents qui m'ont toujours épaulé dans mes projets et mes rêves et qui se sont toujours inquiétés de mon sort;*

*mon grand-père qui a été mon support jusqu'à ses dernier souffles.*

*Je le dédié également à mon frère Yacine et mes sœurs Amina et Hiba, mon oncle, ma tante et toute ma famille, et mes amies.*

***HOCINE Amira.***

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde pour moi, mes chers parents, qui m'ont permis de continuer mes études dans les meilleures conditions et qui m'ont appris à ne jamais baisser les bras.

-Mes très chères sœurs Hanane, Nedjma, Meriem et mes très chers frères Kamel et Mouhamed.

-Ainsi que pour toute ma famille, tous mes amis et mes proches.

**KEDIRA Narimane**

## Résumé :

En général, l'étude du comportement rhéologique de fluides de forage est d'une importance capitale dans le but d'amener l'opération de forage des puits à terme sans aucune difficulté. Cet objectif nécessite la maîtrise des propriétés des fluides de forage à base des polymères. Le choix a été porté sur ce type de fluide pour des raisons environnementales en vue de leur généralisation sur nos sites de forage. Une étude comparative a été proposée dans le but de d'identifier les caractéristiques rhéologiques de deux polymères (PHPA et Xantane).

## Abstract:

In general, the study of the rheological behavior of drilling fluids is of paramount importance in order to bring the well drilling operation to completion without any difficulty. This objective requires mastering the properties of drilling fluids based on biopolymers. The choice was made on this type of fluid for environmental reasons with a view to their generalization on our drilling sites. A comparative study was proposed with the aim of identifying the rheological characteristics of two polymers (PHPA and Xantane).

## المخلص:

بشكل عام، تعتبر دراسة السلوك الانسيابي لسوائل الحفر ذات أهمية قصوى لإكمال عملية حفر الآبار دون أي صعوبة. يتطلب هذا الهدف إتقان خصائص سوائل الحفر على أساس البوليمرات الحيوية. تم الاختيار على هذا النوع من السوائل لأسباب بيئية بهدف تعميمها على مواقع الحفر المتعددة. تم اقتراح دراسة مقارنة بهدف تحديد الخصائص الانسيابية لاثنتين من البوليمرات (الزانتان وبولي أكريلاميد متحلل جزئياً).

# Sommaire

Introduction Générale .....	1
1. Les concepts fondamentaux des polymères .....	3
1.1. Les polymères .....	3
1.1.1. La réaction de polymérisation .....	4
1.1.2. Caractérisation des polymères .....	5
1.1.3. Les types des polymères.....	5
1.1.4. Structure des polymères .....	6
1.1.5. Classification des polymères.....	7
1.2. Les biopolymères .....	8
1.2.1. Les types de biopolymères.....	8
1.3. Exemples sur les polymères .....	9
1.3.1. Le xanthane.....	9
1.3.2. L'hémicellulose .....	10
1.3.3. La gomme de guar.....	10
1.3.4. Le polyacrylamide partiellement hydrolysé PHPA .....	11
2. Le forage et les fluides de forage .....	12
2.1. Le forage .....	12
2.1.1. Les types de forage.....	12
2.2. Les fluides de forage .....	13
2.2.1. Composition de fluide de forage.....	14
2.2.2. Différent types de fluide de forage .....	14
2.2.3. Circulation des fluides de forage .....	14
2.2.4. Les paramètres de fluide de forage.....	15
2.2.5. Le rôle des fluides de forage .....	17
2.2.6. Utilisation des polymères dans les fluides de forage.....	18
3. La rhéologie des fluides de forage .....	19

3.1. Définition.....	19
3.1. Paramètres fondamentaux de la rhéologie.....	20
3.1.1 Notion de mouvement de cisaillement.....	20
3.1.2. La viscosité .....	20
3.2. Les différents comportements rhéologiques.....	21
3.2.1. Les fluides indépendants du temps.....	22
3.2.1.1. Fluides Newtoniens.. .....	22
3.2.1.2. Fluides non Newtoniens .....	22
3.2.2. Les fluides dépendants du temps.....	25
3.2.3. Les fluides viscoélastiques .....	27
3.3. Les modèles rhéologiques.....	28
3.3.1. Le modèle de Bingham .....	29
3.3.2. Le modèle d'Ostwald (Loi de puissance).....	29
3.3.3. Le modèle d'Hershel-Buckley .....	31
3.4. La rhéologie des polymères .....	33
3.5. Généralité sur le rhéomètre .....	34
3.5.1. Constitution du rhéomètre .....	35
3.5.2. Les différents types de rhéomètre.....	35
4. Synthèse comparative .....	39
4.1. Comportement rhéologique des polymères à différentes concentrations... 40	
4.1.1. Solutions de xanthane.....	40
4.1.2. Solutions de PHPA.....	43
Conclusion Générale .....	47
Références Bibliographiques.....	48

## Listes des figures

Figure 1: Structure chimique du CH <sub>2</sub> = CH <sub>2</sub> Monomère de l'éthylène. ....	3
Figure 2: Courbe générale traction-allongement des matériaux polymères .....	7
Figure 3: La structure chimique de xanthane.....	9
Figure 4: Structure chimique de l'hémicellulose.....	10
Figure 5: Structure chimique de gomme a guar.....	11
Figure 6: Structure chimique de PHPA.....	11
Figure 7: Différentes types de forage. ....	13
Figure 8: Circulation des fluides de forage. ....	15
Figure 9: Fluide newtonien. ....	22
Figure 10 : Fluide de bingham. ....	23
Figure 11 Fluide plastique. ....	24
Figure12: Fluide rhéofluidifiant. ....	25
Figure 13: Fluide rhéoépaississant. ....	25
Figure 14: Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes. ....	26
Figure 15 : Courbe Le modèle d'Ostwald. ....	30
Figure 16 : Courbe Le modèle d'Hershel-Buckley. ....	31
Figure 17: Modèles rhéologique. ....	32
Figure 18: Courbes fluage et relaxation.....	33
Figure 19: Un rhéomètre(Malvern). ....	34
Figure 20: Rhéomètre plan- plan. ....	35
Figure 21: Rhéomètre cône plan. ....	36
Figure 22: Rhéomètre cylindre coaxiaux. ....	37
Figure 23: Courbe d'écoulement du xanthane (Benouadah). ....	40
Figure 24: Courbe de viscosité du xanthane (Benouadah).....	41
Figure 25: Rhéogrammes des solutions de la gomme de xanthane (Fourar). ....	41
Figure 26: Viscosité de la gomme de xanthane dans l'eau en fonction du gradient de cisaillement (Fourar). ....	42
Figure 27: Courbe d'écoulement du PHPA (Benouadah). ....	43
Figure 28 Courbe de viscosité du PHPA (Benouadah).....	43
Figure 29: Rhéogrammes des solutions du PHPA (Fourar).....	44
Figure 30: Viscosité du PHPA en fonction du gradient de cisaillement (Fourar).....	44

# Symboles et Nomenclatures

## ✓ Symboles grecques :

$\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa].

$\tau_c$  : Seuil d'écoulement [Pa].

$\gamma$  : Déformation de cisaillement [s<sup>-1</sup>].

$\dot{\gamma}$  : Vitesse de cisaillement [s<sup>-1</sup>].

$\eta$  : Viscosité dynamique [Pa.s].

$\mu_a$  : Viscosité apparente [Pa.s].

$\nu$  : Viscosité cinématique [m<sup>2</sup>/s].

$\mu_{rel}$  : Viscosité relative.

$\mu_p$  : Viscosité plastique [Pa.s].

$\mu_{sp}$  : Viscosité spécifique.

$\mu_0$  : Viscosité à gradient de cisaillement nul [Pa.s].

$\mu_s$  : Viscosité de la phase suspendante.

$\rho$  : Masse volumique du fluide.

$\mu$  : Viscosité.

$[\mu]$  : Viscosité intrinsèque.

$G^*(\omega)$  : Module de rigidité complexe.

$G'(\omega)$  : Rigidité d'accumulation.

$G''(\omega)$  : rigidité de dissipation.

$\mu^*(j\omega)$  : Viscosité complexe.

$dv$  : Dérivé de vitesse.

$d(t)$  : Dérivé du temps.

$df$  : Force de cisaillement [N].

$dS$  : Surface élémentaire [m<sup>2</sup>].

$\lambda$  : Temps de relaxation.

$J(t)$  : Fonctions de fluage.

$G(t)$  : Fonction de relaxation.

$\omega$  : Vitesse angulaire constante.

$\sigma$  : Contrainte.

$\Omega$  : Vitesse de rotation du cylindre intérieur.

$\Gamma$  : Moment de couple.

$(\tau)$  : Contrainte mesurée.

$\tau_0$  : Contrainte de cisaillement à 0.

$\gamma_0$  : Déformation de cisaillement à 0.

✓ **Symboles latines :**

T : Température.

P : Pression [Kgf/cm<sup>2</sup>].

h : Profondeur de la couche traversé [m].

d : Densité de la boue.

$\rho$  : Pesanteur.

t : Temps [S].

R : Rayon.

$\alpha$  : Angle.

$R_1$  : Rayon intérieur.

$R_2$  : Rayon extérieur.

C : Concentration.

$k$  : Consistance de fluide.

$n$  : Indice d'écoulement (ou bien de de structure).

$\omega$  : la pulsation.

$\phi$  : Angle compris entre 0 et  $\pi/2$ (°).

J : Compliance.

G : Relaxation.

$$\mu' = \frac{G''}{\omega} .$$

$$\mu'' = \frac{G'}{\omega} .$$

$\mu_{\text{eff}}$ : Viscosité i

*On fait la science avec des faits,  
comme on fait une maison avec  
des pierres : mais une  
accumulation de faits n'est pas  
plus une science qu'un tas de  
pierres n'est une maison.*

Henri Poincaré

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le succès d'une opération de forage est assuré par plusieurs facteurs parmi eux le choix du fluide de forage dont les fonctions sont multiples, d'où la connaissance et le contrôle des propriétés rhéologiques des fluides de forage ont une incidence majeure pour le bon déroulement d'une opération de forage.

Les polymères utilisés dans les formulations de fluides de forage sont dans la plus part du temps des biopolymères. Ils sont utilisés comme agents de suspension ou réducteurs de filtrat.

La rhéologie joue un rôle décisif dans la bonne conduite d'une boue à un forage, que ce soit dans les boues à base d'huile ou à base d'eau.

C'est grâce à la rhéologie qu'est assurée la remontée des déblais forés par l'outil, et leur maintien en suspension lors de l'arrêt de circulation. Ainsi, il est important de déterminer les différents rhéogrammes en termes de contraintes de cisaillement et de viscosité en fonction de taux de cisaillement à différentes températures.

Pour accéder à ces propriétés, on fait appel à des techniques de mesures expérimentales. Les appareils utilisés sont appelés rhéomètres ; ce dernier permet de mesurer les propriétés rhéologiques des fluides de forage.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif, de caractériser le comportement rhéologique des polymères hydrosolubles utilisés dans le domaine pétrolier tel que la gomme de xanthane, hemicellulose, gomme à guar et PHPA.

Notre travail est présenté dans un document comprenant 4 chapitres.

Nous présenterons dans le premier chapitre une synthèse sur les polymères et les biopolymères, nous donnerons quelques généralités, des définitions, des classifications, des propriétés.

Le deuxième chapitre de ce manuscrit fait le point sur les principales connaissances actuelles concernant les fluides de forage. Nous décrirons principalement les différents types de fluides de forage et leurs fonctions.

Le troisième chapitre est réservé aux notions fondamentales de la rhéologie et aux modèles rhéologiques de bases. On exposera les différents modèles classiques et en structures.

## Introduction générale

---

Le quatrième chapitre est consacré pour la présentation et discussion des résultats expérimentaux concernant la caractérisation rhéologique.

Et On terminera ce travail par une conclusion générale.

## LES CONCEPTS FONDAMENTAUX DES POLYMERES

*C'est l'inconnu qui m'attire.  
Quand je vois un écheveau bien  
enchevêtré, je me dis qu'il  
serait bien de trouver un fil  
conducteur.*

P. G. De Gennes

## 1. Les concepts fondamentaux des polymères :

Les polymères sont utilisés dans diverses industries à savoir : pharmaceutique, cosmétique, alimentaire et pétrolière.

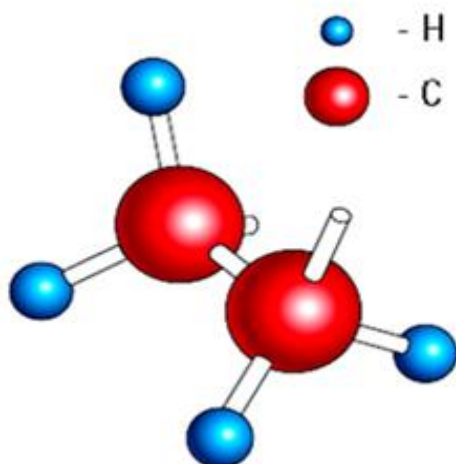
Les polymères les plus particuliers sont les polymères naturels modifiés, alors que d'autres polymères plus sophistiqués sont dérivés toujours des synthétiques du potentiel illimité de la technologie polymère.

Les biopolymères représentent l'une des variétés de polymères tant utilisés dans l'industrie pétrolière, qui sont des molécules produites par les bactéries et par d'autres micro-organismes.

