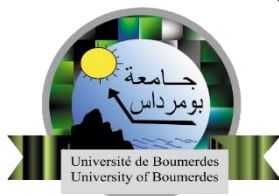
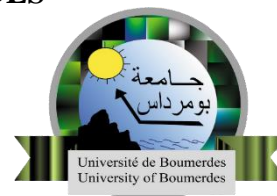


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



FACULTE FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

Spécialité : Génie des polymères

De MASTER en Génie des procédés

Thème :

**Caractérisation rhéologique d'une solution de polymères :
application au fluide de fracturation**

Par :

- *MORDJANE Fatima*
- *IKHETEAH Siham*

Jury de soutenance :

<i>H.AKSAS</i>	<i>UMBB</i>	<i>Président</i>
<i>N.BELLOUL</i>	<i>UMBB</i>	<i>Promotrice</i>
<i>A.BELLOUNIS</i>	<i>CRD</i>	<i>Co-promoteur</i>
<i>B.KOUINI</i>	<i>UMBB</i>	<i>Examineur</i>

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur, Madame **BELLOUL Nabila** pour l'orientation, la confiance et la patience qui ont constitués un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pu être mené au bon port. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.*

*Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude au Co-promoteur Mr **BELOUNIS Abderahim**, pour son suivi attentif de notre travail, ses remarques, ses suggestions, et de nous fournir les documents nécessaires pour la réalisation de ce travail.*

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés et qui, par leurs compétences nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Nos dernières pensées iront vers nos familles, et surtout nos parents, qui nous ont permis de poursuivre nos études jusqu'à aujourd'hui.

Dédicaces

Merci mon DIEU de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les Années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à
me

Donner l'aide et à me protéger. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge d'aujourd'hui. Que dieu les garde et les protège.

A mes adorables sœurs Yasmine, Sacia, Fatiha et Zahia

A mon cher frère Madjid

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime

Siham

Dédicaces

A mes parents

Vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Vos prières et vos bénédictions m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes chers frères Khaled, Marouane et Walid

A mes sœurs Meriem et Meroua

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous

Exprimer mon affection et mes pensées.

Fatima

Résumé :

Les polymères sont devenus indispensables, ils sont employés dans des domaines très divers : le transport, la construction, les applications médicales, le forage et la fracturation hydraulique. Cette dernière est une technique qui consiste à injecter un fluide (de l'eau + sable + des additifs tel que les polymères), à haute pression pour fracturer les roches (les fissures) pour récupérer le gaz de schiste. En effet l'utilisation des polymères est importante rhéologiquement pour accroître la viscosité de l'eau, garder le sable en suspension et transporté jusqu'à des fissures éloignées.

L'étude des propriétés rhéologiques d'une solution à base de xanthane a montré un comportement viscoplastique décrivant un écoulement selon le modèle de Herschel Bulkley adéquat à une application autant que fluide de fracturation.

ملخص

أصبحت البوليمرات ضرورية وتستخدم في مجموعة متنوعة من المجالات: النقل والبناء والتطبيقات الطبية والحفر والتكسير الهيدروليكي. هذا الأخير عبارة عن تقنية تتضمن حقن سائل (ماء + رمل + مواد مضافة مثل البوليمرات) عند ضغط عالٍ لكسر الصخور (الشقوق) لاستعادة الغاز الصخري. في الواقع، يعد استخدام البوليمرات مهمًا من الناحية الريولوجية لزيادة لزوجة الماء، والحفاظ على الرمل معلقًا ونقله إلى شقوق بعيدة.

كجزء من هذه الرسالة، نحن مهتمون بدراسة ريولوجيا حلول البوليمر وتطبيقها في التكسير الهيدروليكي.

Herschel أظهرت دراسة الخصائص الانسيابية لمحلول أساسه الزانثان سلوكًا لزجًا بلاستيكيًا يصف التدفق وفقًا لنموذج المناسب للتطبيق بالإضافة إلى مائع التكسير Bulkley.

Abstract:

Polymers have become essential and are used in a wide variety of fields: transport, construction, medical applications, drilling and hydraulic fracturing. The latter is a technique that involves injecting a fluid (water + sand + additives such as polymers) at high pressure to fracture rocks (cracks) to recover shale gas. In fact, the use of polymers is rheologically important to increase the viscosity of the water, keep the sand in suspension and transported to distant cracks. As part of this dissertation, we are interested in the study of the rheology of polymer solutions and its application in hydraulic fracturing. The study of the rheological properties of a xanthane-based solution has shown a viscoplastic behavior describing a flow according to the Herschel Bulkley model suitable for an application as well as a fracturing fluid.

Liste des figures

Figure 1.1 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines	14
Figure 1.2 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles	15
Figure 1.3 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte	19
Figure 1.4 : Courbes d'écoulement des fluides présentent une contrainte critique	20
Figure 1.5 : Courbes montrent les allures des fluides thixotrope et antithixotrope.	21
Figure 1.6 : Représentation symbolique du comportement élastique du corps solide.	21
Figure 1.7 : Représentation symbolique du comportement visqueux du liquide.	22
Figure 1.8 : Différents types d'association de comportement viscoélastique.	23
Figure 1.9 : Schéma d'état de la matière en solution (a) et (b) après cisaillement	33
Figure 2.1 : Schéma de la porosité.	34
Figure 2.2 : Zones de forte et de faible perméabilité d'une roche réservoir.	35
Figure 2.3 : Schéma descriptif de la fracturation hydraulique.	38
Figure 2.4 : Les additifs chimiques dans la fracturation hydraulique.	41
Figure 2.5 : Maintien des fractures rocheuses ouvertes par remplissage d'agents de soutènements.	42
Figure 2.6 : Types d'agents de soutènements.	42
Figure 2.7 : Encapsulation des fragments de proppants enrobés de résine.	43
Figure 3.1 : Le rhéomètre Kinexus de Malvern.	48
Figure 3.2 : Présentation schématique du rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux.	50
Figure 3.3 : Présentation schématique sur les rhéomètres rotatifs cône plan.	51
Figure 3.4 : Les caractéristiques de la géométrie plan-plan.	51

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Représentation schématique des structures de polymères.</i>	27
<i>Tableau 1.2 : Les types d'homopolymères.</i>	28
<i>Tableau 1.3 : Les types de copolymères.</i>	29
<i>Tableau 2.1 : Fonction et proportion des additifs chimiques utilisés dans les fluides de fracturation.</i>	40

Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Signification</i>
τ	La contrainte de cisaillement (Pa).
df	Force de cisaillement (N).
Ds	La surface élémentaire (m ²)
γ	La déformation de cisaillement.
$\dot{\gamma}$	La vitesse de cisaillement
μ	La viscosité apparente (Pa. s)
K	L'indice de consistance
n	L'indice de l'écoulement
μ_{pl}	Viscosité plastique
G	Relaxation
ω	La pulsation
t	Temps (s)
ϕ	Angle (°)
$G^*(\omega)$	Module de rigidité complexe
$G'(\omega)$	Rigidité d'accumulation
$G''(\omega)$	Rigidité de dissipation
J	Compliance
$\mu^*(j\omega)$	Viscosité complexe
V_v	Volume des vides
V_t	Volume total
K	La perméabilité
Q	Le débit
S	La section de l'éprouvette
η	La viscosité dynamique
$\Delta x/\Delta p$	Le gradient de pression

Sommaire

Introduction générale :	10
CHAPITRE I : Etude rhéologique des solutions polymères	12
PARTIE 1 : ETUDE RHEOLOGIQUE	13
1.1 Introduction :	13
1.2 Définition :	13
1.3 Le cisaillement laminaire :	14
1.4 Contrainte de cisaillement :	15
1.5 Déformation et vitesse de cisaillement :	15
1.5.1 Déformation de cisaillement :	15
1.5.2 Vitesse de cisaillement :	16
1.6 La viscosité :	16
1.7 Le comportement rhéologique des fluides :	17
1.7.1 Les fluides indépendants du temps :	17
Les fluides Newtoniens :	17
Les fluides Non – Newtoniens :	18
1.7.2 Les fluides dépendant de temps :	20
Les fluides thixotropes :	20
Les fluides anti-thixotropes :	20
1.7.3 Les fluides viscoélastiques :	21
PARTIE 2 : LA RHEOLOGIE DES SOLUTIONS POLYMERES	26
1.1 Introduction :	26
1.2 Définition :	26
1.3 Classification des polymères :	26
1.4 Les applications des polymères :	29
1.5 Quelques propriétés des polymères :	30
1.5.1 Propriétés thermiques :	30
1.5.2 Propriétés mécaniques :	30
La rhéologie des solutions de polymères :	30
CHAPITRE II : LA FRACTURATION HYDRAULIQUE	32
2.1 Introduction :	33
2.2 La production des hydrocarbures non conventionnels :	33
2.2.1 La porosité :	34
2.2.2 La perméabilité :	35
2.2.3 Roche mère :	36

2.2.4	Gaz de schiste :.....	36
2.3	La fracturation hydraulique :.....	36
2.4	Le fonctionnement technique :.....	36
2.5	Composition du fluide hydraulique :.....	38
2.5.1	Fluide de base :.....	39
2.5.2	Les additifs chimiques :.....	39
2.5.3	Agents de soutènements (proppants) :.....	41
2.5.4	Types d'agents de soutènements :	42
	Polymères utilisés comme agents de soutènements :	43
2.5.5	Injection des polymères :.....	43
CHAPITRE III : La Rhéométrie et le rhéomètre		45
3.1	Introduction :.....	46
3.2	La Rhéométrie :.....	46
	Définition :	46
3.3	Le rhéomètre :	47
3.3.1	Définition :	47
3.3.2	Rhéomètre Kinexus :.....	47
	Présentation générale :	47
3.4	Classification des rhéomètres.....	48
3.4.1	Les rhéomètres à régime permanent :.....	49
3.4.2	Les rhéomètres à régime transitoire :	52
3.4.3	Les rhéomètres dynamiques (oscillants) :	52
Discussions et interprétations :		53
Conclusion générale :		56

Introduction générale :

La fracturation hydraulique est une technique utilisée depuis les années 40 pour stimuler des gisements d'hydrocarbures conventionnels afin d'en améliorer le taux de récupération. Cette technique est plus connue sous le nom de stimulation de puits et elle est différente de celle utilisée pour l'extraction des hydrocarbures piégés dans la roche mère. En effet, cette dernière, qui porte pour nom exact celui de fracturation hydraulique horizontale à haut volume, a pour objectif de modifier la perméabilité de la roche-mère. La technique consiste à provoquer un grand nombre de micro-fractures dans cette roche non-poreuse afin de permettre la libération et l'extraction des molécules d'hydrocarbure qui s'y trouvent emprisonnées, permettant ainsi au gaz de migrer jusqu'au puits afin d'être récupéré en surface.

La fracturation est obtenue par l'injection dans la formation géologique d'un fluide : une quantité importante d'eau, mélangée à du sable et divers adjuvant chimiques tels que les polymères, et à très haute pression (plus de 700 bars). On provoque ainsi des fractures autour des points d'injection, assorties de fissures.

Par ailleurs la connaissance des propriétés rhéologiques et de filtration des fluides de fracturation qui sont d'une importance capitale pour la réussite de l'opération de fracturation, vont faciliter le passage de l'outil de fracturation à travers les différentes couches de la formation géologique.

La rhéologie est une branche de la physique qui étudie l'écoulement ou la déformation des matériaux sous l'effet des contraintes qui leur 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), Ou de formage de pièces nécessitent inmanquablement l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour déterminer les forces mises en jeu.

Notre travail se compose principalement de trois chapitres :

- **Chapitre1** : *généralités sur la rhéologie des solutions polymères*, ce chapitre est dédié aux notions générales de la rhéologie, nous nous intéressons à la rhéologie des matériaux fluides notamment le comportement des fluides en écoulement de cisaillement permanent et oscillatoire.

