

N° d'ordre/FT/2020

**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 de Génie des Procédés**

Mémoire

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de MASTRE

Spécialité : Génie des procédés

Option : Génie des polymères

THEME

*L'étude du comportement rhéologique sur un
pétrole brut Algérien (Tin Foué Tabankourt TFT)*

Réalisé par :

- M^{lle} SIDI ATHMANE Kenza
- M^{lle} HADDOUCHE Zahia

P^r. BENMOUNAH Abdelbaki Promoteur FT-UMBB

M^{me}. TRIAKI CHIRIFI Mounia Encadreur Sonatrach

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

Remerciements

À ALLAH, le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

À notre encadreur : Pr. BemounahAbed Albaki

Pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Recevez ici nos sincères remerciements pour votre confiance, vos conseils et votre aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Merci également pour votre disponibilité maximale vos encouragements et votre gentillesse.

À notre Co-encadreur : M^{me}. Triaki Mounia

Pour l'aide compétent qui vous nous apporter malgré vous énormes responsabilités pour votre patience, votre confiance et vos précieux conseils.

Nous tenons également à remercier l'ensemble de membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner et d'évaluer notre travail.

Département traitement et contrôle des fluides, Division Laboratoire (EX- CRD) de Boumerdes

Pour nous avoir permis d'effectuer cette étude au sein de votre service. Veuillez accepter, Professeur, nos sincères remerciements, notre profonde gratitude et notre respectueux dévouement.

Nous remercions tous les enseignants du département des génies procédés, et toutes personnes ayant contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

KENZA et ZAHIA

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail,

À mon père : Haddouche Noureddine رحمه الله

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien exemplaire et l'amour exceptionnel que vous me portez depuis mon enfance.

Vous avez toujours été le meilleur exemple à suivre. J'espère réaliser ce jour un de vos rêves et être digne de votre nom, votre éducation, votre confiance et vos hautes valeurs que vous m'avez inculqué.

À ma mère : Ikharbine Dahbia

Aucun mot ne saurait exprimer l'immense amour que je vous porte, et ma reconnaissance quant à votre soutien permanent. C'est à vous maman, que je dédie aujourd'hui le fruit de votre dévouement.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder cher maman santé, bonheur et une longue vie.

À mes chers frères et sœurs : Mohamed lamine, Kamel, Radia, Hasina, Rabia, Nadia

Vous étiez toujours présents pour m'encourager et me soutenir pendant toutes ces années d'étude.

Ces quelques lignes ne sauront exprimer tous les sentiments que je vous porte. Je vous souhaite tout le courage, la réussite et le plein de bonheur, et je ferai de mon mieux pour rester toujours à vos côtés.

Que Dieu vous protège.

A toute famille Haddouche.

À ma cher amie et binôme

Kenza pour tous les moments de joies et de peins qu'on a passé ensemble que je lui bon courage et une belle vie, ainsi qui à sa famille.

À tous mes amis

Sonia, Lina, Noura

A tous mes proches et à tous les étudiants de département

Polmére. A tous ceux qui sont proches de moi avec lesquelles j'ai partagé les

Meilleurs moments de ma vie.

Zahia

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail,

À mon père : SIDI ATMANE Amar رحمه الله

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien exemplaire et l'amour exceptionnel que vous me portez depuis mon enfance.

Vous avez toujours été le meilleur exemple à suivre. J'espère réaliser ce jour un de vos rêves et être digne de votre nom, votre éducation, votre confiance et vos hautes valeurs que vous m'avez inculqué.

À ma mère : Guizzi Bouchra

Aucun mot ne saurait exprimer l'immense amour que je vous porte, et ma reconnaissance quant à votre soutien permanent. C'est à vous maman, que je dédie aujourd'hui le fruit de votre dévouement.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder cher maman santé, bonheur et une longue vie.

À mes chers frères et sœurs : Maroua, Mohamed Alamine, et Abd Karim

Vous étiez toujours présents pour m'encourager et me soutenir pendant toutes ces années d'étude.

Ces quelques lignes ne sauront exprimer tous les sentiments que je vous porte. Je vous souhaite tout le courage, la réussite et le plein de bonheur, et je ferai de mon mieux pour rester toujours à vos côtés.

Que Dieu vous protège.

À Mon frère Fathi et sa femme Warda.

Et Abd Elkader et sa femme.

À Mon sœur Bahidja et sa mari Melki.

À mon oncle Nouri et sa femme Malika et pour leur support continu et leur amour.

À mon fiancé Abd Elrrazak et ma belle mère

Pour leurs encouragements, leur soutien et leur amour. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de santé.

À ma grand- mère et toute famille Sidi Athmane.

À mon cher amie et binôme

Zahia pour tous les moments de joies et de peins qu'on a passé ensemble que je lui bon courage et une belle vie, ainsi qui à sa famille.

À tous mes amis

Aicha, Imane, Noura, Razika, Hayat, sonya, Sabrina

A tous mes amis et mes proches et à tous les étudiants de département

Polmére. A tous ceux qui sont proches de moi avec lesquelles j'ai partagé les Meilleurs moments de ma vie.

Kenza

Remerciements	
Dédicace	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Resume	
Abstract	
ملخص	
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : Généralité sur le pétrole brut	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition du pétrole brut	3
I.3 L'origine du pétrole brut	3
I.4 Composition du pétrole brut	4
I.4.1 Les hydrocarbures paraffines (Alcanes)	5
I.4.2 Les oléfines (hydrocarbures aliphatiques insaturés ou alcènes)	5
I.4.3 Les naphtésènes (hydrocarbures cycliques saturés)	5
I.4.4 Les Hydrocarbures aromatiques	5
I.4.5 Composés oxygénés	6
I.4.6 Composés azotés	6
I.4.7 Composés chimiquement mal définis	6
• Les Asphaltées.....	6
• Les Résines	7
I.4.8 Substances minérales	7
I.5 Classification du pétrole	7
I.5.1 Selon leur teneur en classes d'hydrocarbures	7
I.5.2 Selon leur provenance	7
I.5.3 Selon leur gravite API	7
I.6 Principales propriétés physico-chimie de pétrole brut	8
I.6.1 Densité	8

I .6 .2 Viscosité	9
I .6 .3 point d'écoulement	9
CHAPITRE II : GENERALITE SUR LA RHEOLOGIE	
II .1 Introduction	10
II .2 Viscosité et comportement	10
II .2 .1 Etude du Comportement Rhéologie	10
II .2 .2 Définition de la Rhéologie	10
II .2 .3 Les types de Rhéologie	11
• Rhéologie expérimentale	11
• Rhéologie structure	11
• Rhéologie théorique	11
II .2 .4 Notion de Mouvement linéaire de cisaillement, contrainte de cisaillement	11
II .2 .4 .1 Mouvement linéaire	11
II .2 .4 .2 Contrainte de cisaillement	12
II .2 .5 Déformation et vitesse de cisaillement (shear strain and rate)	12
II .2 .5 .1 Déformation de cisaillement	13
II .2 .5 .2 Vitesse de cisaillement	13
II .2 .6 Modèle Mécanique	14
II .2 .6 .1 Solide élastique parfait.....	14
II .2 .6 .2 Liquide visqueux newtonien.....	15
II .2 .6 .3 Lois d'association en série et en parallèle.....	16
II .2 .6 .4 Solide de Kelvin-Voigt.....	18
II .2 .6 .5 Liquide de Maxwell.....	18
II .2 .7 Equation d'état, Rhéogramme.....	19
II .2 .7 .1 Equation d'état.....	19
II .2 .7 .2 Rhéogramme.....	19
II .2 La viscosité.....	20
II .2 .1 La viscosité dynamique.....	20
II .2 .2 La viscosité cinématique	21
II .3 La viscosité relative, spécifique, intrinsèque.....	21

II .4 Classification du comportement des fluides en écoulement.....	22
II .4 .1 Les fluides newtonien.....	22
II .4 .2 Les fluides non newtonien.....	22
II .4 .2 .1 Fluides indépendants du temps.....	23
II .4 .2 .1 .1 Fluides sans contrainte critique « loi d'Oswald 1925 »	23
II .4 .2 .1 .2 Fluides à contrainte critique « fluide viscoplastique »	25
II .4 .2 .2 Comportement dépendant du temps.....	26
 CAPITRE III : GENERALITES SUR LES EMULSION	
III .1 Généralité sur les émulsions	27
III .1 .1 Définition d'une émulsion	27
III .1 .2 Différentes types d'émulsions	28
III .1 .2 .1 Les émulsion simples	28
III .1 .2 .2 Les émulsion multiples.....	28
III .1 .2 .3 Les mixtes.....	28
III .1 .3 Composition.....	28
□ La phase lipophile.....	29
□ La phase hydrophile.....	29
III .2 Les émulsifiants.....	29
III .2 .1 Définition.....	29
III .2 .2 Effet d'émulsifiant.....	30
III .2 .3 Formation et rupture des gouttes.....	30
• Dispersion	30
• L'homogénéisation	30
III .3 Tensioactif et Tension superficielle.....	30
III .3 .1 Tension superficielle	30
III .3 .2 Tensioactif	31
III .3 .2 .1 Définition	31
III .3 .2 .2 Classification.....	31
A-Classement selon de charge.....	31

• Les Tensioactifs Anioniques.....	32
• Les Tensioactifs Cationiques.....	32
• Les Tensioactifs Zwitterioniques.....	32
• Les Tensioactifs non anioniques.....	32
B-Classement selon la balance HLB.....	32
III .3 .2 .3 Propriétés des Tensioactifs.....	33
III .3 .2 .3 .1 Adsorption aux interfaces	33
III .3 .2 .3 Micellisation	33
III .3 .3 Les additifs modificateurs de viscosité	34
• Additifs modificateurs de viscosité pour les émulsions a aquase (H/E)	34
• Additifs modificateurs de viscosité pour les émulsion huileuses (E/H)	34
• Polymère.....	34
III.3.4. Les choix des Tensioactifs.....	34
• Le HLB des Tensioactifs	35
• Le PH	35
• La Température	35
• L'efficacité du Tensioactif	35
• L'état physique du Tensioactif.....	35
III.3.5. Stabilité d'une émulsion	35
III .3 .5 .1 Sédimentation ou crémage.....	36
III .3 .5 .2 Flocculation.....	37
III .3 .5 .3 Coalescence.....	37
III .3 .5 .4 Mûrissement d'Ostwald	38
III .3 .5 .5 Inversion de phase.....	38
 CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE	
IV.1. L'objectif de l'étude.....	39
IV.2. Matériels et produits.....	39
IV.2.1. Matériels utilisés	39
IV.2.1.1. Rhéomètre.....	39
• Dispositifs expérimentaux « Rhéomètre AR 2000 »	39
• Les principales lois d'écoulement Rhéologiques utilisées pour décrire le comportement de tels fluides	40

IV.2.2. Les propriétés rhéologiques des produits	40
IV.2.2.1. Les propriétés rhéologiques du pétrole brut	40
IV.2.2.2. Toluène	41
IV.2.2.3. L'additif Quick flow X-2433.....	41
IV.2.3. Mode opératoire.....	42
• Expérience 1	42
• Expérience 2.....	42
IV.3. Résultats et discussion	43
Expérience 1.....	43
• L'effet de température sur le comportement rhéologique du pétrole brut.....	43
• Effet de polymère Quick flow X-2433 sur le comportement rhéologique du pétrole brut.....	45
Expérience 2	46
• Etude rhéologique du système : pétrole brut / toluène	46
• Effet du Toluène et de température sur la contrainte de cisaillement	47
• Effet du Toluène sur le seuil d'écoulement	48
• Effet de la température sur la viscosité du brut sans additif	49
• Effet de l'addition du surfactant sur la viscosité	50
Conclusion	50
Conclusion générale	52
Références bibliographique.....	54

Symboles Latins

τ : contrainte de cisaillement [Pa].

F : Force de cisaillement [N].

S : Surface de la couche [m²].

\mathcal{E} : Déformation de cisaillement [s⁻¹].

Du : La distance [m].

Dx : Distance séparant la particule de matière du plan solide inférieur [m].

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

Dt : La dérivée de temps [s].

$D\mathcal{E}$: La dérivée de déformation de cisaillement [s⁻¹].

$Dv(\mathbf{x}, t)$: La vitesse de la couche x à l'instant t [m/s].

J : Coefficient constante appelée complaisance élastique [Pa⁻¹] ou [m².N⁻¹] (SI).

G : Module de rigidité ou module de cisaillement [N/mm²].

η : Coefficient de viscosité dynamique

T : La température [°C].

t : Le temps [s].

P : La pression extérieurs [Pa].

μ : Viscosité dynamique [po] (CGS) ou [Pa.s] (SI).

V : La viscosité cinématique [m². s⁻¹] (SI) ou [cm².s⁻¹] (CGS).

ρ : La masse volumique [Kg/m³] (CGS).

μ_{Rel} : Viscosité relative [Pa.s].

μ_s : Viscosité spécifique [stokes] (SI).

C : La concentration de la solution de la phase dispersée [mol].

μ_i : Viscosité intrinsèque [cm³.g⁻¹].

K: Indice de consistance [Ps. S].

n :L'indice de structure (ou l'indice de l'écoulement).

τ_c :Contrainte critique [Pa].

HLB :Hydrophilic/ Lipophilic Balance

CMC: Concentration Micellaire Critique

H/E :Huile/Eau

TVR :Tension de Valeur Reid

BSw :Bottom Sediment and Water.

N :Newton

m² :Mètre

Pa :Pascal

SI :Système international

PI :Poiseuille

Po :La poise dans le système CGS

S :Second

St :stokes dans un système CGS

API: (American Petroleum Institute) [°].

D: Densité

g: Gramme

Mol: Mole

(°) :Degré

CP: Centpoise

Cm: Centimètre

Mm: Millimètre

Kg: kilogramme

Dynes: Unité de force (CGS) valant 10^5 N.

Lexique Anglais-Français

Shear Strain: Déformation de cisaillement

Shear rate: Gradient de cisaillement (vitesse de cisaillement)

Bottom Sediment and Water: La Teneur en eau

Listes des tableaux

Chapitre I : Généralité sur le pétrole brut

Tableau I .1 Structure de composés hydrocarbonés présentes dans les produits pétroliers.

Tableau I .2 Structure de composés azotés présents dans les produits pétroliers.

Chapitre III : Généralité sur les émulsions

Tableaux III .1 : Les différents types de colloïdes.

Tableaux III .2 : Phénomènes et causes de l'instabilité des émulsions.

Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableaux IV .1 : Principaux Modèles Rhéologique.

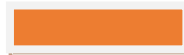
Tableaux IV .2 : Caractéristique du pétrole brut utilisé dans cette étude.

Tableaux IV .3 : Les propriétés de Toluène.

Tableaux IV : Caractéristique de Quick flow X-2433.

Tableaux IV .5 : Contrainte de cisaillement (Pa) du pétrole brut traité à un taux de cisaillement de 250 s^{-1} avec différents concentration de toluène.

Tableaux IV .6 : Evolution du seuil d'écoulement et de son taux de réduction en fonction de la température et de la concentration de toluène.



RESUME

Résumé

L'utilisation des additifs réducteurs de frottement présentent un grand intérêt en raison de leurs applications étendues qui trouvent de nombreuses applications. Une bonne connaissance des propriétés du système (Pétrole brut/additif) est donc nécessaire pour mieux contrôler les mécanismes d'écoulement du pétrole brut. Dans ce mémoire, nous avons étudié deux expériences de comportement rhéologique du pétrole brut.

L'objectif principal de cette étude est :

- L'influence de la température sur le comportement rhéologique du pétrole brut.
- L'Améliorer les caractéristiques de l'écoulement du brut pour une concentration volumique de 0,5% de polymère Quikflow X-2433.
- L'effet de l'addition de déférence concentration de toluène sur les propriétés rhéologiques du pétrole brut contenant près de 2,5% d'asphaltenes.

Nous avons montré aussi qu'une bonne amélioration des paramètres d'écoulement du système est associée à un module visqueux élevé.

Mots clés : pétrole, rhéologie, viscosité, asphaltènes, additif.

Abstract

The use of friction reducing additives is of great interest because of their wide applications which find many applications. A good knowledge of the properties of the system (crude oil / additive) is therefore necessary to better control the flow mechanisms of crude oil. In this thesis, we have studied two experiments of the rheological behavior of crude oil.

The main objective of this study is:

- The influence of temperature on the rheological behavior of crude oil.
- Improve crude flow characteristics at 0.5% volume concentration of Quikflow X-2433 polymer.
- The effect of the addition of deference concentration of toluene on the rheological properties of crude oil containing nearly 2.5% asphaltenes.

We have also shown that a good improvement in the flow parameters of the system is associated with a high viscous modulus.

Mot clefs :crude oil, rheological, viscosity, asphatenes, additive.

ملخص

إن استخدام المواد المضافة لتقليل الاحتكاك له أهمية كبيرة بسبب تطبيقاتها الواسعة التي تجد العديد من التطبيقات. لذلك فإن المعرفة الجيدة بخصائص النظام (النفط الخام / المادة المضافة) ضرورية للتحكم بشكل أفضل في آليات تدفق النفط الخام. في هذه الرسالة قمنا بدراسة تجريبتين للسلوك الريولوجي للنفط الخام.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو:

- تأثير درجة الحرارة على السلوك الريولوجي للنفط الخام.
 - تحسين خصائص التدفق الخام عند تركيز حجم 0.5% من بوليمر Quikflow X-2433.
 - تأثير إضافة إختلاف تركيز التولوين على الخواص الانسيابية للنفط الخام المحتوي على ما يقرب من 2.5% أسفلتين.
- لقد أظهرنا أيضاً أن التحسن الجيد في معاملات تدفق النظام يرتبط بمعامل لزج عالي .
- الكلمات المفتاحية:** البترول، الريولوجي، اللزوجة، اسفلتين، المادة المضافة.