### 1.1. Les polymères :

Un polymère est une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes.

Un monomère est un composé constitué de molécules simples pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. [1]



**Figure 1:** Structure chimique du  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  Monomère de l'éthylène. [1]

### 1.1.1. La réaction de polymérisation :

Les réactions de polymérisation peuvent être divisées en deux catégories selon le mécanisme de croissance de la chaîne :

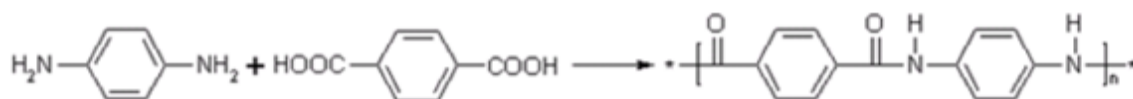
- **La polycondensation** : Cette réaction se fait en éliminant des petites molécules (tel que H<sub>2</sub>O, HCl, NH<sub>3</sub>, etc...) au fur et à mesure de leur apparition dans le milieu (pour déplacer l'équilibre réactionnel). Le polymère qui résulte de cette polymérisation s'appelle polycondensat.
- **La polyaddition** : Cette réaction de polymérisation ionique implique généralement l'ouverture d'une double liaison (C=C) ou d'un cycle. [2]

- **La polycondensation (Polymérisation par étape) :**

C'est la réaction qui procède par des étapes indépendantes.

La croissance des macromolécules est le résultat de réactions chimiques classiques entre les groupements fonctionnels réactifs des monomères.

Dans ce cas des dimères, trimères...etc. qui peuvent réagir ensemble sont formées, leur masse molaire augmente progressivement pour former des polymères à chaîne longue. [2]



- **La polyaddition (Polymérisation en chaîne) :**

Il résulte de réactions ayant lieu grâce à la formation de centres actifs (intermédiaires réactionnels très réactifs) comme des radicaux (espèces chimique possédant un ou plusieurs électrons non appariés sur leur couche externe) ou des ions qui fixent de façon successive de nombreuses molécules de monomère. [2]



La polymérisation en chaîne se fait en trois étapes :

**1. L'amorçage** : Il permet de créer des centres actifs, de nature radicalaire ou ionique

(anionique ou cationique) :  $M \rightarrow M_1^*$ .

**2. La propagation** : Durant laquelle une chaîne se crée et croît par fixation des monomères sur les centres actifs. Cette étape est environ cent mille fois plus rapide que

celle de l'amorçage :  $M_n^* + M \rightarrow M_{n+1}^*$ .

**3. Terminaison** : Le centre actif finit à un moment par être détruit, entraînant l'arrêt de la

croissance de la chaîne :  $M_n^* \rightarrow M_n$ .

### 1.1.2. Caractérisation des polymères :

On distingue trois catégories :

- **polymères naturels** : D'origine végétal tels que : le latex, le bois, ou le coton. [2]
- **Polymères artificiels** : Obtenue par transformation chimique de polymères naturels tels que : acétate de cellulose (CA), nitrocellulose. [2]
- **Polymères synthétique** : Obtenus par des réactions de synthèse tel que : les polyesters, polyamides.

### 1.1.3. Les types des polymères :

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères.
- Les copolymères.

- **Les homopolymères** :

Sont composés d'une seule unité structurale récurrente et identique à elle-même. [1]



- **Les copolymères :**

On appelle copolymère un composé macromoléculaire résultant de la polymérisation de deux monomères A et B appelés comonomères selon la disposition relative des motifs A et B. [1]



#### 1.1.4. Structure des polymères :

Il y a trois structures :

- **Polymères linéaires :**

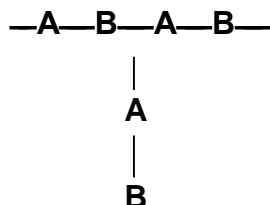
Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes.

Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. [3]



- **Polymères ramifiés :**

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires. [3]





## 1.2. Les biopolymères :

Les biopolymères sont des polymères issus de la biomasse, c'est-à-dire produits par des êtres vivants (végétaux, algues, animaux, fongiques, etc.).

La cellulose et l'amidon par exemple sont des polysaccharides et sont d'origine végétale. [4]

### 1.2.1. Les types de biopolymères :

- **Polymères de synthèse :**

Sont des polymères d'origine fossile. [6]

- **Polymères biodégradables :**

Sont des polymères d'origine fossile (issue de pétrole) auxquels sont ajoutés des additifs qui permettent de favoriser leurs dégradabilités. [6]

- **Polymères de biomasse :**

Il existe 3 sortes : [6]

1-Biopolymères issus de la faune et de la flore :

- Amidon.

- Cellulose.

- Protéine.

2-Biopolymères produits par polymérisation chimique : - PLA.

3-Biopolymères produits par micro-organisme génétiquement modifié :

- PLA.

- PHV.

- PHBV.

### 1.3. Exemples sur les polymères :

Nous nous intéressons en particulier aux polymères suivants :

- Xanthane.
- Gomme à guar.
- Hémicellulose.
- PHPA.

#### 1.3.1. Le xanthane :

C'est un polysaccharide produit par une bactérie appelée "Xanthomonas campestris" intervenant dans le métabolisme de certains végétaux. L'obtention du xanthane suit un processus complexe. [7]

Le xanthane est largement utilisé en tant que viscosifiant vu sa qualité rhéologique, bonne stabilité thermique et sa biodégradabilité. [7]

Sa formule brute moyenne est  $(C_{67}H_{102}O_{56})_n$ .

Avec :  $n = 830$  à  $2\ 800$ .

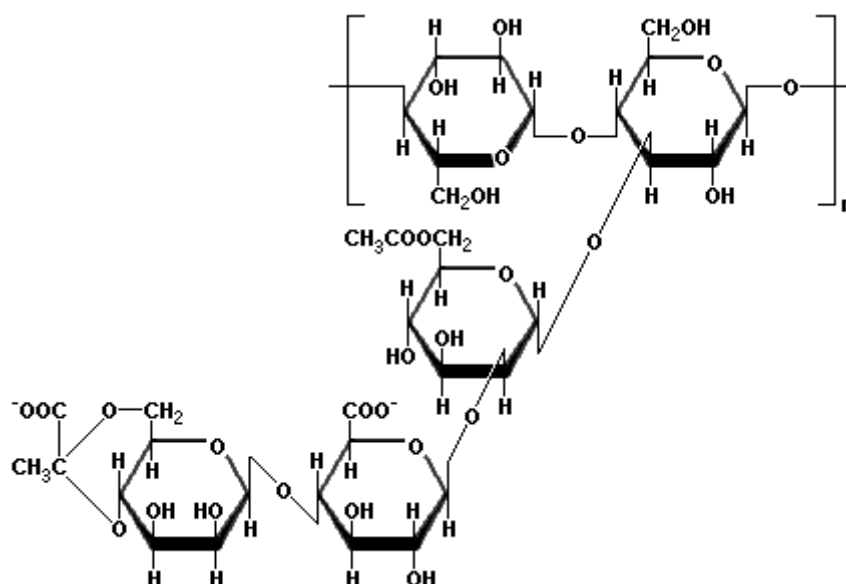


Figure 3: La structure chimique de xanthane. [40]

### 1.3.2. L'hémicellulose :

C'est un biopolymère constitutif de la paroi cellulaire végétale et une des composantes du bois.

Elles constituent un groupe de polysaccharides complexes qui se caractérisent par leur solubilité dans des solutions.

Elle a un rôle de pontage entre les fibres de cellulose, mais aussi avec d'autres composés matriciels. [8]

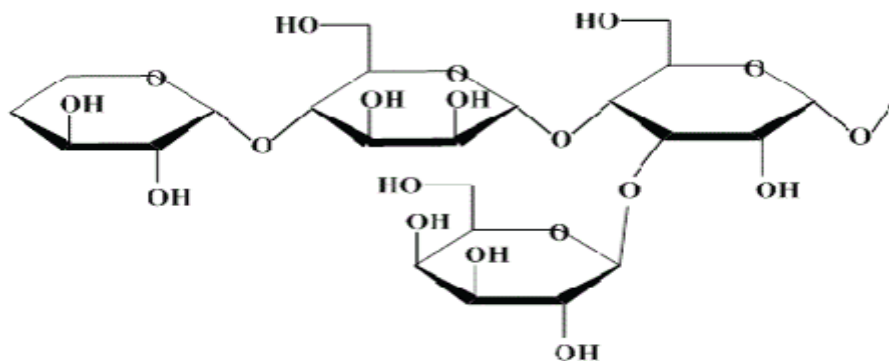


Figure 4: Structure chimique de l'hémicellulose. [41]

### 1.3.3. La gomme de guar :

C'est un polysaccharide extrait de la graine du haricot de guar.

La poudre de gomme de Guar est un produit très polyvalent et il en tant que épaississant, un stabilisant, agent de collage et gélifiant, additif de force, et barrière d'eau, aide à la floculation dans l'industrie.

De plus, il est émulsifiant, liant pour le traitement des eaux usées.

C'est un produit qui améliore la viscosité des boues de forage et qui évite les pertes de fluides dans les terrains traversés par les puits. [9]

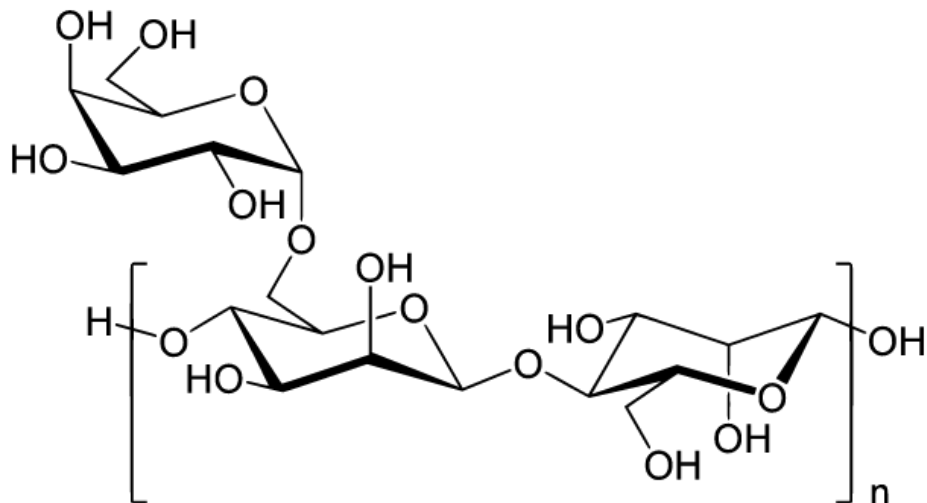


Figure 5: Structure chimique de gomme a guar. [42]

#### 1.3.4. Le polyacrylamide partiellement hydrolysé PHPA :

Le polyacrylamide est un polymère répondant à la formule  $[-CH_2-CH(-CONH_2)-]_n$ , formé à partir d'acrylamide. [12]

C'est une sorte d'additif de boue de forage. Peut être utilisé à la fois dans le forage industriel et dans le forage de pétrole et de gaz et en eau douce et en saumure mais nécessite une température élevée.

Le polyacrylamide est un gel hautement absorbant. Sous forme de poudre, il se dilue dans l'eau pour former un gel visqueux après agitation vigoureuse.

Applicable dans : stabilisation de schiste, viscosités, réduction de frottement, contrôle de perte de fluide et lubrification. [13]

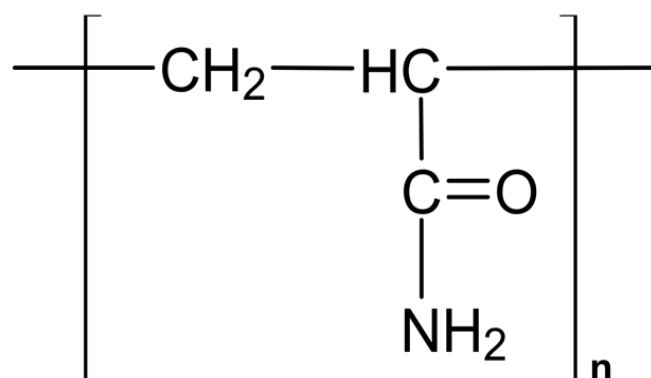


Figure 6: Structure chimique de PHPA. [12]

## LE FORAGE ET LES FLUIDES DE FORAGE

*L'ordre et le désordre tout en étant  
ennemis l'un de l'autre, coopèrent  
d'une certaine façon pour organiser  
l'univers.*

Erwin Schrödinger

## 2. Le forage et les fluides de forage :

Le pétrole brut et le gaz naturel sont formés au cours de millions d'années par décomposition de végétaux et d'organismes marins, comprimés sous le poids des sédiments.

Comme ils sont plus légers que l'eau, ils ont migré pour combler les vides existant dans ces formations sous-jacentes.

Ce mouvement vers le haut s'est arrêté lorsqu'ils ont atteint des couches denses imperméables ou des roches non poreuses ce qu'on appelle un réservoir.

Pour atteindre ce réservoir il faut percer les couches géologiques afin de remonter le pétrole brut ou le gaz naturel, ce procédé on l'appelle le forage.

Dans le domaine pétrolier, les polymères sont utilisés dans les fluides de forage depuis les années 30, et ne cesse de se développer depuis cette date, dont la possibilité d'analyser une situation à un niveau moléculaire permet de concevoir un polymère avec des propriétés spécifiques pour dresser la situation. Pour cette raison, les polymères ont un avenir intéressant dans le domaine des fluides de forage.