- **Chapitre2** : consacré à *la fracturation hydraulique*, ce chapitre va contenir le principe, la description, le but de la fracturation hydraulique, sans oublier au passage de parler sur les fluides de fracturation, les additifs, les polymères et les agents de soutènements (proppants) utilisés dans cette technique.
- **Chapitre3** : *la rhéométrie et le rhéomètre*, dans ce chapitre nous abordions dans un premier temps, la rhéométrie (terme provenant de la contraction du mot rhéologie avec le suffixe *métrie*, mesure) est une science de mesure : mesure des paramètres d'écoulements, mesure de l'état au repos, mesure de la déformation des matériaux soumis à une contrainte. Dans un deuxième temps, nous présenterons les techniques utilisées en rhéologie, du cisaillement simple aux rhéomètres les plus généraux.

CHAPITRE I : Etude rhéologique des solutions polymères

PARTIE 1 : ETUDE RHEOLOGIQUE

1.1 Introduction :

Le mot Rhéologie a été proposé en 1928 par le Professeur BINGHAM pour désigner la science de la déformation et de l'écoulement de la matière. L'origine du mot rhéologie est grecque et se décompose en :

- ✓ Rhéo : couler,
- ✓ Logos : étude.

Il s'agit donc d'une discipline très vaste, concernant une grande variété de matériaux (bitumes, peintures, polymères à l'état fondu, élastomères, boues) ; et impliquant une grande diversité de disciplines (mécaniciens, mathématiciens, physiciens, physico-chimistes et chimistes...).

La rhéologie comporte donc différents aspects :

1. Caractérisation du comportement du fluide,
2. Modélisation des comportements (lois de comportement),
3. Calculs prédictifs des comportements lors de la mise en forme, de l'utilisation des matériaux...,
4. Ajustement du fluide aux propriétés d'écoulement désirées (c'est une partie du rôle de la formulation).

Cette liste donne un premier aperçu des domaines ouverts (et pas encore couverts) par la rhéologie mais n'est évidemment pas exhaustive ^[1]

1.2 Définition :

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées en tenant compte du temps (ou vitesse d'application de contrainte). Plus généralement, elle étudie la relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps dans le matériau ^[2]

Le procédé de la mise en forme des pièces (en métallurgie ; en plasturgie ... etc.) nécessite inmanquablement l'étude de l'écoulement de la matière, il est donc nécessaire de connaître le comportement de la matière pour déterminer les forces mises en jeu.

Globalement, la rhéologie suppose que :

- Le matériau est continu (pas de vide).
- Chaque point de corps se déplace de façon continue.

Deux points du corps infiniment voisins avant la déformation le sont encore après la déformation^[3]

1.3 Le cisaillement laminaire :

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées.

Le mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour des distributions de ces forces. Au cours de ce mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, la déformation alors s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre.

Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide des rhéomètres, et à partir de ces mouvements qu'on peut déterminer les paramètres rhéologiques des fluides^[4].

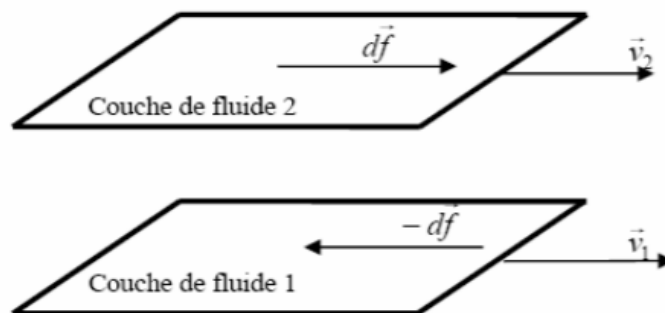


Figure 1.1 : Forces agissantes sur deux éléments de couches voisines.

1.4 Contrainte de cisaillement :

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées de mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : c'est les forces de cisaillement.

En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface sur laquelle elles s'exercent, on définit ainsi ce qu'on appelle la contrainte de cisaillement τ :

$$\tau = \frac{df}{ds}$$

La contrainte de cisaillement τ est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie ^[5]. Elle s'exprime en : pascal, en N/m² ou n dynes/cm².

1.5 Déformation et vitesse de cisaillement :

1.5.1 Déformation de cisaillement :

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant une symétrie plane.

Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre fixe.

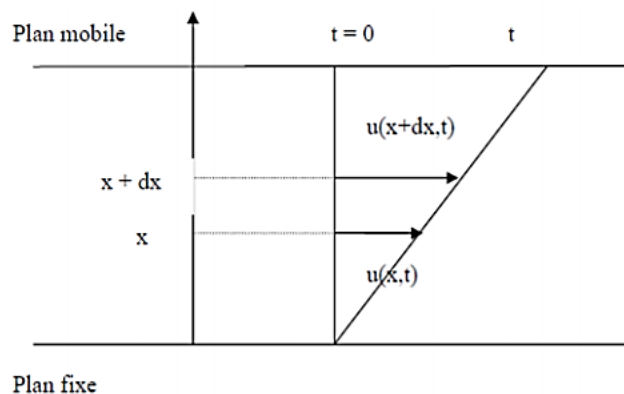


Figure 1.2 : *Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.*

En considérant que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l'instant $t=0$ dans une section droite. A l'instant t postérieur, chaque particule de matière aura parcouru la distance $u(x, t)$ ou x , distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur, permet de repérer les différentes couches planes du matériau.

On définit alors la déformation de cisaillement dans ce cas par l'équation :

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

Cette grandeur est sans dimension, elle ne dépend pas du déplacement $u(x, t)$ lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu'on passe d'une couche à une couche infiniment proche ^[5].

1.5.2 Vitesse de cisaillement :

L'expression de la vitesse de cisaillement est donnée par l'équation suivante, il s'agit du dérivé par rapport au temps de l'équation de déformation de cisaillement ^[4]:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

$\dot{\gamma}$: S'exprime en s^{-1} .

1.6 La viscosité :

La viscosité traduit une résistance à la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluide les unes par rapport aux autres. C'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois pour caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau, notée μ et s'exprimes-en (N.s/m² ou Pa.s) ^[6].

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

1.7 Le comportement rhéologique des fluides :

Rhéologiquement, on peut classer les 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 ^[2].

1.7.1 Les fluides indépendants du temps :

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement τ est fonction seulement de la vitesse de cisaillement $\dot{\epsilon}$ et leur comportement est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien et fluide non newtonien ^[4]

Les fluides Newtoniens :

Un fluide newtonien qui a une viscosité indépendante de la contrainte appliquée et du temps, comme : eau, la plupart des solvants et les huiles minérales.

Il est caractérisé par l'équation rhéologique :

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

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

μ : viscosité dynamique du fluide [Pa. S].

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

Les fluides Non – Newtoniens :

Le caractère non newtonien le plus répandu est la variation de la viscosité avec la vitesse de cisaillement. Ce type de comportement concerne les polymères en solution ou à l'état fondu, la pâte à papier et les ciments^[7].

On distingue deux catégories de fluide non newtonien :

Les fluides sans contrainte critique,

Les fluides à contrainte critique (viscoplastique).

a- Les fluides sans contrainte critique :

- **Les fluides rhéofluidifiant ou pseudoplastique :**

Le fluide rhéofluidifiant est caractérisé par une diminution de la viscosité avec l'augmentation du taux de cisaillement, le fluide devient moins visqueux.

- **Les fluides rhéoépaississant :**

C'est un fluide dont la viscosité augmente avec le taux de cisaillement, le fluide devient plus épais^[8].

Les fluides sont représentés par une loi de puissance :

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

Où : K : l'indice de consistance en [Pa. S].

τ : La contrainte de cisaillement en [Pa].

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

n : l'indice d'écoulement dépend du fluide considéré et caractérise son comportement.

On a :

$$\mu = k^n \dot{\gamma}^{-1}$$

- Pour $n=1$ on a $\mu = k^0 \dot{\gamma} = k$: constante alors le fluide est newtonien.
- Pour $n < 1$; $n-1 < 0$ donc n diminue avec le taux de cisaillement, le fluide est rhéofluidifiant.
- Pour $n > 1$; $n-1 > 0$ donc n augmente avec le taux de cisaillement, le fluide est rhéoépaississant^[4].

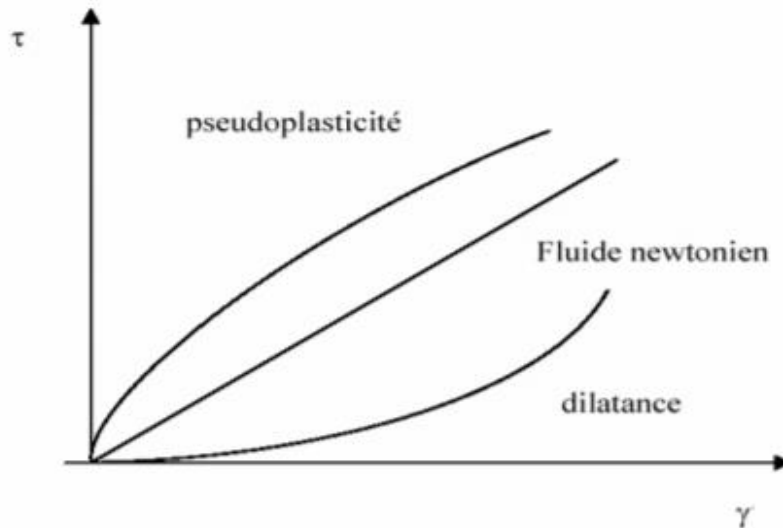


Figure1.3 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.

b- Les fluides à contrainte critique, ou viscoplastiques :

Les fluides à contrainte critique sont des matériaux qui se comportent comme un solide si la contrainte appliquée est inférieure à la contrainte seuil (τ_0). Au-delà de cette contrainte seuil, ils commencent à s'écouler^[9].

On en distingue deux catégories :

- **Les fluides de BINGHAM (1922)** : la présentation la plus simple d'un fluide à seuil est le modèle de BINGHAM, il est décrit par la loi :

$$\tau = \tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma}$$

Avec : μ_{pl} est la viscosité plastique.

- **Les fluides de HUERSCHEL-BUKLEY (1926)** : il est décrit par la loi :

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$$

Où k : est la consistance du fluide et n est l'indice d'écoulement ^[9]

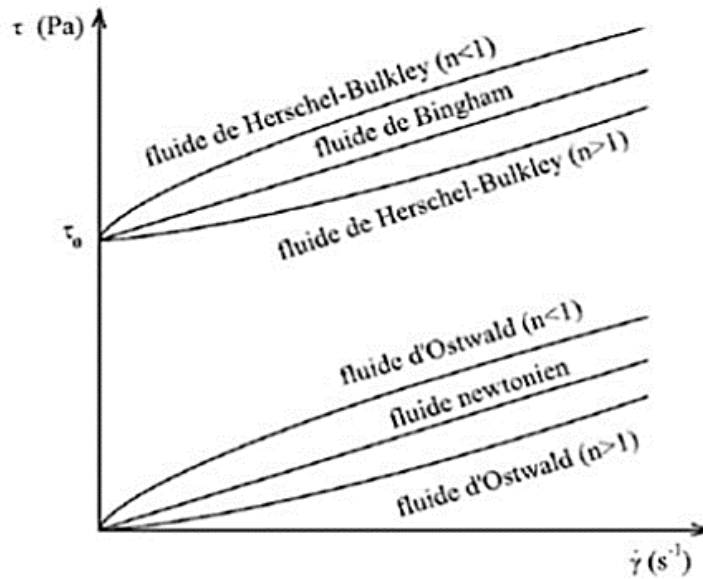


Figure 1.4 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.

1.7.2 Les fluides dépendant de temps :

Certains fluides peuvent avoir un écoulement dont la viscosité apparente n 'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement, mais dépend d'un autre paramètre : le temps ^[10].

Les fluides thixotropes :

Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante, ce phénomène est généralement lié à la désorganisation de la structure et est réversible.

Les fluides anti-thixotropes :

C'est le phénomène inverse, à savoir qu'à contrainte, τ , ou à gradient de vitesse donné, $\dot{\gamma}$ la viscosité dynamique augmente avec le temps ^[11].