INTRODUCTION
GENERALE

Introduction

Le pétrole brut extrait du réservoir est transporté par pipelines soit jusqu'à une raffinerie ou une cuve de stockage, soit jusqu'au port pour être acheminé par tanker. C'est au cours de ce transport par pipeline que les compagnies pétrolières peuvent rencontrer des problèmes avec l'acheminement du brut. Un des problèmes dans le transport est la viscosité élevée de tels fluides ainsi que le coefficient de frottement (les pertes de charges). En outre, la mobilité de brut dans les canalisations ne soit pas économiquement faisable. Pour augmenter la mobilité de brut visqueux, la viscosité et le frottement surtout devraient être réduits. Ceci peut être fait par l'échauffement, le mélange de pétroles lourds avec des pétroles plus légers ou avec les gaz d'hydrocarbure aussi bien que l'émulsification brut/eau. Le chauffage exige souvent des quantités considérables d'énergie et il y a quelques problèmes logistiques en employant des diluants. Pour que la production de champ soit transportée par la canalisation utilisant un diluant, deux canalisations seraient exigées. Il serait ainsi souhaitable de développer une méthode alternative pour le transport. Une alternative est celle de l'ajout d'un additif réducteurs de frottement appelés DRA (Drag reducing agents), peuvent être classés en trois catégories, les polymères, les agents tensio-actifs et les fibres. La réduction de traînée est un phénomène d'écoulement qui apparait en ajoutant une faible quantité d'additifs (quelques parties par million par poids). Cet ajout permet de réduire considérablement le facteur de frottement turbulent dans un fluide en écoulement.

Les premiers travaux systématiques sur la réduction de frottement par les composés macromoléculaires et autres additifs ont débuté aux Etats unis d'Amérique à la fin de la seconde guerre mondiale. Les premiers résultats publiés remontent à 1949 et sont dus à B. A TOMS, ce qui justifie parfois la dénomination d'effet de Toms attribuée au phénomène de réduction de frottement.

Nous nous intéresserons à la caractérisation rhéologique du brut modifié provenant du champ pétrolier d'Ilizi. On devra déterminer les différentes courbes d'écoulement du pétrole brut modifié pour différentes températures ainsi que l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse. Tout ce travail se fait avec et sans l'utilisation d'un agent réducteur de frottement. Cette étude expérimentale est menée sur le Rhéomètre (AR2000 de TA Instruments).

La détermination de la contrainte de cisaillement et la déformation ou vitesse de cisaillement permet de définir l'équation rhéologique d'état d'un liquide, c'est-à-dire la relation les unissant ($\dot{\gamma} = f(\tau)$ ou bien $\tau = f(\dot{\gamma})$).

Ce travail est divisé en deux grandes parties: une partie bibliothèque et une partie expérimentale.

Une partie bibliographique comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre sera consacré à des notions sur le pétrole brut.
- Le deuxième chapitre traitera des généralité sur la rhéologie et les différents types des fluides.
- Dans le troisième chapitre, nous aborderont les émulsions.

Une partie expérimentale comportant un chapitre contenant :

- matériels et les méthodes utilisés dans cette étude.
- résultats interprétations de deux expériences.



CHAPITRE I

GENERALITES SUR

LE PETROLE BRUT

I.1 Introduction

Le pétrole est devenu, à partir des années 50, la première source d'énergie dans le monde. Grâce à sa forte densité énergétique, il représente la matière première des carburants qui alimentent les transports (voitures, camions, avions, etc.). C'est aussi une matière première irremplaçable utilisée par l'industrie de la pétrochimie pour la synthèse d'un nombre considérable de produits pétrochimiques utilisés dans la vie quotidienne tels que les matières plastiques, peintures, colorants, cosmétiques, etc. Le pétrole est aussi une source de sert aussi combustible dans le chauffage domestique et comme source de chaleur dans l'industrie, mais dans une moindre mesure, pour la production d'électricité [1].

I.2 Définition du pétrole brut

Le pétrole brut ou l'or noir [2], que les Romains appelaient bitumen, doit son nom à deux mots latins «petra oleum » qui signifie «huile de pierre ». C'est une huile minérale naturelle combustible, sa couleur varie du vert au brun noir et il dégage une odeur caractéristique, a une densité variant de 0,7 à 1,13. Il est formé d'une multitude de composés organiques, essentiellement des hydrocarbures. Il est piégé dans des formations géologiques particulières et est utilisé surtout comme source d'énergie [1].

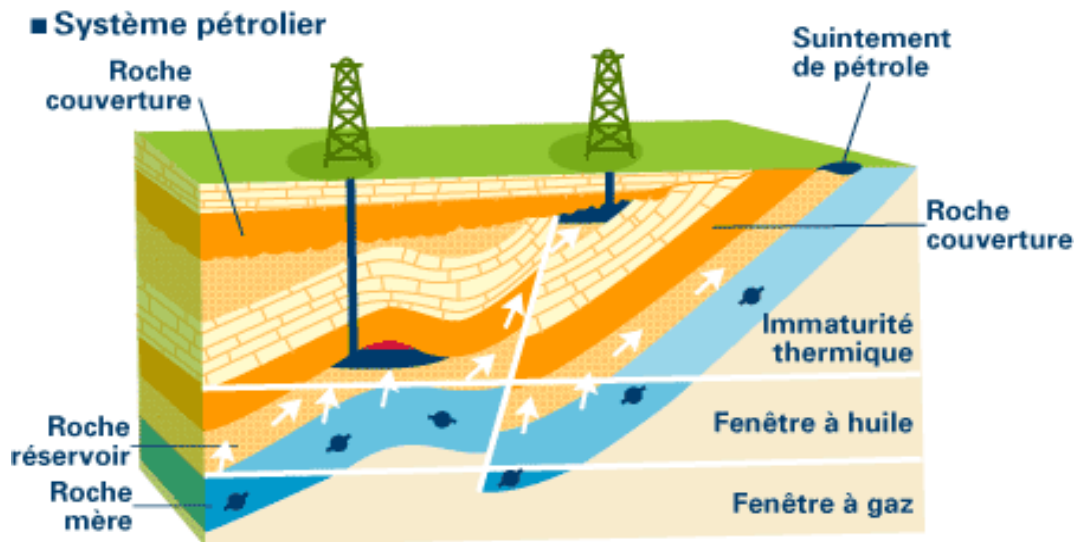
I.3 L'origine de pétrole brut

Le pétrole brut et le gaz se sont formés au cours de millions d'années par décomposition de végétaux et d'organismes marins comprimés sous le poids des sédiments ; ils ont migré dans les vides existants dans ces formations sous-jacentes. Ce mouvement vers le haut s'est arrêté lorsqu'ils ont atteint couches denses imperméables ou des couches non poreuses.

Le pétrole brut est présent, en général, dans des formations géologiques particulière, telles que les anticlinaux, les pièges de faille et les dômes de sel, que l'on trouve sous divers types de terrains et dans des climats très variés. En pratique, le lieu d'accumulation appelé « piège » constitue une espèce au-dessus de la roche poreuse dans laquelle le pétrole circule.

La roche qui contient le pétrole s'appelle un réservoir. En s'accumulant en profondeur dans les terrains poreux et fissurés, les hydrocarbures forment ce qui est appelé des gisements. Dans le cas

contraire, ils peuvent finir par suinter à la surface et former des mares pétrolières (**Figure I.1**) dont on peut trouver quelques exemples au Venezuela et au Moyen-Orient [3].



FigureI. 1: Schéma d'un réservoir pétrolier

I.4 Composition du pétrole brut

Les éléments essentiels composant le pétrole sont le carbone (83 à 87%) et l'hydrogène (11 à 14%) qui forment les divers groupements d'hydrocarbures. Parmi les composants du pétrole, on compte également les composés oxygénés, le soufre et l'azote (au total jusqu'à 6 ou 7%), aussi on a pu constater la présence dans les cendres du pétrole du chlore, phosphate, silicium et des métaux tels que : K, Na, Ca, Fe, Ni... etc.

Les hydrocarbures contenus dans le pétrole appartiennent aux trois groupements suivants :

- Les paraffines (alcanes).
- Les naphènes.
- Les hydrocarbures aromatiques [4].

I.4.1 Les hydrocarbures paraffines (Alcanes)

Ces hydrocarbures sont saturés ayant la formule générale C_nH_{2n+2} ; la teneur de ces hydrocarbures dans le pétrole brut est variable [4].

I.4.2 Les oléfines (hydrocarbures aliphatiques insaturés ou alcènes)

Le pétrole ne contient pratiquement pas d'hydrocarbures insaturés ; ils sont surtout produits par le traitement des produits pétroliers dans les procédés thermiques et thermocatalytiques [4].

I.4.3 Les naphtènes (hydrocarbures cycliques saturés)

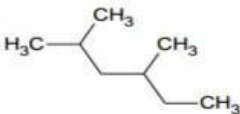
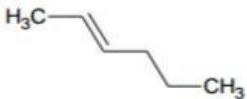
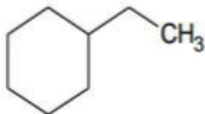
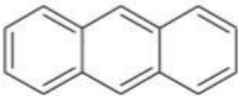
Ce sont des hydrocarbures cycliques saturés ayant la formule générale C_nH_{2n} , Ces hydrocarbures sont présentés dans le pétrole sous forme de dérivés du cyclohexane et cyclopentane, ils sont divisés en naphténiques monocycliques, bicycliques et polycycliques. Si leur teneur est environ 50% dans le pétrole, on dit qu'il est naphténique [4].

I.4.4 Les Hydrocarbures aromatiques

Ce sont des hydrocarbures cycliques non saturés de formule générale C_nH_{2n-6} , ces hydrocarbures sont présentés dans le pétrole sous forme de benzène, toluène, xylène et leurs dérivés. Si la teneur de ces hydrocarbures est d'environ 35% dans le pétrole, on dit qu'il est aromatique.

Exemple : le benzène C_6H_6 [4].

Tableau I.1 Structures de composés hydrocarbonés présents dans les produits pétroliers.

familles	Iso-paraffines	Oléfines	Naphtènes	Aromatiques
formules	C_nH_{2n+2}	C_nH_{2n}	C_nH_{2n}	C_nH_{2n-8k}
Exemples				

I.4.5 Composés oxygénés

Ces composés sont représentés dans le pétrole sous forme de phénol et d'acides

Naphténiques


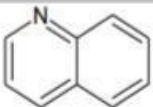
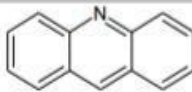
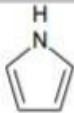
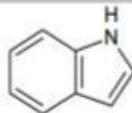


Leur teneur dans le pétrole est faible (1 ÷ 2%) [4].

I.4.6 Composés azotés

Ce sont des composés hétérocycliques contenant l'élément d'azote, leur teneur dans le pétrole varie de 0.02-2.5%, elle augmente avec l'augmentation de la température d'ébullition des fractions, on le retrouve sous forme de quinoléine et pyridine.

Tableau I.2 Structure de composés azotés présents dans les produits pétroliers.

Familles	Dérivés basiques			Dérivés neutres	
	Pyridine	Quinoléine	Acridine	Pyrrrole	Indole
Exemples					

I.4.7 Composés chimiquement mal définis

a. Les Asphaltènes

Les asphaltènes sont des solides noirs et brillants ; dont la masse moléculaire peut varier de 1000 à 100 000 g /mol. Ils sont constitués d'une accumulation de feuillets polyaromatiques condensée reliés par des chaînes saturées, qui sont présents dans les résidus [5].

b. Les Résines

Ce sont des molécules à caractère aromatique très marqué, renfermant des hétéroéléments (N, O, S, Ni, et V), leur masse moléculaire peut varier de 500 à 1000 g/mol [5].

I.4.8 Substances minérales

Le pétrole brut contient de l'eau dont la combinaison donne une émulsion qui peut être stable, il contient aussi des sédiments [4].

I.5 Classification du pétrole

On distingue les différents types de pétrole selon leur densité, leur fluidité, leur teneur en soufre, selon leur provenance, selon la gravité API et leur teneur en différents classes d'hydrocarbures [4].

I.5.1 Selon leur teneur

Le pétrole est classifié suivant ses composants majoritaires, on distingue 3 catégories de bruts :

- Les bruts à prédominance paraffiniques.
- Les bruts à prédominance naphthéniques.
- Les bruts à prédominance aromatiques [4].

I.5.2 Selon leur provenance

On distingue les provenances tel que : Golf Persique, mer du Nord, Venezuela et Nigeria Les bruts les plus connus sont l'Arabian light (brut de référence du Moyen Orient), le Brent (Brut de référence européen) et le West Texas Intermediate (WTI) (brut de référence américain) [4].

I.5.3 Selon leur gravité API

L'échelle °API rend compte de la densité et donc de la longueur des chaînes carbonées des composés.

Plus les chaînes sont longues, plus le pétrole est lourd. On peut recommander:

- Le pétrole est léger (light) si le degré API est supérieur à 31.1.
- Le pétrole est moyen (médium) s'il est compris entre 22.3 et 31.1.
- Le pétrole est lourd (heavy) s'il est compris entre 10 et 22.3.
- Le pétrole est extra lourd (extra heavy) s'il est inférieur à 10 [4].

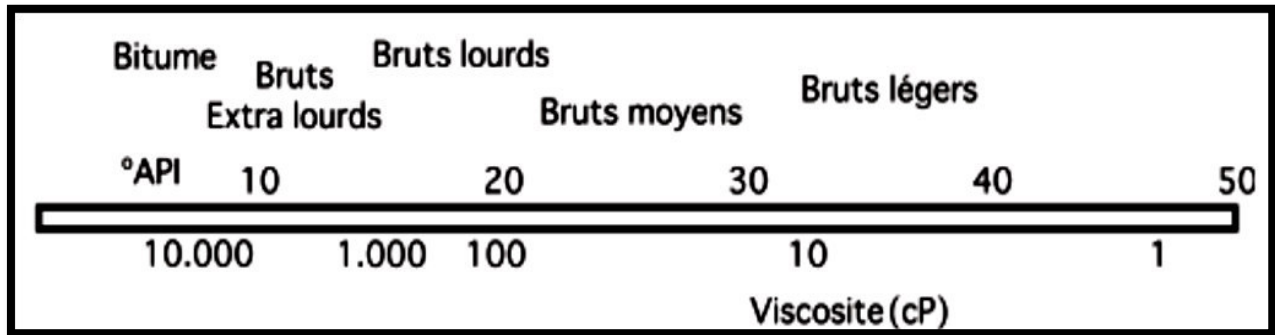


Figure I.2 Classification du brut pétrolier selon leur °API .

I.6 Principales propriétés physico-chimie de pétrole brut

I.6.1 Densité

La densité des pétroles bruts constitue une caractéristique très importante, car elle conditionne, pour une large part, leur prix. Elle s'exprime couramment en degrés (°) API reliés à 60 °F par la formule :

$$^{\circ}\text{API} = 141,5/d - 131,5$$

Où d est la densité (60 °F/60 °F).

La densité des pétroles bruts s'échelonne généralement entre 0,8 et 1, bien que certains produits extrêmes puissent se situer en dehors de cet intervalle [6].

Le "degré API" (American Petroleum Institute) est l'unité de mesure, utilisée dans le système anglo-saxon, pour mesurer la densité d'un liquide, en particulier d'un brut pétrolier, on parle généralement de brut lourd pour moins de 20°API, moyen dans les 20 à 30°API et léger au-delà, mais ces bornes varient selon les pays [3].

I.6 .2 Viscosité

La viscosité est généralement définie comme étant la caractéristique de la résistance à l'écoulement d'un fluide. Elle est liée à sa densité ainsi qu'à la présence de molécules organiques plus ou moins longue et complexe, plus le pétrole est lourd et moins il sera visqueux.

La mesure de la viscosité des pétroles bruts à différentes températures, est particulièrement importante pour le calcul des pertes de charge dans les pipelines, les tuyauteries et les conduites de raffinerie ainsi que pour la spécification des pompes et des échangeurs.

L'évolution de la viscosité en fonction de la température n'est pas la même pour tous les bruts, La viscosité d'un brut paraffinique augmentera rapidement si la température baisse ; par contre pour les bruts naphthéniques ou mixtes, l'accroissement de la viscosité est plus progressif.

La viscosité cinématique est le rapport de la viscosité absolue à la masse volumique d'un fluide, exprimée couramment en centistoke (cSt) et dans le système SI en mm^2/S .

La viscosité absolue (ou dynamique) est le rapport de la contrainte de cisaillement au gradient de vitesse de cisaillement. Le rapport est constant pour un fluide newtonien, exprimée en centipoise (cP) et dans le système SI en (Pa.s) [7].

I.6 .2 Point d'écoulement

Le point d'écoulement des pétroles bruts est mesuré pour donner une indication approchée sur la pompabilité. en fait, l'agitation du fluide provoquée par le pompage, peut empêcher ou détruire la formation des cristaux de paraffines, conférant ainsi aux bruts une certaine fluidité au-dessous de la température d'écoulement mesurée.

Le point d'écoulement des pétroles bruts se situent généralement dans un intervalle compris entre : -60°C et $+30^\circ\text{C}$ [4].

CHAPITRE II

GENERALITES SUR

LA RHEOLOGIE

II .1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous décrivons le comportement des rhéologies des fluides, et en donnant quelques termes et concepts liés à la rhéologie ainsi que différentes typologie d'écoulement de fluide.

