

N° d'ordre : 01/2011- M/G-C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENE »
FACULTE DE GENIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister

EN GENI CIVIL

Spécialité Hydraulique

Par : Mr MOUAS Amar

Sujet

***Etude du comportement rhéologique du pétrole brut à haute
et à basse température et de l'influence d'un additif
réducteur de frottement***

Soutenu publiquement le 28/09/2011 devant le jury composé de :

M. BOUHADEF	Professeur USTHB	Président
A. SAFRI	Maître de conférences USTHB	Directeur de mémoire
K. BENYOUNES	Maître de conférences UMBB	Examineur
M. C. KHELLAF	Maître de conférences USTHB	Examineur

Remerciements

Je tiens d'abord à remercier vivement mon promoteur Mr Abdelhamid Safri Maître de conférences à la faculté de Génie Civil de l'USTHB.

Je tiens à remercier Monsieur Malek Bouhadeb, Professeur à la faculté de Génie Civil de l'USTHB, directeur de laboratoire LEQHYD, pour l'honneur qu'il me fait de présider ce Jury.

Je remercie intensément Monsieur K. Benyounes, Maître de conférences à l'université de Boumerdes (UMBB), pour avoir bien voulu accepter de faire partie du Jury.

Je voudrai également exprimer mes remerciements à Monsieur Khellaf Med Cherif, Maître de conférences à l'USTHB, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je voudrai également exprimer mes remerciements à Mr Benmounah Abdelbaki Maître de conférences à l'université de Boumerdes (UMBB), ainsi que son équipe de l'Unité de Recherche (UR-MPE).

Je ne saurais oublier ma famille et ma femme qui m'a été d'un grand soutien et qui n'a ménagé ni sa patience ni ses encouragements pour que ce travail puisse un jour aboutir.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	4
Introduction.....	4
I.1. Comportement rhéologique.....	4
I.1.1. Définition de la rhéologie	4
I.1.2. Notion de mouvement de cisaillement	5
I.1.2.1. Déformation et vitesse de cisaillement (shear rate)	5
I.1.2.2. La contrainte de cisaillement (shear stress).....	6
I.2. Viscosité.....	7
I.3. Viscoélasticité	8
I.3.1. Modèle mécanique	10
I.3.1.1. Solide élastique parfait.....	10
I.3.1.2. Liquide visqueux newtonien	11
I.3.1.3. Lois d'association en série et en parallèle.....	12
I.4. Rhéogramme	13
I.5. Classification des fluides	14
I.5.1. Les fluides newtoniens.....	14
I.5.2. Fluides non newtoniens (non linéaires).....	14
I.5.2.1. Liquides rhéo-fluidifiants (Shear softening, thinning).....	15
I.5.2.2. Fluides rhéoépaississants (shear thickening).....	18
I.5.2.3. Liquides plastiques.....	19
I.5.2.4. Les liquides thixotropes	21
I.6. Le pétrole.....	22
I.6.1. Classification des bruts pétroliers	23
I.6.2. Formation et production du pétrole.....	23
I.6.3. Composition du pétrole.....	24
I.7. Additif réducteur de frottement	25
I.7.1. Polymère	25
I.7.2. Les tensioactifs.....	26
I.7.3. Les fibres.....	26
I.8. Les forces dans les milieux dispersés	26
I.8.1. Le mouvement brownien	27
I.8.2. La tension superficielle	27
I.8.3. Les forces de Van Der Waals.....	28

I.8.4. Forces électrostatiques	28
I.8.5. La liaison hydrogène	29
I.9. État de l'art	29
I.9.1 Influence de la température.....	30
I.9.2 Influence de taux de cisaillement.....	36
I.9.3. Influence des additifs	39
Conclusion	41
Chapitre II : Matériaux et appareillages	43
Introduction.....	43
II.1. Tests physico-chimiques.....	44
II.1.1. Densité	44
II.1.2. Viscosité	45
II.1.3. Teneur en eau.....	46
II.1.4. Tension de Vapeur Reid (T.V.R.).....	47
II.1.5. Teneur en asphaltène	49
II.1.6. Point d'écoulement	49
II.2. Matériaux utilisés	49
II.2.1. Viscosifiant	49
II.2.2. Additif Quickflow X-2433.....	50
II.3. Appareil de mesure la viscosité (viscosimètre)	50
II.3.1. Définition	50
II.3.2. Principe de fonctionnement	52
II.3.3. Equation générales.....	53
II.3.3.1. Détermination de $\tau(\mathbf{r})$	54
II.3.3.2. Détermination de $\gamma(\mathbf{r})$	55
Chapitre III : Etude expérimentale et interprétations des résultats	58
Introduction.....	58
III.1. Préparation des solutions.....	58
III.1.1. Préparation de la solution en viscosifiant.....	59
III.1.2. Préparation des échantillons	59
III.2. Le protocole suivi	59
III.3. Caractéristiques du pétrole brut	60
III.4. Présentation et discussion des résultats expérimentaux.....	60
III.4.1. Étude rhéologique de pétrole brut modifié sans additif.....	60

III.4.1.1. Etude des courbes d'écoulement et l'influence de la température	60
III.4.1.2. Etude de l'évolution de la viscosité et l'influence de la température	71
III.4.2. Étude rhéologique de pétrole brut modifié avec l'ajout de l'additif réducteur de frottement	76
III.4.2.1 Etude de l'effet de la concentration en polymère réducteur de frottement.....	76
III.4.3. Dégradation de polymère	84
Conclusion	86
Conclusion et recommandations.....	87
Références.....	89

Liste des figures et des photographies

Figure I.1 : Schéma du mouvement de cisaillement	5
Figure I.2 : Schéma de déplacement des particules sur deux couches adjacentes	6
Figure I.3 : Schéma illustre le déplacement relatif de deux couches successives	7
Figure I.4 : Fonction du fluage et le symbole d'un solide plastique parfait (ressort)	11
Figure I.5 : Fonction fluage et le symbole d'un liquide newtonien (amortisseur)	11
Figure I.6 : Représentation mécanique de solide de Kelvin-Voigt (a) et liquide de Maxwell (b)	12
Figure I.7 : Représentation de la fonction de fluage pour le solide de Kelvin-Voigt (a) et le liquide de Maxwell (b)	13
Figure I.8 : Rhéogramme d'un fluide newtonien et l'évolution de sa viscosité	14
Figure I.9 : Rhéogramme d'un corps fluidifiant et l'évolution de sa viscosité apparente	15
Figure I.10 : Rhéogramme d'un corps fluidifiant en coordonnées log-log	16
Figure I.11 : Rhéogramme de certains corps fluidifiants	16
Figure I.12 : Représentation de l'équation de Shangraw	17
Figure I.13 : Rhéogramme de fluide rhéoépaississant et la variation de la viscosité	18
Figure I.14 : Rhéogramme d'un corps de Bingham	20
Figure I.15 : Rhéogramme d'un corps de Casson	20
Figure I.16 : Rhéogrammes présentant le cycle d'hystérésis, (a) avec un rhéomètre à contrainte imposée et (b) avec un rhéomètre à vitesse de déformation imposée	22
Figure I.17 : Classification des bruts pétroliers selon leur °API	23
Figure I.18 : Schéma de principe de chaîne de polymère de polyéthylène	25
Figure I.19 : comportement rhéologiques d'un brut paraffinique Nord Africain pour différentes température	31
Figure I.20 : Rhéogramme aux différentes températures pour les fractions volumétriques fixes de la phase dispersée. (a) Huile déshydratée (0%) et (b) émulsion Eau-pétrole (20%) et (c) émulsion Eau-pétrole (40%)	33
Figure I.21 : Viscosité cinématique en fonction de la température à un taux de cisaillement fixe $\dot{\gamma} = 50s^{-1}$	34
Figure I.22 : Rhéogramme de pétrole brut vierge de Nada à 33°C	34
Figure I.23 : Rhéogramme de pétrole brut vierge de Nada à 24 °C (a) ; à 27 °C (b)	35
Figure I.24 : Effet de la température sur la contrainte critique (à gauche) et sur la viscosité (à droite)	36
Figure I.25 : Viscosité apparente de pétrole brut contre le taux de cisaillement aux différentes températures sur l'échelle log-log	38
Figure I.26 : Viscosité absolue vs le taux de cisaillement aux différentes températures. (a) Pétrole déshydraté (0%)	38
Figure I.27 : Viscosité absolue vs le taux de cisaillement aux différentes températures. (a) Pétrole déshydraté (0%). (b) émulsion Eau-pétrole (20%). (c) émulsion Eau-pétrole (40%)	39
Figure II. 1 : Schéma principal d'évacuation des effluents au TFT	44
Figure II. 2 : Cylindres de révolution	53
Figure II. 3 : Différentes couches cylindriques de l'échantillon par leur distance r	53
Figure II. 4 : Portion de substance comprise entre deux couches de rayon r et r'	54