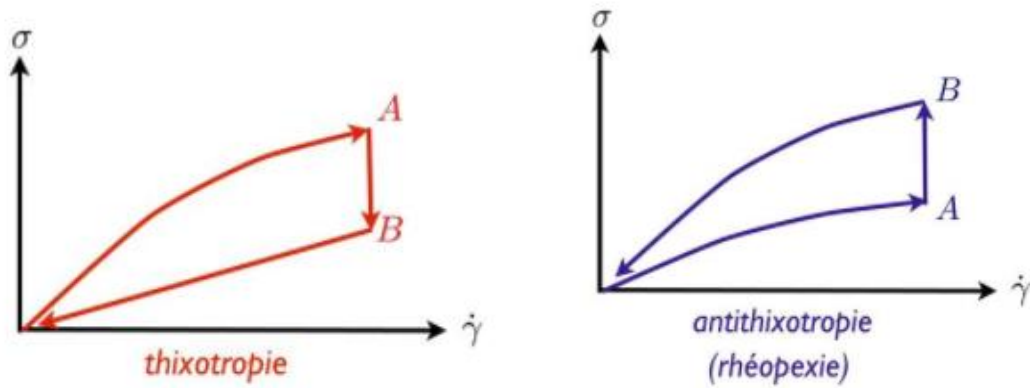


Figure 1.5 : Courbes montrent les allures des fluides thixotrope et antithixotrope.

1.7.3 Les fluides viscoélastiques :

La **viscoélasticité** : est la propriété des matériaux qui présentent des caractéristiques à la fois les matériaux visqueux : résistent à un écoulement en cisaillement et présentent une déformation qui augmente linéairement avec le temps lorsqu'une contrainte est appliquée, les matériaux élastiques : se déforment lorsqu'ils sont contraints, et retournent rapidement à leur d'origine une fois la contrainte retirée.

Le comportement d'un solide élastique est symbolisé par un ressort (le module élastique G), et le comportement d'un fluide visqueux est représenté par un amortisseur de viscosité μ ^[12].

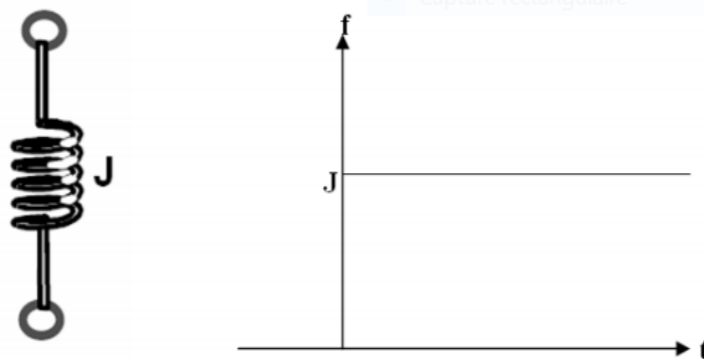


Figure 1.6 : Représentation symbolique du comportement élastique du corps solide.

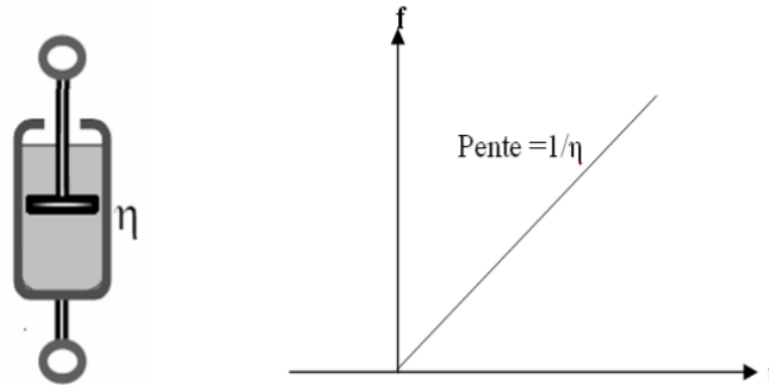


Figure 1.7 : Représentation symbolique du comportement visqueux du liquide.

- **Le comportement viscoélastique :**

En général ce comportement se définit en construisant un modèle constitué d'un assemblage en série ou en parallèle de ressort et d'amortisseur.

Dans une association en parallèle :

- La contrainte imposée à l'ensemble est la somme des contraintes imposées à chaque branche.
- La déformation subie est identique dans chaque branche et égale à la déformation subie par l'ensemble.

Dans une association en série :

- La contrainte imposée à l'ensemble est supportée en totalité par chaque élément.
- La déformation totale est la somme des déformations subie par chaque élément.

L'association parallèle : modèle de Kelvin-Voigt :

Il consiste à additionner les contraintes d'origine élastique avec celle d'origine visqueuse^[5].

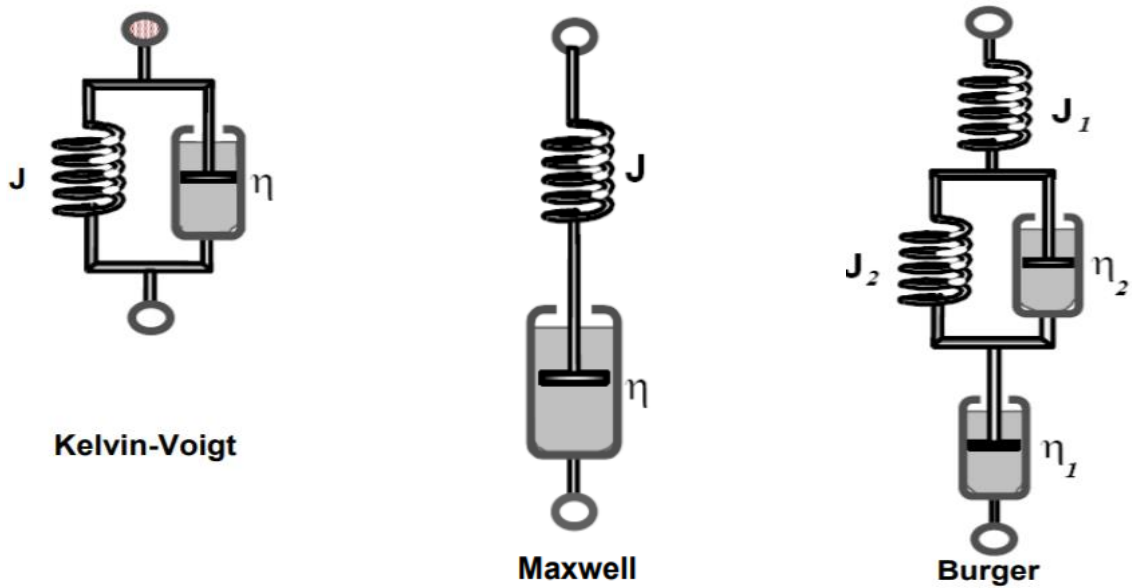


Figure1.8 : Différentes types d'association.

Relation générale du comportement viscoélastique :

$$\dot{\gamma}(t) = \frac{\tau(t)}{\mu} + \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau(t)}{dt}$$

Les fonctions de la viscoélasticité : sont deux fonctions, fluage et relaxation :

La détermination des propriétés viscoélastiques des 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 ω .

Lors de ce test, la contrainte et la vitesse de cisaillement évoluent sinusoïdalement au cours du temps ^[2].

La méthode de sollicitation en cisaillement simple repose sur des échelons de contrainte (fluage) ou de déformation (relaxation) imposé de façon instantanée. Ce principe théorique est confronté à l'inertie mécanique du système de mesure rhéomètre. C'est pour cela on utilise les propriétés de réponse oscillatoire des fluides viscoélastique soumis à des sollicitations de type sinusoïdales en fonction du temps.

Les fonctions de fluage $J(t)$ et de relaxation $G(t)$ caractérisent l'écoulement des fluides viscoélastique selon les modes de mesure en cisaillement simple [2].

- **Les paramètres complexes :**

En mode dynamique, on applique des contraintes ou des déformations qui répondent à des fonctions sinusoïdales du temps (t) de pulsation donnée(ω) qui ne provoquent pas l'écoulement du fluide. A l'instant on a [4] :

$$\gamma(\omega) = \gamma_0 \cdot \cos(\omega t)$$

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

La contrainte mesuré (τ) est en déphasage permanent avec la déformation (γ) d'un angle ϕ compris entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. En fonction du temps de mesure (t), ce décalage par rapport aux conditions initiales devient tel que :

$$\gamma(\omega t) = \gamma_0 \cdot e^{j\omega t} = \gamma_0 \cdot (\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t))$$

Soit

$$\gamma(\omega t) = \gamma'(\omega) + j \cdot \gamma''(\omega)$$

De même

$$\tau(\omega t) = \tau'(\omega) + j \cdot \tau''(\omega)$$

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

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

$$\mu' = \frac{G''}{\omega} \text{ et } \mu'' = \frac{G'}{\omega}$$

Nous obtenons donc l'expression de G' et de G'' [4] :

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos(\varnothing) \quad G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin(\varnothing)$$

PARTIE 2 : LA RHEOLOGIE DES SOLUTIONS POLYMERES

1.1 Introduction :

Depuis longtemps au niveau de l'industrie, on utilisait les matériaux organiques basés essentiellement sur la chimie du carbone, pour la construction des pièces dans plusieurs domaines. Depuis les années vingt, on a découvert un nouveau matériau macromolécules qui s'appelle polymère, qu'on utilise dans tous les domaines (mécanique, électronique, le domaine pétrolier et du gaz ^[3].

1.2 Définition :

Polymère est un mot qui vient du grec pollus plusieurs, et meros partie. C'est une macromolécule, organique ou inorganique, constitué de l'enchaînement répété d'un motif d'un même motif, le monomère (du grec monos : un seul ou une seule, et meros : partie), relié les uns aux autres par des liaisons covalentes.

L'enchaînement des monomères peut se faire de façon linéaire, ramifié ou réticulé. Les polymères forment un corps qui peut se présenter sous forme liquide ou solide à température ambiante ^[13].

1.3 Classification des polymères :

A : Selon l'origine :

➤ Les polymères naturels :

Issus des règnes végétal, animal ou minéral leur économique et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur à assurer une place de premier choix comme : les polysaccharides, cellulose ... etc.

➤ Les polymères artificiels : sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer leurs propriétés.



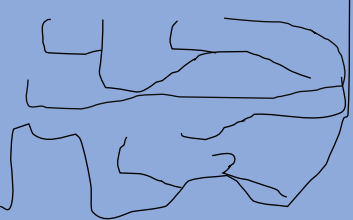
➤ Les polymères synthétiques :

Obtenus par polymérisation de molécules monomères ^[4].

B : Selon leurs structures (dimensionnalité) : peuvent être classés en trois catégories

- Monodimensionnels (linéaire) : chaque chaîne est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères.
- Bidimensionnel : se présente sous la forme de feuilles bidimensionnelles d'épaisseur comparable à celle des molécules simples.
- Tridimensionnels : résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique de polymères linéaires leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule ^[14].

Tableau 1.1 : Représentation schématique des structures polymères.

Type de structure	Schéma de la structure	Exemples
Linéaire ou Monodimensionnel		CMC, PHPA
Branché ou Bidimensionnel		Amidon, gomme de xanthane
Réticulé ou Tridimensionnel		Gomme de xanthane réticulé

C : Selon leurs comportements thermiques :

- Les thermoplastiques : ramollissent sous l'effet de la chaleur, ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Ils sont des macromolécules linéaires par des liaisons faibles, ses chaînes peuvent glisser les unes par rapport les autres.

- Les thermodurcissables : sont des produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels.
- Élastomères : sont constitués de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer^[15].


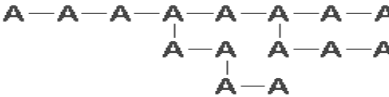
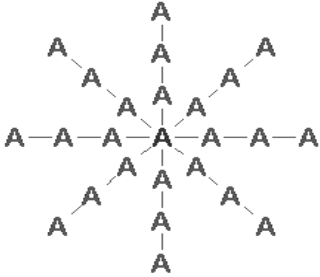
D : Selon l'enchaînement des unités constitutives :

a) Homopolymère : les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères on peut citer le polyéthylène.