II .2 Viscosité et comportement associés

II .2 .1 Etude du Comportement Rhéologique

Etymologiquement, la Rhéologie est une science qui traite l'écoulement et les déformations des substances sans l'action de contrainte. La Rhéologie a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. [8]

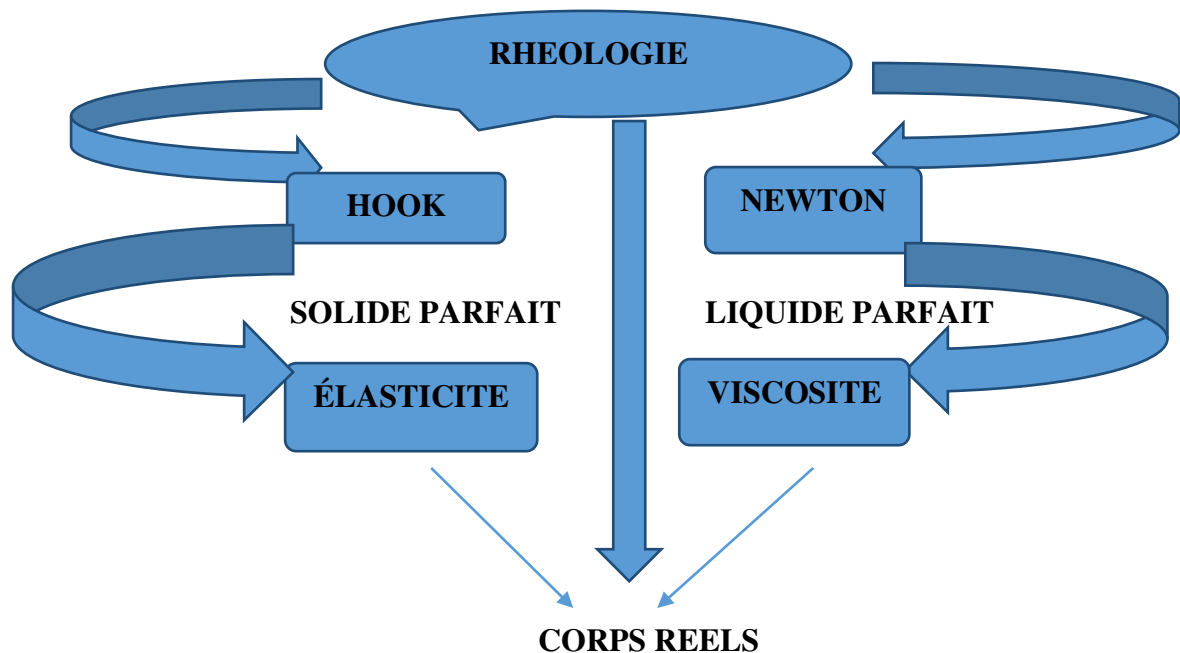


Figure II .1 Schéma synoptique du comportement Rhéologique.

II .2 .2 Définition de la Rhéologie

L'origine du mot « rhéologie » est attribuée à Bingham en 1922, qui définit la rhéologie comme la science des déformations et des écoulements de la matière. A l'origine, la rhéologie se définit comme une science pratiquement identique à la mécanique des milieux continus dont le but est d'observer, décrire et modéliser les déformations de la matière sous l'action de différentes forces (Eugène Bingham.1939). Si cette déformation est à l'origine

d'un mouvement relatif entre les molécules du matériau qui peuvent se croiser et le mouvement s'effectue toujours dans des directions opposées, nous parlerons alors d'un **écoulement de cisaillement**.

Discipline qui étudie l'écoulement et la déformation des matériaux sous l'action de contraintes. **Ou encore** : science des relations entre contraintes et déformation (ou vitesse de cisaillement) d'un élément de volume. [8]

II .2 .3 Types de rhéologie

Elle s'intéresse à l'observation aux échelles microscopique et nanoscopique (réarrangement des atomes ou des molécules, leurs mouvements relatifs, ou différences de taille) ainsi qu'à l'élaboration d'équations pouvant décrire la déformation de ces matériaux.

La rhéologie se décompose en plusieurs sortes d'études :

- **Rhéologie expérimentale** : détermination expérimentale des relations de comportement (entre contrainte et déformation ou vitesse de déformation).
- **Rhéologie structurale** : explication des comportements à partir de la structure de matériau.
- **Rhéologie théorique** : fournir des modèles mathématiques en nombre limité des comportements indépendamment de la structure microscopique .[9]

II .2 .4 Notion de mouvement de cisaillement, contrainte de cisaillement

II .2 .4 .1 Mouvement linéaire

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

Pour certaine distribution de ces forces un mouvement appelé mouvement laminaire de cisaillement est engendré .[10]

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes

sur les autres ; sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre, c'est un mouvement strictement ordonné stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de se volume.

La forme des couches dépend bien entendu de la géométrie du problème et par conséquent des conditions expérimentales [10].

II .2 .4 .2 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 qui s'exercent tangentielles à la surface de la couche : ces forces tangentielles sont appelées **forces de cisaillement**.

Il est commode de rapporter 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** :

$$\tau = F/S$$

τ : contrainte de cisaillement [N/m² =pascal(Pa)] [10]

II .2 .5 Déformation et vitesse de cisaillement (Shear strain and rate)

De façon tout à fait général, en mécanique, on distingue parmi les grandeurs physiques :

- Les grandeurs physiques dynamiques : forces, couple ..., qui donnent naissance au mouvement.
- Les grandeurs physique cinématique : vitesse, accélération ..., qui décrivent géométriquement le mouvement.
- Nous avons défini au paragraphe 1.2 « contrainte de cisaillement » la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie, la contrainte de cisaillement τ , responsable du mouvement laminaire de cisaillement.
- Nous allons à présent définir les deux grandeurs cinématiques fondamentales, la déformation et la vitesse de cisaillement, grandeurs décrivant le mouvement du matériau

dans l'espace, au cours du temps, indépendamment des contraintes qui lui ont donné naissance [10].

II .2 .5.1 Déformation de cisaillement \mathcal{E} (shear strain)

Pour définir la déformation de cisaillement, il est souhaitable d'envisager le cas particulier d'un mouvement laminaire de cisaillement présentant la symétrie plane [10].

Par exemple : « exemples de mouvement laminaires de cisaillement, hypothèse de la couche limite » ou' le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile (figure I .2).

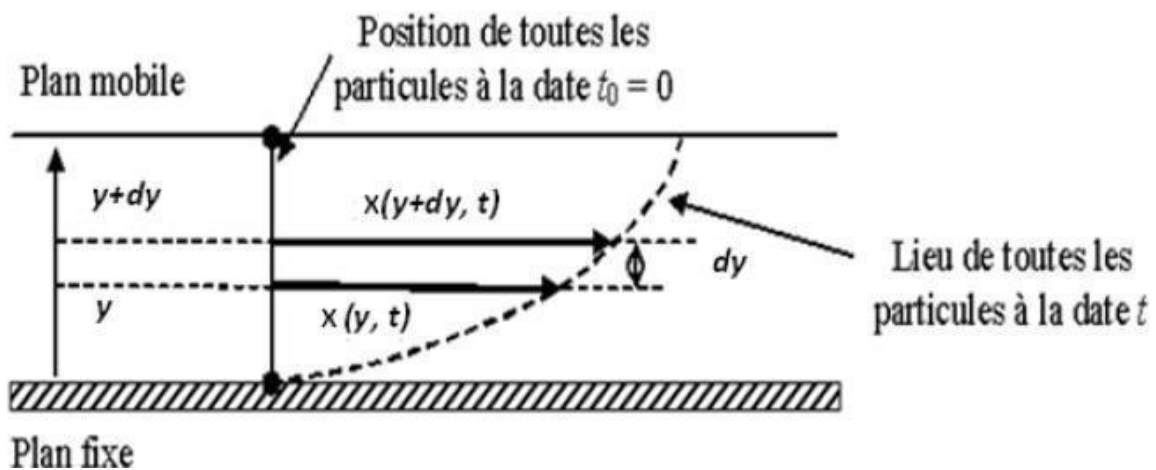


Figure II .2 Gradient de déplacement dans un mouvement de cisaillement plan.

Considérons les particules de matière qui se trouvent au temps origine $t=0$ dans une certaine section droite. À un instant t postérieure, chaque particule de matière aura parcouru la distance $u(x, t)$ ou' x distance séparant la particule de matière du plan solide inférieure, permet de repérer les différentes couches planes du matériau.

On définit la déformation de cisaillement dans le cas symétrie plane par la relation :

$$\mathcal{E}(x, t) = du(x, t) / dx$$

II .2 .5 .2 Vitesse de cisaillement (shear rate)

La vitesse de cisaillement $\dot{\mathcal{E}}$ est appelée aussi gradient de vitesse. Avant tout, il faut définir la déformation de cisaillement. Elle correspond au vecteur déplacement de la particule

fluide d'une couche sous l'effet du mouvement de cisaillement pendant une durée T donc, la déformation de cisaillement traduit de la distance parcourue par Dx en fonction de sens éloignement à la plaque [8].

La vitesse de cisaillement $\dot{\epsilon}$ est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement ϵ , c'est une vitesse de déformation :

$$\dot{\epsilon} = [d\epsilon]/dt$$

$\dot{\epsilon}$ a par conséquent les dimensions de l'inverse d'un temps s'exprime en s^{-1} .

Si l'on se ramène au cas de la symétrie plane envisagé au paragraphe précédent, il vient, en utilisant la relation :

$$\dot{\epsilon} = [d/dt] * [du/dx] = [d/dx] * [du/dt]$$

Et puisque $[du(x,t)/dt]$ représente la vitesse $v(x,t)$ de la couche x à l'instant t, on peut encore écrire, dans le cas de la symétrie plane :

$$\dot{\epsilon} = dv(x,t)/dx$$

II .2 .6 Modèle Mécanique

Le comportement d'un corps viscoélastique linéaire est intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique parfait et d'un liquide visqueux newtonien.

Nous allons donc rappeler les propriétés de ces deux matériaux idéaux et limites et construire des modèles de comportement intermédiaires.

II .2 .6 .1 Solide élastique parfait

L'équation rhéologie du solide élastique parfait (loi de Hooke) s'écrit :

$$\epsilon(t) = J \tau(t) \quad (1)$$

Où J est un coefficient constant, dépendant de la nature du solide, appelée complaisance élastique (elastic complaire). Notons que l'on utilise souvent le coefficient $G=1/J$, appelée module de rigidité ou module de cisaillement (elastic modulus).

J est homogène à l'inverse d'une contrainte, et exprime en Pa^{-1} ou en $m^2 \cdot N^{-1}(SI)$.

Ou en $\text{cm}^2, \text{dynes}^{-1}$ (CGS) : G est homogène à une contrainte et s'exprime dans les unités inverses.

La relation (1) s'applique à une expérience de cisaillement simple ; il faut cependant souligner que pour un solide élastique parfait, la déformation et la contrainte sont toujours reliées par relation linéaire (loi de Hooke).de type (1).

Un solide élastique parfait sera symbolisé en rhéologie par un ressort de coefficient de complaisance élastique J (figure II .3) [10].

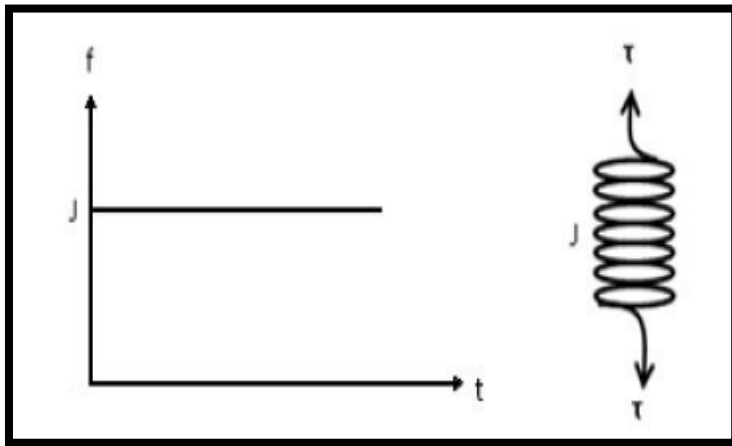


Figure II .3 Modèle d'un solide élastique parfait.

La figure II .3 représente schématiquement un solide élastique parfait de coefficient J soumis à une contrainte τ .

II .2 .6 .2 Liquide visqueux newtonien

L'équation rhéologie du liquide visqueux newtonien est l'équation de newton [déjà introduite dans le paragraphe viscosité dynamique], relation $\tau = \eta \cdot \dot{\epsilon}$ qui peut encore s'écrire :

$$[d\epsilon/dt] = \tau(t)/\eta \quad [10]$$

Tenant compte des conditions initiales :

$$T < 0 ; \tau(t) = 0 ; \epsilon(t) = 0$$

L'équation (2) s'intègre immédiatement :

$$\epsilon(t) = 1/\eta \int_0^t \tau(t') dt'$$

On remarque que :

- Le liquide visqueux newtonien se « souvient » de toutes les contraintes qui lui ont été imposées dans le passé : l'expression de $\mathcal{E}(t)$ dépend de toutes les valeurs prises par la contrainte τ de 0 à 1.
- Si la contrainte est ramenée à zéro un certain instant, la déformation demeure constante et égale à la valeur qu'elle possédait au même instant ; la déformation est irrécupérable.
- Le comportement est bien un comportement liquide ; soumis à une contrainte constante $[\tau/\eta] t$.

Le liquide visqueux newtonien sera symbolisé en rhéologie par un amortisseur de coefficient de viscosité η (figure II .4).

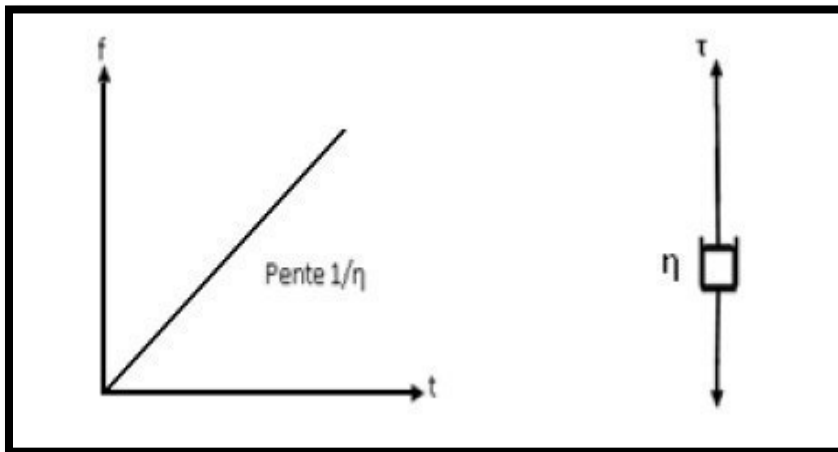


Figure II .4 Modèle d'un liquide visqueux newtonien.

II .2 .6 .3 Lois d'association en série et en parallèle

Par définition :

Dans une association en parallèle dont un cas particulier est présenté figure II .5 [10].

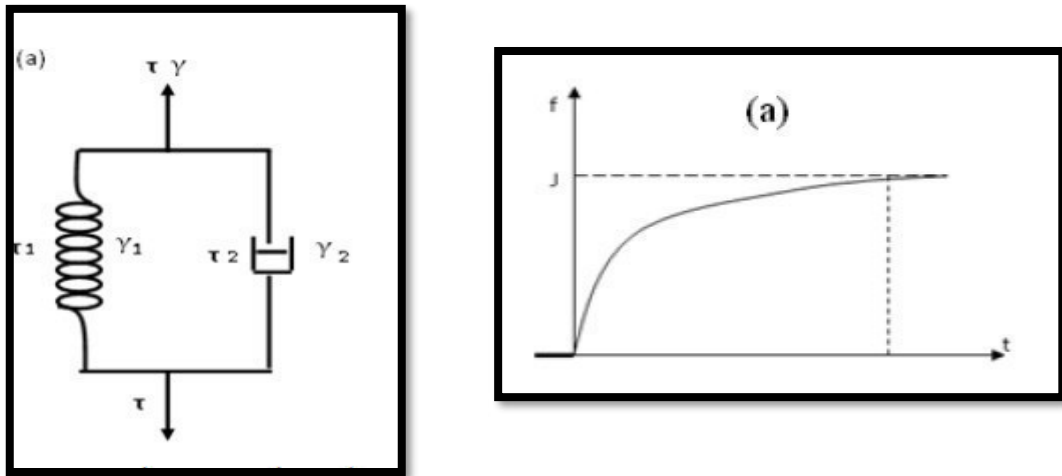


Figure II .5 Cas particulier d'une association en parallèle.

- 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 dont un cas particulier est présenté figure II .6

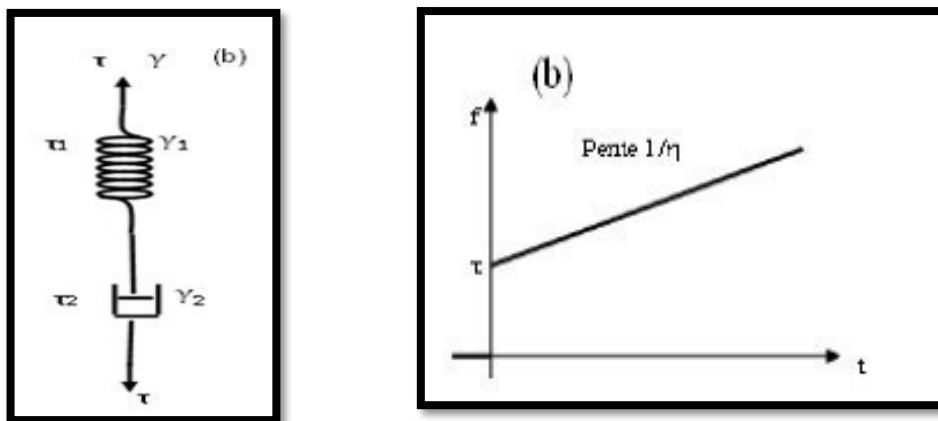


Figure II .6. Cas particulier d'une association en série.

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

Nous allons à présent utiliser ces lois d'association à propos de deux modèles très importants :

- Successivement le solide de kelvin – Voigt.

- Le liquide de maxwell.

II 2 .6 .4 Solide de kelvin-Voigt

Il est constitué par l'association en parallèle d'un ressort de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η (figure II .7) [10].