Figure II. 5 : Deux couches cylindriques infiniment voisines de rayons r et $r + dr$	56
Figure III 1 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 20°C	62
Figure III 2 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 25°C	63
Figure III 3 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 30°C	64
Figure III.4 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 35°C	65
Figure III 5 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 40°C	66
Figure III. 6 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 50°C	67
Figure III 7 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse aux différentes températures	69
Figure III. 8 : Evolution de la contrainte seuil de cisaillement en fonction de la température	70
Figure III 9 : Evolution de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesse à différentes températures	72
Figure III 10 : Evolution de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesse à différentes températures	74
Figure III.11 : Contrainte de cisaillement en fonction de gradient de vitesse à la température 20, 25, 30 et 40°C pour différents concentrations Quikflow X-2433	76
Figure III 12 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse pour les concentrations de 0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppmp. Haut à 20 °C. Bas à 25 °C	77
Figure III 13 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse pour les concentrations de 0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppmp. Haut à 30 °C. Bas à 40 °C	78
Figure III 14 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 10 et 20 ppmp	81
Figure III 15 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 30 et 40 ppmp	82
Figure III 16 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 60, 80 et 100 ppmp	83
Figure III 17 : Influence du vieillissement de la solution polymérique (Quikflow X-2433) sur l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour $C_p = 20$ ppmp à 25°C	85
Figure III.18 : Influence du vieillissement de la solution polymérique (Quikflow X-2433) sur l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour $C_p = 30$ ppmp à 25°C	85
Photographie II. 1 : Viscosimètre à chute de bille	46
Photographie II. 2 : Centrifugeuse	47
Photographie II. 3 : Bombe Reid destiné pour mesurer la TVR	48
Photographie II. 4 : Viscosimètre HAAKE VT550	51
Photographie II. 5 : Géométrie MV-DIN	52

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Lois rhéologiques des fluides	30
Tableau I.2 : Ajustement des données viscosimétriques pour le brut cireux non traité d'Umbarka au modèle d'écoulement de casson	35
Tableau I.3 : Données anticipées de rhéomètre pour le pétrole brut de Nada	40
Tableau II. 1 : Caractéristiques de Quickflow X-2433	50
Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques du brut de secteur nord	60
Tableau III.2 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 20 °C	62
Tableau III.3 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 25 °C	63
Tableau III.4 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 30 °C	64
Tableau III.5 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 35 °C	65
Tableau III.6 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 40 °C	66
Tableau III.7 : Coefficient de corrélation pour différents modèles rhéologiques à 50°C	67
Tableau III.8 : Evolution des paramètres rhéologiques d'Herchel-Bulkley en fonction de la température	70
Tableau III.9 : Données rhéologique du pétrole modifié à différentes températures et concentrations d'additif réducteur de frottement	80

Notations

γ (ou ε) : Déformation

X : Vecteur de déplacement

y : Distance entre deux couches

$\dot{\gamma}$ (ou $\dot{\varepsilon}$) : Gradient de vitesse ou taux de cisaillement ou vitesse de déformation

v : Vitesse de l'écoulement

τ : Contrainte de cisaillement

F : Force de cisaillement

S : Surface de la couche cisillée

η : Viscosité dynamique

ν : Viscosité cinématique

ρ : Masse volumique

τ_0 : Amplitudes de la contrainte

γ_0 : Amplitudes de la déformation

ω : Pulsation

N : Fréquence

δ : Déphasage entre la contrainte et la déformation

\bar{G} : Module de rigidité complexe (complex modulus)

\bar{J} : Complaisance complexe (complex compliance).

$G'(\omega)$: Module de conservation (storage modulus)

J : Complaisance élastique (elastic compliance)

G : Module de rigidité ou module de cisaillement

$G''(\omega)$: Module de perte (loss modulus)

$f(t)$: Fonction fluage

$\theta = \eta J$: Temps de retard

k : Coefficient de consistance

n : Indice de comportement qui traduit l'écart avec le fluide de Newton

η_0 : viscosité dans la première région newtonien

η_∞ : viscosité dans la seconde région newtonienne

α : Un coefficient qui traduit l'écart avec le comportement newtonien

$\tau_{1/2}$: représente la contrainte pour laquelle $\eta = \eta_0/2$

τ_p : traduit l'écoulement par rupture de liaisons dans le modèle de Williamson

τ_v : Contrainte visqueuse habituelle

A et B : Deux facteurs dans l'équation de Williamson

β : Facteur dan l'équation de Shangraw

η_B : Viscosité plastique de Bingham

η_c : Viscosité plastique de Casson.

τ_c : Contrainte seuil

°API : Amerecan petrolum institut

T_{wat} : Température pour laquelle les premiers cristaux de paraffine apparaissent (wax appearance temperature)

R : Coefficient de corrélation

t : Temps

T_{amb} : Température ambiante

P_{atm} : Pression atmosphérique

P_{man} : Pression qui affiche le manomètre

r : Rayon de cylindre

Abstract

The improvement of the flow of crude oil in the pipelines is done in particular by adding little reducing additives of friction. In this work we are interested in the rheological study of the crude. Viscometer VTT550 of research Unit RU-MPE of the University of Boumerdes was used to determine the curves of flow. One viscosifier to modify the crude was used as well as a type of polymer of long chain was employed like reducing additive of friction to different concentration. We noted that, the crude paraffinic modified by viscosifier Gelton is obeyed the rheological law of Herschel-Bulkley that is with or without additive at different temperature of tests. This meant that the modified crude is a non-Newtonian liquid with yield stress.

Résumé

L'amélioration de l'écoulement du pétrole brut dans les pipelines se fait notamment en ajoutant un peu des adjuvants réducteurs de frottement. Dans ce travail nous nous intéressons à l'étude rhéologique du brut. Le viscosimètre VTT550 de l'Unité de Recherche UR-MPE de l'université de Boumerdes a été employé pour déterminer les courbes d'écoulement. Un viscosifiant pour modifier le brut a été utilisé ainsi qu'un type de polymère de longue chaîne a été employé comme additif réducteur de frottement à différentes concentrations. On a constaté que le brut paraffinique modifié par le viscosifiant Gelton est obéi à la loi rhéologique d'Herschel-Bulkley que se soit avec ou sans additif à différentes températures d'essais. Ce qui signifie que le brut modifié est un liquide non-Newtonien à seuil.

Mots clés: Rhéologie, Fluides complexes, Réduction de frottement, Polymère.

Introduction générale

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 [1].

Ce phénomène a été découvert accidentellement par B. A. Toms [2] en 1948. En étudiant la dégradation mécanique des solutions de polymères, il a constaté une réduction des pertes de charge atteignant les 80% en ajoutant une faible quantité de polymères. Cette réduction rend le système d'écoulement très économique, car en réduisant la puissance de pompage, d'où le nombre de station de pompage. Des applications de ce phénomène sont trouvées dans divers secteurs comme celle de transport de pétrole brut en Alaska (1980) [3], sans devoir construire des stations de pompage supplémentaires, le débit a augmenté de 25 % avec une concentration de quelques ppmp [4].