### 2.3. Le forage :

Le forage consiste à creuser un trou de forme cylindrique et à percer les couches géologiques sur des profondeurs et des distances pouvant atteindre plusieurs kilomètres, tout en suivant des trajectoires compliquées. [10]

#### 2.3.2. Les types de forage :

- **Le forage vertical :**

Permet de forer le puits à l'aplomb vertical de la zone du gisement où le pétrole est susceptible d'être présent dans le sous-sol. [11]

- **Le forage dévié :**

Permet de forer plusieurs cibles depuis un même site de forage. Cela limite le nombre de sites en surface et permet d'utiliser les installations déjà existantes. [11]

- **Le forage horizontal :**

Permet l'atteinte de plusieurs cibles dans le sous-sol depuis un même site et de maximiser la surface d'échange avec le réservoir, réduisant ainsi le nombre de forages nécessaires. [11]

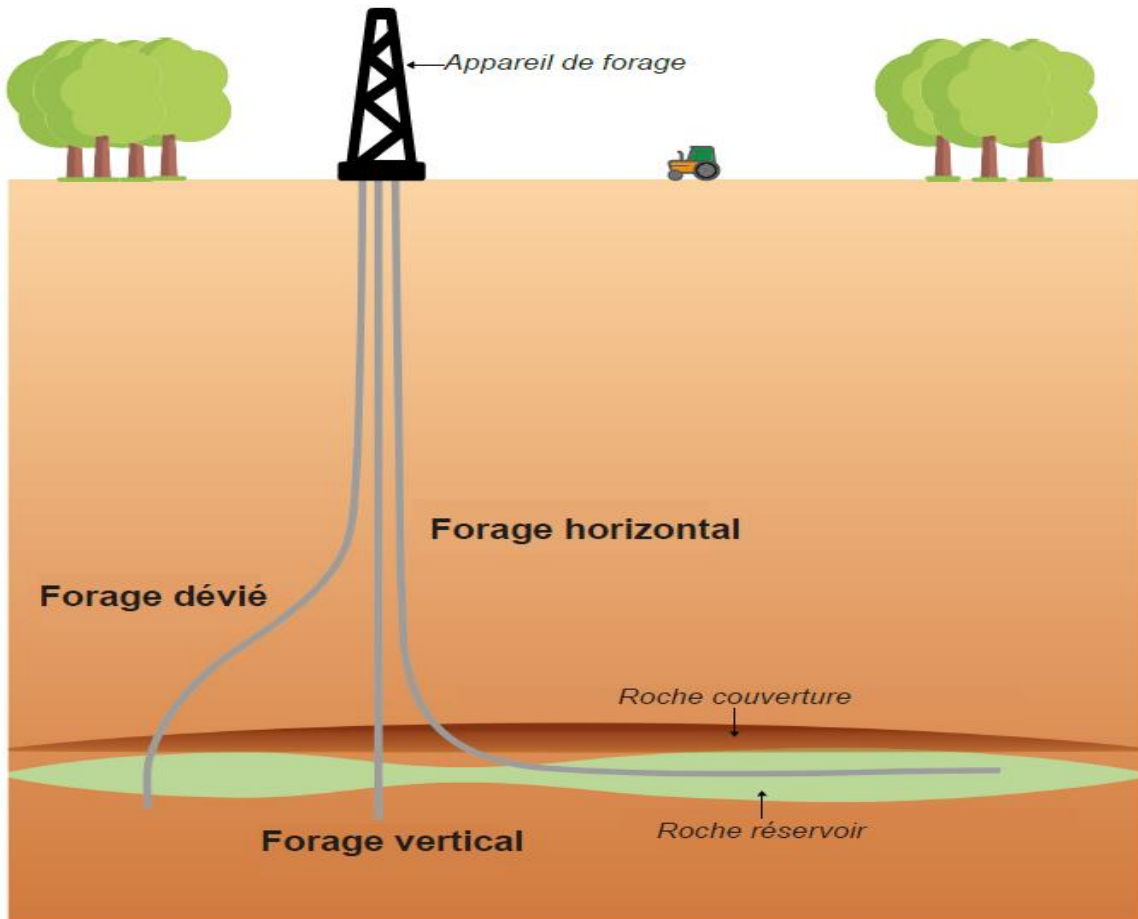


Figure 7: Différents types de forage. [11]

#### 2.4. Les fluides 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, ciments, ...).

C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastiques, le plus souvent thixotropes.

Les fluides de forage ont un rôle très important dans le succès du forage. [14]

### 2.4.2. Composition de fluide de forage :

Le choix de la formulation à utiliser va dépendre de la formation rocheuse à traverser, des contraintes environnementales et économiques ainsi que des possibilités d'approvisionnement sur place des produits à boue.

Différentes formulations peuvent être utilisées sur un même forage selon les couches géologiques traversées. Les boues à l'huile donnent généralement de meilleurs résultats (meilleures lubrifications, minimisation de l'endommagement des formations productrices, résistances aux hautes températures) mais sont généralement plus chères et posent des problèmes écologiques. [15]

### 2.4.3. Différent types de fluide de forage :

Les fluides de forage sont utilisés pour faciliter le forage.

Il existe trois types de fluides :

- **Les fluides à base d'huile :**

Dans les boues à l'huile, la phase liquide est une huile brute, minérale ou synthétique, contenant souvent une saumure dispersée sous forme d'émulsion inverse eau dans huile stabilisée par un émulsifiant. Les boues à l'huile sont essentiellement utilisées lors des forages offshore profonds. [16]

- **Les fluides à base d'eau :**

La plupart des boues de forage sont à base d'eau (eau douce ou salée).

- **Les fluides de forage gazeux :**

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée ou ajoutée intentionnellement (air, gaz naturel, la mousse). [16]

### 2.4.4. Circulation des fluides de forage :

Le fluide de forage est en circulation continue durant toute la durée du forage et aussi bien dans le sondage qu'en surface. Le fluide de forage est préparé dans des bacs à boue.

Il est injecté à l'intérieur des tiges [drill pipes], jusqu'à l'outil qui comporte également des orifices qui laissent sortir la boue.

Cette dernière une fois sortie de l'outil remonte par l'espace annulaire chargé des déblais pour être recueillie en surface dans un tube appelé « tube fontaine ».

Elle est ensuite acheminée par un « tube goulotte » vers un « tamis vibrant » qui la tamise en enlevant les déblais et laissant la boue débarrassée des solides venus du puits retourner dans le bac d'où elle a été pompée afin de subir des traitements chimiques (dilution, ajout de produits,...) et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques aux valeurs initiales avant d'être réinjectée dans le puits. [17]

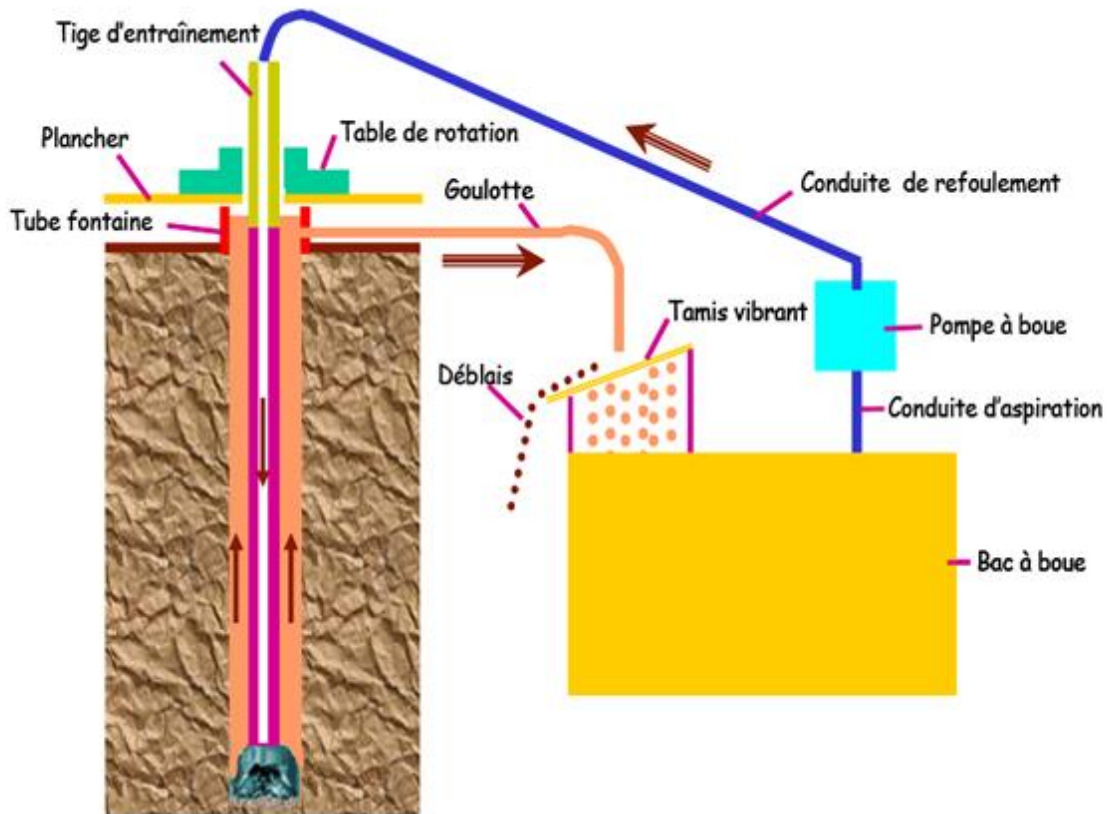


Figure 8: Circulation des fluides de forage. [17]

#### 2.4.5. Les paramètres de fluide de forage :

Les caractéristiques des fluides de forage sont généralement basées sur les paramètres physiques et chimiques suivants :

- **Densité :**

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.

Il ne faut pas également qu'elle dépasse la limite de résistance des couches pour ne pas les fracturer et causer des pertes en cours de circulation. [18]

- **La pression exercée par la boue :**

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

$$P = h \cdot d / 10.$$

- **Filtrat:**

C'est une propriété fondamentale du fluide de forage et surtout lorsqu'on fore des formations poreuses, particulièrement lorsque celle-ci contient du gaz ou du pétrole, on accordera une attention toute particulière au filtrat à température élevée et à haute pression. [18]

- **Filtration et cake :**

Lorsque la boue se trouve en contact des parois plus ou moins perméables du trou, la partie liquide filtré dans la formation en déposant sur les parois sa partie solide que l'on appelle « Cake », dans un puits.

On a affaire à deux types de filtration :

- la filtration dynamique : qui se produit lorsque le fluide est en circulation.
- la filtration statique : qui se produit lorsque le fluide est immobile et ne circule pas.

Il est extrêmement important de connaître les caractéristiques de filtration.

En effet les hauts filtrats peuvent délité les formations délicates (argile marnes) et favoriser les éboulements, de plus le cake déposé peut être épais au point d'empêcher le passage du tricône lors des manœuvres de changement d'outils. [18]

- **Rôle du filtrat :**

L'importance du filtrat est considérable dans le forage d'un puits le filtrat doit être :

- ✓ Suffisamment élevé pour augmenter la vitesse d'avancement.
- ✓ Suffisamment bas pour ne pas délité ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les coulages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaire, dolomies, grès, etc.).

Il ne doit pas envahir les formations productives, occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ses formations etc.

Fixé le filtrat que doit posséder la boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage.

Les caractéristiques physico-chimiques des boues de forage sont liées à la présence des sels solubles ou insolubles, ionisés ou non. [18]

- **PH :**

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

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

Le pH est mesuré :

- \* Soit par une méthode colorimétrie (papier pH ou indicateurs colorés).
- \* Soit par une méthode électrométrie (pH-mètre), au moyen d'électrodes en verre. [18]

#### **2.4.6. Le rôle des fluides de forage :**

La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits.

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

- ▶ Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu'à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire.
- ▶ Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide.
- ▶ Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- ▶ Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées.
- ▶ Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie. [19]

---

### 2.4.7. Utilisation des polymères dans les fluides de forage :

Les polymères utilisés dans les formulations de fluides de forage à base d'eau sont hydrosolubles et peuvent être d'origine très variée : polymères naturels, semi synthétiques et synthétiques. Ils confèrent aux fluides de forage un caractère viscosifiant et réducteur de filtrat. [20]

- **Viscosifiant :**

L'ajout de polymère à une solution doit augmenter la viscosité de la phase liquide, ceci peut s'expliquer par le gonflement des macromolécules.

L'augmentation de la viscosité permet de maintenir les particules en suspensions, et d'être compatible avec le milieu environnant afin de ne pas endommager la formation. Les polymères confèrent au fluide un caractère thixotrope afin d'empêcher toute sédimentation en cas d'arrêt du forage.

- **Inhibiteurs du gonflement :**

Ces polymères sont utilisés pour éviter le gonflement de la formation sur les parois pendant le forage et d'éviter ainsi le colmatage du puits. Nous citerons par exemple le PHPA, le silicate de sodium, glycol...

- **Réducteurs de filtrat :**

Si le volume du filtrat est important, il peut causer l'invasion des parois du puits et par conséquent son éboulement ; d'où la nécessité de contrôler ce volume de filtrat par l'ajout d'additifs chimiques appelés réducteurs de filtrat, qui sont dans la plupart du temps des polymères (CMC, PAC, polysaccharides...).