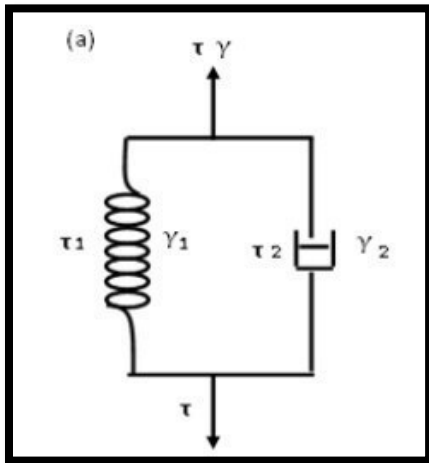


Figure II .7 Modèle d'un solide de kelvin – Voigt.

II .2 .6 .5 Liquide de Maxwell

Il est constitué par l'association en série d'un ressort de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η (figure II .8) [10].

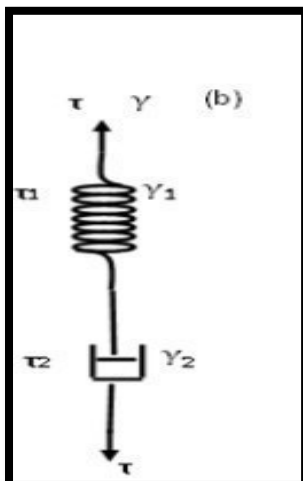


Figure II .8 Modèle d'un liquide de Maxwell.

II .2 .7 Équation de l'état et Rhéogramme

II .2 .7 .1 Équation de l'état

Tout système mécanique obéit à une équation fondamentale qui établit une relation entre les grandeurs dynamiques responsables du mouvement et les grandeurs cinématique décrivant ce mouvement (exemple de la loi fondamentale de la dynamique du point matériel $F=m \cdot \gamma$).

Il en est ainsi en rhéologie, où existe une relation entre la déformation de cisaillement ϵ et la contrainte de cisaillement τ , relation qui dépend des propriétés et de la nature du matériau nous noterons cette relation :

$$\epsilon = f(\tau)$$

C'est l'équation rhéologique d'état de la substance .sa connaissance détermine toutes les propriétés rhéologiques du matériau. C'est pourquoi le but de la rhéologie est la détermination expérimentale (à l'aide de rhéomètres) de l'équation $\epsilon=f(\tau)$

Remarque

L'équation rhéologique ne dépend pas seulement de la nature et des propriétés du matériau ; elle dépend aussi de la température T et de la pression P extérieures.il serait donc plus correct d'écrire :

$$\epsilon = f(\tau, P, T)$$

II .2 .7 .2 Rhéogramme

Les courbes qui traduisent graphiquement l'équation rhéologique d'état sont appelées rhéogrammes.

Les rhéogramme les plus fréquemment utilisés et dont nous donnerons des exemples dans les graphes suivants sont :

- Les graphes τ, ϵ à pression et température extérieures constantes.
- Les graphes $\tau, \dot{\epsilon}$ à pression et température extérieures constantes.

- Les graphes ε, t traduisant l'évolution de ε au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsque la contrainte est appliquée à l'instant initial $t=0$ et maintenue constante (expérience de fluage).
- Les graphes τ, t traduisant l'évolution de τ au cours du temps, à pression et température extérieures constantes, lorsqu'une déformation est imposée à l'instant initial $t=0$ et maintenue constante (expérience de relaxation) [10].

II .2 La viscosité

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie. Leur connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologie du matériau. On définit différents coefficients de viscosité [10].

II .2 .1 La viscosité dynamique

Elle est définie par relation :

$$\mu = \tau / \dot{\varepsilon}$$

Et est également appelée viscosité apparente.

Son unité est la poise (p) dans le système CGS, et le pascal second (Pa. s) dans le système international SI. Notons que pendant longtemps, l'unité SI a été appelée le poiseuille et notée PI [10].

$$1 \text{ Pa. S} = 1 \text{ PI} = 10 \text{ P}$$

Il est clair que μ est une fonction de la température T et de la pression P extérieure, mais aussi en général de la contrainte de cisaillement τ ou, encore, selon un point de vue tout à fait équivalente, de la vitesse de cisaillement $\dot{\varepsilon}$:

$$\mu = F [T, P, \tau]$$

$$\mu = G [T, P, \dot{\varepsilon}]$$

Il existe certaines substances pour lesquelles μ ne dépend pas de la contrainte de cisaillement : ces corps sont appelés newtoniens. Leur coefficient de viscosité dynamique est alors appelée viscosité absolue et noté η . L'équation rhéologique d'un corps newtonien (équation de newton) s'écrit donc :

$$\tau = \eta \dot{\epsilon}$$

Où η n'est fonction que de la température et de la pression extérieures.

II .2 .2 La viscosité cinématique

Ce coefficient est défini par la relation :

$$V = \mu / \rho$$

Où ρ est la masse volumique du matériau.

Son unité est le $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, encore appelée stokes (St) dans le système CGS, et le $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ dans le système international.

Bien que la définition de la viscosité cinématique puisse s'appliquer à tous les liquides, qu'ils soient newtoniens ou non newtoniens, cette notion est sur tout utilisée dans le cas des liquides newtoniens : c'est seulement pour ces liquides qu'il existe une méthode de détermination directe de la viscosité cinématique par rhéomètre capillaire, ce qui justifié l'intérêt de ce coefficient [10].

II .2 .3 La viscosité relative, spécifique, intrinsèque

Dans l'étude des solutions (des dispersions), afin de déterminer les influences respectives du soluté (de la phase dispersée) et du solvant (de la dispersante) dans le comportement rhéologique, on utilise fréquemment les coefficients de viscosité suivants : [10].

- **Viscosité relative :**

$$\mu_{\text{Rel}} = \mu / \mu_s$$

- **Viscosité spécifique :**

$$\mu_{\text{sp}} = [\mu - \mu_s] / \mu_s = \mu_{\text{Rel}} - 1$$

- **Viscosité intrinsèque :**

$$[\mu_i] = \limite (\mu_{\text{sp}} / c)$$

$$C, \dot{\epsilon} \rightarrow 0$$

Où μ et μ_s représente respectivement la viscosité dynamique de la solution (de la dispersion)

Et du solvant (de la phase dispersante), et où C représente la concentration de la solution (De la phase dispersée).

μ_{rel} et μ_{sp} sont des grandeurs dimension.

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

II .4 Classification du comportement des fluides en écoulement

II .4 .1 Les fluides newtonien

Le modèle de fluide newtonien décrit bien la très grande majorité des fluides composés de molécules simples. Ces fluides se caractérisent notamment par une dépendance linéaire des contraintes et des vitesses de déformation. Newton a montré que lorsqu'on cisaille un fluide entre deux plaques parallèles :

- Les seules contraintes créées par l'écoulement par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du taux de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement s'arrête.

Pour une température donnée et une pression donnée, la viscosité ne dépend que de la nature du fluide.

Pour ces fluides, la relation entre la contrainte et le taux de cisaillement est une relation linéaire. Dont le coefficient de proportionnalité est **la viscosité dynamique du fluide [8]**.

$$\tau = \eta \, dv/dx = \eta \cdot \dot{\epsilon}$$

II .4 .2 Les fluides non newtoniens

Comme mentionné ci-dessus, un fluide non newtonien est celui dont le taux de cisaillement vraie, la contrainte de cisaillement ne vraie pas dans la même proportion (ni même nécessairement dans la même direction).

La viscosité du fluide n'est pas constante compte tenu de la température et de la pression mais elle est dépendue des conditions d'écoulement telles que la géométrie de l'écoulement, la

vitesse de cisaillement, etc., et parfois même de l'histoire cinématique de l'élément de fluide en cours d'examen.

Un flux non-newtonien peut être imaginé en pensant à tout fluide comme étant un mélange de molécules avec différentes formes et tailles ; lorsqu'elles passent l'une près de l'autre comme cela arrivé durant un écoulement, leur taille, forme et cohésion va déterminer quelle force est nécessaire pour les faire bouger. A chaque taux de cisaillement spécifique, l'alignement peut être différent et une force plus ou moins importante peut être requise pour maintenir le mouvement.

De tels fluides peuvent être commodément groupés en trois grandes classes :

- Fluides pour lesquels le taux de cisaillement à tout point, est déterminé seulement par la valeur de la contrainte de cisaillement à ce point, à ce moment ; ces fluides sont diversement connus comme « **indépendants du temps** », « **purement visqueux** », « **inélastique** » ou « **fluides newtonien** ».
- Fluides plus complexe pour lesquelles la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement dépend, en outre, de la durée de cisaillement et leur histoire cinématique ; ils sont appelés « **fluides au caractère dépendant du temps** ».
- Fluides présentant les caractéristiques des deux fluides idéaux, des solides élastiques et montrant reprise élastique partielle, après déformation ceux –ci sont classés comme des « **fluides viscoélastique** » [8].

II .4 .2 .1 Fluides indépendant du temps

II .4 .2 .1 .1 Fluides sans contrainte critique « loi D'Ostwald 1925 »

Les fluides de loi de puissance sont un exemple de l'un des fluides sans contrainte critique, newtonien généralisées, mais la loi d'évolution n'est plus linéaire.

La loi en puissance « D'Ostwald » : une des lois empiriques fréquemment utilisées en rhéologie pour les fluides visqueux incompressibles s'écrit :

$$\tau = k(\dot{\epsilon})^n \text{ [3].}$$

Ou' K représente la consistance du fluide et n l'indice de structure (ou l'indice de l'écoulement), qui traduit l'écart avec un écoulement newtonien.

L'explication physique de cette relation est que l'application d'une contrainte entraîne une organisation de l'écoulement avec des mécanismes assez différents selon la nature du fluide considéré. Cette équation implique que la valeur ($\dot{\epsilon}$) en un point quelconque du fluide cisailé, est déterminée uniquement par la valeur actuelle de la contrainte de cisaillement en ce point.

En fonction de la forme de la fonction dans l'équation (3), ces fluides peuvent être subdivisées en deux types : **Rhéofluidifiant** ou « pseudo – plastiques », et **Rhéopaisissants** ou « dilatants ». La **figure II .9**, montre la représentation de l'évolution de la loi d'Ostwald pour les fluides sans contraintes critiques [8]

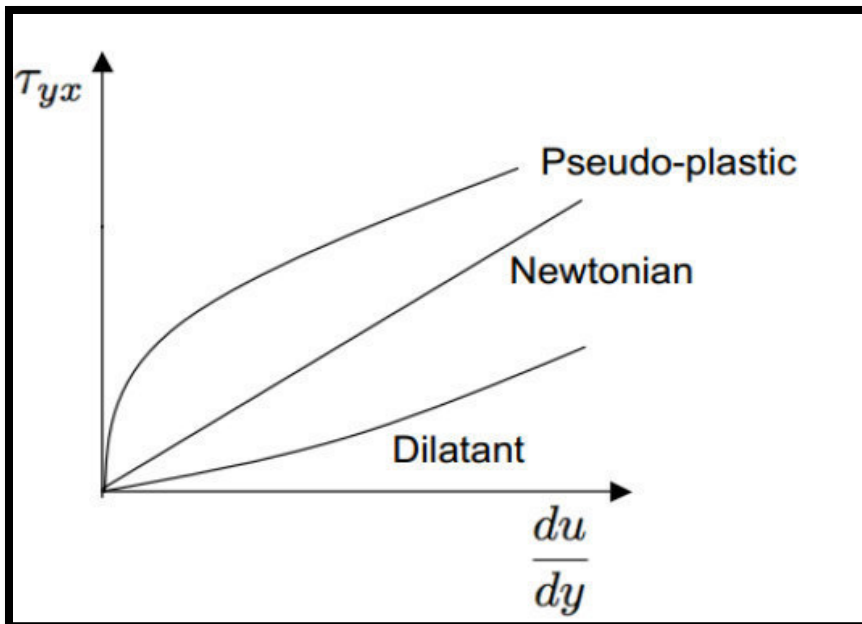


Figure II .9 : relation entre la contrainte et le taux de cisaillement pour les fluides sans contrainte critique (**loi d'Ostwald**).

La loi d'Ostwald peut présenter selon l'indice de l'écoulement (n) un fluide newtonien $n=1$, Rhéofluidifiant $n<1$ ou rhéopaisissants $n>1$.

- **Fluides pseudo-plastique ou « Rhéofluidifiant »**

Les fluides dans lequel la viscosité apparente diminue avec l'augmentation du taux de déformation ($n<1$) sont appelés pseudo-plastique (ou rhéofluidifiants).

Quand on cisaille de manière plus importance. Cela donne un système de plus en plus fluide, ce qui justifie le nom de rhéofluidifiant (**Figure II .10**). La plupart des fluides non-newtoniens

appartiennent à ce groupe, comme les solutions de polymères, de suspension colloïdales ; on peut citer également le sang, l'encre d'imprimante, les huiles végétales...etc [8].

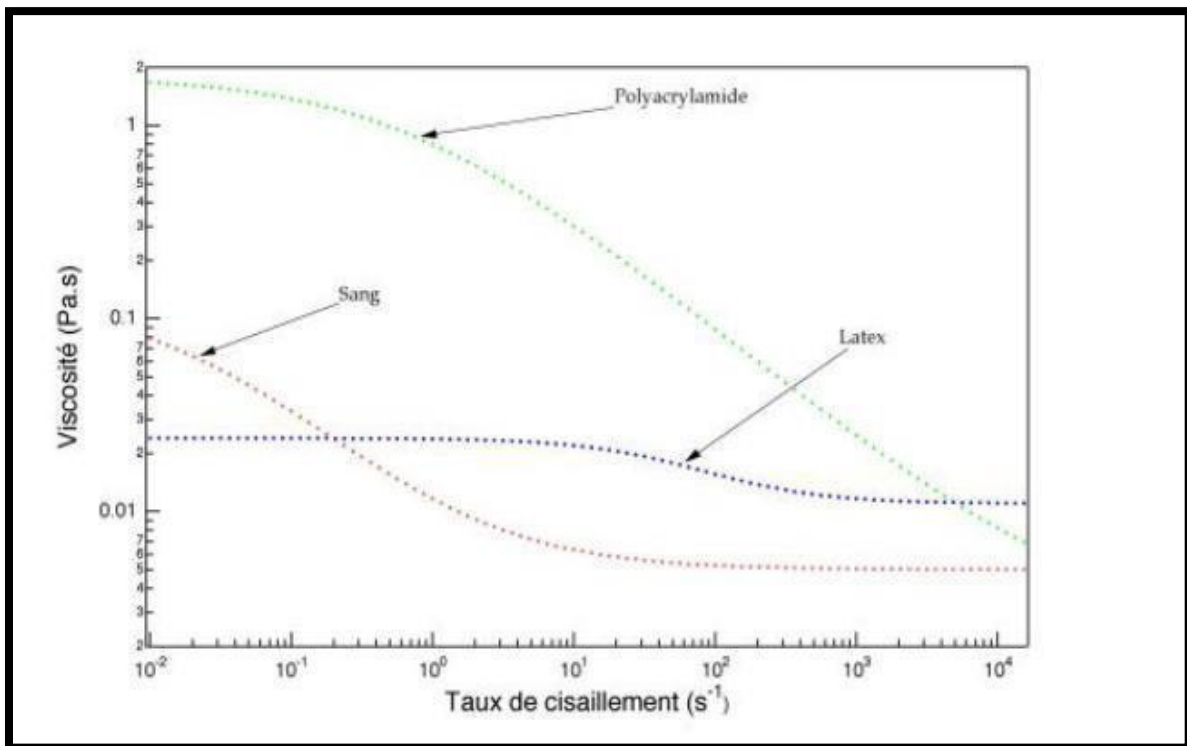


Figure II .10 : Viscosité en fonction du taux de cisaillement pour une solution aqueuse de polyacrylamide, du sang une suspension de particules de polymère (latex) dans l'eau.

- **Fluides dilatants ou « Rhéoépaississants »**

Inversement, dans le cas des rhéofluidifiant, la viscosité apparente augmente avec l'augmentation du taux de déformation ($n > 1$) dans ce cas, le fluide est appelé dilatant (ou Rhéoépaississants) [3].

II .4 .2 .1 .2 Fluides à contrainte critique « fluide viscoplastique »

Ce type de comportement du fluide est caractérisé par l'existence d'une contrainte seuil (τ_c) qui doit être dépassée avant que le fluide ne se déforme. Une fois que l'amplitude de la contrainte extérieure a dépassé la valeur de la contrainte seuil, la courbe d'écoulement peut être linéaire ou non linéaire, mais ne passe pas par l'origine. On peut expliquer ce type de comportement des fluides par le fait que la substance au repos est constituée de structures tridimensionnelles de rigidité suffisante pour résister à toute contrainte extérieure inférieure à (τ_c).

Pour des niveaux supérieurs à la contrainte (τ_c), la structure se décompose et la substance se comporte comme un matériau visqueux [8].

- **Fluide de Bingham (1916)**

La notion « **fluide de Bingham** » est souvent introduite pour un fluide qui se comporte comme un solide jusqu'à ce que la contrainte minimale (τ_c) est dépassée, et présente par la suite une relation linéaire entre la contrainte et la vitesse de déformation [8].

II .4 .2 .2 Comportement dépendant du temps

Le comportement des fluides non newtoniens peut s'expliquer par la modification de leur structure interne. Si ces modifications sont très rapides, le temps n'intervient pas de manière significative dans leur loi constitutive : par contre, si elles sont suffisamment lentes, la viscosité mesurée dépend du temps. Pour ces types de fluides, leur comportement actuel est influencé par ce qu'ils ont subi auparavant. Ces fluides semblent présenter une « mémoire » qui disparaît avec le temps.

La viscosité apparente du fluide dépend d'un certain nombre de propriétés, y compris la vitesse de cisaillement et l'historique du processus de cisaillement, selon la façon dont la viscosité apparente change avec le temps. Le comportement des fluides dépendant du temps peut être subdivisé en deux catégories : **les fluides viscoélastiques et les fluides thixotropes** [8].



CHAPITRE III

GENERALITES SUR

LES EMULSIONS

III-1- Généralités sur les émulsions

Les émulsions font partie de la famille des colloïdes, que l'on peut définir comme un système composé de deux phases distinctes en suspension et dont la dimension caractéristique (diamètre des gouttelettes ou longueur des discontinuités) se situe entre le micromètre et le nanomètre. Il existe une grande variété de classes de colloïdes en fonction de la nature des deux phases, elles sont présentées sur le **Tableaux III .1** [11].