Depuis 1948, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de ce phénomène, Y. Al-roomia et al (2004) [5] montre les travaux de Zakin et al. (1979) sur des émulsions de pétrole eau dans l'écoulement turbulent, cette étude et concernée pour déterminer les effets de la viscosité la température et la fraction pétrole-eau sur les caractéristiques d'écoulement turbulent, leurs conclusion était : l'addition d'un certain agent tension actif à une

concentration élevée n'a qu'un peu d'effet sur la réduction de frottement par contre l'addition d'un polymère à haut poids moléculaire est tout à fait efficace, mais ils sont dégradés par le cisaillement mécanique et perdent leur efficacité. D. Mowla et al [6], ont étudié un écoulement de deux phases de pétrole air dans un pipe horizontal, utilisant le Polyalpha-oléfine (polyisobutylène) comme réducteur de frottement, sa présence provoque une diminution en frottement environ de 40% DR. Dans les travaux de T. Al-Wahaibi et al [7] la présence des petites concentrations de polymères réducteurs de frottement dans une conduite cylindrique pour un écoulement de pétrole-eau montre une réduction de frottement maximum environ de 50%, et aussi, ils montrent un changement de configuration d'écoulement. Ils constatent que l'effort de cisaillement entre liquide et la paroi diminue parce que l'interface devient plus lisse. D'après ces études et d'autres sans omettre ceux de [3], [6], [8] et [9] la réduction de frottement apparaît lorsqu'on ajoute de faibles quantités d'agent réducteurs de frottement, ces derniers modifient la structure de l'écoulement. Le mécanisme par lequel la traînée turbulente est réduite n'est pas élucidé complètement, mais comporte des changements sur la rhéologie des solutions de polymère diluées [10]. Il n'existe pas à l'heure actuelle un modèle universelle accepté pour expliquer ce mécanisme. Un mécanisme complet devrait faire intervenir l'influence de la structure et la composition d'additifs, la microstructure, les interactions molécules d'additifs-solvants ainsi que la rigidité ou la flexibilité de la macromolécule [5].

Alors, il y a sûrement un changement de comportement de fluide lors de l'ajout des additifs. Donc, il est indispensable de connaître les lois de comportement rhéologiques qui gouvernent les écoulements et de faire une étude rhéologique sur le pétrole brut qui est l'objectif de cette thèse.

Suite à la découverte de nouveaux champs pétroliers et la saturation des réseaux de transfert du brut vers les réservoirs de stockage, les compagnies pétrolières utilisent de plus en plus la méthode d'injection d'additifs réducteurs de frottement pour améliorer les caractéristiques de l'écoulement dans ces réseaux. Lorsqu'on étudie le comportement d'un brut paraffinique, celui-ci peut être considéré aussi bien comme un fluide newtonien, non newtonien à seuil, thixotrope et même comme un solide plastique hétérogène, selon les conditions thermiques et mécaniques dans lesquelles il se trouve. Cependant, dans tous les cas, la température joue un rôle très important.

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 viscosimètre VT 550.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Introduction

Dans ce chapitre, On présente quelques résultats des travaux de recherche sur l'étude du comportement rhéologique des fluides, et de présenter quelques notions liées à la rhéologie ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides.

I.1. Comportement rhéologique

I.1.1. Définition de la rhéologie

Étymologiquement, la rhéologie est une science qui traite l'écoulement et les déformations des substances sous l'action de contraintes [11] et [12]. 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 [13].

La rhéologie est capable d'intégrer l'étude de l'ensemble des substances, qu'elle soit liquides ou solides [14]. Mais dans la plupart des cas, la formulation doit traiter de problèmes qui concernent des solides pâteux ou des liquides épais. Les termes utilisés ici sont volontairement équivoques. En effet, il faut être conscient du fait que la notion de liquide recouvre aussi bien des liquides très fluides comme l'eau, les solvants organiques, les solutions et les dispersions diluées, mais aussi des substances beaucoup plus visqueuses et consistantes à l'aspect pâteux, semi solide voire même solide.

Ces différences d'appréciation sont souvent dues à la très large gamme d'échelle de temps qui concerne le mécanisme d'écoulement. L'écoulement d'un fluide comme l'eau s'effectue instantanément sous l'effet de la pesanteur. Dans certains cas, il faudra attendre quelques heures quelques années voire même quelques siècles, pour observer un début d'écoulement significatif [14]. Malgré ces différences des échelles de temps, ce sont les mêmes lois de comportement et les mêmes grandeurs qui régissent les écoulements.

Les sections suivantes visent à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides. Pour commencer il convient de définir le mouvement de cisaillement qui est le type de mouvement mis en œuvre en rhéologie.

I.1.2. Notion de mouvement de cisaillement

Exemple simple, mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes, l'une immobile, l'autre animée d'un déplacement parallèle à la première (figure I.1). Ce mouvement idéal s'apparente à celui de la peinture étalée à la brosse sur un mur, de la crème cosmétique étendue sur la peau, du beurre étalé sur la tartine du pain [14].

Pendant toute la durée de l'écoulement (du cisaillement) le mouvement est laminaire (non turbulent). Les couches glissent les unes sur les autres et le matériau est assimilé à une superposition de couches parallèle et adjacentes d'épaisseur infiniment minces sans qu'il y ait transfert de matière entre les couches [11] et [13].

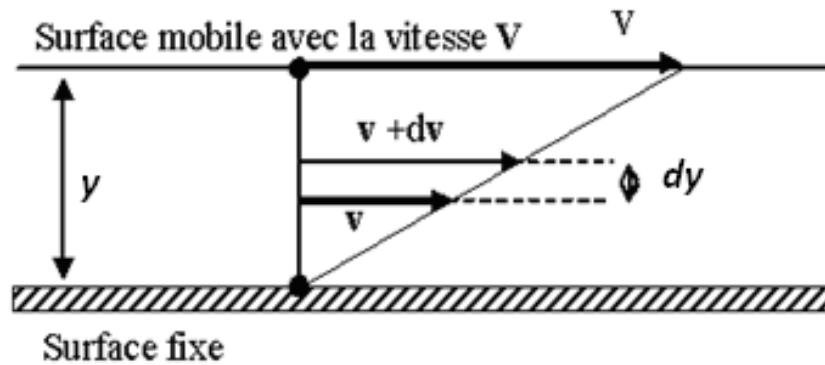


Figure I.1 : Schéma du mouvement de cisaillement

Deux grandeurs servent à caractériser quantitativement le cisaillement

I.1.2.1. Déformation et vitesse de cisaillement (shear rate)

La vitesse de cisaillement est appelée aussi gradient de vitesse. Avant tout, il faut définir la déformation de cisaillement. Elle correspond au vecteur déplacement u (figure I.2) de la particule fluide d'une couche sous l'effet du mouvement de cisaillement pendant une durée t . donc, au temps origine, les particules de matière se trouvent dans une certaine section droite. A un instant t postérieur, chaque particule aura parcouru la distance $X(y, t)$. On définit le déplacement entre les deux plans dans le cas de la symétrie plane comme la déformation, plane par la relation suivante [11], [14] et [15].

$$\gamma = \frac{dX}{dy} \quad (I.1)$$

Par définition, la vitesse de cisaillement est la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dX}{dy} = \frac{d}{dy} \frac{dX}{dt} = \frac{dv}{dy}$$

D'où:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} [s^{-1}] \quad (I.2)$$

Où $\dot{\gamma}$ est le gradient de vitesse, v est la vitesse de l'écoulement, y est la distance entre deux couches et X est le déplacement

La valeur de la vitesse de cisaillement dépend, non seulement de la vitesse de déplacement de la plaque mobile mais aussi, de l'épaisseur y cisailée.