Il existe au sein des homopolymères, différentes familles.

Pour la suite du paragraphe(A) sera l'unité de l'homopolymère.

Tableau (1.2) : Les types d'Homopolymères.

TYPES	FORMES
Les homopolymères linéaires	
Les homopolymères branchés	
Les homopolymères étoiles	

b) Les copolymères : Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères.

Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère. Parmi les différents modes de copolymères^[16]:

Tableau (1.3) : Les types de copolymères.

Modes	Formes
Le mode statistique	$A-A-B-B-B-B-B-B-A-A-B-A$
Le mode alterné	$A-B-A-B-A-B-A-B-A-B-A$
Le mode séquencé	$A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B-B$
Le mode greffé	$A-A-A-A-A-A-A-B-B-B-B-B-B$

E : Selon leurs applications :

- 1) Les polymères de grande diffusion (de grande commodité) : dont la production annuelle s'évalue par millions de tonnes tel que le polyéthylène, le polystyrène, PVC.
- 2) Polymères techniques : ont des caractéristiques mécaniques qui leur permettent de substituer aux matériaux traditionnels pour de nombreuses applications telles que le polyamide, poly acétals.
- 3) Les polymères spéciaux (de haute performance) : présentent une propriété spécifique qui induit leur utilisation pour une application particulière telle que les polymères conducteurs, thermostables et adhésifs ^[17].

1.4 Les applications des polymères :

Les polymères ont envahi tous les domaines de notre vie quotidienne :

- Les polymères de commodité : automobile, infrastructure, emballage.
- Les polymères techniques : sport, orthoptie, prothèse, jardin.
- Les polymères haute performance : aviation et espace, exploitation pétrolière ^[18].

1.5 Quelques propriétés des polymères :

1.5.1 Propriétés thermiques :

La température influence sur le comportement des polymères :

- ✓ La température de transition vitreuse (T_g) est définie comme la température à laquelle le liquide devient trop visqueux pour couler en un temps raisonnable ^[19].
- ✓ La température de fusion d'une matière représente la température à laquelle un le composé fond c'est à dire passe de l'état solide à l'état liquide, nommée (T_f) ^[20].

1.5.2 Propriétés mécaniques :

Puisque les polymères sont des macromolécules de grande masse moléculaire, la résistance mécanique résulte de la présence d'un grand nombre de liaisons secondaires qui relient chaque macromolécule aux macromolécules qui l'entourent, cette résistance varie de manière considérable avec la masse de polymère. Lorsque celle-ci est faible les liens de valence sont faibles et la rupture se produit facilement par désolidarisation ^[21].

La rhéologie des solutions de polymères :

Sur une large gamme de taux de cisaillement, les polymères ont un comportement non newtonien. Pour les faibles taux de cisaillement les solutions de polymères montrent un plateau newtonien, ou la viscosité est constante, suivi d'une diminution de la viscosité pour de plus fort taux de cisaillement ^[22].

Les solutions polymères sont constitués au repos de particules de formes irrégulières, gouttelettes ou chaînes emmêlées qui constituent une viscosité élevée car ayant une forte résistance à l'écoulement. Soumis à une contrainte, l'écoulement s'accélère, les particules s'orientent, les chaînes se démêlent parallèlement à la force d'entraînement et opposent ainsi une résistance plus faible. La viscosité diminue ^[4].

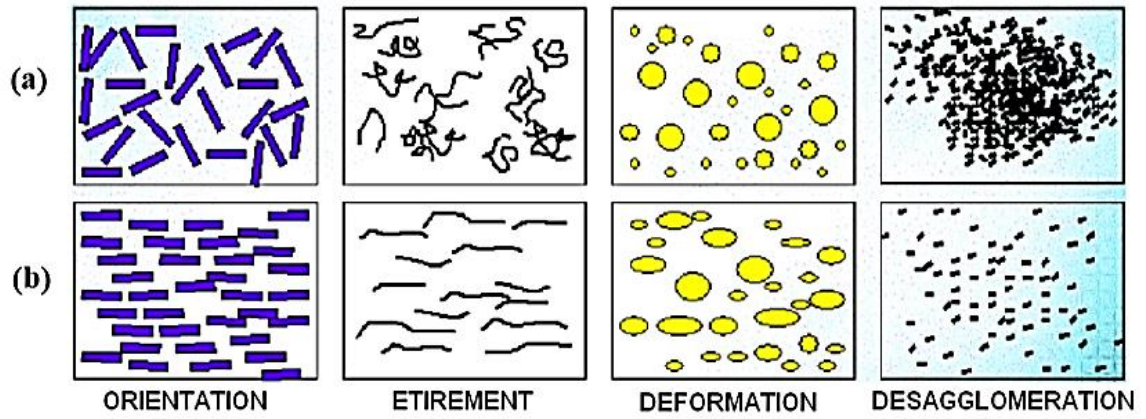


Figure (1.9) : Schéma de la matière en solution (a) avant et (b) après cisaillement.

CHAPITRE II : LA FRACTURATION HYDRAULIQUE

2.1 Introduction :

Le gaz naturel représente une source d'énergie sûre, abondante et économique pour la planète. On y a recours depuis de nombreuses années déjà, il est également une source énergétique fiable pour la production électrique.

Autrefois, les efforts de l'industrie pétrolière et gazière étaient axés sur l'exploration et le développement des gisements de gaz naturel de type classique. Plus récemment, avec l'épuisement de ces ressources, l'accent est plutôt mis sur la mise en valeur des ressources de gaz non conventionnelles. Le gaz naturel provenant de ces nouvelles sources n'est pas distinguable du gaz naturel classique, mais son exploitation s'avère plus coûteuse et exige le recours à des technologies spéciales conçues pour faciliter la production du gaz.

La fracturation hydraulique est une des principales technologies mise au point en vue de rentabiliser la production du gaz provenant de ces réservoirs ^[23].

2.2 La production des hydrocarbures non conventionnels :

Depuis quelques années, le développement de la production d'hydrocarbures de roche-mère (pétrole et gaz de schiste) a considérablement modifié le paysage énergétique des USA.

Les hydrocarbures de roche-mère sont les hydrocarbures liquides ou gazeux qui sont restés piégés dans la couche argileuse, riche en matière organique (la roche-mère), où ils se sont formés par augmentation de pression et de température au cours de leur enfouissement durant les temps géologiques. Une partie des hydrocarbures formés dans la roche-mère est expulsée, et, si les conditions géologiques sont favorables, iront former des gisements conventionnels. La partie restante constitue les hydrocarbures de roche-mère. Ce sont donc des hydrocarbures dont le mode de formation et la composition chimique sont identiques aux hydrocarbures conventionnels mais ils sont contenus dans une roche très peu poreuse et quasiment imperméable rendant impossible leur production par des méthodes classiques. Ils sont donc classés parmi la grande famille des hydrocarbures non conventionnels au même titre que les sables bitumineux du Canada et les huiles lourdes et extra-lourde du Venezuela.

La production de ces hydrocarbures fait massivement appel à deux techniques déjà couramment employées dans le monde pétrolier : le forage horizontal et la fracturation hydraulique. Le forage horizontal et la fracturation hydraulique [24].

2.2.1 La porosité :

La porosité est une grandeur macroscopique qui permet de quantifier le volume non occupé par le solide. Numériquement, la porosité totale n est définie comme le rapport entre le volume total des vides V_v et V_t le volume total du volume élémentaire représentatif [25] :

$$n = V_v/V_t$$

Exprimée en pourcentage (%), on dit souvent que la porosité est :

- Faible si $n < 5\%$;
- Médiocre si $5\% < n < 10\%$;
- Moyenne si $10\% < n < 20\%$;
- Bonne si $20\% < n < 30\%$;
- Excellente si $n > 30\%$ [26].

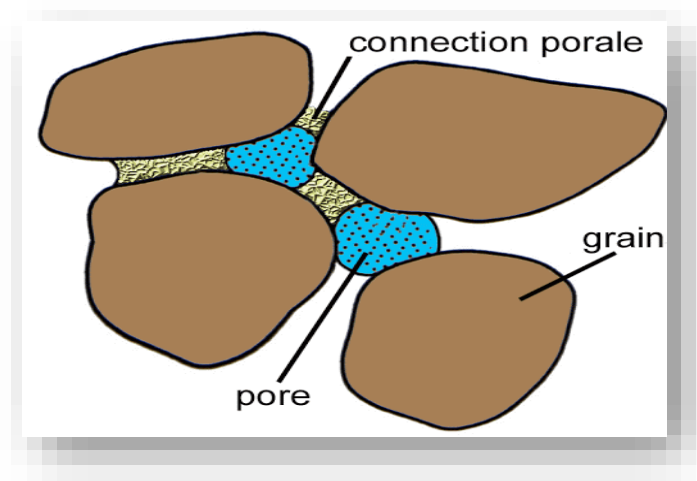


Figure (2.1) : schéma de la porosité.

2.2.2 La perméabilité :

La perméabilité est une caractéristique physique qui représente la facilité qu'a un matériau à permettre le transfert de fluide à travers un réseau connecté. La Loi de Darcy permet de relier un débit à un gradient de pression appliqué au fluide grâce à un paramètre caractéristique du milieu traversé : la perméabilité K .

$$Q/S = K/\eta \cdot \Delta p/\Delta x$$

La perméabilité K est donc :

$$K = Q/S \cdot \Delta p/\Delta x \cdot \eta$$

- Q C'est le débit,
- S Est la section de l'éprouvette,
- η Est la viscosité dynamique du fluide,
- $\Delta p/\Delta x$ C'est le gradient de pression. ^[27].

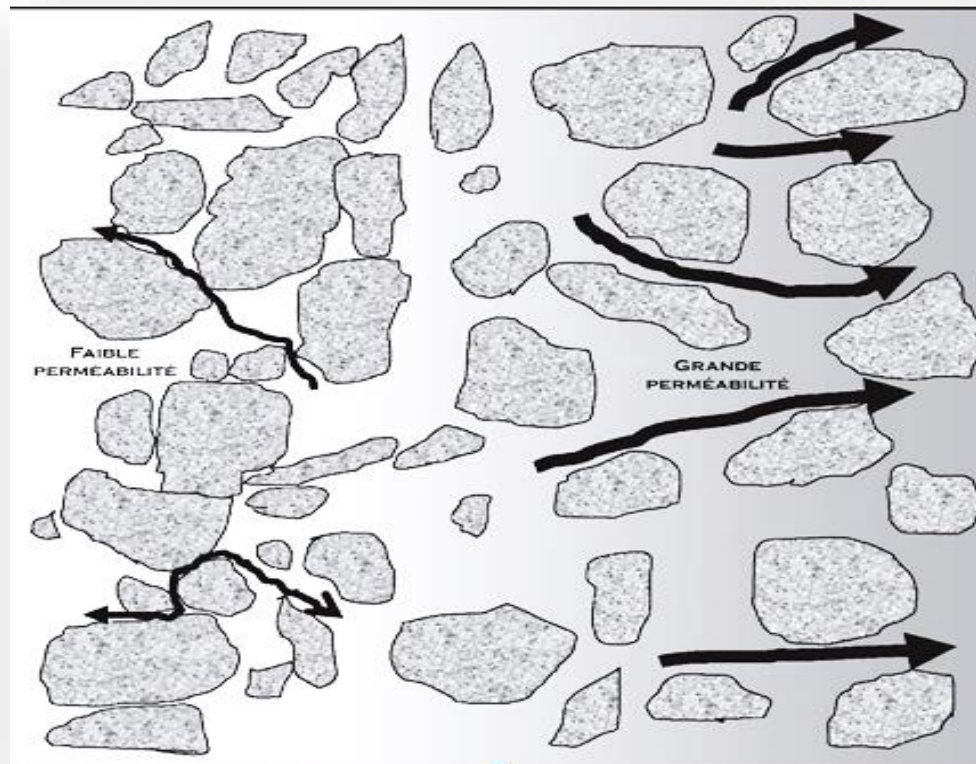


Figure (2.2) : zones de forte et de faible perméabilité d'une roche réservoir.