## LA RHEOLOGIE DES FLUIDES DE FORAGE

*Ce qui est affirmé sans preuve  
peut-être nié sans preuve.*

*Euclide*

### 3. La rhéologie des fluides de forage :

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des matériaux sous l'effet des contraintes qui sont appliquées, compte tenu de la vitesse d'application de ces contraintes ou plus généralement de leur variation au cours du temps.

Les procédés de préparation de produits (solutions, pâtes, etc...). Ou de formage de pièces (en métallurgie, en plasturgie, etc. ...) nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces à mettre en jeu.

Le mot rhéologie vient des termes grecs « rhéo », qui signifie écoulement, et « logos », qui désigne l'étude d'un domaine. [21]

#### 3.1. Définition :

La rhéologie est une science particulièrement adaptée à l'étude des corps viscoélastiques tels que sont les polymères et les bitumes, pour pouvoir prédire leurs comportements sous sollicitations mécaniques.

La rhéologie est la science qui traite l'écoulement, la déformation, et plus précisément la viscosité des matériaux sous l'action des contraintes physiques.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études : [21]

2. **Rhéologie expérimentale** : Détermination expérimentale des relations de comportement (entre contraintes et déformation ou vitesse de déformation).
3. **Rhéologie structurale** : Explication des comportements à partir de la structure du matériau.
4. **Rhéologie théorique** : Fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique.

### 3.3. Paramètres fondamentaux de la rhéologie :

#### 3.3.2. Notion de mouvement de cisaillement :

- **La vitesse de cisaillement :**

Où la déformation constitue la grandeur cinématique fondamentale en rhéologie ; aussi appelée gradient de vitesse. [22]

Elle s'exprime par la relation :

$$\gamma = \frac{dv}{de} \quad \text{unité : s}^{-1}$$

- **La contrainte de cisaillement :**

C'est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. [22]

On est amené à définir la contrainte de cisaillement par :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad \text{unité : } [\tau] = \text{N/m}^2 = \text{Pa.}$$

#### 3.3.3. La viscosité :

La notion de viscosité traduit une résistance à la déformation ; c'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. [23]

On définit différents coefficients de viscosité :

- **Viscosité dynamique :**

Correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'une vitesse de l'écoulement dans la matière. [23]

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{unité : } [\eta] = \text{Pa.S} = \text{Pl} = \text{Po.}$$

- **Viscosité cinématique :**

C'est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique. [23]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{unité : } [\nu] = \text{m}^2.\text{S}^{-1}$$

- **Viscosité relative, spécifique, intrinsèque :**

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

On utilise fréquemment les viscosités suivantes : [24]

- **La viscosité relative :**

$$\mu_{\text{rel}} = \frac{\mu}{\mu_s}$$

- **La viscosité spécifique :**

$$\mu_{\text{sp}} = \frac{\mu - \mu_s}{\mu_s} = \mu_{\text{rel}} - 1$$

- **La viscosité intrinsèque :**

$$[\mu] = \lim_{\substack{c \rightarrow 0 \\ \gamma \cdot \rightarrow 0}} \left[ \frac{\mu_{\text{sp}}}{C} \right]$$

### 3.4. Les différents comportements rhéologiques :

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

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

Nous distinguons trois catégories principales de fluides :

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

### 3.4.2. Les fluides indépendants du temps :

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement  $\tau$  est fonction seulement de la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$ . Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien, non newtonien et fluide viscoélastique. [26]

#### 3.4.2.1. Fluides Newtoniens :

Un fluide est dit Newtonien si sa viscosité est indépendante de la contrainte appliquée.

Cette catégorie de fluides obéit à la loi de newton :  $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$

La viscosité néanmoins dépend d'autres facteurs tels que la température et la pression.

Exemples de fluides newtoniens : eau, miel, sirop de sucre de canne. [25]

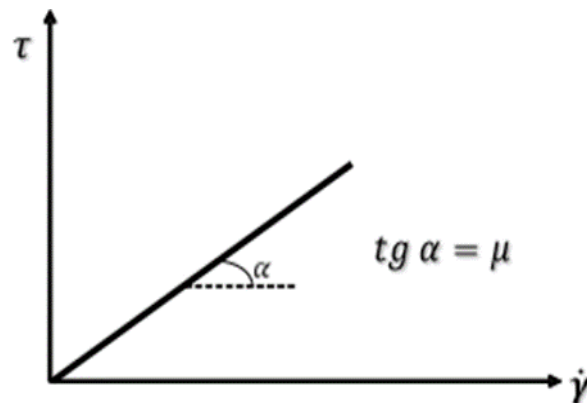


Figure 9: Fluide newtonien. [21]

#### 3.4.2.2. Fluides non Newtoniens :

Ce sont tous les fluides pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et la vitesse de cisaillement n'est pas proportionnelle. [26]

Ils sont caractérisés par la relation générale :

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

Où le facteur de proportionnalité est une valeur dépendant de  $\dot{\gamma}$ , appelée **viscosité apparente**.

Il existe deux catégories principales de fluides non newtoniens indépendants du temps :

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

- **Fluides à contrainte critique :**

Cette catégorie de fluides est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique. [26]

Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale appelée seuil d'écoulement  $\tau_c$ .

La relation d'écoulement de ces fluides s'écrit :

$$\tau - \tau_c = \mu_a \dot{\gamma}^n \quad \text{si} \quad \tau \geq \tau_c$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{si} \quad \tau < \tau_c$$

\*Si  $n=1$  : Le fluide est appelé fluide de **Bingham** avec  $\mu_a = \mu_p$  connue sous le nom de viscosité plastique.

Au-delà du seuil d'écoulement  $\tau_c$  le liquide se comporte comme un liquide Newtonien.

Les exemples les plus classiques sont Les peintures à l'huile, les margarines, certaines graisses, dentifrice.

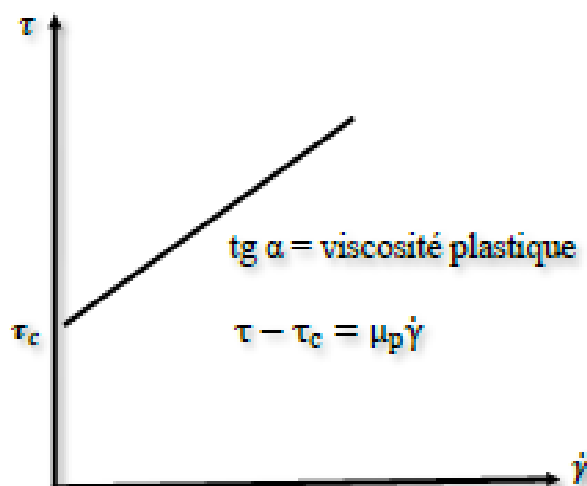


Figure 10 : Fluide de bingham. [27]

\*Si  $n \neq 1$  : Le fluide est appelé fluide Plastique, obéissant à la relation d'HERSCHEL-BULKEY :

$$\tau - \tau_c = k\dot{\gamma}^n$$

$k$  est appelée «consistance», et  $n$  l'indice d'écoulement.

Au-delà du seuil d'écoulement  $\tau_c$  le liquide se comporte comme un liquide plastique fluidifiant. [27]

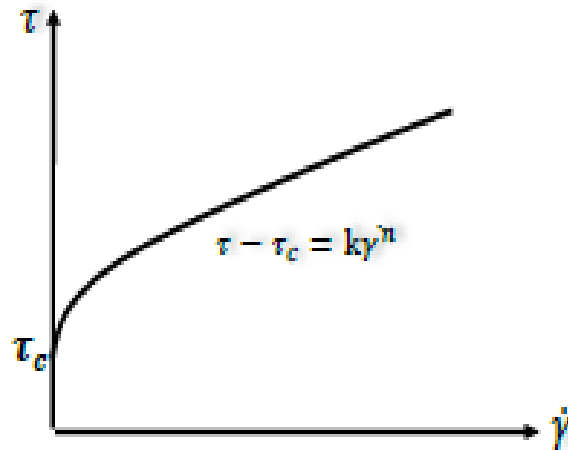


Figure 11 Fluide plastique. [36]

- **Fluides sans contrainte critique :**

Les figures sont présentes les courbes d'écoulement des deux principales catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques (ou rhéofluidifiants) et les fluides dilatants (ou rhéoépaississants).

Les courbes d'écoulement de ces fluides la relation dite loi d'OSTWALD-DE WAELE :

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

\*Si  $0 < n < 1$  : Le fluide est appelé pseudo-plastique ou rhéofluidifiant.

Les principaux fluides présentant un comportement rhéofluidifiants sont : Le savon, les suspensions de détergent, la mayonnaise, les ciments, les pâtes à papier, le ketchup, le magma et certaines peintures.

\*Si  $n > 1$  : Le fluide est appelé fluide dilatant ou rhéoépaississant.

C'est le cas par exemple d'une suspension concentrée de maïzena. [28]

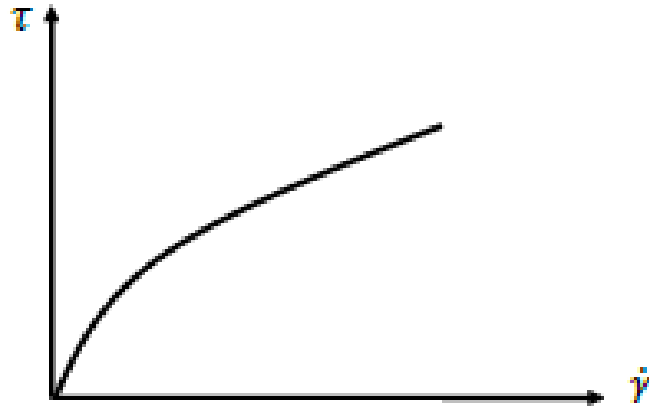


Figure12: Fluide rhéofluidifiant. [36]

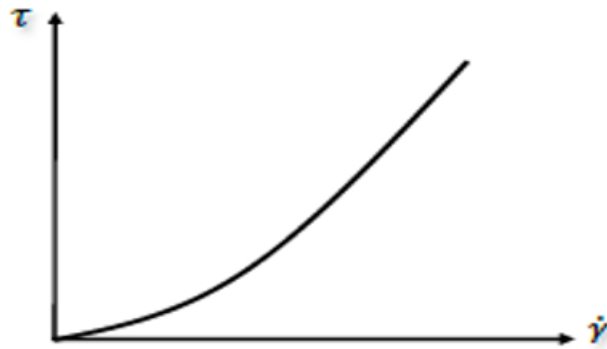


Figure 13: Fluide rhéoépaississant. [36]

### 3.4.3. Les fluides dépendants du temps :

Le comportement des fluides dépendant du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne.

Cette modification peut être très rapide ; dans ce cas, le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement.

Par contre, si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencées par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : « le temps ». [29]

Il existe deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropes.
- Les fluides rhéopexes.

- **Les fluides thixotropes :**

Ces fluides sont souvent apparentés aux fluides **rhéofluidifiants** puisque ils ont les mêmes effets, mais la différence est qu'ils dépendent du temps.

Sous la contrainte constante, le fluide **thixotrope** va réagir comme le fluide **rhéofluidifiant**, il va devenir liquide mais sur la durée. Lorsque l'on applique une force à un moment donné le fluide ne va que très peu, voire quasiment pas changer d'état alors que si l'on maintient la force, ce dernier va changer d'état au fur et à mesure que le temps passe.

À l'inverse, lorsque que le fluide a changé d'état, si on enlève la force appliquée, il faut un certain temps avant que le fluide ne revienne à l'état initial. [30]

Exemple de fluide thixotrope: le sable mouvant.

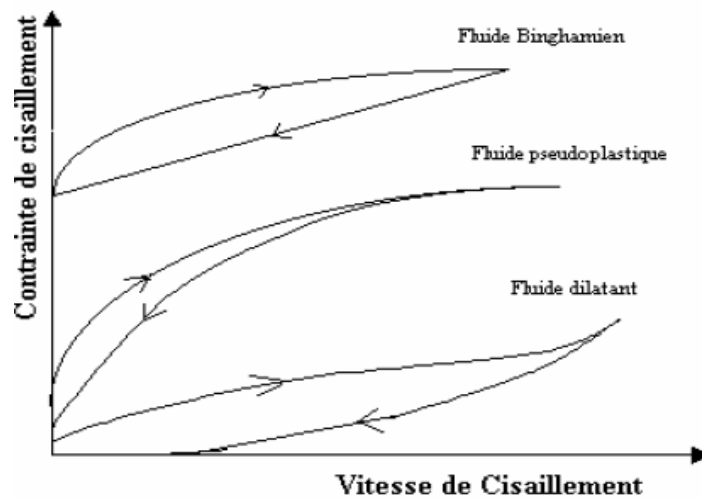


Figure 14: Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes. [32]

- **Les fluide antithixotropes :**

Ces fluides sont l'inverse des fluides **thixotropes**, et sont souvent apparentés aux fluides **rhéoépaississants**. Sous la contrainte, le fluide va réagir comme le fluide **rhéoépaississant**, c'est-à-dire qu'il va devenir plus solide avec la durée. Comme le fluide **thixotrope**, il faut que la contrainte soit maintenue pendant un certain temps pour que le fluide devienne solide. Pareillement, lorsque l'on enlève la force, le fluide reprend sa forme initiale sur la durée. [31]

#### 3.4.4. Les fluides viscoélastiques :

C'est un fluide qui se comporte comme s'il était composé d'un solide élastique et un fluide visqueux ou l'écoulement serait dépendant de certains paramètres (température, charge, etc.).