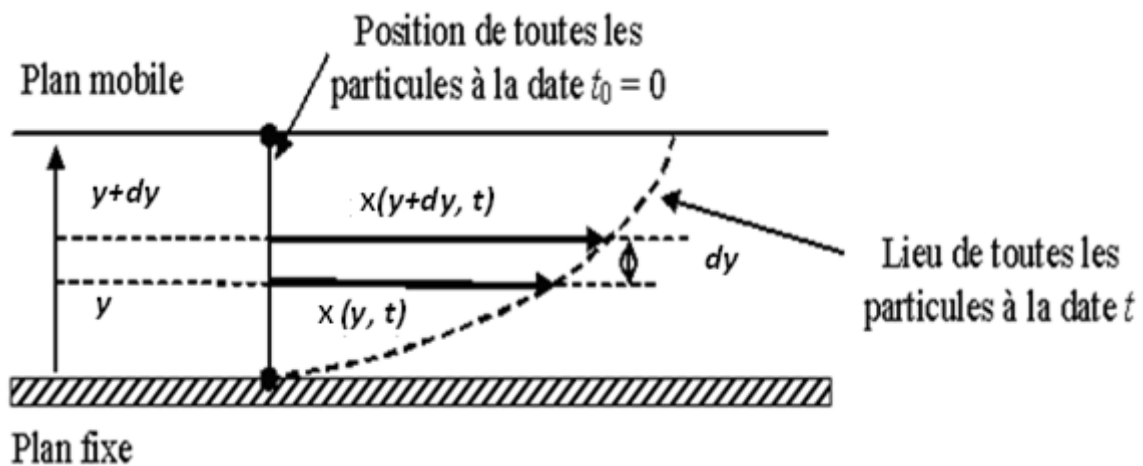


Figure I.2 : Schéma de déplacement des particules sur deux couches adjacentes

I.1.2.2. La contrainte de cisaillement (shear stress)

Considérons deux couches au contact, elles se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : ce sont les forces de cisaillement [11], [14] et [15].

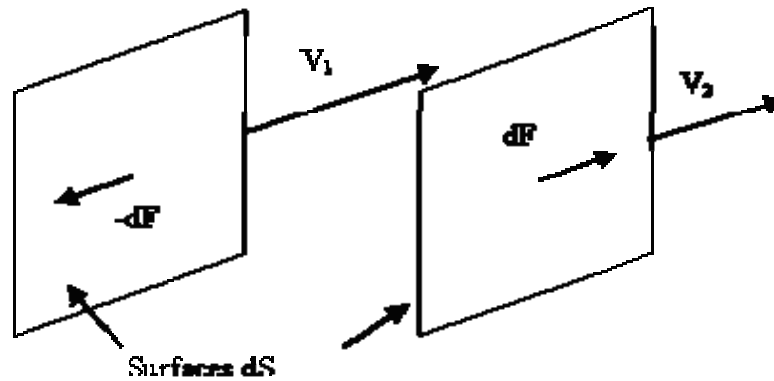


Figure I.3 : Schéma illustre le déplacement relatif de deux couches successives

Si l'on suppose que $|\vec{V}_1| > |\vec{V}_2|$, il est clair que la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement \vec{dF} parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). Réciproquement, la couche (2) exerce sur la couche (1) une force de cisaillement $-\vec{dF}$ tendant à la freiner. Ces forces dépendent de la surface considérée. On est amené à définir la contrainte de cisaillement par :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (I.3)$$

τ : contrainte de cisaillement [$N/m^2 = \text{pascal (Pa)}$]

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau. Elle varie en général d'une couche à l'autre mais constante en tout point de la même couche.

Les mouvements de cisaillement sont réalisés avec des rhéomètres. Dans les situations applicatives, ils ne possèdent pas en général cette symétrie plane de translation. En effet, la plupart des rhéomètres produisent un mouvement de rotation (cylindres coaxiaux, cône plan, plan-plan) ; les mouvements de cisaillement sont donc rotatifs.

I.2. Viscosité

Une force constante F est typiquement exigée pour déplacer la plaque supérieure (figure I.2) à une vitesse constante relativement à la plaque inférieure. En général, la contrainte de cisaillement augmente quand la vitesse de cisaillement augmente. En rhéologie la grandeur physique qui relie la contrainte et la vitesse de cisaillement n'est rien d'autre que la viscosité dynamique [11] et [16].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (I.4)$$

La contrainte est directement proportionnelle au taux de cisaillement, (la constante de la proportionnalité s'appelant viscosité dynamique) pour un fluide dite newtonien. Si le fluide n'est pas newtonien, le schéma qui représente la contrainte en fonction du taux de cisaillement n'est pas une ligne droite, mais c'est une courbe et la viscosité n'est plus constante et devient en fonction du taux de cisaillement. Elle est maintenant définie comme la pente de la droite (c'est-à-dire, relation I.4) [12]. Li-ming Che & al [17], ont accepté que la viscosité d'un liquide soit une fonction des forces intermoléculaires qui limitent leur mouvement. La notion de viscosité alors peut être visualisée comme étant la résistance interne d'un plan fluide à glisser sur un plan adjacent lorsque l'on applique une force.

Unités : Pa.s ou poiseuille (Pl) ; l'unité cgs peut encore être rencontrée le poise (10 Po=1 Pa.s).

NB : la viscosité dynamique s'appelle aussi viscosité apparente. La viscosité cinématique est définie par la relation.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (I.5)$$

Où ρ est la masse volumique.

La viscosité n'est pas la seule grandeur à observer, la plupart des substances possèdent également des propriétés élastiques d'autant plus marquées qu'ils possèdent une organisation moléculaire complexe. La viscoélasticité étudie concert les propriétés visqueuses et élastiques des substances.

I.3. Viscoélasticité

Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses et certains présentent en plus des propriétés élastiques. La viscoélasticité correspond a un comportement intermédiaire entre celui d'un solide élastique (déformation proportionnelle à la contrainte et reliée à celle-ci par les coefficients d'élasticités) et celui d'un liquide newtonien (taux de déformation croissant avec la contrainte) [18].

Une substance élastique linéaire idéale réagit à l'application d'une force par une déformation proportionnelle à cette force. Un tel matériau est représenté selon les conventions habituelles par un ressort. Une substance visqueuse linéaire idéal réagit à l'application d'une

force par un flux de vitesse constante proportionnelle à cette force, il est représenté selon les conventions habituelles par un amortisseur [11], [19] et [20]. Un fluide élastique possède la capacité de stocker toute l'énergie mécanique de déformation sans dissipation, tandis qu'un fluide visqueux dissipe toute l'énergie mécanique de déformation, sans capacité d'en stocker [11].

Un fluide viscoélastique combine ces deux propriétés. Il réagit à l'application d'une force par une déformation instantanée et un flux. Si une seconde force est appliquée, son effet se superpose à celui de la première, dont l'effet n'est pas limité dans le temps.

Dans la pratique, on construit fréquemment un modèle viscoélastique par des combinaisons de composants élastiques et visqueux idéaux. Les deux modèles les plus simples peuvent être représentés respectivement par la combinaison en série et en parallèle d'un composant élastique et d'un composant visqueux.

La procédures pour déterminer les propriétés viscoélastique est les expériences de fluage et de relaxation, à partir desquelles on détermine la fonction de fluage et de relaxation qui elles sont importantes pour étudier ces propriétés.

La fonction fluage $f(t)$ est la déformation subie par le matériau, lorsqu'on impose à ce dernier une contrainte d'amplitude unité à l'instant initial $t = 0$, contrainte qui est maintenue constante au cours du temps [11] et [16].

La fonction de relaxation $g(t)$ est la contrainte résultant de l'application d'une déformation d'amplitude unité à l'instant initial $t = 0$, déformation qui est maintenue constante au cours du temps [11] et [16].

Il existe d'autres procédures pour déterminer les propriétés viscoélastique que les expériences de fluage et de relaxation, c'est l'expérience mécanique dynamique, qui impose une contrainte (ou une déformation) sinusoïdalement variable au cours du temps avec la fréquence N [11], [16] et [21]. La linéarité des équations entraîne que la déformation (ou la contrainte) est également sinusoïdale et de même fréquence, mais avec un déphasage δ entre la contrainte et la déformation [11], [12] et [21].

$$\begin{aligned}\tau(t) &= \tau_0 \cos(\omega t + \delta) \\ \gamma &= \gamma_0 \cos \omega t\end{aligned}\tag{I.6}$$

Où τ_0, γ_0 sont les amplitudes de la contrainte et de la déformation, $\omega = 2\pi N$, pulsation et δ le déphasage entre les deux.