Tableaux III .1 : Les différents types de colloïdes.

Phase dispersée→ Phase continue↓	Solide	liquide	Gazeuse
Solide	Suspension solide	Émulsion solide	Mousse solide
Liquide	Sol	Émulsion	Mousse
Gazeuse	Aérosol	Aérosol liquide	

III-1-1-Définition d'une émulsion

Une émulsion est définie comme un mélange de deux liquides immiscibles dont l'un est dispersé sous forme de fines gouttelettes, dans l'autre, le liquide enveloppant constitue la phase continue ou externe, le liquide dispersé constitue la phase interne, nous appellerons par émulsion stable, une émulsion qui ne peut pas être rompue sans avoir recours à certaines formes de traitement.

Dans le cas d'une huile brute ou d'une émulsion ordinaire, il s'agit d'une dispersion de gouttelettes d'eau dans l'huile. Normale, ou régulière, des émulsions d'huile-terrain consistent en une phase huileuse continue ou externe et une eau dispersée ou de la phase interne [12].

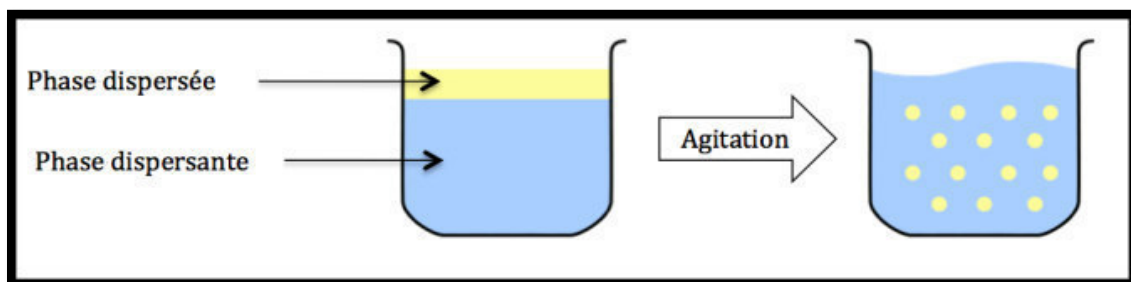


Figure III .1 Schéma explication des phases.

III .1 .2 Différents types d'émulsions

Il existe différents types d'émulsions (Clause et al., 2007), comme illustré dans la figure III .2.

III .1 .2 .1 Les émulsions simples

Sont constituées d'une phase continue et d'une phase dispersée. Elles sont appelées « émulsions directes » lorsque la phase continue est aqueuse (type Huile dans Eau, H/E), et inverses lorsque la phase continue est huileuse (type Eau dans Huile, E/H) .

III .1 .2 .2 Les émulsions multiples

Sont constituées d'une émulsion simple dispersée dans une phase continue. Elles peuvent donc être de type H/E/H ou de type E/H/E.

III .1 .2 .3 Les émulsions mixtes

Sont des émulsions dont la phase dispersée est constituée de gouttelettes de composés liquides différents par leur composition ou par leur concentration. Ces émulsions peuvent être de type E1+E2/H ou H1+H2/E [13].

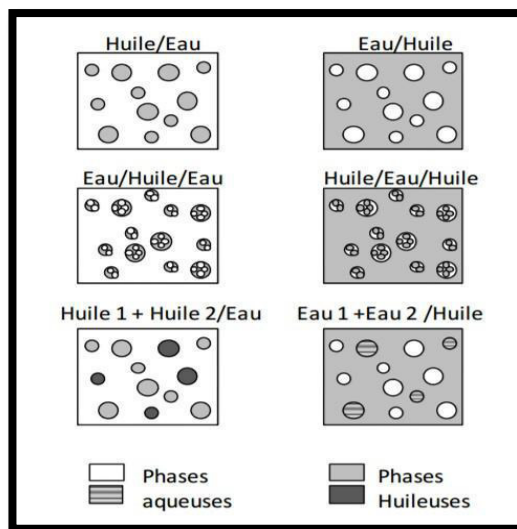


Figure III .2 Différents types d'émulsions.

III .1 .2 Composition

Une émulsion est, en général, composée de deux phases :

- **La phase lipophile**

La phase lipophile, également appelée phase grasse, phase huileuse ou phase l'organique, est généralement constituée d'un mélange d'ingrédients d'origines variées. Elle peut être composée d'huiles, de graisses et/ou de cires qui, à température ambiante, se trouvent respectivement sous forme liquide, semi-solide et solide. Des substances synthétiques peuvent aussi être utilisées.

- **La phase hydrophile**

La phase hydrophile, appelée également phase aqueuse, contient généralement de l'eau et des composés solubles en phase aqueuse appelés composés hydrosolubles.

Selon le domaine d'application (alimentaire, cosmétique ou pharmaceutiques ou pétrolier) et le type d'émulsion, différentes substances peuvent être ajoutées dans la phase lipophile ou hydrophile afin de conférer au produit diverses propriétés. Ces différents ingrédients se distribuent entre les deux phases en fonction de leur solubilité [14].

III .2 Les émulsifiants

III .2 .1 Définition

Un émulsifiant est un composé chimique qui contribue par son action interfaciale, à faciliter la création d'une nouvelle interface, en abaissant l'énergie libre interfaciale et à conférer une certaine stabilité à la gouttelette en formant à sa surface une couche adsorbée protectrice. Cette couche forme un film élastique et rigide et protège ainsi les gouttelettes lors de leur rapprochement. On appelle **émulsifiant** un composé stabilisant qui diminue la tension interfaciale et qui ralentit la coalescence.

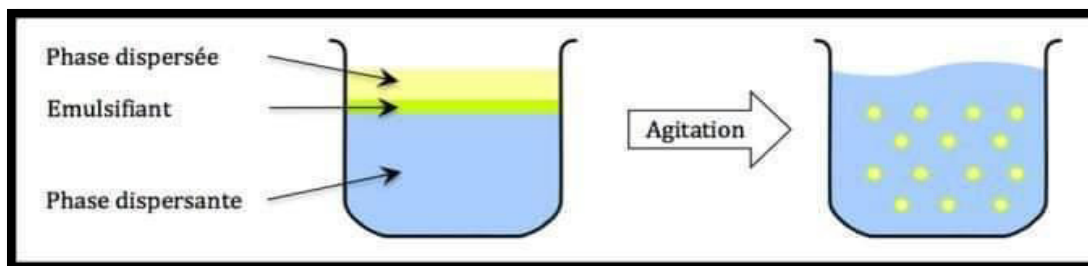


Figure III .3 Schéma d'une émulsion avec émulsifiant.

III .2 .2 Effet de l'émulsifiant

Les tensioactifs favorisent la formation des émulsions en facilitant la déformation des gouttes et donc leur rupture en gouttelettes. Plus l'agitation est forte, plus la quantité de tensioactifs à utiliser est faible et inversement [8].

III .2 .3 Formation et rupture des gouttes

Le procédé de formation des gouttelettes est basé sur le cisaillement du mélange et ce procédé s'effectue en deux étapes :

- **La dispersion** : mélange de la phase hydrophile et lipophile pour former de grosses gouttes d'environ 100 μm de diamètre.
- **L'homogénéisation** : rupture des grosses gouttes en gouttelettes d'environ 10 μm de diamètre.

Remarque : La taille des gouttelettes dépend de la vitesse de cisaillement du mélange [14].

III .3 Tension superficielle et tensioactifs

III .3 .1 Tension superficielle

La tension superficielle est une mesure de la force agissant à une frontière entre deux Phases. Ce phénomène a pour effet de minimiser l'aire de l'interface, compte tenu des contraintes imposées par ailleurs au système (gravité, pression ...). Ainsi, les tensions superficielles peuvent également être employées pour indiquer le potentiel pour le rétablissement de pétrole d'un réservoir. En particulier, la forme sphérique d'une goutte assure une surface minimale pour un volume donné (en l'absence de gravité).

Physiquement, la tension superficielle est associée aux forces de cohésion internes qui s'exercent entre les molécules d'un fluide : forces de van der Waals, liaisons hydrogène liaisons ioniques, liaisons métalliques (dans les métaux comme le mercure). Dans un fluide en volume, les forces exercées par chaque molécule sont équilibrées par celles exercées par les molécules voisines. Par exemple si on introduit une interface avec le vide, les forces exercées dans sa direction ne sont plus équilibrées ; c'est à l'origine des forces de tension superficielle et de l'énergie correspondante [15].

III .3 .2 Tensioactifs

III .3 .2 .1 Définition

Les tensioactifs sont des molécules organiques amphiphiles, comportant deux parties bien distinctes :

Une tête polaire hydrophile, qui présente une forte affinité pour les molécules d'eau et une queue apolaire hydrophobe (lipophile), que les molécules d'eau ont plutôt tendance à fuir (Figure III .4). La tête hydrophile est généralement constituée d'un ion ou d'un groupement possédant un moment dipolaire et la queue hydrophobe d'une ou de plusieurs chaînes aliphatiques. Lorsqu'elles se trouvent à l'interface eau-air, les molécules amphiphiles ont tendance à diriger leur tête hydrophile vers l'eau et leur queue hydrophobe vers l'air, ce qui a pour conséquence de modifier l'énergie de l'interface [8].

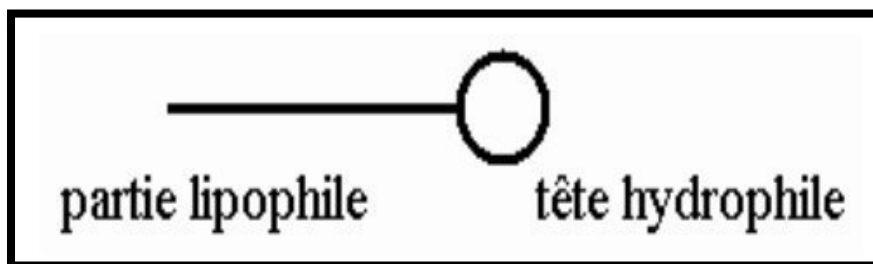


Figure III .4 Schéma simplifié d'une molécule de tensioactif.

III .3 .2 .2 Classification

A- Classement selon la charge

Il existe de nombreuses molécules tensioactives très différentes les unes des autres. On peut classer ces molécules en fonction de la charge de la tête hydrophile: dans la (figure III .5).

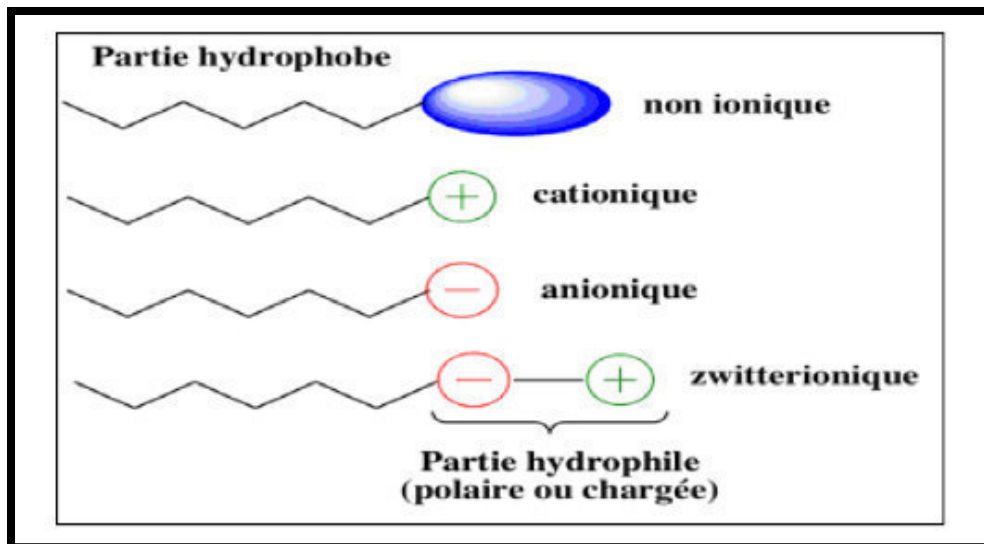


Figure III .5 Représentation schématique des quatre catégories de Tensioactifs.

- **Les tensioactifs anioniques** : La tête polaire est chargée négativement. Par exemple, les ions carboxylates ou sulfonâtes.
- **Les tensioactifs cationiques** : La tête polaire est chargée positivement. Par exemple, les amines protonées ou encore les ammoniums quaternaires. Cependant, ce type de tensioactifs regroupe des molécules toxiques et irritantes, leur utilisation est donc limitée.
- **Les tensioactifs zwitterioniques ou amphotères** : La tête hydrophile porte à la fois une fonction acide et basique. En fonction du pH du milieu, le tensioactif ne libère pas le même ion. En milieu basique, ce tensioactif se comporte comme un anion et en milieu acide comme un cation. C'est le cas des phospholipides (comme les lécithines) mais aussi des bétaines.
- **Les tensioactifs non ioniques** : La tête polaire n'est pas chargée mais elle possède des groupements polaires susceptibles de créer des liaisons hydrogènes. Par exemple, les esters de glycol ou encore des éthers d'alcool gras [11].

B-Classement selon la balance HLB

Afin de connaître le caractère plutôt hydrophile ou lipophile d'un tensioactif, on peut se référer à la balance empirique hydro-lipophile HLB (Hydrophilic/Lipophilic Balance) mise au point par Griffin en 1949 [11]. Elle permet de classer les tensioactifs selon leur lipophilie et leur hydrophilie. Ainsi, on attribue à chaque tensioactif un indice HLB, compris entre 0 et 20, traduisant le caractère du tensioactif :

- Si l'indice HLB < 8, alors l'amphiphile est lipophile.
- Si l'indice HLB > 12 alors l'amphiphile est hydrophile. (Plus la valeur est proche de 20, plus la solubilité dans l'eau est grande)

- De plus, on utilisera un tensioactif pour une émulsion Huile dans l'eau si $HLB > 12$ et un tensioactif pour une émulsion Eau dans l'huile si $HLB < 8$ [11].

III .3 .2 .3 Propriétés des tensioactifs

Les propriétés des tensioactifs sont influencées par plusieurs facteurs, d'une part la nature des molécules, d'autre part la formulation globale dans laquelle se trouve le tensioactif, et enfin la température.

III .3 .2 .3 .1 Adsorption aux interfaces

Les molécules tensioactives ont tendance à se concentrer aux interfaces et à s'orienter de façon à augmenter les interactions attractives (partie hydrophile/phase hydrophobe). Ce phénomène d'adsorption du tensioactif provoque une diminution de la tension superficielle ou de la tension interfaciale jusqu'à ce que l'interface soit saturée.

III .3 .2 .3 .2 Micellisation

Le tensioactif possède une capacité d'association qui se développe à partir d'une certaine appelée concentration micellaire critique, CMC (figure III .6). La micelle est une structure, dans laquelle les molécules de surfactifs possèdent une énergie libre plus faible qu'en solution. La micellisation est le résultat d'un compromis entre les effets qui tendent à favoriser l'extraction du surfactif de la phase aqueuse, tel l'effet hydrophobe, et les effets qui favorisent la dissolution du surfactif dans l'eau ou ceux qui s'opposent à la formation structure micellaire [16].

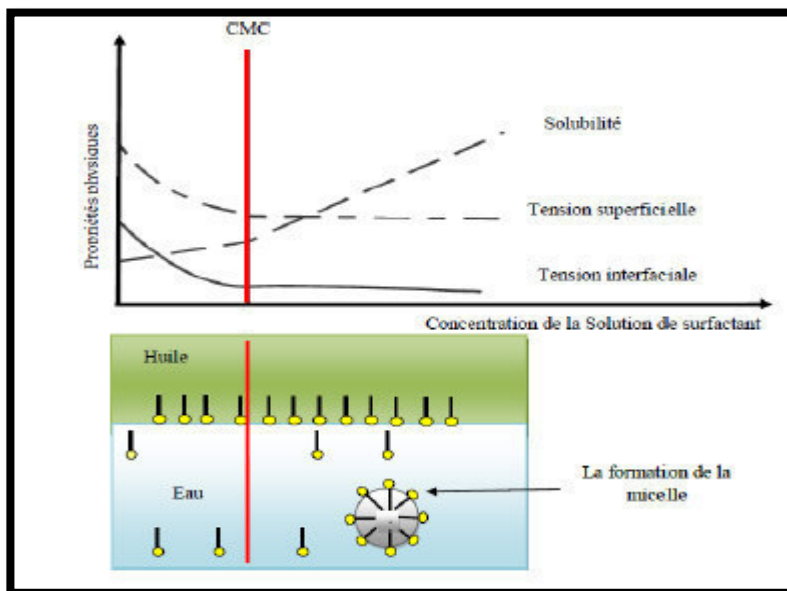


Figure III .6 Tension superficielle, Tension interfaciale, Formation d'une micelle en fonction de la concentration de la solution du surfactant.

III .3 .3 Les Additifs modificateurs de viscosité

L'additif est une substance chimique liquide ou solide qui, en général, est introduite avant ou pendant la préparation du produit afin d'apporter ou d'améliorer une ou plusieurs propriétés physico-chimiques.

Les additifs modificateurs de viscosité, appelés également agents de texture, sont des molécules qui stabilisent les émulsions en augmentant la viscosité de la phase dispersante.

Il existe des additifs modificateurs de viscosité pour les émulsions de types aqueuses (H/E) et huileuses (E/H).

- **Additifs modificateur de viscosité pour les émulsions aqueuse (H/ E)**

Agents de textures, stabilisateurs d'émulsion (H/E), les plus connus sont les épaississants et les gélifiants. En effet, à faible concentration ils ont la faculté d'augmenter la viscosité de la phase hydrophile.