La détermination des propriétés viscoélastiques de certains matériaux passe par la mise en place d'une analyse oscillatoire.

Ce type de test consiste à imposer à l'échantillon un cisaillement oscillatoire de pulsation donnée  $\omega$ .

Lors de ces tests, la contrainte  $\tau(t)$  et la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}(t)$  évoluent sinusoïdalement au cours du temps. [32]

- **Viscoélasticité linéaire :**

Tous les matériaux présentent un comportement linéaire, à condition que les contraintes et les déformations auxquelles ils sont soumis demeurent suffisamment faibles.

Le comportement linéaire est évidemment relié à l'aptitude du matériau à supporter des déformations, sans modification de sa structure microscopique ; à cet égard, on peut considérer que l'étude des propriétés viscoélastiques linéaires permet de caractériser la structure « au repos ».

Au contraire, la transition vers un régime non linéaire (à partir d'un certain seuil de déformation) s'accompagne le plus souvent d'une modification structurelle.

Le comportement viscoélastique de fluides peut être décrit conceptuellement comme résultant de l'association de ressorts et d'amortisseurs.

Toutes les associations de ressorts et d'amortisseurs, aussi complexes soient-elles, correspondent à un comportement viscoélastique linéaire. [32]

- **Paramètres complexes :**

En mode dynamique, on applique des contraintes ou des déformations qui répondent à des fonctions sinusoïdales du temps ( $t$ ) de pulsations données ( $\omega$ ) qui ne provoquent pas l'écoulement du fluide. [32]

A l'instant initial on a :

$$\gamma(\omega) = \gamma_0. \quad \tau(\omega) = \mu \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot \cos(\omega t + \phi) = \tau_0 \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

La contrainte mesurée ( $\tau$ ) est en déphasage permanent avec la déformation ( $\gamma$ ) d'un angle  $\phi$  compris entre 0 et  $\pi/2$  en fonction du temps de mesure ( $t$ ).

Par analogie avec le solide de Hooke on définit un module de rigidité complexe  $G^*(\omega)$  :

$$G^*(\omega) = \frac{\tau(\omega t)}{\gamma(\omega t)} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot e^{j\phi} = G'(\omega) + j \cdot G''(\omega)$$

La rigidité d'accumulation  $G'(\omega)$  traduit la capacité du fluide à conserver l'énergie sous forme élastique (en phase avec  $\gamma$ ).

Les propriétés visqueuses sont exprimées par la rigidité de dissipation  $G''(\omega)$  (déphasage de  $\pi/2$  avec  $\gamma$ ).

Par analogie avec la relation de Newton ; on définit la viscosité complexe  $\mu^*(j\omega)$  :

$$\mu^*(j\omega) = \frac{\tau(\omega t)}{\dot{\gamma}(\omega t)} = \mu'(\omega) - j \cdot \mu''(\omega)$$

Avec :  $\mu' = \frac{G''}{\omega}$  et  $\mu'' = \frac{G'}{\omega}$

Nous obtenons donc l'expression de  $G'$  et de  $G''$  :

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos(\phi).$$

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin(\phi).$$

### 3.5. Les modèles rhéologiques :

Il existe différents modèles qui permettent de caractériser le comportement des fluides non-newtonien.

Ceci permettent parfois de mettre en avant une contrainte seuil ou bien un comportement rhéoépaississant ou rhéofluidifiant. [33]

### 3.5.2. Le modèle de Bingham :

Le modèle de Bingham permet de caractériser des fluides dits à seuils, comme les gels par exemple.

En dessous d'une contrainte seuil, le fluide va se comporter comme un solide et au-delà de cette contrainte, le comportement sera le même que celui d'un fluide Newtonien.

Les équations qui régissent le comportement d'un fluide de Bingham sont les suivantes :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \begin{cases} 0 & , \tau < \tau_0 \\ (\tau - \tau_0) / \mu & , \tau \geq \tau_0 \end{cases}$$

On trouve des fluides de bingham au quotidien comme la mayonnaise par exemple.

Le modèle de Bingham est le modèle utilisé pour décrire la grande partie des boues de forage. [33]

### 3.5.3. Le modèle d'Ostwald (Loi de puissance) :

Le modèle de loi de puissance permet de caractériser les fluides ayant un comportement rhéoépaississant et rhéofluidifiant.

$$\tau = K \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^n$$

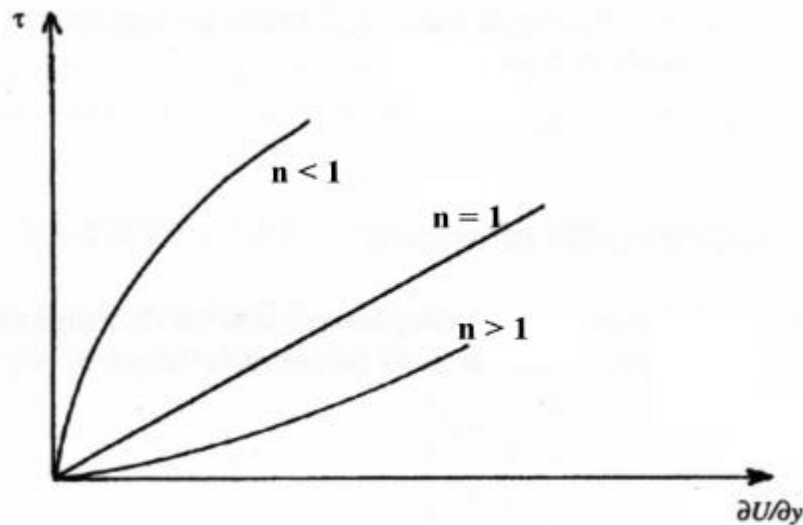
Où le paramètre K est appelé consistance du fluide, et l'exposant n indice de structure (ou bien indice d'écoulement).

Cependant il est important de remarquer que le paramètre K n'a pas de réelle correspondance physique car sa dimension est directement liée à la valeur de l'exposant n.

Pour cela on introduit parfois une viscosité effective donc l'expression est détaillée ci-dessous afin d'avoir une unité plus concrète. Toutefois, cette valeur n'a toujours pas de réelle signification physique et bien souvent on s'intéresse à une "viscosité infinie" qui est la viscosité du fluide lorsque le cisaillement tend vers l'infini, car cette valeur est une réelle propriété du fluide et pour des grands cisaillements, le comportement tend vers la linéarité.

$$\mu_{\text{eff}} = K \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n-1}$$

On peut également ajouter à cette loi de puissance une dépendance avec la température afin de prendre en compte la modification des propriétés physique du fluide par l'évolution de la température du milieu considéré, car la consistance K est en général fortement thermo-dépendante. [33]



**Figure 15** : Courbe Le modèle d'Ostwald. [33]

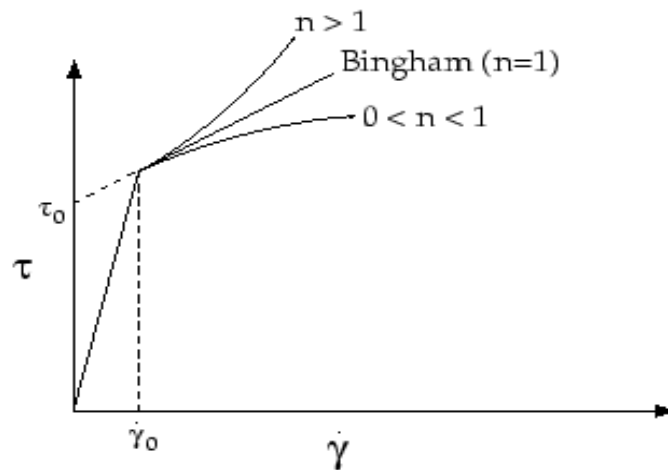
Le graphique représente le comportement des fluides pour des valeurs de l'exposant  $n$  particulières. On remarque que pour :

- $n > 1$  : Le fluide a un comportement rhéoépaississant.
- $n < 1$  : Le fluide a un comportement rhéofluidifiant.
- $n = 1$  : Le fluide a un comportement Newtonien.

### 3.5.4. Le modèle d'Hershel-Buckley :

Le modèle de Hershel-Buckley est le modèle utilisé par Fluent pour décrire les plastique de Bingham, c'est donc le modèle que nous avons utilisé lors de nos simulation.

Ce modèle est au croisement entre le modèle de Bingham et celui d'Ostwald.



**Figure 16** : Courbe Le modèle d'Hershel-Buckley. [33]

On voit apparaître ici un cisaillement critique avant lequel le comportement du fluide est linéaire. Cette valeur n'est pas nulle car autrement cela créerait des erreurs numériques. Pour les valeurs de cisaillement faible, le fluide se comporte alors comme un fluide extrêmement visqueux.

Dans nos simulations nous prendrons donc une valeur de cisaillement critique très faible afin de représenter le mieux possible le comportement d'un fluide de Bingham.

Ces graphiques illustrent le comportement des principaux fluides non-Newtonien que nous avons présenté précédemment. [33]

### Rheological Models

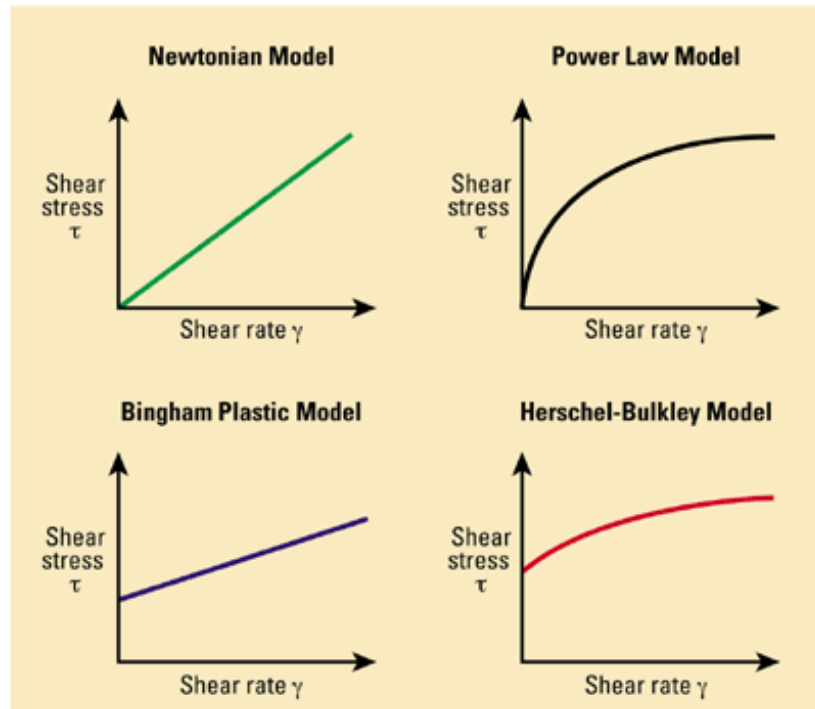


Figure 17: Modèles rhéologique. [33]

On peut établir l'équation rhéologique de chaque modèle et en déduire les fonctions fluage et relaxation dans chaque cas particulier.

Il s'avère toutefois que les modèles de Kelvin-Voigt et de Maxwell généralisés suffisent pour déduire n'importe quelles fonctions de fluage et de relaxation.

Le modèle de Maxwell correspond à l'association en parallèle de  $n$  liquides de Maxwell, chacun d'eux étant constitué par un ressort et un amortisseur en série.

Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est pour sa part constitué par l'association en série d'un liquide de Maxwell et de  $n$  solides de Kelvin-Voigt (constitué lui-même par l'association en parallèle d'un ressort et d'un amortisseur).

Relation générale du comportement viscoélastique :

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{\tau'(t)}{\mu} + \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau(t)}{dt}$$

Le facteur temps intervient dans l'expression des propriétés viscoélastiques à travers le temps de relaxation ( $\lambda$ ) ; il correspond à la durée de valeur  $\lambda$  pendant laquelle la tension  $\gamma$  diminue de  $1/e$  de sa valeur initiale.