Pour faciliter les calculs, on emploie le formalisme de nombre complexes.

$$\begin{aligned}\bar{\tau}(t) &= \tau_0 e^{i(\omega t + \delta)} = \bar{G}(\omega) \bar{\gamma}(t) \\ \bar{\gamma}(t) &= \gamma_0 e^{i\omega t} = \bar{J}(\omega) \bar{\tau}(t)\end{aligned}\tag{I.7}$$

\bar{G}, \bar{J} : module de rigidité complexe (complex modulus) et complaisance complexe (complex compliance).

$$\text{Avec : } \bar{G}(\omega) = G'(\omega) + G''(\omega)\tag{I.8}$$

$G'(\omega)$, est appelé module de conservation (storage modulus), $G''(\omega)$, module de perte (loss modulus) [11], [16] et [21].

I.3.1. Modèle mécanique

Le comportement d'une substance viscoélastique 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 substances idéaux et limites et construire des modèles de comportements intermédiaires. Le ressort représente un solide élastique ou un solide linéaire de Hooke, De même, un fluide visqueux ou newtonien linéaire est représenté par un amortisseur.

I.3.1.1. Solide élastique parfait

$$\gamma(t) = J \tau(t) = \frac{1}{G} \tau(t)\tag{I.9}$$

Où :

J : Complaisance élastique (elastic compliance) [Pa^{-1}]

G : Module de rigidité ou module de cisaillement

C'est celui d'un ressort, la relation entre la contrainte appliquée et la déformation est donnée par la loi de Hooke précédente, si la courbe de décharge coïncide avec la courbe de charge, quelle que soit la vitesse de déformation, l'élasticité est dite idéale (parfaite), ce comportement idéal ne se rencontre jamais. Dans un comportement réel, il y'a de l'élasticité mais imparfait [11].

De l'expression de la loi de Hooke, on tire la fonction fluage ci-après :

$$f(t) = J \quad \text{pour} \quad t \geq 0$$

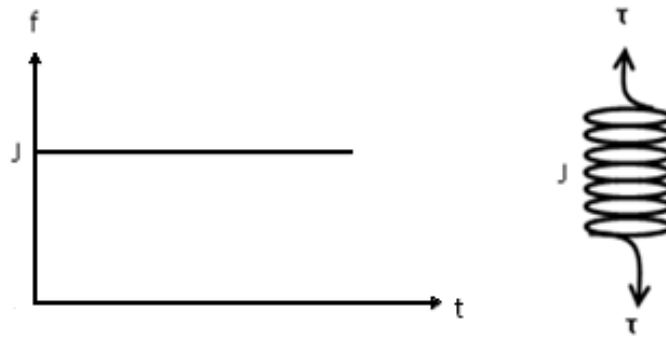


Figure I.4 : Fonction du fluage et le symbole d'un solide plastique parfait (ressort)

I.3.1.2. Liquide visqueux newtonien

$$\frac{d\gamma(t)}{dt} = \frac{\tau(t)}{\eta} \quad (I.10)$$

C'est celui d'un amortisseur, l'équation rhéologique du liquide visqueux est l'équation de Newton. Tenant compte des conditions initiales $t < 0 ; \tau(t) = 0 ; \gamma(t) = 0$, cette équation s'intègre immédiatement:

$$\gamma(t) = \frac{1}{\eta} \int_0^t \tau(t') dt' = \frac{\tau_0}{\eta} t \quad (I.11)$$

On remarque que le comportement est bien un comportement liquide ; soumis à une contrainte constante la déformation croît linéairement avec le temps, le liquide s'écoule indéfiniment. L'expression de la fonction de fluage est obtenue en remplaçant, τ_0 par l'unité dans l'équation [11].

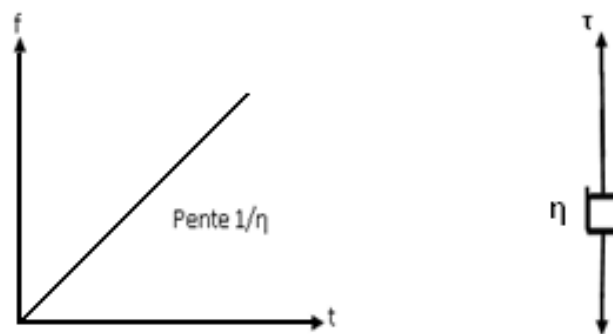


Figure I.5 : Fonction fluage et le symbole d'un liquide newtonien (amortisseur)

$$f(t) = \frac{t}{\eta} \quad (I.12)$$

I.3.1.3. Lois d'association en série et en parallèle

Le comportement viscoélastique le plus général est défini en construisant un modèle constitué d'un assemblage de ressorts et d'amortisseurs en série et en parallèle. L'équation rhéologique de la substance sera obtenue en utilisant les équations rhéologiques des constituants élémentaires et en respectant les lois d'association en série et en parallèle des différents éléments.

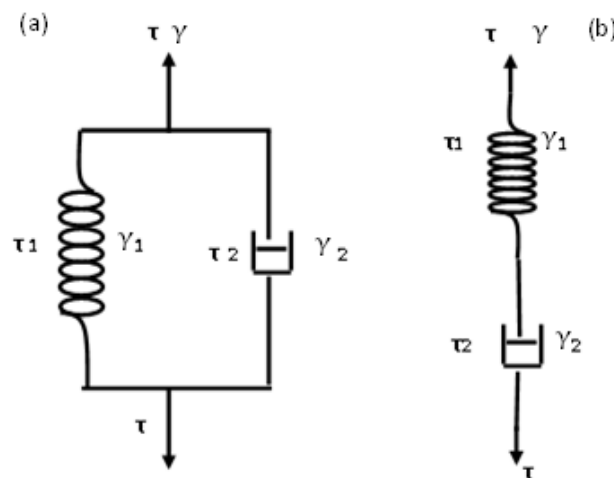


Figure I.6 : Représentation mécanique de solide de Kelvin-Voigt (a) et liquide de Maxwell (b)

On distingue le solide de Kelvin-Voigt (figure I.6 (a)), qui est constitué par l'association en parallèle d'un ressort, de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η . son équation rhéologique est donnée par :

$$\eta \frac{d\gamma}{dt} + \frac{1}{J} \gamma = \tau \quad (I.13)$$

Pour déterminer la fonction fluage $f(t)$, il suffit de remplacer la contrainte par l'unité, en résolvant l'équation différentielle, cette fonction est représentée dans la figure I.7 (a) [11] :

$$f(t) = J(1 - e^{-t/\theta}) \quad (I.14)$$

Avec : $\theta = \eta J$ est appelé temps de retard [s].

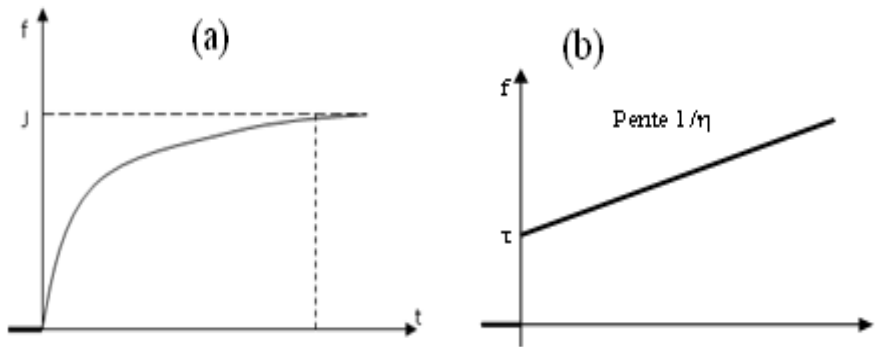


Figure I.7 : Représentation de la fonction de fluage pour le solide de Kelvin-Voigt (a) et le liquide de Maxwell (b)

et le liquide de Maxwell (figure I.6 (b)), Il est constitué par l'association en série d'un ressort de complaisance élastique J et d'un amortisseur de coefficient de viscosité η , on outre, Dans ce modèle toute la déformation (prolongation) de l'élément est la somme des déformations au ressort et de l'amortisseur et son équation rhéologique est donnée par :

$$\frac{d\gamma}{dt} = J \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\eta} \tau \quad (I.15)$$

Après avoir fait des opérations mathématiques on obtient la fonction de fluage ci-après et sa courbe illustré sur la (Figure I.7 (b)).

$$f(t) = J + \frac{t}{\eta} \quad (I.16)$$

On constate que, le liquide de Maxwell est un liquide visqueux possédant une élasticité instantanée.