2.2.3 Roche mère :

Une roche mère (généralement argileuse ou carbonatée) est un sédiment renfermant un certain pourcentage en matière organique (de 0.5% à 6%) et ayant généré ou étant en mesure de générer des quantités appréciables d'huile ou de gaz.

Une roche mère est caractérisée par son taux de carbone organique total traduisant sa richesse en matière organique ^[28].

2.2.4 Gaz de schiste :

Le gaz de schiste fait partie des gaz non conventionnels, il est contenu dans des couches sédimentaire très riche en matière organique, dont la minéralogie est principalement argileuse, avec des quartzs et des carbonates qui est rendent friables et leur donne l'apparence de schiste ^[29].

2.3 La fracturation hydraulique :

La fracturation hydraulique est une technique utilisée pour l'extraction du pétrole et du gaz naturel. Elle permet de libérer de certaines formations géologiques des ressources qui seraient sinon irrécupérables.

La technique consiste à injecter sous haute pression dans le sol un mélange d'eau et additifs afin de créer des micros fractures dans la roche. Les hydrocarbures peuvent alors s'écouler par ces fractures jusqu'à un puits de forage ^[30].

2.4 Le fonctionnement technique :

Le processus de fracturation hydraulique comporte quelques étapes supplémentaires à l'extraction de ressources conventionnelles. La phase de forage est néanmoins semblable.

✓ Création d'un bassin de décantation :

Il est creusé près de l'emplacement de forage et recouvert d'un plastique afin d'éviter toute contamination potentielle du sol. Toutes les boues, roches et terres extraites pendant le

forage du puits seront stockées dans le bassin de décantation pour éviter toute contamination du sol et de la nappe phréatique.

Il est creusé près de l'emplacement de forage et recouvert d'un plastique afin d'éviter toute contamination potentielle du sol. Toutes les boues, roches et terres extraites pendant le forage du puits seront stockées dans le bassin de décantation pour éviter toute contamination du sol et de la nappe phréatique.

✓ **Fissuration des roches :**

Des explosifs sont utilisés pour permettre la relation tubes de forage/ressource. Les fissures sont maintenues ouvertes par les grains de sable mélangés au fluide de stimulation hydraulique et permettent au gaz naturel de s'échapper de la roche étanche vers la surface, en remontant le long du puits.

✓ **Décapage des tubes :**

De l'acide chlorhydrique est injecté (5 à 33 tonnes) pour décapier les tubages ^[29].

✓ **Ouvertures des fractures et remontée du gaz :**

Le liquide de fracturation est injecté à une pression de 400 à 700 bars (selon la nature des roches), agrandit les microfissures du schiste. Le sable pénètre dans les interstices et les empêche de se refermer, les adjuvants présents dans le fluide de stimulation visent à réduire le frottement et à protéger la formation rocheuse, renforçant ainsi la sécurité et l'efficacité de la stimulation hydraulique. Le liquide de fracturation se compose d'eau (10 000 à 20 000 m³), de sable (800 à 1000 m³) et de produits chimiques (environ 200 tonnes) dont la composition réelle et le nombre n'est généralement pas communiqué par l'exploitant sous couvert du secret professionnel.

La fracturation se faisait par étape de 200 mètres en 200 mètres, nécessitant à chaque fois de réinjecter de l'eau et du liquide de fracturation. Le gaz migre dans le conduit et remonte à la surface pour être stocké.

✓ **La phase d'exploitation :**

En surface, les hydrocarbures sont séparés de l'eau qui remonte avec eux, puis traités, s'ils contiennent des impuretés, et enfin transportés.

Dans les zones où l'exploration pétrolière est active, des infrastructures de transport existent auxquelles on peut se rattacher

✓ **Le stockage :**

Des camions captent le gaz et l'amènent en usine de traitement. L'eau de retour (entre 8 et 50%) décante dans des bassins de stockage avant d'être réinjectée ou traitée en usine.

✓ **La fin d'exploitation :**

Le forage est refermé par des bouchons de ciment de 50 à 100 mètres à différents niveaux^[29].

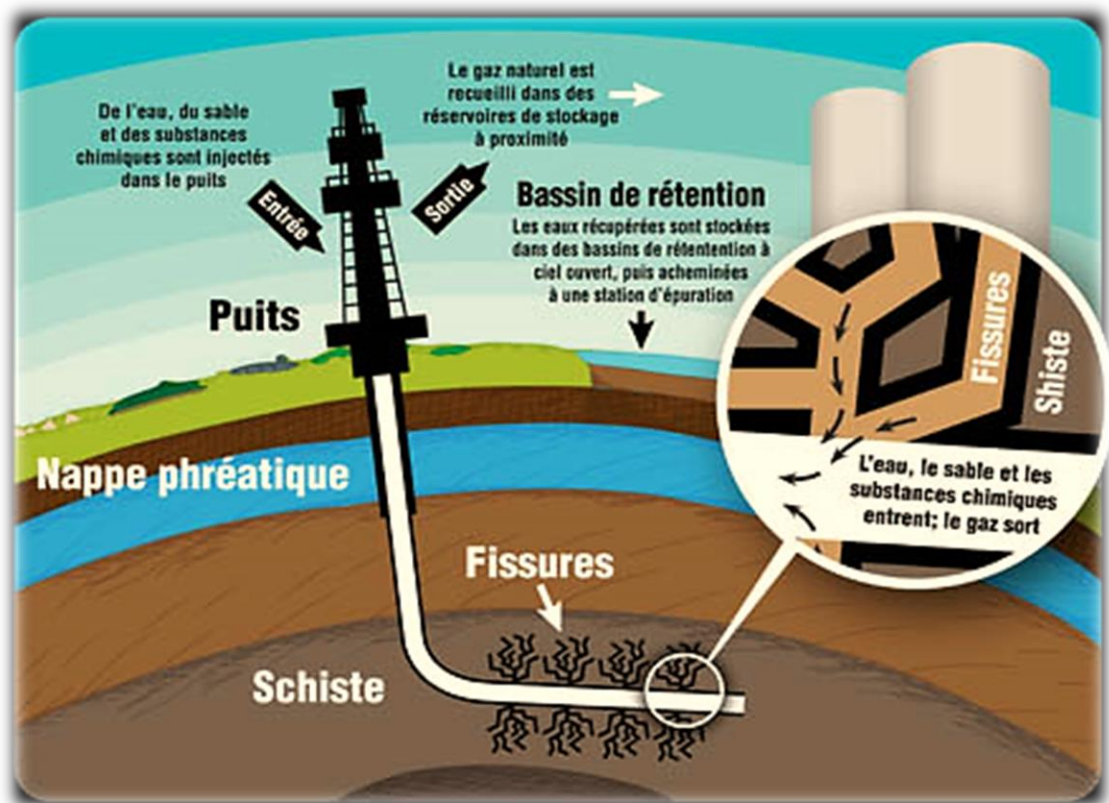


Figure (2.3) : schéma descriptif de la fracturation hydraulique

2.5 Composition du fluide hydraulique :

Comme évoqué précédemment, lors de la fracturation hydraulique, un mélange d'eau (95 %), de sable (5 %) et de produits chimiques (inférieur à 0,2 %) est injecté afin de fracturer la roche, puis d'empêcher les fractures de se refermer, et de permettre au gaz de s'écouler dans le puits. L'ajout de produits chimiques a pour objectif d'améliorer l'efficacité de la fracturation et, par là même, la rentabilité du puits^[31].

2.5.1 Fluide de base :

Le choix du type de fluide de fracturation se fait en fonction des propriétés du réservoir. Généralement on utilise les fluides à base d'eau, certains réservoirs contiennent de l'argile sensible à l'eau et on utilise d'autres types de fluides tels que des gaz (le dioxyde de carbone, l'azote, le propane) et des fluides à base de pétrole.

L'eau est le fluide le plus utilisé en raison du fait qu'elle est peu coûteuse et abondante.

Lors d'opération de fracturation au moyen de fluides à base d'eau, on procède aux principaux essais de la compatibilité de l'eau avant d'entreprendre le procédé de fracturation [32]

2.5.2 Les additifs chimiques :

Dans le procédé de fracturation hydraulique, des additifs chimiques sont introduits pour des fins diverses à différents moments tout au long du procédé d'extraction. Ils ne représentent que 0,1 à 0,5 % de la proportion totale du fluide de fracturation hydraulique.

Les additifs sont appliqués afin d'adapter le matériau injecté à la composition géologique spécifique du réservoir, protéger le puits et améliorer le fonctionnement qui variera en fonction du type de puits. En effet, il est probable que la composition du fluide injecté soit modifiée au cours d'un projet de fracturation.

Les additifs utilisés dans les opérations de fracturation hydraulique sont destinés à des usages spécifiques, comme les biocides pour contrôler les microorganismes, les inhibiteurs de corrosion pour empêcher la corrosion de la tuyauterie, les agents de viscosité pour le transport, les gélifiants pour améliorer le positionnement du proppants et réduire la pression de traitement et les acides pour aider à éliminer les dommages causés par l'accumulation de boue de forage [33].

Tableau (2.1): Fonction et proportion des additifs chimiques utilisés dans les fluides de fracturation.

Additifs	Principaux composés	Fonction	Proportion (Volume en %)
Acides Dissolvants	Acide chlorhydrique Acide muriatique	Dissoudre les Minéraux et les métaux. Fissurer la roche.	0.123%
Réducteurs de Friction	Polyacrylamide Huiles minérales	Réduire la friction entre le fluide et la tuyauterie.	0.088%
Agents Gélifiants	Bentonite Gomme de Guar	Epaissir l'eau pour mieux garder le proppant en suspension.	0.056%
Inhibiteurs de Dépôts	Ethylène-glycol Propylène-glycol	Protéger des dépôts sur les parois des conduites.	0.043%
Agents des tenues Des gels	Persulfate de sodium Hémicellulose	Permettre une rupture retardée des chaînes de polymères en gel.	0.01%
Agent de Réticulation	Perborate de sodium Anhydride acétique Borates	Maintenir la viscosité du fluide en cas d'augmentation de la température.	0.007%
Inhibiteurs de Corrosion	Diméthyleformamie Alcool propargylique	Protéger la tuyauterie de la corrosion.	0.002%
Biocides	Glutaraldéhyde Dibromoacétonitrile	Éliminer les bactéries qui produisent des éléments corrosifs.	0.001%

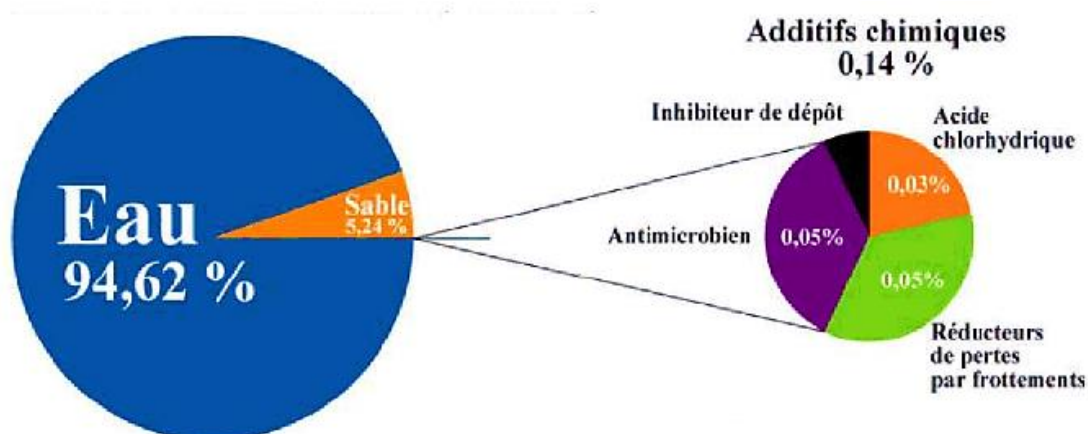


Figure (2.4): les additifs chimiques dans la fracturation hydraulique

2.5.3 Agents de soutènements (proppants) :

Les agents de soutènement sont simplement des matériaux de type sable de silice, sable enrobé de résine, ou des particules de céramique manufacturées, qui sont employés pour maintenir les fractures de la formation ouverte afin de favoriser le flux et l'extraction éventuelle des hydrocarbures. Aussi simple que puissent paraître les agents de soutènement, la quantité exprimée en proppant utilisée dans l'industrie a décuplé depuis l'an 2000. Dans certaines régions, il n'est pas rare de voir près de 2000 tonnes de proppants utilisés par puits, ce qui représente 5% du coût total du puits.