\*Si  $t \gg \lambda$  alors :  $\gamma(t) = \tau \cdot J + \tau \cdot t / \mu$

Les fonctions de fluage  $J(t)$  et de relaxation  $G(t)$  caractérisent l'écoulement des fluides viscoélastiques selon les modes de mesures en cisaillement simple. [34]

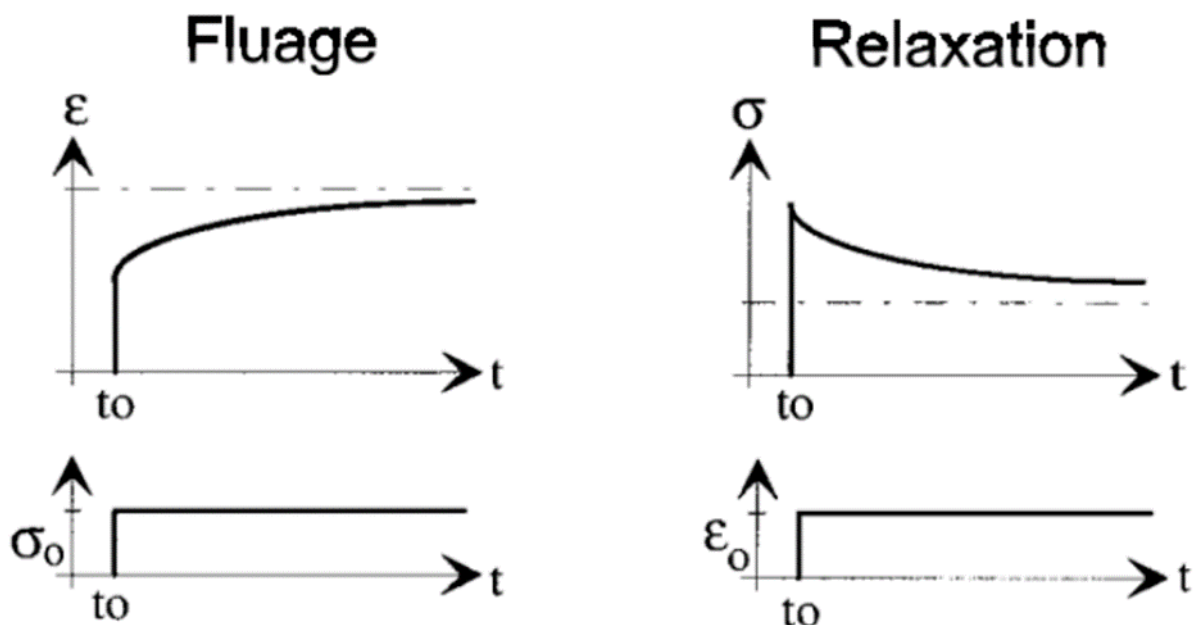


Figure 18: Courbes fluage et relaxation. [43]

### 3.6. La rhéologie des polymères :

Les matériaux polymères ont des propriétés rhéologiques extrêmement riches et diverses, qui dépendent elles-mêmes de la composition du fluide et des conditions d'écoulement.

Les différents comportements qu'ils présentent peuvent être expliqués par leurs structures moléculaires et leurs propriétés dynamiques, si bien qu'ils constituent des modèles permettant d'expliquer par des mécanismes moléculaires relativement simples la grande variété des propriétés viscoélastiques des autres matériaux. [35]

### 3.7. Généralité sur le rhéomètre :

Un rhéomètre est un appareil de laboratoire permettant de faire des mesures rhéologiques d'un fluide en lui appliquant une contrainte de cisaillement.

Généralement de faible dimension caractéristique (très faible inertie mécanique du rotor),

Cet appareil permet d'étudier fondamentalement les propriétés d'écoulement d'un liquide, d'une suspension, d'une pâte, etc., en réponse à une force appliquée.

Il est plus sophistiqué pour une analyse rhéologique et plus cher qu'un viscosimètre.

Il permet de connaître les grandeurs fondamentales tels que le taux de cisaillement, la contrainte de cisaillement  $\tau(t)$  et viscosité. [36]



**Figure 19:** Un rhéomètre (Malvern). [44]

### 3.7.2. Constitution du rhéomètre :

Un rhéomètre est constitué d'un axe de rotation lié à un moteur qui peut être soit à vitesse imposée, soit à un couple imposé et d'une cellule de mesure.

La cellule est composée d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor).

Le fluide à étudier est confiné entre le rotor et le stator dans une zone appelés entrefer.

Les écoulements sont bien définis, utilisant généralement les rhéomètres de cylindres coaxiaux, plan-plan ou cône-plan.

Les trois grandeurs expérimentales qui entrent en jeu lors de la mesure sont le couple mécanique appliqué (mesuré), la vitesse angulaire  $\omega$  de rotation du rotor et l'angle de rotation du rotor mesuré à partir de la position au repos. [37]

### 3.7.3. Les différents types de rhéomètre :

- **Les rhéomètres rotatifs plan-plan :**

Dans ce rhéomètre le fluide est cisailé entre deux plans parallèles caractérisés par leur rayon  $R$  et l'entrefer  $h$  entre ces deux plans.

Ce rhéomètre est mieux adapté pour étudier les comportements d'un fluide newtonien, l'analyse mathématique se fait dans le repère cylindrique  $(r, \theta, z)$  Sous ces conditions, le taux de cisaillement et la contrainte s'écrivent sous la forme suivante : [36]

$$\gamma = \frac{\Omega r}{h} \quad \text{et} \quad \sigma = \frac{\Gamma}{2\pi r^3} \left( 3 + \frac{\partial \ln \Gamma}{\partial \ln \dot{\gamma}} \right)$$

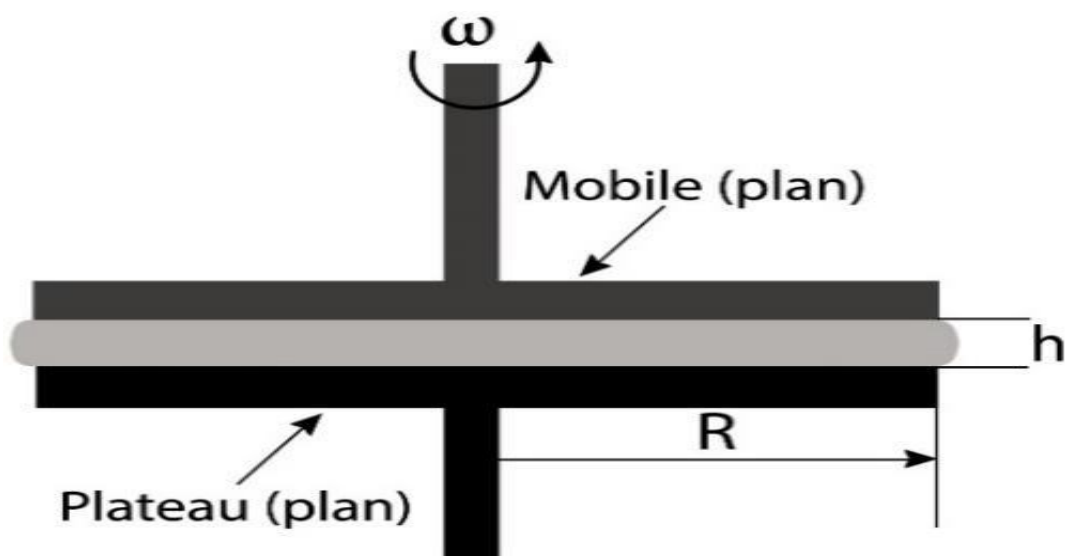


Figure 20: Rhéomètre plan- plan. [36]

- Les rhéomètres rotatifs cône-plan :

Dans ce rhéomètre, le fluide est cisailé entre un cône et un plan. Le cône est caractérisé par son rayon  $R$  et par l'angle  $\alpha$ . Il est fixé sur la partie tournante du rhéomètre, qui lui confère une rotation par rapport à son axe avec une vitesse angulaire constante  $\omega$ .

L'angle  $\alpha$  est très faible ( $\leq 4^\circ$ ) pour obtenir un taux de cisaillement vertical constant dans le volume de mesure : [36]

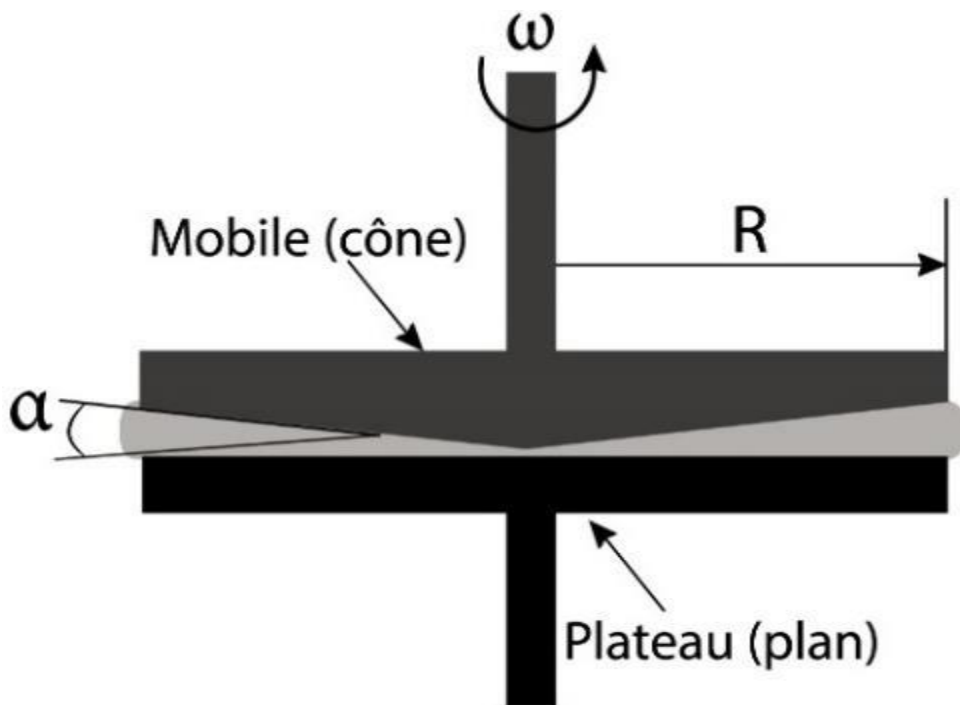


Figure 21: Rhéomètre cône plan. [36]

- **Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux :**

Dans ce rhéomètre le fluide se trouve en écoulement de cisaillement entre deux cylindres coaxiaux, (le cylindre intérieur de rayon  $R_1$ , le cylindre extérieur de rayon  $R_2$ , et de hauteur  $h$ ).

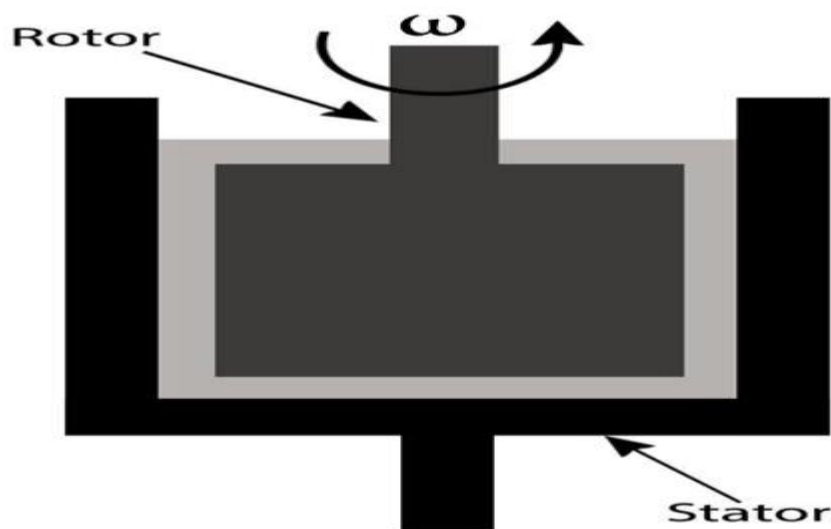
Ce type est le plus utilisé ; dans le cas où le rayon intérieur  $R_1$  et le rayon extérieur  $R_2$  sont proches, on définit le rayon moyen :

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2}.$$

Les taux de cisaillement  $\dot{\gamma}$  et la contrainte  $\sigma$  sont homogènes dans toute la zone d'entrefer et ils peuvent être calculés pour un fluide newtonien à l'aide des équations suivantes :

$$\sigma = \frac{\Gamma}{2\pi R^2 h} \quad \text{et} \quad \dot{\gamma} = \frac{2\pi R_2 \Omega_2}{R_2 - R_1}$$

Où  $\Omega$  est la vitesse de rotation du cylindre intérieur et  $\Gamma$  est le moment de couple. [36]



**Figure 22:** Rhéomètre cylindre coaxiaux. [36]

## SYNTHESE COMPARATIVE

*Soit  $A$  un succès dans la vie.  
Alors  $A = x + y + z$ , où  $x =$   
 $travailler$ ,  $y = s'amuser$ ,  
 $z = se taire$ .*

*Albert Einstein*

---

## 4. Synthèse comparative :

L'injection d'eau dans les différentes opérations pétrolières est une méthode relativement simple, et bien connue et peu coûteuse, qui a connu une application généralisée depuis une centaine d'années.

Cependant deux problèmes majeurs ressortent de cette injection

- 1- Le problème d'incompatibilité des eaux d'injection et de gisement
- 2- Le faible taux de récupération de l'huile.

Dans ce chapitre, on présente quelques résultats des études effectuées par Benouadah [38] et Fourar [39] qui visaient principalement à améliorer des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères dans les puits de forage horizontaux.

Benouadah [38] a abordé les différents problèmes rhéologiques des fluides de forage dans un champ pétrolier de TFT, elle a étudié d'abord la compatibilité de l'eau d'injection et de l'eau de gisement liée à la formation d'un dépôt de sulfate de baryum. Ensuite elle a proposé l'injection d'eau améliorée par la présence de polymères hydrosolubles dans le but d'améliorer leurs propriétés rhéologiques et étudier leurs propriétés dans les conditions de gisement à savoir la température, salinité, la présence de certains ions ...etc.

Fourar [39] a aussi étudié la physicochimie et la rhéologie des solutions des polymères ainsi que des suspensions de boue complété d'une étude électrocinétique. Il a mis en évidence l'influence de certains constituants tel que les polymères ; xanthane, PAC et PHPA sur les propriétés rhéologiques du système.