I.4. Rhéogramme

La courbe représentant l'évolution de la contrainte de cisaillement simple en fonction de la vitesse de déformation est appelée rhéogrammes. Il résume l'ensemble des propriétés d'écoulement de l'échantillon [14]. Les représentations $\gamma = f(t)$, $\tau = f(t)$ sont utilisées respectivement à contrainte constante (dans les expériences de fluage) et à vitesse de déformation constante (dans les expériences de relaxation) [11].

I.5. Classification des fluides

I.5.1. Les fluides newtoniens

On les appelle aussi liquide linéaire, ces liquides possèdent une équation rhéologique linéaire [11] :

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (I.17)$$

Dans ce cas là (liquides newtoniens) il y a proportionnalité entre contrainte et vitesse de cisaillement [22], si bien que la viscosité est indépendante du cisaillement appliqué [14], elle dépend de la température et de la pression [14] et [23]. Les rhéogrammes ont l'aspect suivant:

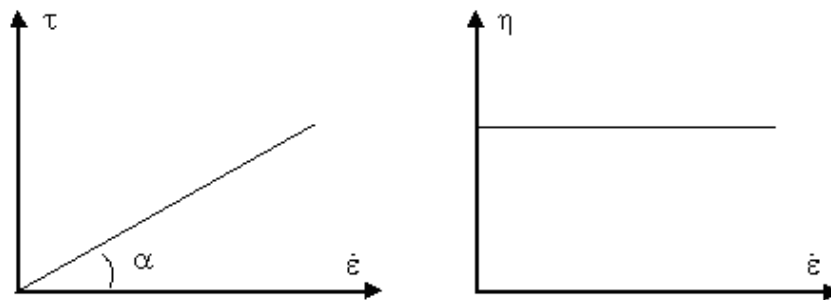


Figure I.8 : Rhéogramme d'un fluide newtonien et l'évolution de sa viscosité

Pour ces fluides, on parle de viscosité absolue [11]. Une seule mesure est alors suffisante pour décrire l'écoulement à température et à pression données. L'utilisation d'un rhéomètre pour l'étude de tels fluides ne s'avère nécessaire que pour vérifier le caractère newtonien du fluide. L'utilisation de viscosimètres suffira pour étudier le comportement de la viscosité vis à vis de la température, de la pression ou de la concentration (avec un solvant newtonien). Exemples : eau, la plupart des solvants, huiles minérales, certaines dispersions.

I.5.2. Fluides non newtoniens (non linéaires)

Dans le cas des liquides non newtoniens, pour lesquels la relation de proportionnalité n'est plus vérifiée [22], et qui présentent un comportement en écoulement beaucoup plus complexe, dans ce cas la viscosité n'est pas constante. A chaque valeur du couple vitesse de déformation, contrainte de cisaillement correspond à une valeur de la viscosité. Dès lors, on parle de viscosité apparente [11] et [14].

I.5.2.1. Liquides rhéo-fluidifiants (Shear softening, thinning)

Le comportement rhéo-fluidifiant est défini par un rhéogramme dont sa courbe passe par l'origine et dont la concavité est tournée vers le bas. On en déduit facilement que la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente, le liquide devient moins visqueux et donc plus fluide lorsque le cisaillement croît [11] et [14]. Parfois appelés pseudo-plastiques.

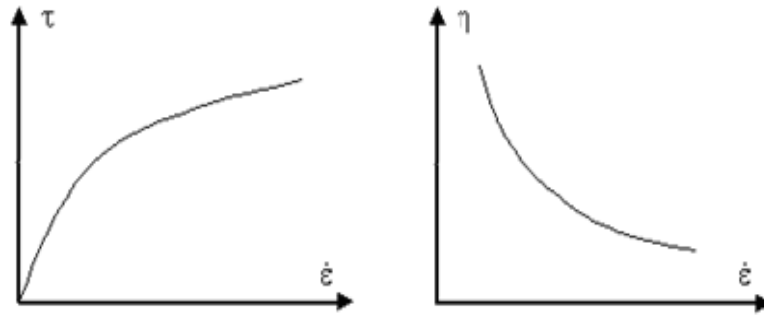


Figure I.9: Rhéogramme d'un corps fluidifiant et l'évolution de sa viscosité apparente

Parmi ces fluides on trouve, les polymères à longues chaînes en solution ou à l'état fondu, les pâtes à papier, les colles, les ciments...etc. son interprétation à l'échelle microscopique consiste que les molécules s'alignent progressivement dans le sens de l'écoulement, sous l'effet de la vitesse de cisaillement et ainsi favorise leur glissement relatif des différentes couches. Une seconde interprétation consiste à envisager une modification de structure du liquide sous l'effet du gradient de vitesse (déstructuration par rupture de liaison de type Van Der Waals, défloculation des particules) [11].

Aucune équation ne peut prétendre venir à bout de ce type de comportement. C'est pourquoi plusieurs modèles doivent être essayés [11].

A) Les modèles à deux paramètres

Équation d'Ostwald ou loi de puissance (1925)

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (I.18)$$

Où k est le coefficient de consistance et $n (< 1)$ est l'indice de comportement qui traduit l'écart avec le fluide de Newton.

Cette équation s'exploite facilement en passant aux logarithmes (recherche par régression linéaire pour validation du modèle) [11] et [23]. En effet :

$$\log \tau = \log k + n \log \dot{\gamma} \quad (I.19)$$

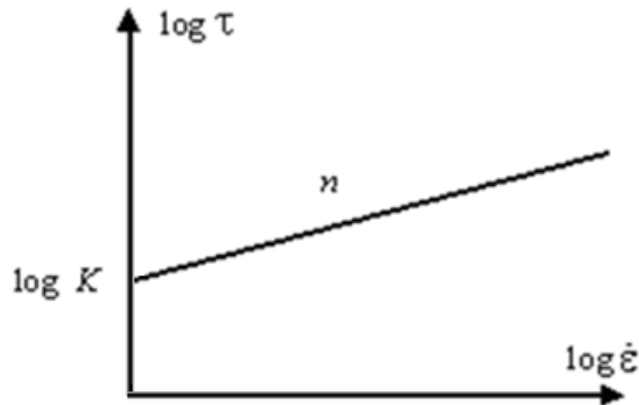


Figure I.10 : Rhéogramme d'un corps fluidifiant en coordonnées log-log.

Dans le modèle d'Ostwald, la viscosité s'exprime par :

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (I.20)$$

Les limites de ce type de loi interviennent quand le fluide présente des régions de comportement newtonien, l'une à faible vitesse de cisaillement et l'autre à forte vitesse de cisaillement [11].