Les agents de soutènement utilisés doivent créer une perméabilité au gaz et au pétrole sous haute pression pour leur permettre de circuler jusqu'au puits de forage. Par conséquent, l'espace interstitiel entre les particules de proppant doit être suffisamment important et avoir une bonne résistance aux contraintes de fermeture afin de maintenir les fractures ouvertes après le retrait de la pression de fracturation ^[33].

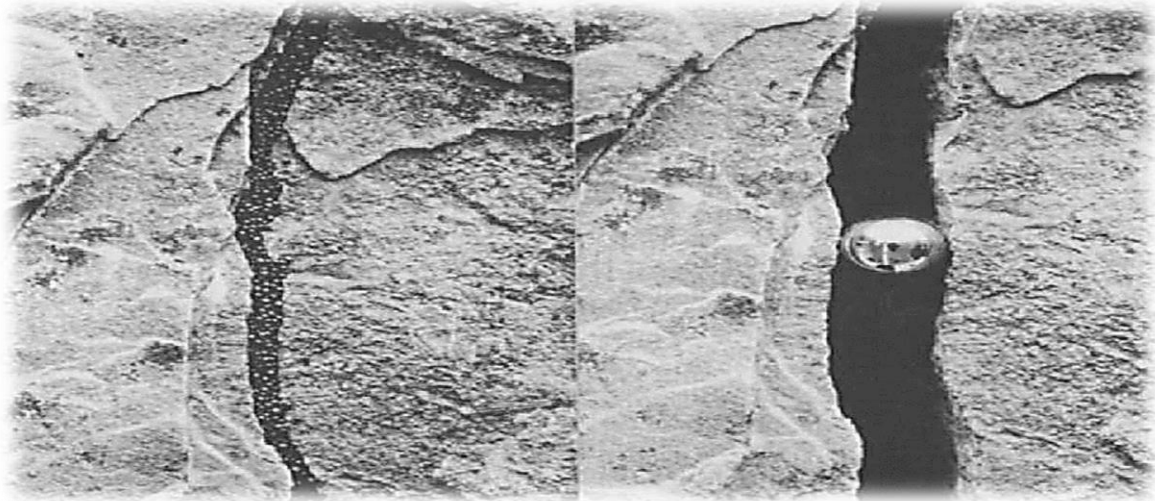
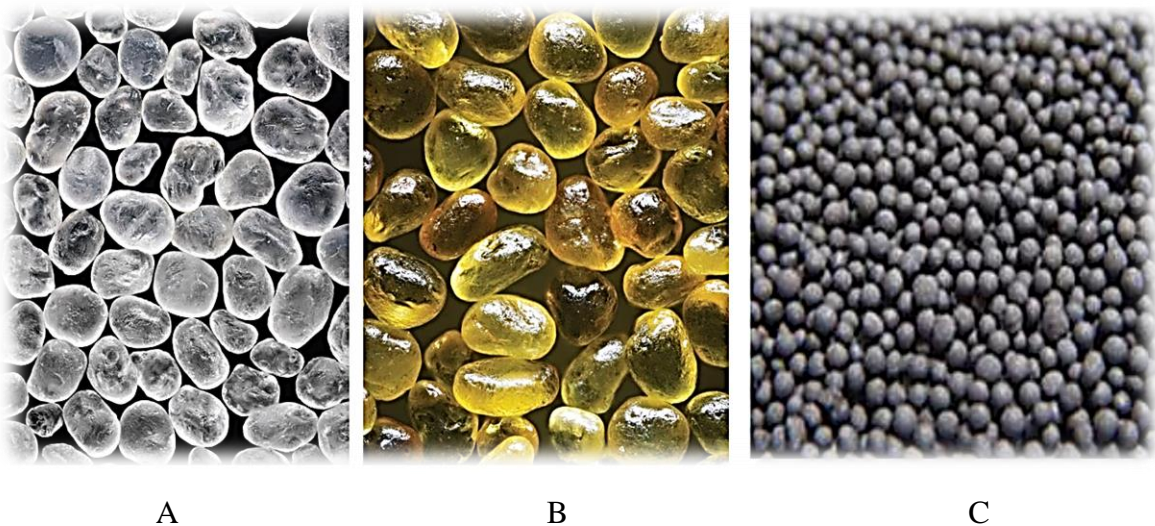


Figure (2.5) : *maintien des fractures rocheuses ouvertes par remplissage d'agent de soutènement.*

2.5.4 Types d'agents de soutènements :

Il existe trois types d'agents de soutènement utilisés dans les opérations de fracturation hydraulique qui assurent à plus de 99% l'approvisionnement global en agents proppant ; le sable naturel, le sable enrobé de résine, et les agents en céramique^[33].



A

B

C

Figure (2.6) : *types d'agents de soutènements.*

- **A** est le sable naturel,
- **B** est sable enrobé de résine,
- **C** sont les billes de céramiques.

Polymères utilisés comme agents de soutènements :

✓ Résines d'enrobages :

Des polymères (résine par exemple) peuvent être appliqués afin d'améliorer la résistance de l'agent de soutènement et agir comme une colle pour maintenir ensemble certains grains enrobés, brisés sous l'effet de la contrainte de fermeture, pour prévenir non seulement les fines particules produites d'obstruer le passage des fluides, mais aussi pour les empêcher de refluer à la surface pendant l'opération de fracturation.

Les résines les plus couramment utilisées pour revêtir les agents de soutènement sont les résines époxy, les furanes, les polyesters, les esters vinyliques et les polyuréthanes [33].

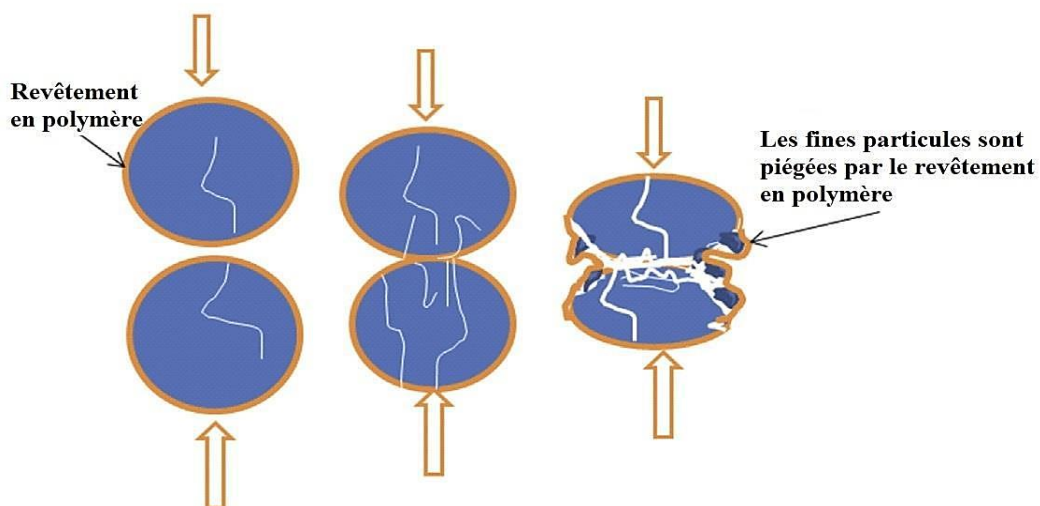


Figure (2.7) : Encapsulation des fragments de proppant enrobés de résine.

2.5.5 Injection des polymères :

L'injection de polymère peut améliorer l'efficacité du balayage de deux façons. D'une part, l'incrément de la viscosité améliore le rapport de mobilités entre le fluide déplacé et le fluide déplaçant (polymère), en réduisant l'effet de digitations. D'autre part du point de vue microscopique, on réduit la saturation résiduelle car le nombre capillaire est augmenté.

L'injection d'une solution de polymère se fait à vitesse d'écoulement plus faible (augmentation de la viscosité) qui implique un temps de récupération économiquement un peu plus défavorable^[34].

□ **Sélection des polymères :**

Le choix d'un polymère se fait sur la base de son pouvoir viscosifiant, son coût et sa capacité à résister à différentes conditions physicochimiques et à l'attaque de différents agents chimiques externes.

Les polymères utilisés principalement pour augmenter la viscosité de la phase aqueuse sont des polymères synthétiques tels que les polyacrylamides et le Xanthane.

➤ **Le xanthane :**

Est un biopolymère obtenu par fermentation microbienne de *xanthomascampestris*, il s'agit d'un polysaccharide considéré comme un polyélectrolyte rigide. Cela limite sa capacité à adopter certaines configurations. Cette rigidité lui procure une résistance à la dégradation mécanique et le maintien de la viscosité dans les gisements même si la salinité est élevée.

➤ **Les Polyacrylamides :**

Sont des polymères synthétiques obtenus par polymérisation de l'acrylamide. Les polyacrylamides sont des polymères à chaîne flexible qui ont de hautes masses moléculaires, autour de $20 \cdot 10^6$ g/mol, qui donnent des solutions très visqueuses. Une fraction de l'acrylamide peut être hydrolysée pour produire de l'acide acrylique ce qui fait que sa viscosité diminue dans l'eau salée^[34].

CHAPITRE III : La Rhéométrie et le rhéomètre

3.1 Introduction :

Pour le transport et la manipulation des fluides on a besoin de connaître un certain nombre de leurs propriétés, essentiellement leurs propriétés rhéologiques. La détermination de ces propriétés relève d'une discipline qui appartient à la mécanique des fluides et qu'on appelle **rhéologie**. Cette discipline est connue comme étant l'étude de l'écoulement et de la déformation des fluides réels, sous l'effet de contraintes qui leur sont appliquées.

Pour accéder à ces propriétés, on fait appel à des techniques de mesures expérimentales qui relèvent de ce qui est appelée **rhéométrie**. Les appareils utilisés sont appelés **rhéomètres**. Un rhéomètre permet de mesurer les propriétés rhéologiques des fluides telles que la viscosité, l'indice d'écoulement, la consistance, la vitesse de cisaillement, etc. ^[35].

Dans cette partie du travail, notre description de la rhéométrie sera théorique et expérimentale à la fois. Notre modeste expérience au niveau du laboratoire de rhéologie du CRD de Boumerdes sera rapportée dans ce qui suivra.

3.2 La Rhéométrie :

Définition :

La rhéométrie désigne la technique expérimentale permettant de déterminer les propriétés rhéologiques des matériaux (viscosité, l'indice d'écoulement, etc.).

Un certain nombre de tests rhéométriques peuvent être effectués pour déterminer les propriétés d'écoulement et de viscoélasticité d'un matériau. Ils dépendent en grande partie du type de rhéomètre utilisé et de ses capacités ^[35].

3.3 Le rhéomètre :

3.3.1 Définition :

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 simple 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. Les mesures qu'il donne peuvent être comparées avec celles obtenues par d'autres techniques [35].

3.3.2 Rhéomètre Kinexus :

Présentation générale :

En janvier 2009 est arrivé au laboratoire dans sa première version utilisable un nouveau rhéomètre, le Kinexus du constructeur Malvern. Ce nouvel appareil permet d'allier la rhéométrie conventionnelle (rotation autour de l'axe vertical et mesure du couple) aux techniques de traction/compression (déplacement vertical et mesure de la force normale) développées précédemment. On peut ainsi obtenir un nouveau type d'écoulement en écrasant le fluide tout en le faisant tourner comme dans un rhéomètre plan/plan classique. En superposant les deux écoulements, on peut générer des écoulements tridimensionnels variés. Nous pouvons, grâce à ce système complexe, non seulement interroger le comportement du fluide dans des géométries originales, mais aussi mesurer l'effet d'un écoulement sur un autre et ainsi d'avoir des informations sur la loi de comportement en trois dimensions.