- **Additifs modificateurs de viscosité pour les émulsions huileuses (E/ H)**

Sont en général, d'origine synthétique tels que les siliceés modifiées, les argiles modifiées ou divers polymères organiques. Les agents de texture pour les émulsions huileuses sont beaucoup plus rares étant donné que la viscosité de la phase huileuse est beaucoup plus importée que celle de la phase aqueuse. Ainsi, pour modifier la viscosité de la phase huileuse, il est conseillé de jouer sur la composition de la phase lipophile de l'émulsion [16].

- **Polymère**

Le mot polymère est composé de deux mots grecs ; « polus » signifie beaucoup et « meros » signifie partie ou pièce, donc le mot polymère signifie « beaucoup de pièces » et, ce mot est employé pour décrire tous les matériaux qui se composent de beaucoup d'unités répétitives. Les unités répétitives sont appelés monomères, ils sont liées ensemble habituellement par des fortes liaisons dits covalents de carbone-carbone. Les polymères sont des chaînes en général très longues, composées de 10³ à 10⁶ monomères avec les poids moléculaires moyens de 10⁴ à 10⁷ g/mol.

III .3 .4 Les choix des tensioactifs

Le choix des tensioactifs est très Important car ils assurent la formation et la Stabilité de l'émulsion dans le temps.

Les tensioactifs peuvent former des couples. En général, l'un des tensioactifs joue le rôle de stabilisateur d'interface et l'autre empêche la migration des gouttelettes (séparation des deux phases).

Pour que des couples de tensioactifs puissent se former, il faut prendre en compte différents paramètres :

- **Le HLB des tensioactifs** : l'un doit être hydrophile ($HLB > 10$) et l'autre doit être hydrophobe ($HLB < 10$).
- **Le pH** : certains tensioactifs ioniques sont incompatibles entre eux à un certain pH.
- **La température** : étant donné que la température peut varier lors d'une émulsion, il faut que les tensioactifs utilisés gardent les mêmes propriétés.
- **L'efficacité du tensioactif** : bien que certains tensioactifs aient le même HLB, ils n'auront pas les mêmes effets (ces informations peuvent être obtenues par les fournisseurs).
- **L'état physique du tensioactif** : les tensioactifs sont plus faciles à utiliser lorsqu'ils sont sous forme liquide [14]

III .3 .5 Stabilité d'une émulsion

En industrie, l'émulsification consiste essentiellement à produire une dispersion stable et homogène de deux liquides immiscibles. Cependant, ces systèmes sont souvent sujets à des mécanismes de déstabilisation pouvant être divisés en trois classes :

- Les mécanismes de migration de gouttes (floculation, crémage et sédimentation).
- Les mécanismes de variation de taille de gouttes (mûrissement d'Ostwald et Coalescence).
- Les mécanismes d'inversion de phase [16].

Tableaux III .2 Phénomènes et causes de l'instabilité des émulsions.

Phénomènes	Causes
Coalescence	Rapprochement des gouttelettes
Murissement d'Ostwald	Solubilité de la phase dispersée dans la phase dispersante
Crémage et Sédimentation	Différence de densité entre les phases
Floculation	Répulsion insuffisante entre les gouttelettes
Inversement de phase	Température

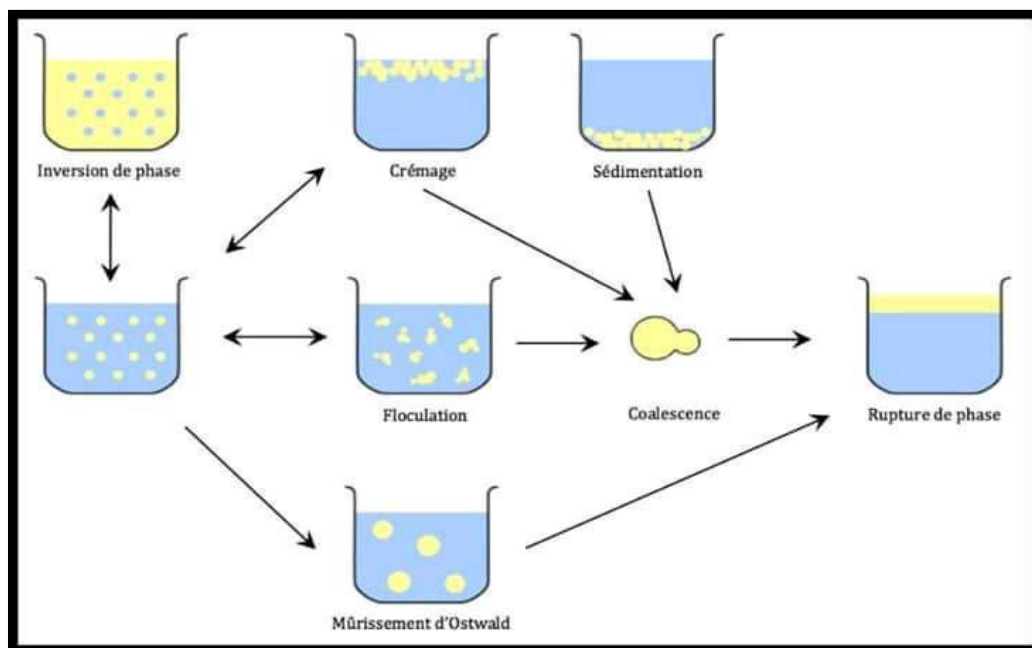


Figure III .7 : Schéma récapitulatif des différentes migrations de gouttelettes.

III .3 .6 Sédimentation ou crémage

La sédimentation ou le crémage ; les flocces de gouttelettes migrent, selon la densité des deux phases, vers le bas (sédimentation) ou vers le haut (crémage) du récipient contenant l'émulsion (figure III .8) [16].

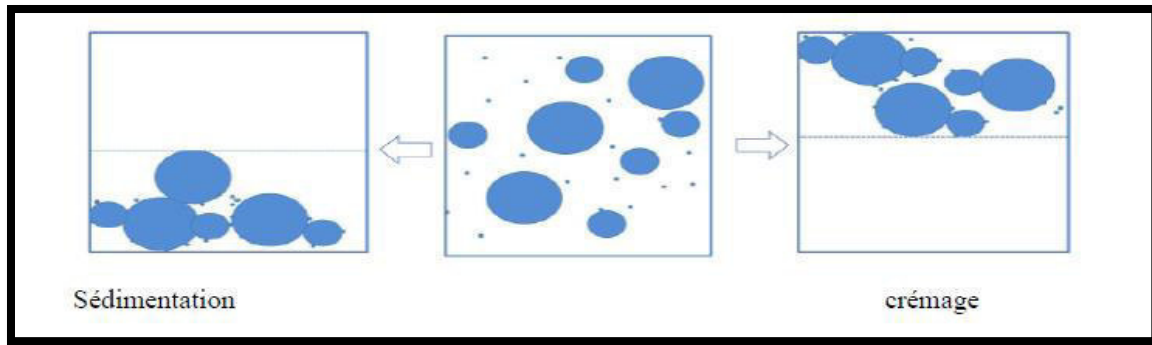


Figure III .8 Phénomène de sédimentation et crémage.

III .3 .7 .Floculation

La floculation qui provient de l'association des gouttelettes en floculats est caractérisée par l'état de proximité des gouttelettes qui ne sont alors déstabilisées que par un mince film de phase dispersante et de stabilisant (figureIII .9). Cet état ne conduit pas nécessairement à la coalescence [16].

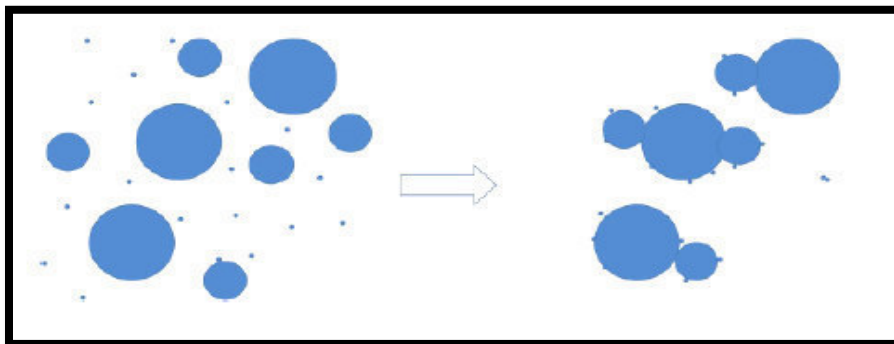


Figure III .9 Figure phénomène de floculation.

III .3 .8 Coalescence

La coalescence est due au rapprochement de gouttes par des forces d'interactions. Ici, le film interfacial se rompt pour donner naissance à une seule goutte. Ce phénomène se décompose en trois étapes : le rapprochement des deux gouttes, le drainage puis la rupture du film (figure III .10) [16]

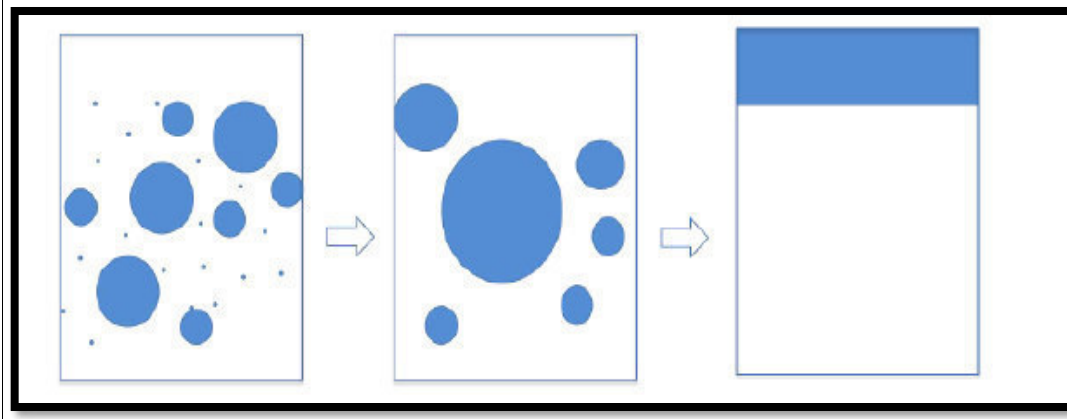


Figure III .10 Phénomène de coalescence.

III .3 .9 Mûrissement d'Ostwald

C'est un processus irréversible qui dépend d'une part de la granulométrie et d'autre part de la suppression de Laplace (figure III .11). Les gouttes les plus petites disparaissent au profit des plus grosses par transfert de matière à travers la phase continue [16].

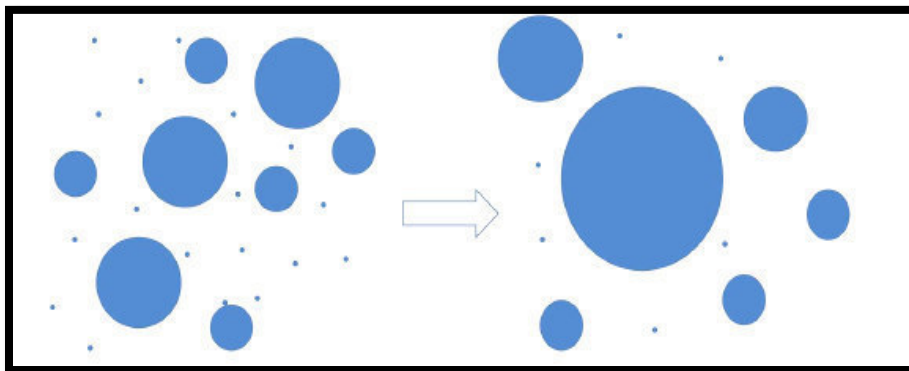


Figure III .11 Mûrissement d'Ostwald.

III .3 .10 Inversion de phase

Survenant par suite d'une modification chimique du tensioactif ou d'une augmentation inconsidérée de la phase interne ou de la température, elle se traduit par la transformation brusque ou progressive d'une émulsion H/E en une émulsion E/H et inversement : on dit que l'émulsion a tourné [16].



PARTIE

EXPERIMENTALE

IV .1 Objectif de l'étude

Dans le présent travail, nous présentons deux études expérimentales dans la quelle en étudiant: L'influence de la température sur le comportement rhéologique du pétrole brut. Pour améliorer les caractéristiques de l'écoulement du brut, nous avons ajouté un additif réducteur de frottement Quikflow X-2433.

L'effet de l'addition de toluène sur les propriétés rhéologiques du pétrole brut contenant près de 2.5% d'asphaltées sur la viscosité du pétrole brut.

IV .2 Matériels et Méthodes

IV .2 .1 Matériels utilisés

IV .2 .1 .1 Rhéomètre

- **Dispositifs expérimentaux « Rhéomètre AR 2000 »**

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le rhéomètre AR-2000 de TA Instruments c'est un rhéomètre rotatif, fonctionnent à gradient imposé (**Figure IV.1**). La gamme de gradients de vitesse accessibles avec cet appareil est comprise entre $6,25 \cdot 10^{-3}$ et 2000 s^{-1} pour la géométrie cône –plan dont nous disposons. Pour le monde oscillatoire. Il permet de travailler dans une gamme de fréquence entre 10^{-5} et $100[\text{rad/s}]$.

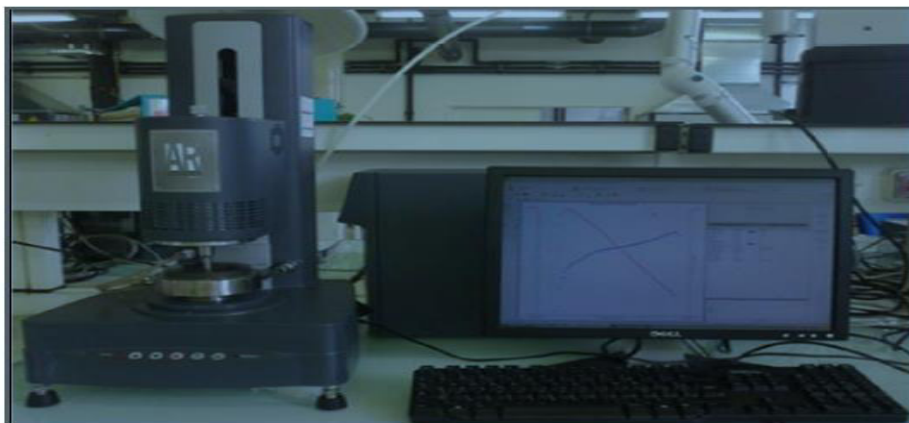


Figure IV .1 : Rhéomètre AR 2000.

- Les principales lois d'écoulement Rhéologiques utilisées pour décrire le comportement de tels fluides

Tableaux IV .1 : Principaux Modèles Rhéologies.

Modèles	Loi rhéologique	Paramètres
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{Bin}} \dot{\gamma}$	τ_c : Contrainte seuil. K : L'indice de consistance. n : L'indice d'écoulement.
Herchel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma})^n$	τ_c : Contrainte seuil. η_{PL} : Viscosité plastique.
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + [\eta_{\text{cas}} \dot{\gamma}]^{1/2}$	K_1 : Contraire seuil de casson. K_2 : Paramètre viscosité de Casson.

IV .2 .2 Les propriétés rhéologiques des produits

- Les propriétés rhéologiques du pétrole brut

Le brut utilisé est récupéré dans la région d'Illizi. Les caractéristiques physico-chimiques de l'huile brut utilisée, telles que la densité, la teneur en eau, et le bitume ont été déterminées sur le site et sont représentées dans le tableau (IV .2).

Tableau IV .2 : Caractéristiques du pétrole brut utilisé dans cette étude.

Caratéristiques des échantillons	
API gravity	32.7
Densité du brut (26°)	0.847
TVR(35.5°)	339
Bsw%	0.05

- **Toluène**

Le toluène, également appelé méthyl benzène ou phénylméthane est un liquide transparent, insoluble dans l'eau et possédant une odeur caractéristique rappelant celle du dissolvant pour peinture. Cette odeur rappelle quelque peu celle, douceâtre, du benzène apparenté. C'est un hydrocarbure aromatique très répandu utilisé comme produit de départ industriel.

Tableau IV .3 : les propriétés de Toluène.

Formule	C7H8
Masse Molaire (g.mol-1)	92.14
Masse Volumique (g/ml)	0.867 à 20°C
Point d'ébullition	110.6°C
Point de Fusion	-95°C
Indice de Réfraction	1.495 à 20°C

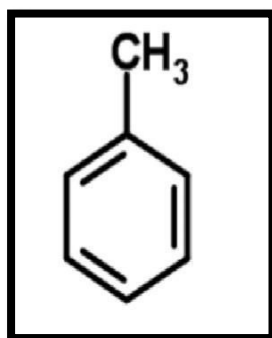


Figure IV .2 : Structure chimique du Toluène utilisé.

- **L'additif Quick flow X-2433 et ses propriétés**

Ce polymère est utilisé dans le transport du pétrole brut ; il est caractérisé par un haut poids moléculaire et une entière solubilité dans le pétrole brut. Sa formule chimique est tenue secrète. Dans ce tableau, on représente quelques propriétés physiques du polymère.

Tableau IV .4 : Caractéristiques de Quickflow X-2433.

Polymère	Apparences	Densité	Point d'inflammabilité	Point de congélation
Quickflow X- 2433	Liquide	0,92-0,94	>61,66°C	<-34,44°C

IV .2 .3 Mode opératoire

- **Expérience 1**

Nous avons utilisé le rhéomètre (AR2000 de TA Instruments) à contrainte imposée du Laboratoire LMMC de l'Université de Boumerdès. Il est composé de deux cylindres coaxiaux (rotor de rayon $R1 = 14$ mm et stator de rayon $R2 = 15$ mm ; hauteur immergée = 42 mm ; Aluminium). La régulation en température se fait au niveau de la partie extérieure par l'intermédiaire d'un bain thermostaté. La substance étudiée est emprisonnée dans l'espace annulaire, son volume est de 19,6 ml. Chaque échantillon est pré cisailé pour assurer une répartition uniforme de la matière composant la substance.