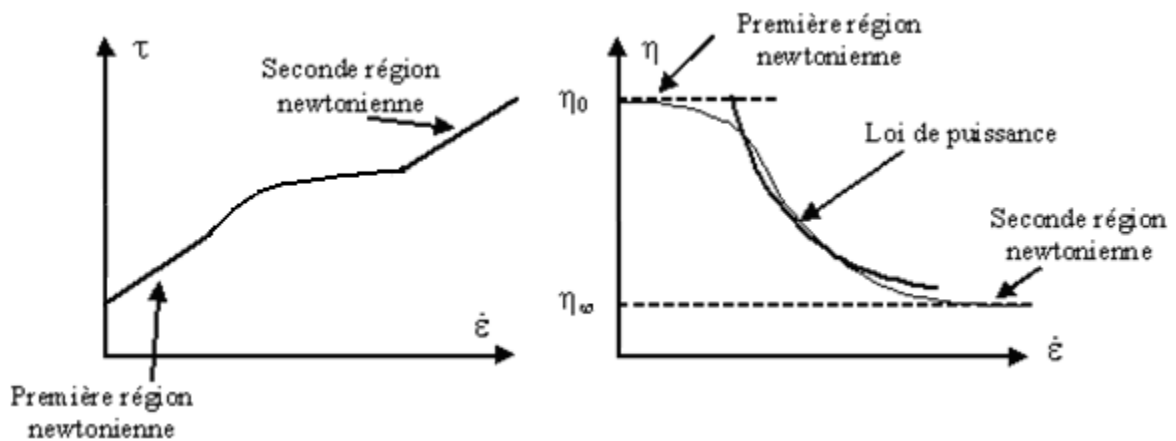


Figure I.11 : Rhéogramme de certains corps fluidifiants

B) Modèles à trois paramètres

La loi de puissance est tronquée du côté des faibles vitesses de cisaillement et est remplacée par une loi de Newton.

$$\begin{aligned} \tau &= \eta_0 \dot{\gamma} & \text{pour } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0 \\ \tau &= k \dot{\gamma}^n & \text{pour } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{aligned} \quad (I.21)$$

Avec une condition de raccordement pour $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$, et $k = \eta_0 \dot{\gamma}_0^{1-n}$

Modèle d'Ellis : Ce modèle rhéologique cité par [11], dont l'expression de la contrainte est donnée par:

$$\tau = \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 + (\tau + \tau_{1/2})^{\alpha-1}} \quad (I.22)$$

η_0 : viscosité de la première région newtonien

$\alpha > 1$: Un coefficient qui traduit l'écart avec le comportement newtonien

$\tau_{1/2}$: représente la contrainte pour laquelle $\eta = \eta_0/2$

Remarque : quand $\eta \ll \eta_0$, on retrouve la loi de puissance

Modèle de Williamson: La contrainte est considérée comme la somme de deux termes. Le premier traduit l'écoulement par rupture de liaisons et le second représente la contrainte visqueuse habituelle [11] :

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_p(\dot{\gamma}) + \tau_v(\dot{\gamma}) \quad (I.23)$$

En supposant que : $\tau_v(\dot{\gamma}) = \eta_\infty \dot{\gamma}$ (dans la seconde région newtonienne)

$$\tau = \frac{A\dot{\gamma}}{(B+\dot{\gamma})} + \eta_\infty \dot{\gamma} \quad (I.24)$$

Equation de Shangraw : Elle admet que les rhéogrammes ont une asymptote oblique qui impose à l'écart Q de décroître exponentiellement [11].

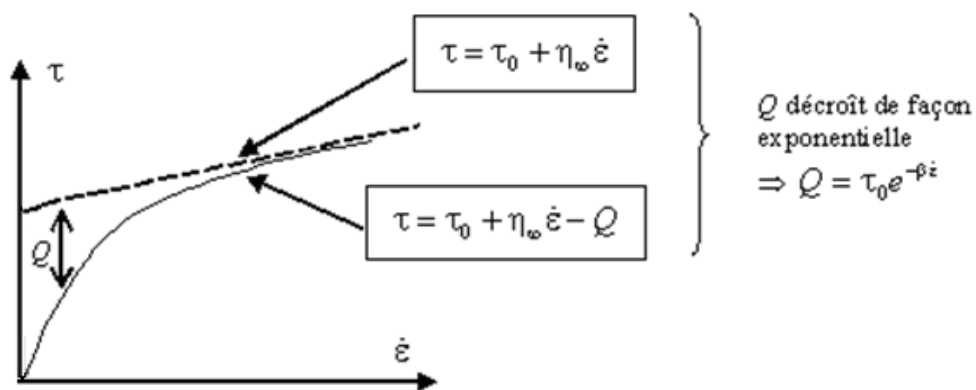


Figure I.12 : Représentation de l'équation de Shangraw

Le modèle prend donc la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 (1 - e^{-\beta \dot{\gamma}}) + \eta_\infty \dot{\gamma} \quad (I.25)$$

τ_0 et η_∞ sont directement déterminés sur le rhéogramme. Q est calculé point par point et le graphe $\ln Q$ en fonction de la vitesse de cisaillement permet d'obtenir la pente β .

C) Modèles à quatre paramètres

Ces modèles ont été cités par [11], [18] et [23]. Quand il y a des déviations significatives du modèle de lois de puissance à haute et aux basses valeurs de cisaillement, il est nécessaire d'employer un modèle qui tient compte des valeurs limite.

Carreau (1972) a proposé le modèle de viscosité qui incorpore les deux limites de viscosité selon la loi suivante :

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = (1 + (\beta\dot{\gamma})^2)^{-p} \quad (I.26)$$

modèle de Cross :

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\beta\dot{\gamma})^p} \quad (I.27)$$

I.5.2.2. Fluides rhéoépaississants (shear thickening)

Le comportement rhéoépaississant (encore appelé dilatant ou épaississants) qui est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut : le liquide devient plus visqueux et donc plus épais lorsque le cisaillement croît [11] et [16].

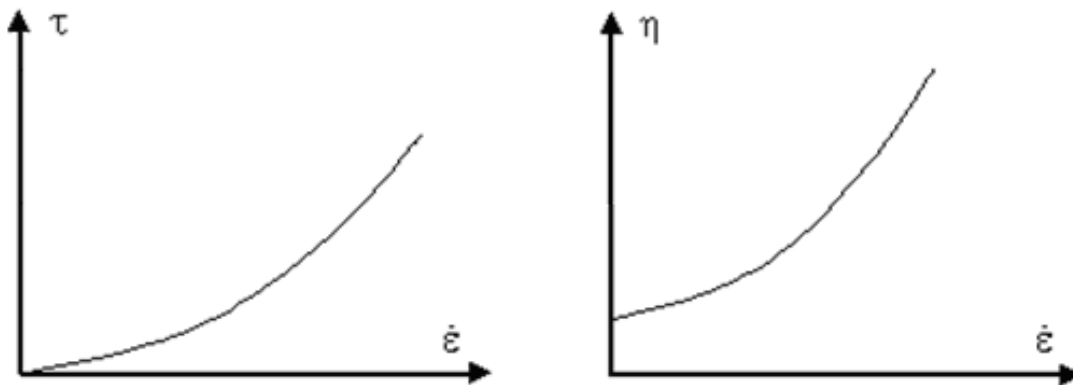


Figure I.13 : Rhéogramme de fluide rhéoépaississant et la variation de la viscosité

Ce comportement est beaucoup moins fréquent. Il concerne des dispersions très concentrées comme les solutions d'amidon, sables mouillés et compactés et il y a aussi certaines huiles polymériques. Certains de ces produits augmentent de volume sous la contrainte (épaississants) [11]. Les causes d'origine moléculaire. Au repos, le volume libre

entre les particules est minimal, sous un gradient de vitesse en augmentation, il y a gonflement du liquide (les particules sont moins imbriquées). La phase continue n'est plus capable de combler les vides inters particulaires ni d'assurer une bonne lubrification [11]. Ce comportement est susceptible d'être décrit une loi de puissance [11] et [20]

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (I.28)$$

Avec $n > 1$. Et la viscosité $\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ croît avec la vitesse de déformation [20].

I.5.2.3. Liquides plastiques

Le terme plastique indique que les liquides plastiques s'écoulent à partir d'une certaine valeur de contrainte τ_c . Au repos le liquide possède une structure tridimensionnelle rigide (particules emboîtées) ou floculées. Le seuil d'écoulement correspond à l'énergie nécessaire pour les séparer. Au-delà, l'écoulement s'effectue sous l'effet de la contrainte effective $(\tau - \tau_c)$ [11], [12], [18] et [23].