Pour rendre cette superposition possible, le système complet de rotation (moteur, capteur et fixation de la géométrie supérieure) est mobile et peut monter et descendre le long des deux colonnes verticales, de la même manière que la platine de la machine de force. Le plateau supérieur bouge grâce à une vis dans une des colonnes et un encodeur permet de connaître sa position ^[36].



Figure (3.1): *le rhéomètre Kinexus de Malvern*

3.4 Classification des rhéomètres

Pour la caractérisation des propriétés rhéologiques des fluides, il existe une variété de rhéomètres nous distinguons trois grandes classes de rhéomètres :

1. Les rhéomètres à régime permanent, fonctionnant essentiellement comme viscosimètres pour déterminer les viscosités et les rhéomètres - de substances liquides.
2. Les rhéomètres à régime transitoire qui permettent l'étude des propriétés viscoélastiques des matériaux.

3. Enfin, les rhéomètres dynamiques fonctionnant en régime sinusoïdal et fournissant une description très complète des propriétés rhéologiques des substances ^[4].

3.4.1 Les rhéomètres à régime permanent :

Dans ces rhéomètres, la substance à étudié est soumise à un mouvement laminaire indépendant du temps : les différentes couches s'écoulent sans que vitesse et contrainte de cisaillement subissent aucune modification au cours du temps. Ils sont utilisés à l'étude seule des substances possédant le comportement liquide, capables par conséquent de suivre un processus d'écoulement permanent, l'objectif expérimental recherché étant la détermination de leur rhéogramme.

Dans cette catégorie, nous distinguerons essentiellement deux types de rhéomètres ^[4] :

a) Rhéomètres de type couette :

Dans ce genre de rhéomètre, l'écoulement est de type Couette. La substance est cisailée entre deux surfaces solides, l'une fixe, l'autre mobile. On distingue trois types :

➤ Les rhéomètres rotatifs à cylindres coaxiaux :

Le fluide se trouve en écoulement de cisaillement entre deux cylindres coaxiaux, l'un à l'arrêt, l'autre en mouvement de rotation (rotor). Le cylindre intérieur offre une grande surface de contact pour augmenter le couple résistant et donc la sensibilité de l'appareil. Cependant, l'inertie mécanique est élevée ce que limite la gamme de taux de cisaillement accessible.

Ce type est le plus utilisé, de très bonne précision, mais adapté uniquement aux fluides de faible viscosité car le volume d'échantillon nécessaire est important et cela est mal adapté aux fluides de forte viscosité, en plus du remplissage de la cellule de mesure qui peut être délicat, en particulier pour les fluides consistants ^[35].

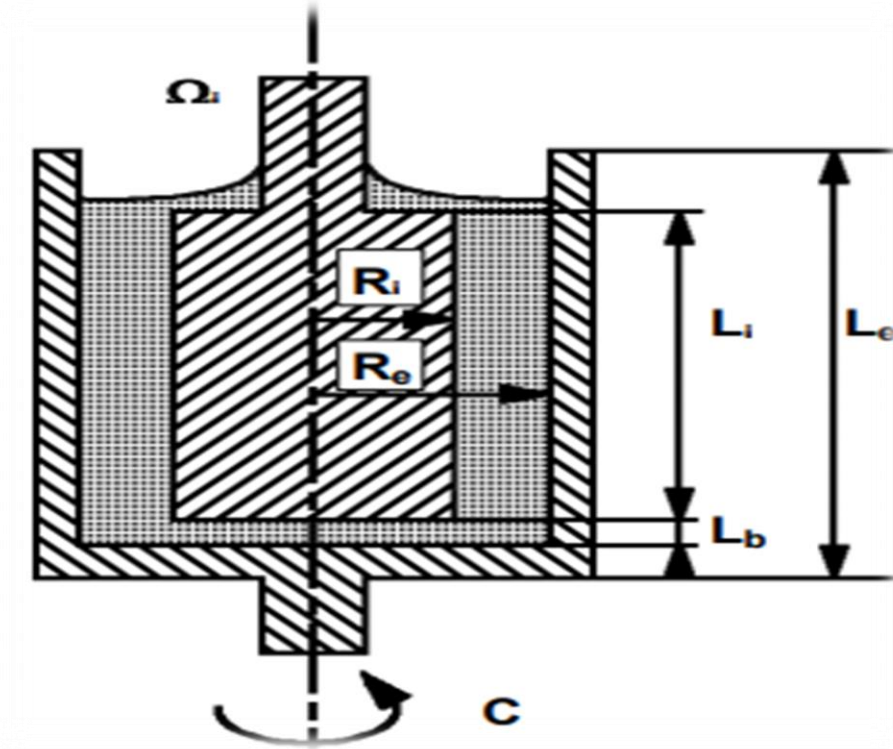


Figure (3.2) : présentation schématique du rhéomètre rotatif à cylindres coaxiaux.

➤ Les rhéomètres rotatifs cône-plan :

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

L'angle est très faible ($\leq 4^\circ$) pour obtenir un taux de cisaillement vertical constant dans le volume de mesure^[35].

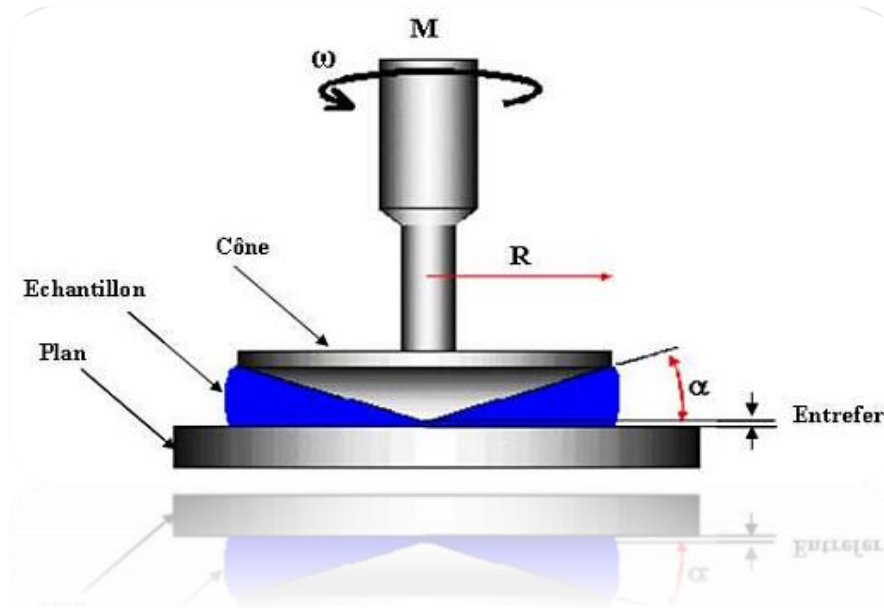


Figure (3.3) : présentation schématique sur les rhéomètres rotatifs cône-plan.

➤ Les rhéomètres rotatifs plan-plan :

Dans cette géométrie, le fluide est cisailé entre deux plans parallèles caractérisés par leur rayon R et l'entrefer h entre ces deux plans. L'un des plans est à l'arrêt, l'autre est en rotation à la vitesse angulaire.

Cette géométrie est mieux adaptée pour les suspensions^[35].

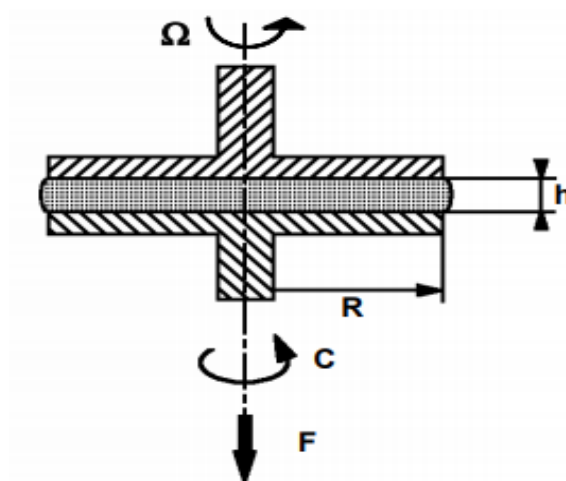


Figure (3.4) : les caractéristiques de la géométrie plan-plan.

b) Les rhéomètres de type poiseuille :

Dans ce genre de rhéomètre, l'écoulement est de type Poiseuille. Il s'agit essentiellement de viscosimètre (mesure de viscosité) ^[35].

3.4.2 Les rhéomètres à régime transitoire :

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires, aussi bien solide que liquide. Dans tels rhéomètres, on soumet l'échantillon à une sollicitation instantanée, qui est maintenue constante, et l'on étudie son comportement dans les instants qui suivent. Pendant un certain intervalle de temps qui précède l'établissement d'un régime permanent, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps : l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

Il existe deux types de rhéomètres transitoires : les rhéomètres à fluage et les rhéomètres à relaxation ^[4].

3.4.3 Les rhéomètres dynamiques (oscillants) :

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitudes variant sinusoïdalement dans le temps ;

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

- Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquence ou à une seule fréquence particulière (rhéomètre résonants) ;
- Les rhéomètres à oscillations libres qui permettent de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement ^[4].

Discussions et interprétations :

Nous avons eu la chance d'observer et de réaliser des essais de rhéologie en utilisant le rhéomètre Kinexus Malvern.

Tout d'abord, nous avons réalisé un test sur, sur une solution à base du xanthane pur à température ambiante. Cet essai nous ont permis de tracer une courbe de contrainte de cisaillement en fonctions du taux de cisaillement. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 3.5.

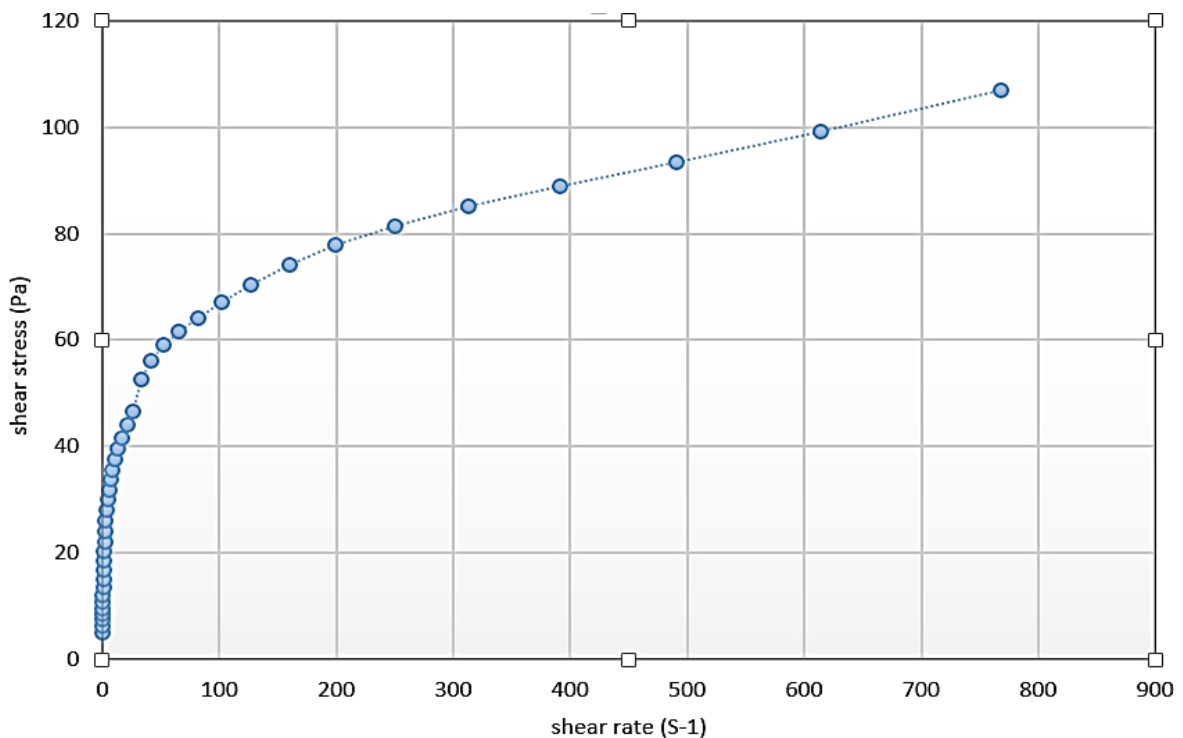


Figure (3.5) : *Rhéogramme de solution de gomme de xanthane.*

La figure (3.5), montre un écoulement non-newtonien selon une allure superposable avec le modèle proposé par HERSHEY BULKLEY. Le Xanthane est un fluide pseudoplastique qui présente donc un seuil de contrainte de cisaillement à partir de laquelle l'écoulement démarre. Ce genre d'écoulement apparaît généralement dans des suspensions concentrées de particules solides dans un solvant. Ces particules s'organisent, au repos, en une microstructure qui confère à la suspension un comportement de solide, puis, quand la microstructure est suffisamment désorganisée, la suspension à un comportement fluide.