Dans le but d'améliorer les caractéristiques de l'écoulement du fluide, on ajoute des polymères réducteurs de frottement. Dans cette étude, on ne représente que l'évolution de la contrainte de cisaillement et la viscosité en fonction du gradient de vitesse et ce pour une concentration de 0,5% en volume ajouté au pétrole brut du polymère Quikflow X- 2433 qui est soluble dans le pétrole.

- **Expérience2**

Les paramètres rhéologiques ont été mesurés en utilisant le rhéomètre AR 2000 de TA-Instruments-à géométrie Couette (diamètre 14 mm). En raison de sa grande surface, nous pouvons obtenir une bonne précision avec ce type de dispositif et les mesures peuvent être obtenues même pour les faibles valeurs de la viscosité. Tous les échantillons seront soumis à un pré-cisaillement de 60 s, avec un taux de cisaillement $0,15 \text{ s}^{-1}$ pour homogénéiser l'échantillon dans la géométrie. Les échantillons seront laissés au repos pendant 30 secondes. Ensuite, la procédure d'acquisition est démarrée. La gamme de taux de cisaillement appliqué est de 0.01 S^{-1} à 500 S^{-1} . Plusieurs températures seront testées, 10°C , 15°C et 20°C .

Les échantillons de pétrole brut / tensioactifs a été homogénéisé en secouant dans un modèle incubateur agitateur Heidolph M. 3001k à 100 tours par minute et à 25°C pendant 5 min.

IV .3 Résultats et discussions :

IV .3 .1 Expérience 1

- **L'effet de température sur le comportement rhéologique du pétrole brut:**

Les différents graphes, représentés sur les **figures IV .3** et **4**, représentent l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité en fonction du gradient de vitesse, pour différentes températures.

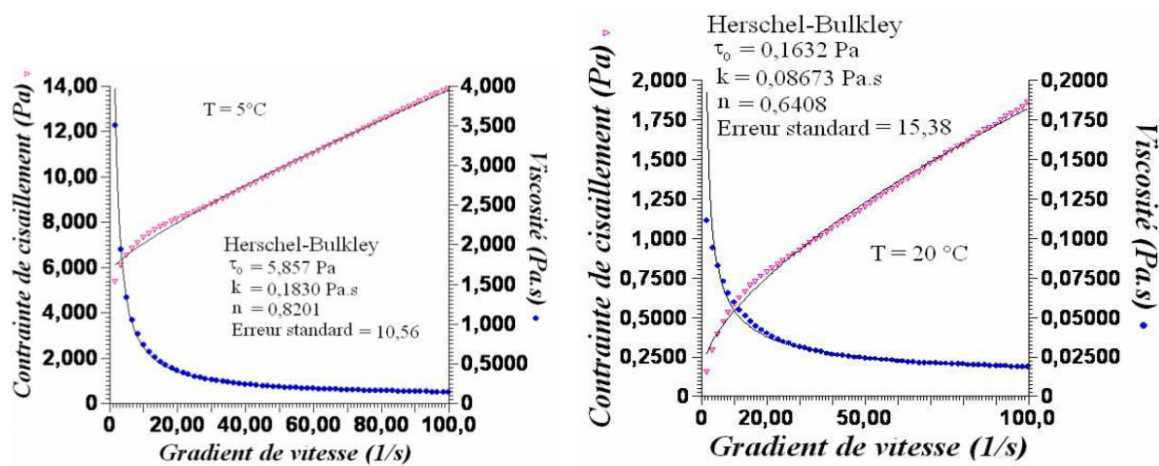


Figure IV .3 : Evolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour les températures 5°C et 20°C

1. Dans le cas de la température de 5°C, l'analyse des courbes d'écoulement et de viscosité obtenues (**figure 3**) a montré que les modèles de Herschel-Bulkley, Bingham et Casson corroborent les points expérimentaux avec des erreurs standard de 10,56%, 14,38% et 14,13%, ce qui nous permet de retenir le premier modèle. Dans le cas de 10°C et 15°C, c'est le modèle de Casson qui offre le meilleur ajustement. Par contre, dans les cas de 20°C et plus, c'est celui de Herschel-Bulkley qui convient pour ajuster les résultats expérimentaux.

Dans le cas de la **figure IV .3**, nous constatons une forte diminution de la viscosité du brut pour les faibles gradients de vitesse lorsque la température est inférieure à 25°C, ce qui n'est pas le cas pour des températures supérieures. Ce changement de viscosité peut être attribué à une modification de la structure de la substance. Les forces hydrodynamiques ont tendance à orienter les macromolécules constituant le brut dans le sens de l'écoulement et le mouvement brownien s'oppose à cette orientation. Plus la vitesse augmente (donc le taux de cisaillement), plus les molécules s'orientent et plus le frottement des molécules (donc la viscosité) diminue, Bellet et al.

2. On remarque que, pour une température de 30°C, le modèle rhéologique de Herschel-Bulkley tend vers le modèle de Bingham du moment que l'indice de structure, n , est voisin de l'unité. L'augmentation de la température a fait varier les paramètres rhéologiques (τ_0 , k , n , etc.). Pour des températures supérieures à 30°C (figure IV .4), les modèles de Herschel-Bulkley et Bingham corroborent les résultats expérimentaux avec une bonne approximation.

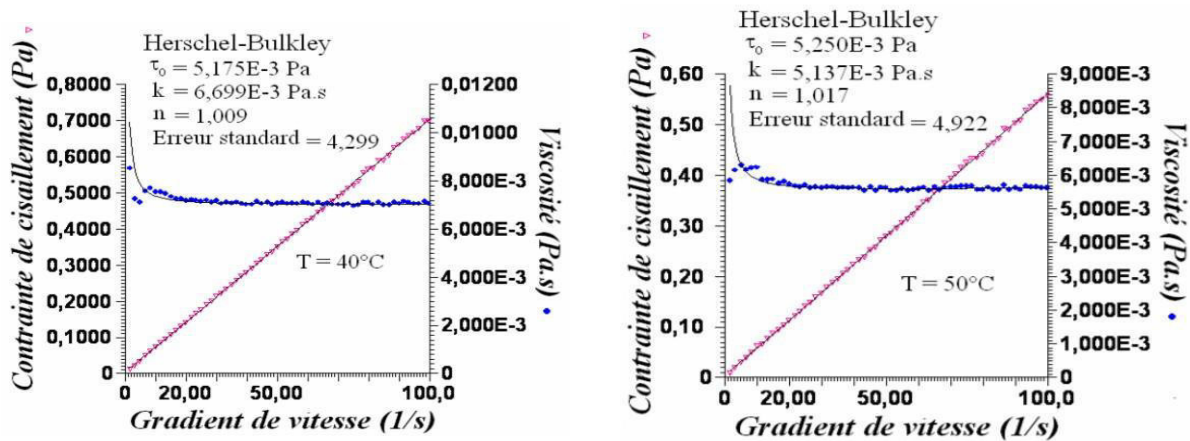


Figure IV .4 : Evolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour les e 40°C et 50°Ct.

3. La représentation des courbes de viscosité et de la contrainte de cisaillement, en fonction du gradient de vitesse, en échelle logarithmique (**figure IV .5**) pour l'ensemble des températures testées, montre que la viscosité évolue peu pour les températures supérieures à 20°C. Cette évolution est plus importante pour des températures inférieures à 20°C. Inversement, c'est aux faibles températures que l'action du gradient de vitesse est la plus importante et donc le caractère non newtonien le plus marqué. On note des rapports de viscosité plus importants, lorsque la température passe de 5°C à 20°C, que dans le cas où cette température passe de 20°C à 50°C. Cette influence de la température, sur les courbes d'écoulement, peut être attribuée à la présence de paraffine dans le pétrole brut.

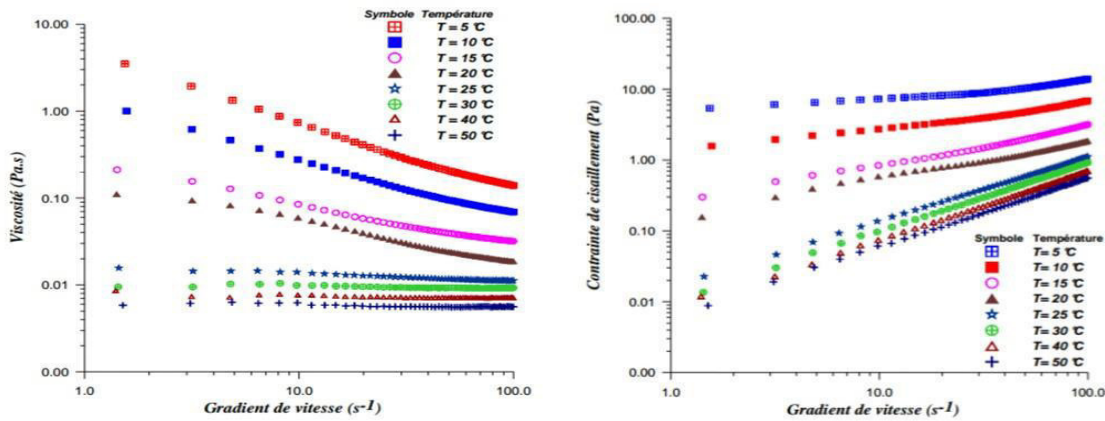


Figure IV .5 : Influence de la température sur la viscosité et la courbe d'écoulement du pétrole brut.

• **Effet de polymère Quikflow X- 2433 sur le comportement rhéologique du pétrole brut :**

Nous avons remarqué l'apparition de l'effet Weïssenberg, lequel est dû aux forces normales suite au caractère viscoélastique très marqué dans la solution préparée.

L'ajout, à une concentration de 0,5% de polymère Quikflow X-2433 dans le pétrole brut, a modifier les paramètres rhéologiques du pétrole brut comme le montre la figure (IV .6). La viscosité est devenue plus importante, tout en conservant le caractère non newtonien de la solution. La représentation de l'évolution de la contrainte de cisaillement, en fonction du gradient de vitesse, a permis de montrer que la solution polymérique développe des contraintes de cisaillement plus importantes pour un même gradient de vitesse.

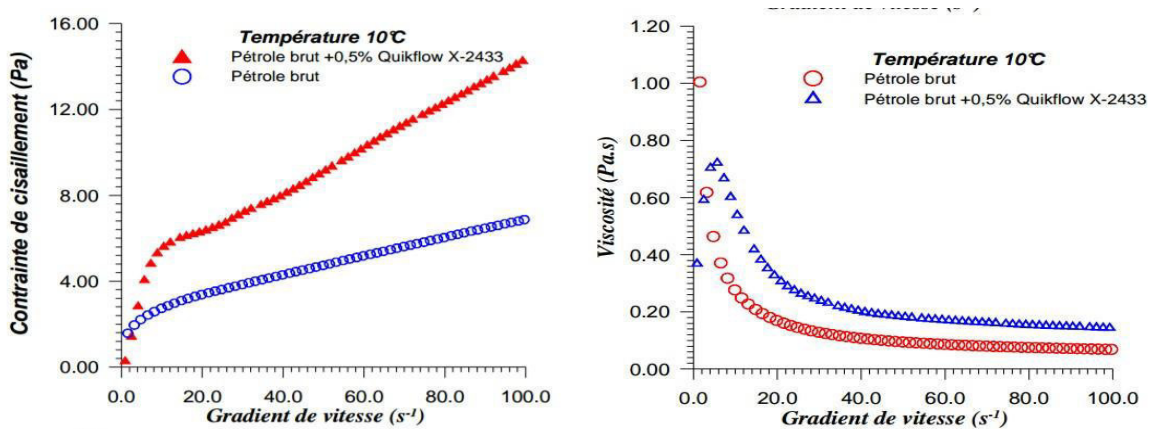
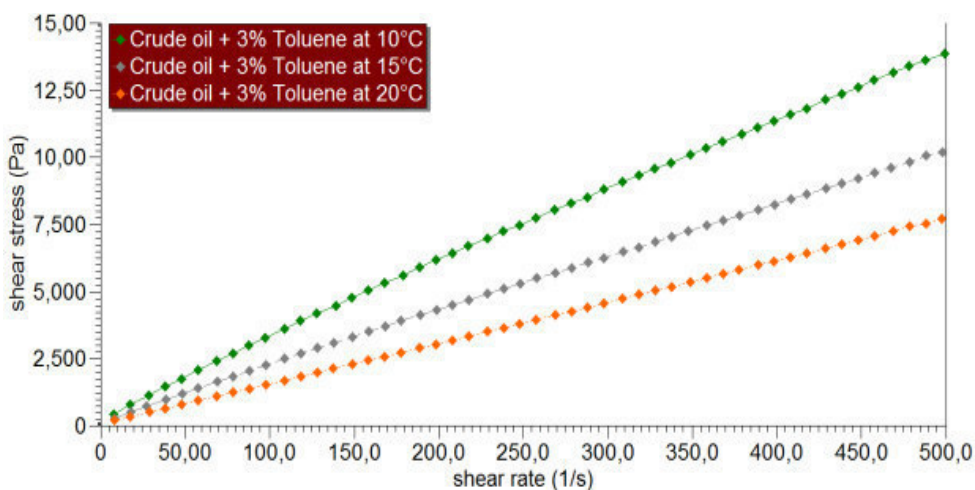
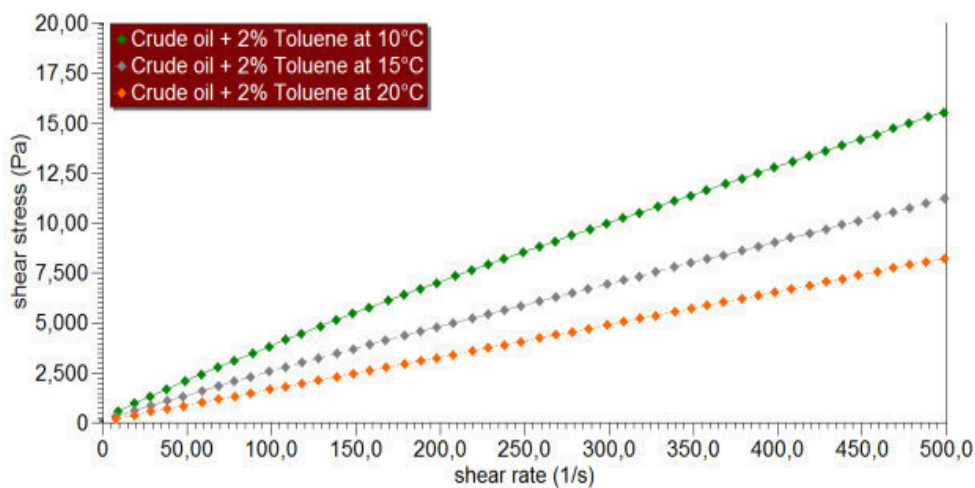


Figure IV .6 : Influence de l'additif Qui flow X-2433 sur les paramètres rhéologiques

IV .3 .2 Expérience 2

- **Etude rhéologique du système : pétrole brut/ toluène**

Les courbes de la **Figure IV .7**, montre le caractère non-newtonien pseudo-plastique, à savoir, il n'y a pas d'écoulement, lorsque la contrainte de cisaillement appliquée est inférieure à une (valeur critique). On peut observer que les courbes d'écoulement présentent des tendances similaires pour toutes les températures testées, une augmentation progressive de la contrainte de cisaillement est observée avec l'augmentation du taux de cisaillement.



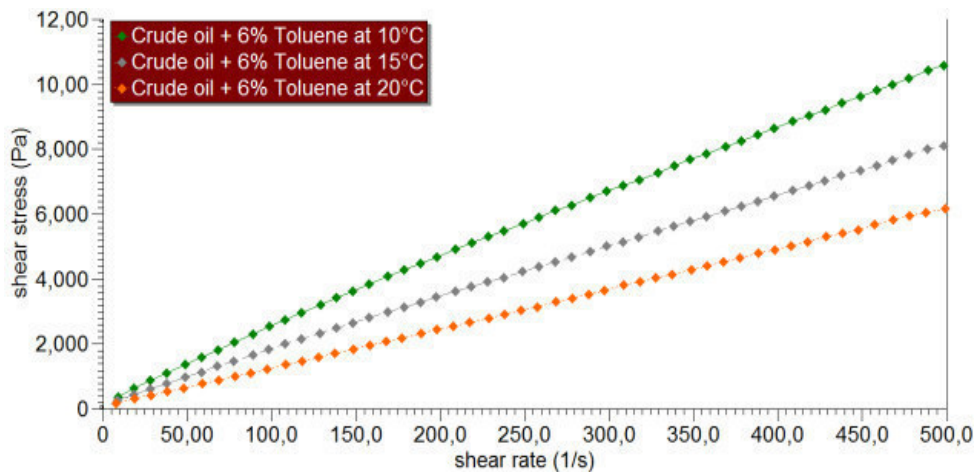


Figure IV .7 : courbes d'écoulement de pétrole brut Algérien traitée à des températures différentes.

Il a été constaté expérimentalement que la contrainte de cisaillement diminue lorsque la température augmente et que la viscosité diminue avec l'augmentation de la température. La contrainte seuil ainsi a diminuée avec l'augmentation de la température (**tableau 5**).

La figure IV .7 montre que l'efficacité de l'additif est significative au taux de cisaillement élevés. Ceci peut être attribué à la perturbation exercée par cisaillement élevé sur le mécanisme de l'interaction de l'agent tensioactif avec la structure de pétrole brut.

• Effet du Toluène et de la température sur la contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement du pétrole brut en présence de 2%, 3% et 6% de l'agent tensioactif pour des températures comprises entre 10 et 20 ° C à 250 S⁻¹ sont résumées dans le tableau (**IV .5**). Il est évident qu'en augmentant la concentration de l'agent tensioactif, la contrainte de cisaillement diminue considérablement par exemple (8,550 Pa à 2% à 5,713 Pa à 6% à 10 ° C) à 20 ° C la température, alors que (de 4,041 Pa at2% à 3,036 Pa). Les résultats ont montré que la température affecte la contrainte de cisaillement, cette dernière est réduite pour chaque concentration de Toluène.