### 4.3. Comportement rhéologique des polymères à différentes concentrations :

#### 4.3.2. Solutions de xanthane :

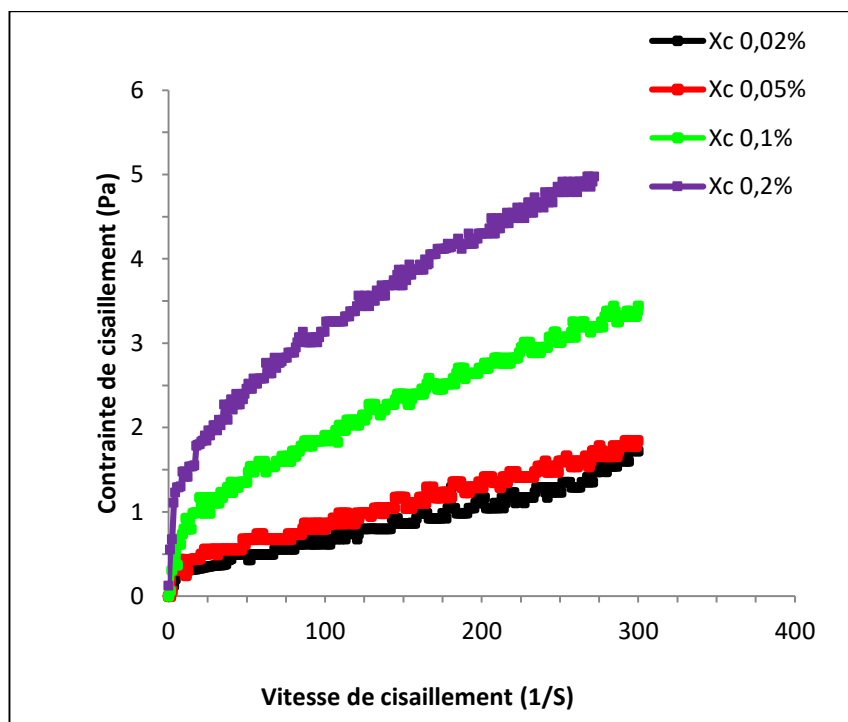


Figure 23: Courbe d'écoulement du xanthane. [38]

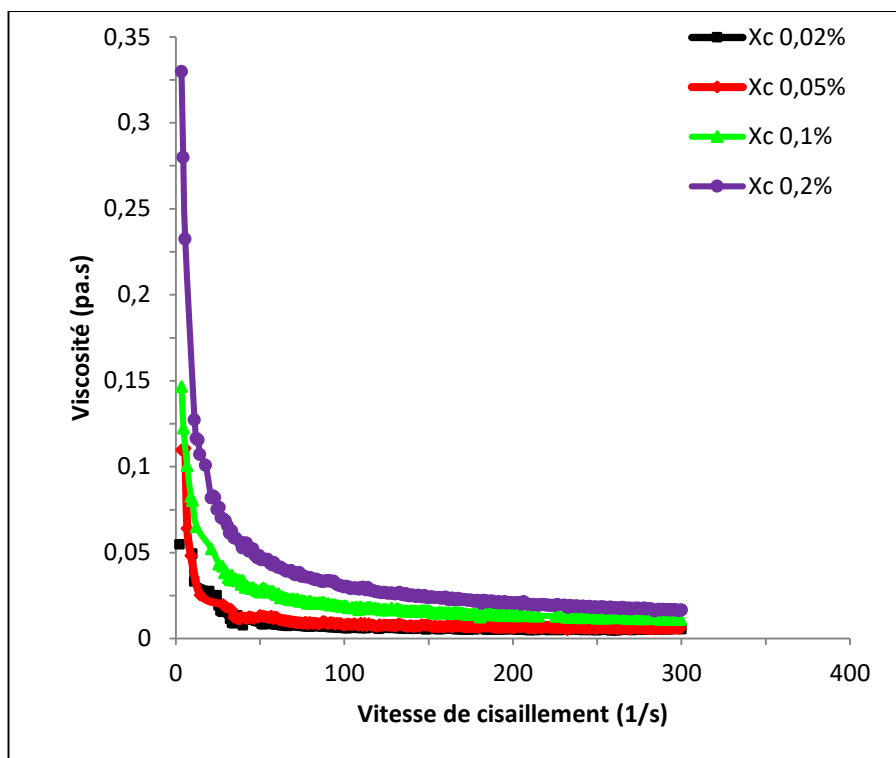


Figure 24: Courbe de viscosité du xanthane. [38]

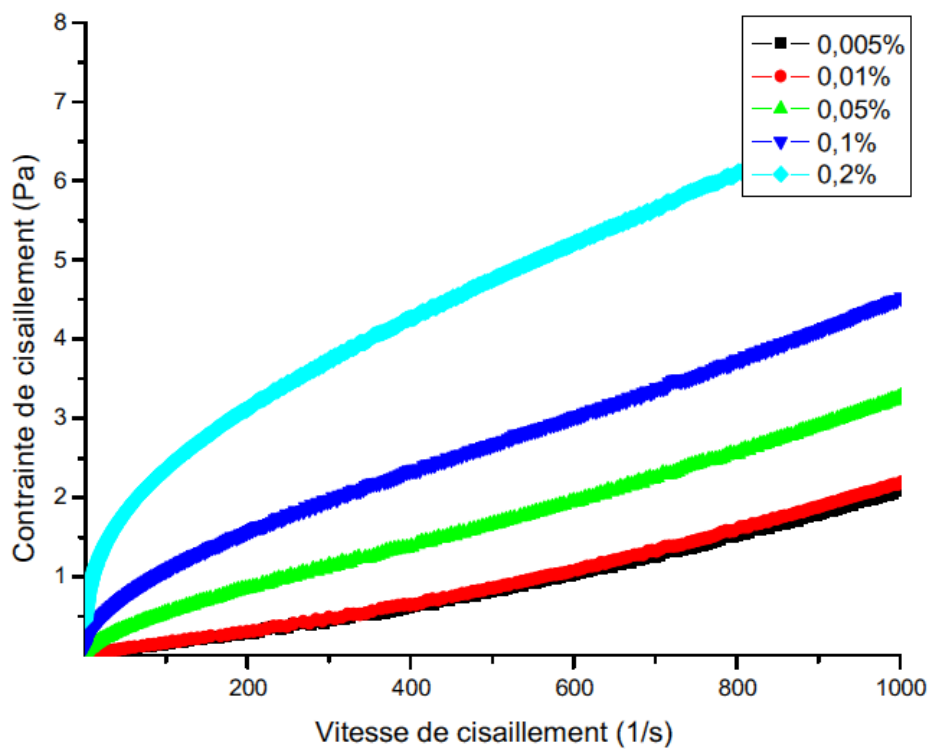


Figure 25: Rhéogrammes des solutions de la gomme de xanthane. [39]

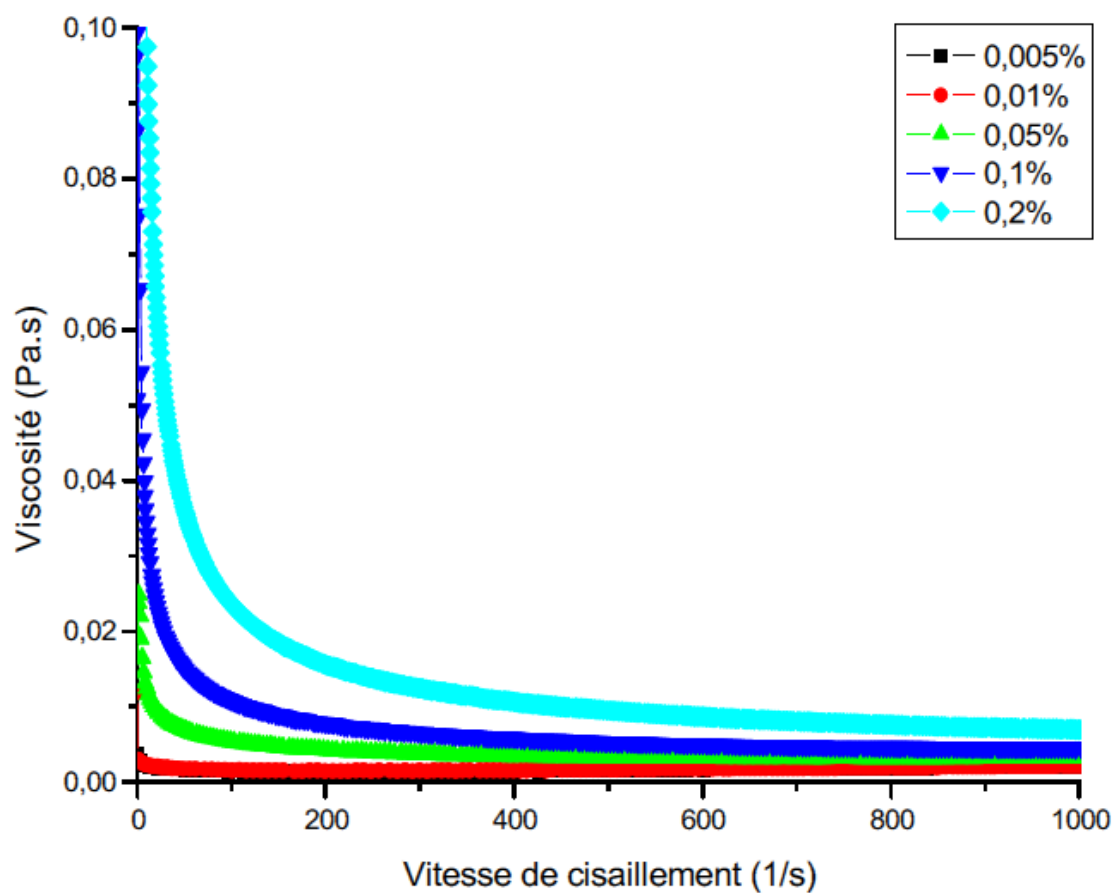


Figure 26: Viscosité de la gomme de xanthane dans l'eau en fonction du gradient de cisaillement. [39]

## 4.3.3. Solutions de PHPA :

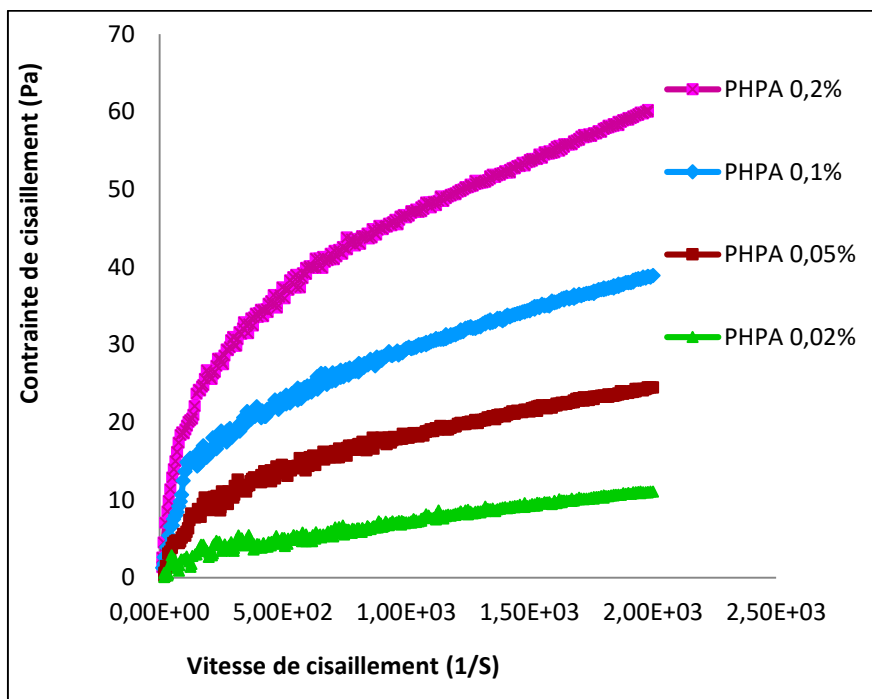


Figure 27: Courbe d'écoulement du PHPA. [38]

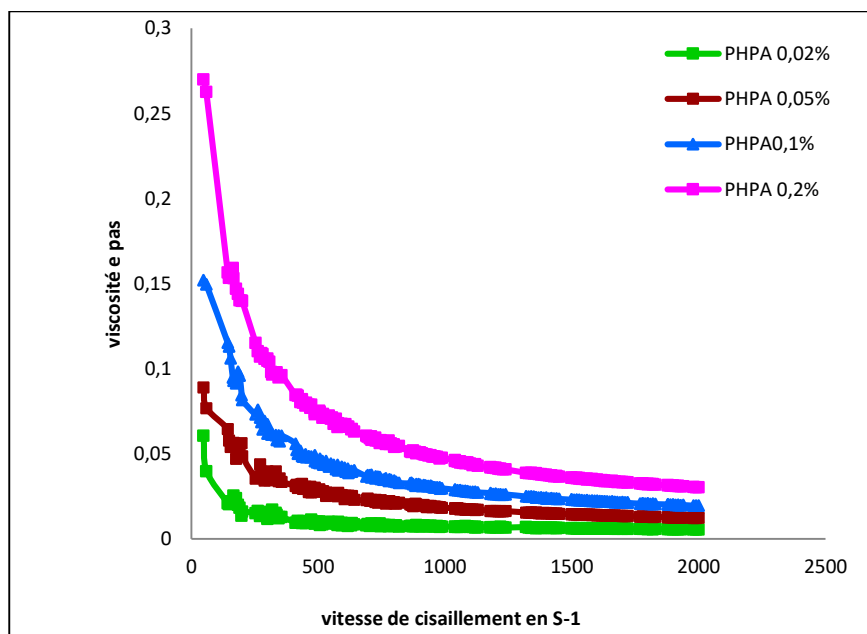


Figure 28: Courbe de viscosité du PHPA. [38]