Après la caractérisation rhéologique du xanthane, nous sommes passés à la préparation d'une solution aqueuse contenant 1% de xanthane et 3% d'un agent réticulant (crosslinker). Cette formulation était proposée par l'opérateur du CRD afin de suivre son comportement rhéologique et par la suite optimisé la formule pour une application dans le domaine de la fracturation hydraulique des roches. Malheureusement nous n'avons pas pu réaliser la partie optimisation et application.

Le test de viscoélasticité de la solution préparée à base du xanthane est fait à température ambiante ($T=25^{\circ}$) à une fréquence de 1Hz et les résultats obtenus sont représentés dans la figure 3.6.

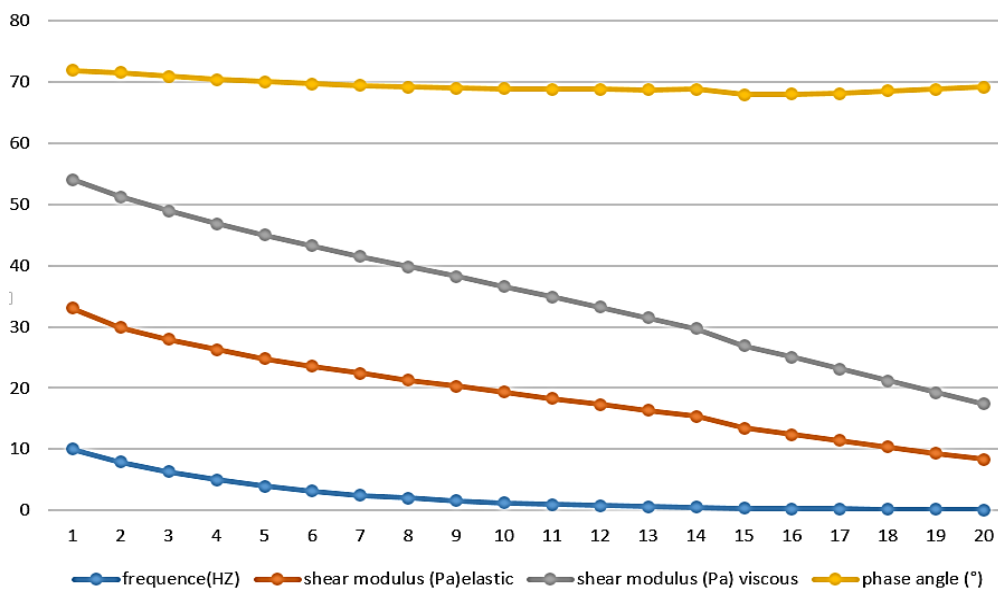


Figure (3.6) : *comportement viscoélastique de la solution (xanthane et crosslinker).*

Selon la figure (3.6), qui montre les propriétés rhéologiques de la solution, les deux modules G' (élastique) et G'' (visqueux) sont peu dépendant de la fréquence et G' est supérieur à G'' , ce qui signifie que nous sommes en présence d'un comportement rhéologique typique d'un gel. A l'échelle moléculaire, la formation du gel est synonyme de la formation d'un réseau tridimensionnel suite à des interactions intermoléculaires provoqué par l'agent réticulant.

Il faut noter que le xanthane est capable d'adopter en solution aqueuse une nouvelle conformation qui se caractérise par des propriétés rhéologiques différentes. Il possède un pouvoir épaississant élevé même de faible concentration ainsi qu'un

caractère fortement rhéofluidifiant, ce qui explique ses nombreuses applications industrielles en tant qu'un agent de contrôle de la viscosité dans les systèmes aqueux.

Conclusion générale :

Au cours de ce travail consacré à l'étude des polymères dans les fluides de fracturation hydraulique et, malheureusement, qui n'a pas abouti à une étude expérimentale concrète suite à la crise sanitaire mondiale Covid19, nous avons préparé un manuscrit en conséquence contenant :

Une étude théorique détaillée sur le comportement rhéologique des polymères en tenant compte des différents modèles rhéologiques existant ainsi que les équations mathématiques correspondants ;

Une vaste explication sur le domaine de la fracturation hydraulique des roches. Ce domaine de la recherche pétrolière implique les polymères comme un composant indispensable dans les solutions fluides de fracturation, ce qui impose aux polyméristes de développer des études plus profondes pour la compréhension de tous les paramètres influençant le rendement de l'opération.

Et enfin, une modeste présentation de notre expérience au sein du laboratoire de rhéologie du CRD de Boumerdes qui consiste en un apprentissage des bases de la rhéométrie et la manipulation des solutions polymériques dans le domaine de la fracturation hydraulique des roches.

Références bibliographiques

- [1] **K. BENYAHIA** « Contrôle Non destructif et Propriétés Rhéologiques Des Matériaux Diélectriques Mous », mémoire de magistère en électrotechniques, université de Batna.
- [2] **M. REBIHA, I. BOULHAYA** « Effet de sel monovalent (Na Cl) sur le comportement rhéologique des solutions de xanthane en système dilué », mémoire de fin.
- [3] **T. DJOUDI** « études de l'écoulement du polymère fondu dans les moules résolution par la méthode des volumes finis », mémoire de fin d'étude de l'université Mohamed Khider de Biskra, 2005.
- [4] **K. FOURAR** « Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymère : application aux puits horizontaux », mémoire de magistère université M'Hamed Bougara Boumerdes 2007.
- [5] **G. COUARRAZE, G. JEAN-LOUIS, H. NICOLAS** « Initiation à la rhéologie » ,4^oéd, Paris 1944.
- [6] **N. BOUDRAHEM** « Analyse du comportement hydrodynamique global de particule fluidisés par un fluide non newtonien », mémoire de magistère, université de Bejaïa 2011.
- [7] **F. SPRINGINSFELD** « Mécanisme de gélification et comportement rhéologique d'émulsions d'alcane partiellement cristallisés ». Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie-Curie (2009).
- [8] **A. BENSLIMANE** « rhéologie et écoulement de fluide chargés : application au réseau d'assainissement urbains : étude expérimentale et modélisation. Université Strasbourg, 2012.
- [9] **K. BENAZOUZ** « relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersion de particules d'argile dans des dispersions de polymères », thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, 2010.
- [10] **E. GUAZZELLI** « rhéologie des fluides complexes », école d'ingénieur de Paris.
- [11] **K. CHALAH** « influence de l'ajout des polymères (PAC, HEC) de la température sur le comportement rhéologique et les propriétés électrocinétiques des fluides de forage à base d'eau », thèse de magister de l'université de M'Hamed Bougara Boumerdes, 2012.
- [12] **R. RIGAL** « comportement de fluide complexes sous écoulement : approche expérimentale par résonance magnétique nucléaire et techniques optiques et simulations numériques », thèse de doctorat de l'institut national polytechniques de lorraine, paris, 2012
- [13] **S. BOUADJELA** «Etude des mélanges de polymère et de solvant nématiques », thèse de magister de l'université Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2011.
- [14] **P. WISS** société francophone de biomatériaux dentaires, université médicale virtuelle francophone, France, 2009/2010.

- [15] **F. BENYOUB** « élaboration et caractérisation d'un réseau de polymère à base de polystyrène de différentes architectures », thèse de magister de l'université de Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2009.
- [16] **N. KAL** « étude expérimentale de comportement mécanique de PMMA à l'état vierge et après vieillissement par UV », mémoire de master, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2014.
- [17] **W. GHORZI** « étude de la diffusion des molécules de bas poids moléculaire dans des réseaux de polymères acryliques », mémoire de licence de l'université d'Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2012.
- [18] **M. ROBERT PELLETIER** « formation professionnaliste : ingénieurs procédés en raffinage et pétrochimie, production de polymères de commodité/ de gaz de synthèse » centre IAP de Hassi Messoud, 2015.
- [19] **C. DALLE FERRIER** « transition vitreuse et hétérogénéités dynamiques dans les liquides moléculaires et les polymères », thèse de doctorat de l'université de paris-sud, 2009.
- [20] **Y. CHAOU** « comportement mécanique en traction monotone d'un polymère associé à la poudre de fer pur », mémoire fin d'études de l'université de Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [21] **P. JEAN, Z. GERALD, K. WILFRIED** « Introduction à la science des matériaux », 3eme édition, université Romande, Genève, 1999.
- [22] **J. MORJEON** « récupération assistée du pétrole par injection de polymères hydrosolubles », thèse de doctorat de l'université de bordeaux, 2017.
- [23] **N. BARRAU**, « introduction à la fracturation hydraulique ». *Affiliation CS*, janvier 2016, p.4.
- [24] **R. VIALLY**, « hydrocarbures de roche mère ». *IFP énergies nouvelles*, p.5.
- [25] **C. COLL**, « endommagement des roches argileuses et perméabilité induite au voisinage d'ouvrages souterrains » thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier Grenoble, 2005.
- [26] **O. MOUHOUS**, « simulation numérique d'un écoulement eau-huile dans un milieu poreux » mémoire master de l'université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2016.
- [27] **G. YVES**, perméabilité des roches et loi de darcy » *Planète terre éducol ENS de Lyon*, 23 mars 2000.
- [28] **T. FERHI, M. ZELBAH**, « étude géochimique des huiles et des extraits du bassin d'OUED MYA » mémoire master de l'université USTHB, 2019.
- [29] **W. ATTOUM. S. LOUATI**, « fracturation hydraulique dans l'industrie gazière : analyse et critique » mémoire master de l'université Abou Bekr BELKAID Tlemcen, 2013.
- [30] **C. WOOD**, « fracturation hydraulique » *l'encyclopédie canadienne*, 2015.
- [31] **N. BENCHOUIA, E. SEROUANDA, N. SEBBAG**, « exploitation du gaz de schiste en Algérie : impacts environnementaux et sociaux » de l'université 20 août 1955 Skikda.

[32]**A.BOUBEKRI, S.MAHAMAT HABIB**, description de la technique de fracturation conventionnelle et de fracturation Hiway» mémoire master de l'université KasdiMerbah Ouargla, 2013.

[33]**A.KAMEL**, « analyses des impacts environnementaux des fluides utilisés dans la fracturation hydraulique» thèse de doctorat de l'université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2019.

[34]**J.JUAREZ MOREJON**, «récupération assisté du pétrole par injection de polymère hydrosoluble : nouvelle approche» thèse de doctorat de l'université de bordeaux, 2017.

[35]**N.ELAHACENE**, «essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel RHE03000» mémoire master de l'université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem ,2019.

[36]**Q.BARRAL**, «superposition d'écoulements orthogonaux dans des fluides complexes : mise en place d'une expérience, application aux suspensions et aux fluide à seuil» thèse de doctorat de l'université Paris-Est, 2011.