En général, la contrainte de cisaillement de l'huile brut utilisée est réduite presque de moitié lorsque la température passe de 10 à 20 ° C, ceci est valable pour toutes les concentrations.

Tableau IV .5: Contrainte de cisaillement (Pa) du pétrole brut traité à un taux de cisaillement de 250 s^{-1} avec différentes concentration de toluène

Pétrole brut	Concentration du Toluène	10°C	15°C	20°C
	2%	8,550	5,857	4,041
	3%	7,484	5,309	3,794
	6%	5,713	4,231	3,036

• Effet du Toluène sur le seuil d'écoulement

Le seuil de l'écoulement est une contrainte limite, au-dessous de laquelle, l'échantillon se comporte comme un solide. En vertu de cette valeur, la déformation élastique disparaît lorsque la contrainte appliquée est atteinte. Le modèle de Herschel-Bulkley a été utilisé pour déterminer la contrainte seuil pour chaque échantillon à différentes concentrations de l'additif. Les résultats sont représentés dans le tableau (IV .6).

Tableau IV .6 : Evaluation du seuil d'écoulement et de son taux de réduction en fonction de la température et de la concentration de Toluène.

Temp (°C)	Seuil de l'écoulement (Pa)			%Réduction du seuil de l'écoulement			
	Sans additif	Avec additif			Avec additif		
		2%	3%	6%	2%	3%	4%
10	1,093	0,8628	0,7734	0,7624	21,06	29,24	30,24
15	0,9380	0,7026	0,6426	0,6063	23,17	31,49	35,36
20	0,6337	0,1287	0,4343	0,3984	79,69	31,46	37,13

Du **tableau IV .6**, on observe que le seuil de l'écoulement diminue considérablement avec la température, il est réduit à peu près de moitié lorsque l'échantillon est chauffé de 10 à 20 ° C. le taux de réduction du seuil d'écoulement est accru avec l'augmentation de la température de 10 ° C à 20 ° C , qui peut être provoquée par l'effet de la température sur la structure des composants chimiques qui se traduit par la destruction des structures ordonnées de composants lourds dans la phase de pétrole brut, et de réduire par conséquent le seuil de l'écoulement du pétrole brut. Pour toutes les concentrations du tensioactif utilisé dans notre étude, le taux de réduction maximum obtenu est 79,69%, correspondant à l'addition de 2% de tensioactif à 20 ° C. A 10 ° C et 15 ° C l'addition de 3% et 6% d'agent tensioactif diminue la valeur de la contrainte seuil, de 29,24% et 35,36% respectivement. On peut dire que la présence de tensio-actif dans le pétrole brut réduit considérablement le seuil de l'écoulement qui rend le début de l'écoulement facile.

• Effet de la température sur la viscosité du brut sans additif

La température est considérée comme un paramètre important pour mieux comprendre les propriétés structurales et rhéologiques de pétrole brut, en échelle logarithmique, nous avons présente la viscosité apparente par rapport à la vitesse de cisaillement, à partir de laquelle on voit que la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de vitesse de cisaillement pour toutes les températures de test et que le taux de diminution est abaissé avec une augmentation de la température.

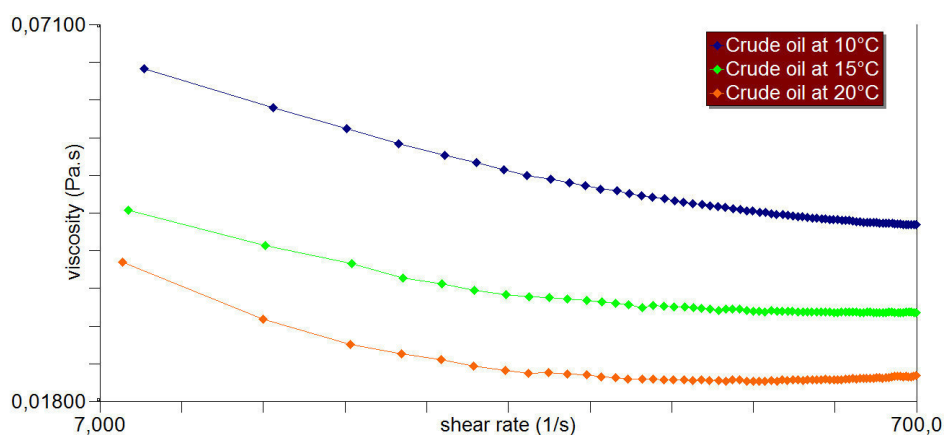


Figure IV .8 : Effet de la température sur la viscosité du pétrole brut sans additif.

Il a été observé que la viscosité présente une variation plus grande à des vitesses de cisaillement plus faibles par rapport aux vitesses de cisaillement plus élevées. Cela peut s'expliquer par :

Avec l'augmentation de température, les composants de poids moléculaire élevé du pétrole brut, tel que des asphaltènes, résines, cires, etc. Ne sont pas en mesure de s'agglomérer et former des agrégats et donc la rupture du lien entre les particules solides, ce qui conduit à la réduction de la viscosité, tandis que des taux de cisaillement élevés la viscosité devient constante en raison de la stabilisation des structures de cire et des asphaltènes.

• Effet de l'addition du surfactant sur la viscosité

Résultats de la viscosité apparente du pétrole brut / agent tensio-actif à la température 10 °C, 15 °C et 20 °C, à la vitesse de cisaillement dans la plage de 0 à 500 s⁻¹ sont présentés dans le tableau IV, et sont représentés graphiquement sur la **figure (IV .9)**. De toute évidence, Le tensioactif réduit la viscosité du pétrole brut et les résultats dépendent de la concentration de l'additif.

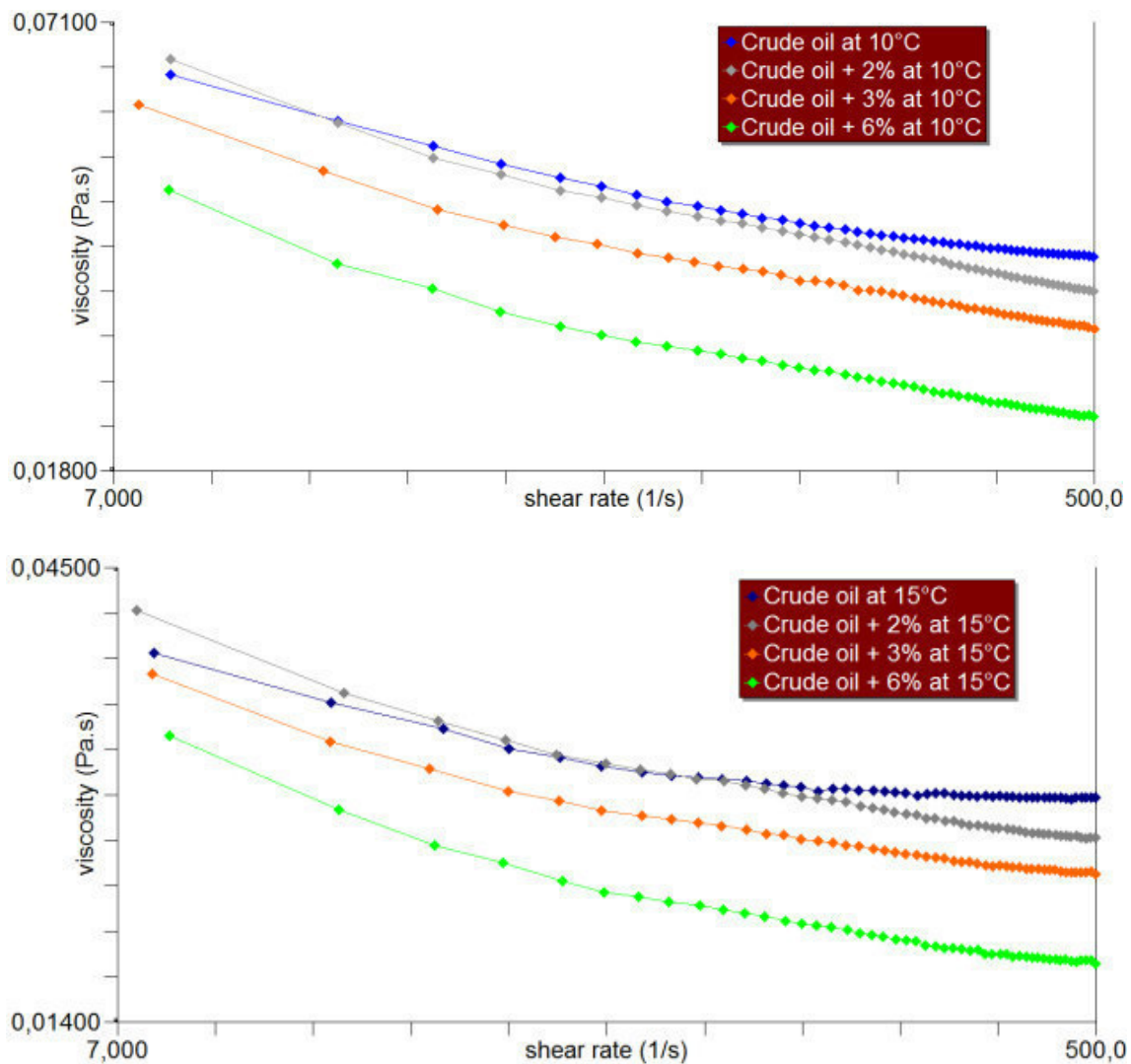


Figure IV .9 : Effet de la température sur la viscosité du pétrole brut avec additif.

Il a été observé que la viscosité présente une variation plus grande à des vitesses de cisaillement plus faibles par rapport aux vitesses de cisaillement plus élevées. Cette réduction dépend non seulement de la concentration du Toluène, mais aussi de la température d'essai et le taux de cisaillement appliqué. Ceci est conforme avec les travaux d'El Gamal. Selon ces figures, il convient de noter que le taux de réduction de la viscosité peut augmenter avec l'augmentation de la concentration du tensioactif dans la solution, en particulier à 6%. L'agent tensio-actif a également été efficace pour réduire la viscosité de manière significative à plus haute température. On a observé que le taux de diminution est une fonction croissante de la concentration, mais tend toujours à la valeur asymptotique à de fortes contraintes de cisaillement. Une réduction importante de la viscosité apparente a été observée pour toutes les concentrations d'additif. Toutefois, à des valeurs de taux de cisaillement supérieur à 250s^{-1} **Figure (IV .9)**, il y a une réduction de la viscosité apparente à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une concentration en solution de 2% de toluène. Mais, à des valeurs de vitesse de cisaillement inférieure à 250 s^{-1} , aux mêmes températures, la réduction de la viscosité est négligeable. La variation de la viscosité avec la concentration de l'additif à $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ est représentée sur **la Figure (IV .9)**.

IV .4 Conclusion

D'après les deux articles de Safri Abdelhamid et Bouhadeb Malek (première expérience) et Djemiat Djamal Eddine, Safri Abdelhamid Et Benmounah Abdelbaki (deuxième expérience). On note que l'augmentation de la température a également un effet positif sur l'efficacité de l'additif (tensioactif, polymère) car il diminue la viscosité et le seuil d'écoulement du pétrole brut.

Le comportement rhéologique du pétrole brut algérien a montré que le fluide étudié est de type viscoélastique et non-newtonien :

- La première expérience et suit les modèles rhéologiques de Herschel-Bulkley et de Casson pour les faibles températures et celui de Herschel-Bulkley et Bingham pour des températures supérieures à 20°C (fluide plastique).
- La deuxième expérience correspond au modèle rhéologique de Herschel-Bulkley (rhéofluidifiant).



CONCLUSION

Conclusion générale

Le pétrole brut provient de différentes régions du monde et montre leur variation de comportement rhéologique aux différentes températures. On note que la température affecte la viscosité du pétrole brut qui diminue considérablement avec l'augmentation de la température, et ainsi le taux de cisaillement. L'influence de la température sur la viscosité est bien plus significative que le taux de cisaillement.

Dans ce travail, nous avons présenté le comportement rhéologique d'un pétrole brut algérien contenant du polymère Quikflow-X-2433 et de tensioactif (Toluène), afin d'améliorer les caractéristiques d'écoulement du pétrole brut. A cet effet, les effets de la concentration de tensioactif et de la température sur les principaux paramètres rhéologiques et le caractère viscoélastique de pétrole brut ont été étudiés.

Le pétrole brut se comporte comme un fluide plastique et suit les modèles rhéologiques de Herschel-Bulkley et de Casson pour les faibles températures et celui de Herschel-Bulkley et Bingham pour des températures supérieures à 20°C. Nous avons constaté que les paramètres rhéologiques (τ_0 , k , n , η_{Bin} , η_{Cas}) des différents modèles varient avec la température. Cette variation est plus importante lorsque la température passe de 5°C à 20°C que dans le cas où cette température passe de 20°C à 50°C. L'ajout, au pétrole brut, du polymère Quikflow-X-2433, à une concentration volumique de 0,5%, nous a permis de montrer que la solution polymérique devient plus visqueuse, cette addition lui procure alors un caractère viscoélastique très marqué.

Les résultats expérimentaux de pétrole brut avec ou sans agent tensio-actif montrent que :

- Le comportement rhéologique du pétrole brut algérien a montré que le fluide étudié est de type non-newtonien et correspond au modèle rhéologique de Herschel-Bulkley (rhéofluidifiant).
- La viscosité de l'huile brut diminue de manière significative avec la température et avec l'augmentations de la vitesse de cisaillement dans la plage de températures 10°C et 15 °C et 20 ° C.
- Le seuil d'écoulement diminue en augmentant la température et la concentration de l'additif.
- Le taux de réduction de la viscosité, le seuil d'écoulement et la contrainte de cisaillement sont en fonction de la concentration de l'agent tensioactif dans la solution.

-L'efficacité de l'agent tensioactif sur les paramètres rhéologiques du pétrole brut est fortement affectée par le taux de cisaillement appliqué.

-L'augmentation de la température a également un effet positif sur l'efficacité de l'additif car il diminue la viscosité et le seuil d'écoulement du pétrole brut.

Ainsi, l'objectif de l'effet de la température, du polymère et du tensioactif est de réduire la contrainte et la viscosité du pétrole brut

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographique

- [1] BELGHIT, C. (2019). *NOUVELLES CORRELATIONS POUR LA DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET THERMODYNAMIQUES DES HYDROCARBURES ET DES FRACTIONS PETROLIERES.*
- [2] Tulipe, S. (2004). Le bassin tchadien à l'épreuve de l'or noir. *Politique africaine*, (2), 59-81.
- [3] Djemiat, D. E. (2017). Contribution à l'étude du comportement rhéologique du pétrole brut provenant du champ pétrolier de Tin Fouyé Tabankort, TFT (Illizi, Algérie)
- [4] RAHMOUNI, M., & DAHOU, M. E. A. (2017). *ETUDE DE DESSALAGE DU PETROLE BRUT*, Université Ahmed Draia-ADRAR.
- [5] Guibet, J. C. (1997). *Carburants et moteurs. Tome 1* (Vol. 1). Editions Technip.
- [6] le Jury, D. (2016). *Biodégradation des Hydrocarbures (Pétrole brut et Kérosène) par la Microflore Microbienne des Eaux de la région de Skikda*, Université de Annaba.
- [7] Sawsen, A. B. E. D., OUARZKI, I., & Sara, A. G. G. O. U. N. (2017) Etude de valorisation des bruts provenant des champs pétroliers Algériens.
- [8] Mouas, A. (2011). Etude du comportement rhéologique du pétrole brut à haute et à basse température et de l'influence d'un additif réducteur de frottement.
- [9] ELAHACENE Nour elhouda.(2019). essais et mesures rhéologique pilotes par le logiciel rheo3000, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [10] GUY, COUARRAZE, JEAN-LOUIS, GROSSIORD, et NICOLAS, HUANG. *Initiation à la rhéologie* (4^{Éd.}): Bases théoriques et applications expérimentales. Lavoisier, 2014.
- [11] L. CAULLET, A. D. SANTOS, G. KNIPPER, M. RUSALEN et M. SEIGNEUR, 2017-2018, *LES ÉMULSIONS ALIMENTAIRES ET COSMÉTIQUES*, université de lorraine.
- [12] Selka, C., & Kelaiaia, A. (2017). *TRAITEMENT DE L'ÉMULSION PAR LE DESSALAGE ET LES PRODUITS CHIMIQUES.*
- [13] Ratisbonne-Zafimahova, K. A. (2013). Formulation d'un adjuvant phytosanitaire sous forme d'émulsion et optimisation de la pulvérisation.
- [14] M.-L. Dupasquier, A. Nazari, F. Fontaine-Vive, X. Fernandez, J. Golebiowski, CDIEC, *Les émulsions cosmétiques*, Université de Nice SophiaAntipolis. [en ligne], disponible sur <http://.ressources.uniscielfr/formulat> .consulté le 15/08/2020.

[15] BENHAMZA, M. (2010). Nouvelles formulations pour peintures, résines et adjuvants à base de tensioactifs biodégradables, Thèse de doctorat, Université 08 Mai 1945–Guelma.

[16] Aoudia, F. (2017). Etude du pouvoir émulsifiant de tensioactifs cationiques pour l'industrie cosmétique, UMMTO.

Partie d'interprétation des résultats

Safri Abdelhamid¹., Bouhadeb Malek². Effet de la température et d'un additif sur le comportement rhéologique du pétrole brut, USTHB.

Djemiat, D. E., Safri, A., & Benmounah, A. (2015). Effet d'un agent tensioactif sur le comportement rhéologique d'un pétrole brut Algérien. In Congrès français de mécanique. AFM, Association Française de Mécanique.

MERZOUGUI, A. (2009). ETUDE EXPERIMENTALE ET PREDICTIVE DE L'EQUILIBRE LIQUIDE-LIQUIDE DU SYSTEME TERNAIRE n-HEPTANE-TOLUENE-ANILINE (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).

Mouas, A. (2011). Etude du comportement rhéologique du pétrole brut à haute et à basse température et de l'influence d'un additif réducteur de frottement (Doctoral dissertation).