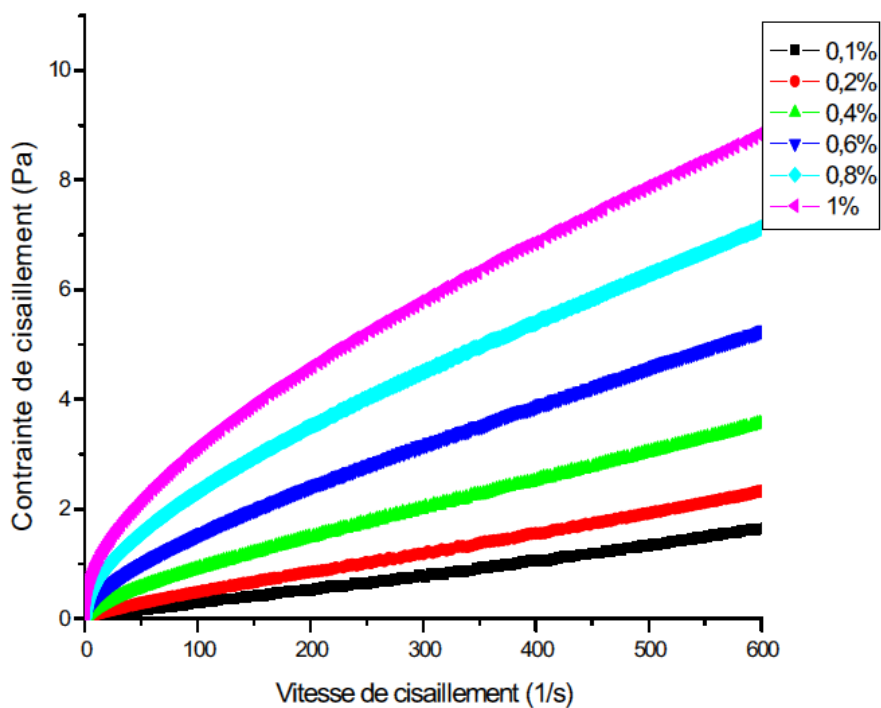


Figure 29: Rhéogrammes des solutions du PHPA. [39]

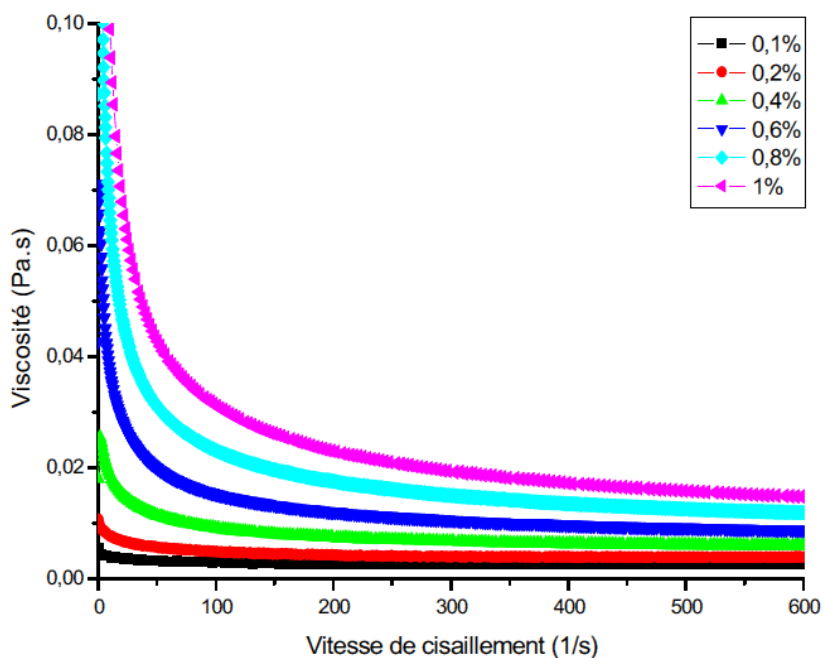


Figure 30: Viscosité du PHPA en fonction du gradient de cisaillement. [39]

➤ **Discussion des résultats :**

Les Figures ci-dessus représentent les rhéogrammes des solutions de xanthane et du PHPA pour différentes concentrations.

D'après ces rhéogrammes toutes les solutions montrent un écoulement non Newtonien (à taux de cisaillement plus élevé le comportement de polymère rapproche d'un comportement Newtonien) avec un seuil d'écoulement non nul dont la valeur dépend de la concentration en polymères. Ceci est d'ailleurs montré par les courbes de viscosités où les viscosités les plus élevées sont obtenues pour des taux de cisaillements nuls et ce pour les deux polymères. La viscosité de ces derniers diminue en fonction de la vitesse de cisaillement et cela d'autant plus fort aux faibles taux de cisaillement. Pour une vitesse de cisaillement constante, il faut des contraintes plus élevées.

La variation de la viscosité des solutions de xanthane a été étudiée en fonction du gradient de cisaillement. La viscosité, bien que diminuant avec la contrainte de cisaillement, augmente avec la concentration.

La rhéologie du xanthane est caractérisée par la présence d'une contrainte seuil, peu visible avec les faibles concentrations ; à partir de laquelle débute l'écoulement. Celle-ci diminue avec la concentration, la présence de cette contrainte seuil est due probablement à la formation d'un gel de structure faible, les macromolécules de xanthane forment des agrégats complexes par liaisons hydrogène et enchevêtrement des chaînes du polymère. La formation de ces réseaux fortement ordonnés permet aux solutions de xanthane d'avoir une viscosité élevée à faible vitesse de cisaillement. A plus forte vitesse de cisaillement la viscosité diminue ; cette diminution peut être expliquée par la désagrégation du réseau et par l'alignement des différentes macromolécules dans la direction du cisaillement.

La même tendance est observée pour le comportement rhéologique des solutions de PHPA comparativement aux solutions de xanthane. La viscosité augmente avec la Concentration et diminue avec le taux de cisaillement (caractère rhéofluidifiant). La chute de la viscosité intrinsèque résulte de la dégradation du polyacrylamide sous cisaillement.

D'après Benouadah [38], le modèle de Herschel Bulkely est celui qui convient pour décrire les propriétés rhéologiques des solutions de xanthane qui se comporte en solution comme des fluides pseudoplastiques avec une contrainte seuil.



# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Les travaux présentés dans notre mémoire ont porté sur une étude comparative des propriétés rhéologiques en solution aqueuse de deux types polymères (Xanthane, et PHPA) étudiés par Benouadah et Fourar. Ces polymères sont utilisés dans le domaine pétrolier, notamment dans le forage, la récupération assistée, le transport des hydrocarbures....etc. Vu leur importance particulière nous avons établi une synthèse des résultats obtenus qui vise en premier lieu à caractériser leur comportement.

Nous avons présenté quelques résultats des études effectuées par Benouadah et Fourar qui visaient principalement à améliorer des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères dans les puits de forage horizontaux.

La variation de la viscosité des solutions de xanthane a été étudiée en fonction du gradient de cisaillement. La viscosité, bien que diminuant avec la contrainte de cisaillement, augmente avec la concentration.

La même tendance est observée pour le comportement rhéologique des solutions de PHPA comparativement aux solutions de xanthane.

Enfin, et dans le but d'assurer une continuité à notre travail, il serait très intéressant :

- D'exploiter d'autres polymères et d'étudier d'autres solutions, afin de les intégrer à des études futures tout en gardant les mêmes démarches et les mêmes procédures.
- D'étudier le comportement des polymères en présence de la roche réservoir.



# Références Bibliographiques

---

## Références Bibliographiques

- [1] L. Naouri, «effet du vieillissement et analyse des mécanisme du comportement mécanique et tribologique d'un PEHD,» 2015. p. 3,4,5.
- [2] [En ligne]. Available: <http://tpe-textile-nylon-coton-2015-2016.e-monsite.com/pages/3-1-la-polymerisation.html>.
- [3] M. FEIDYoughourta, *Influence de la charge sur le*, Tizi-Ouzou, 2015/2016, p. 5.
- [4] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biopolym%C3%A8re#:~:text=Les%20biopolym%C3%A8res%20sont%20des%20polym%C3%A8res,et%20sont%20d'origine%20v%C3%A9g%C3%A9tale..>
- [5] [En ligne]. Available: [http://fr.wikipedia.org/wiki/polym%C3%A8re\\_classification](http://fr.wikipedia.org/wiki/polym%C3%A8re_classification).
- [6] B. Fouzia, «comportement rhéologique de solutions de biopolymères.Application au chitosane,au poly(vinyle alcool),» p. 3, 2011/2012.
- [7] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes.2007, p.43 ,44.
- [8] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9micellulose>.
- [9] [En ligne]. Available: <http://mamyastucesblog.canalblog.com/archives/2019/05/05/37300076.html>.
- [10] M, *Etudes physico-chimiques et influence*, Bejaia, 2012, p. 4.
- [11] [En ligne]. Available: <https://www.vermilionenergy.fr/nosactivites/larecherchedupetrole/les-differents-types-de-forage-en-france.cfm> .
- [12] «wikipedia,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyacrylamide>.
- [13] «polyacrylamidechina,» [En ligne]. Available: <https://www.polyacrylamidechina.com/fr/products/Partially-Hydrolyzed-Polyacrylamide-PHPA-for-drilling->
- [14] D. Ahmed, *comportement rhéologique de fluide de forage en régime stationnaire*, alger, 2004, p. 3.
- [15] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007, p.8
- [16] D. Ahmed, *comportement rhéologique de fluide de forage en régime stationnaire*, alger, 2004, p.7,8.
- [17] M, *Etudes physico-chimiques et influence*, Bejaia, 2012, p.12,13.
- [18] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.13,14.
- [19] k. mohamed, «les fluides de forage:etude des performances et considerations environnementales,» p. 3, 15 02 2008.
- [20] D. Ahmed, *comportement rhéologique de fluide de forage en régime stationnaire*, alger, 2004,p.12,13.

## Références Bibliographiques

---

- [21] E. N. e. houda, *essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000*, Mostaganem, 2018/2019, p. 8.
- [22] D. Ahmed, *comportement rhéologique de fluide de forage en régime stationnaire*, alger, 2004, p.17,18.
- [23] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.23.
- [24] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.24.
- [25] E. N. e. houda, *essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000*, Mostaganem, 2018/2019, p. 8.
- [26] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.25,26.
- [27] E. N. e. houda, *essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000*, Mostaganem, 2018/2019, p. 9.
- [28] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.28.
- [29] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.29,30.
- [30] [En ligne]. Available: <https://fluidenewtonien.jimdofree.com/les-fluides/non-newtoniens/thixotropes/#:~:text=Ces%20fluides%20sont%20souvent%20apparent%C3%A9s,liquide%20mais%20sur%20la%20dur%C3%A9e.> .
- [31] [En ligne]. Available: <https://fluidenewtonien.jimdofree.com/les-fluides/non-newtoniens/antithixotropes/> .
- [32] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.31,34,35.
- [33] [En ligne]. Available: <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiep/content/2012-g19/les-modeles-rheologiques#:~:text=Il%20existe%20diff%C3%A9rents%20mod%C3%A8les%20qui,un%20comportement%20rh%C3%A9o%C3%A9paissant%20ou%20rh%C3%A9ofluidifiant.> .
- [34] F. Karim, «amelioration des proprietes rheologiques des fluides de forage a base de biopolymeres,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007,p.32,33.
- [35] B. Fouzia, «comportement rhéologique de solutions de biopolymères. application au chitosane au poly(vinyle alcool) et à leurs mélanges,» p. 53, 2011/2012.
- [36] E. N. e. houda, *essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000*, Mostaganem, 2018/2019, p. 11,12.
- [37] D. Ahmed, *comportement rhéologique de fluide de forage en régime stationnaire*, alger, 2004.
- [38] N. Benouadah. Etude du comportement rhéologique des polymères hydrosolubles utilisés dans les applications pétrolières. Mémoire d'ingénieur. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2010.

## Références Bibliographiques

---

- [39] F. Karim, «amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères,» Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2007.
- [40] [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gomme\\_xanthane](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gomme_xanthane).
- [41] [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Hemicellulose\\_fig1\\_236217541](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Hemicellulose_fig1_236217541)  
.
- [42] [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Hemicellulose\\_fig1\\_236217541](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-Hemicellulose_fig1_236217541)  
.
- [43] [En ligne]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Fluage-et-relaxation-dun-materiau-soumis-a-une-sollicitation-au-temps-t-0\\_fig41\\_281219183](https://www.researchgate.net/figure/Fluage-et-relaxation-dun-materiau-soumis-a-une-sollicitation-au-temps-t-0_fig41_281219183).
- [44] Photo prise au centre de recherche et Développement par HOCINE Amira et KEDIRA Narimane.