On distingue deux types de liquides plastiques :

A) Liquide plastique idéal ou liquide de Bingham

On parlera de fluide Bingham lorsque la relation (I.21) sera une très bonne approximation du fluide. τ_c représente alors le seuil minimal des contraintes à appliquer au fluide pour que celui-ci commence à s'écouler. On peut expliquer schématiquement ce comportement d'un fluide en supposant que ce dernier présente au repos une structure tridimensionnelle rigide susceptible de résister à des contraintes inférieures à τ_c . Dès que l'on dépasse cette contrainte, la structure se détruit totalement du fluide devient newtonien sous l'effet de la contrainte efficace $\tau - \tau_c$. Si de nouveau la contrainte devient inférieure à τ_c , la structure initiale se reforme en un temps suffisamment court pour qu'on puisse le négliger [24].

$$\tau = \tau_c + \eta_B \dot{\gamma} \quad (I.29)$$

Où η_B désigne la viscosité plastique de Bingham.

Bingham a étudié les peintures à l'huile qui sont des fluides newtoniens. Ce n'est plus le cas des peintures actuellement fabriquées qui répondent à des cahiers des charges plus draconiennes : étalement facile, absence de trace de pinceau, absence de coulure...

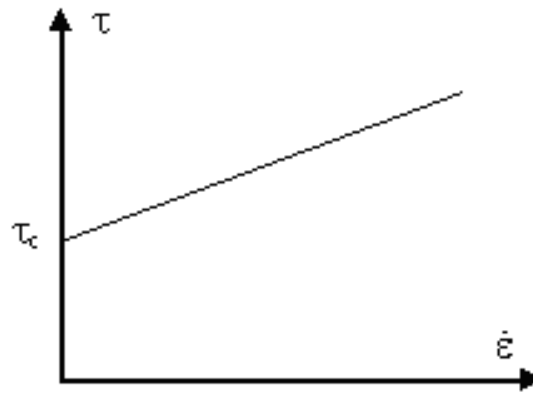


Figure I.14 : Rhéogramme d'un corps de Bingham

B) Liquides de Casson

Ce sont des liquides plastiques non idéaux qui possèdent un comportement plastique fluidifiant.

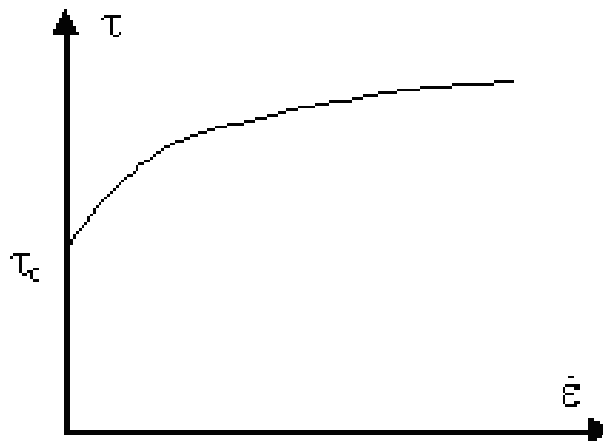


Figure I.15 : Rhéogramme d'un corps de Casson

Ce cas est plus répandu que les liquides de Bingham, par exemple : les boues, pâte dentifrice, sulfate de zinc ou de baryum en suspension, pâte à pain, matières grasses, peintures dispersion.

Deux modèles mathématiques se dégagent.

a) Modèle de Casson :

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_c \dot{\gamma}} \quad (I.30)$$

Où η_c est la viscosité plastique de Casson.

b) Modèle de Herchel-Bulkley :

Les fluide d'Herchel-Bulkley est en générale caractérisé par les fluide plastique.

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (I.31)$$

Avec : $n < 1$ comportement plastique fluidifiant, et $K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$ est la viscosité de Herchel-Bulkley

I.5.2.4. Les liquides thixotropes

Le comportement à un instant t d'un fluide thixotrope est fonction des contraintes subies dans un passé relativement récent (mémoire à courte échelle). Lorsque la contrainte disparaît, le fluide recouvre ses propriétés d'origine (mémoire à grande échelle). L'étude d'un tel comportement donne des rhéogrammes présentant un cycle d'hystérésis [25]. On reprend ici la définition de N.MIDOUX : « la consistance de ces fluides dépend aussi bien de la vitesse de cisaillement que de la durée de cisaillement.

Si un fluide thixotrope est soumis à un cisaillement après une période de repos, sa structure se désorganise peu à peu et sa viscosité apparente décroît avec le temps. Au fur et à mesure que le nombre de liaisons détruite augmente, la vitesse de décroissance de la viscosité apparente diminue et la structure tend à se réorganiser à une vitesse qui varie comme le nombre de liaisons détruite. On a ainsi une analogie profonde avec une réaction équilibrée. On pourra même souvent observer un état d'équilibre dynamique lorsque la vitesse de désorganisation sera égale à la vitesse de réorganisation. Bien entendu, cet équilibre dépendra de la vitesse de cisaillement.

Ainsi à une vitesse de cisaillement donnée, appliquée à partir de $t=0$, après un long temps de repos du fluide, on assiste à une décroissance de la contrainte tangentielle jusqu'à une valeur d'équilibre d'autant plus faible que $\dot{\gamma}$ est plus grande.

La thixotropie est un phénomène réversible et au repos, la structure détruite se reforme graduellement. Si la courbe d'écoulement est tracée en augmentant $\dot{\gamma}$ puis en le diminuant, on obtient des cycles d'hystérèse (voir figure I.16) dépend évidemment [24] ».

De nombreux matériaux présentent ce phénomène d'hystérésis. Tout se passe comme si les contraintes subies dans un passé relativement récent modifiaient leur comportement à l'écoulement présent. Mais ils ne seront considérés comme thixotropes que s'ils retrouvent les propriétés initiales. Cela se traduit par des rhéogrammes qui présentent un cycle d'hystérésis. Ainsi ils sont considérés en tant que fluides thixotropiques, où une fois soumise à un taux constant de cisaillement la structure de gel de ces fluides est progressivement décomposée et la viscosité apparente diminue avec le temps [26].

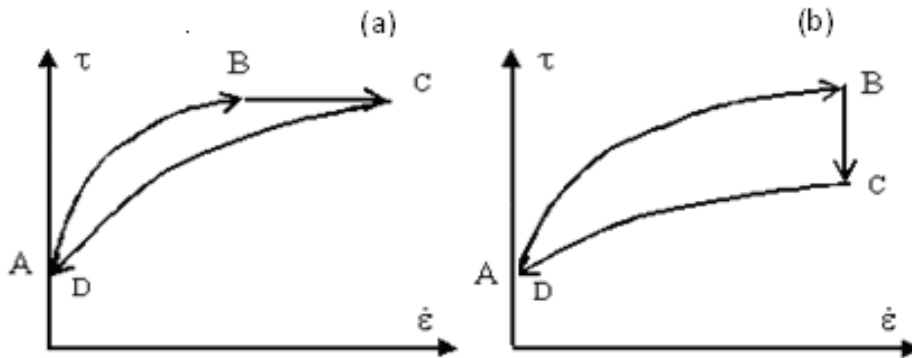


Figure I.16 : Rhéogrammes présentant le cycle d'hystérésis, (a) avec un rhéomètre à contrainte imposée et (b) avec un rhéomètre à vitesse de déformation imposée

Cet exemple montre un fluide représentant sa viscosité décroître sous l'augmentation de la vitesse de cisaillement (AB). Sous l'effet d'une contrainte constante (d'une vitesse de cisaillement constante), la viscosité continue à diminuer (BC). L'effet destructurant est retardé. Il s'ensuit que la descente en contrainte (en vitesse) se fait sous une viscosité plus faible. Le fait d'observer que les points A et D sont confondus permet d'affirmer que l'on a affaire à un matériau thixotrope.

I.6. Le pétrole

Le pétrole brut est un liquide d'origine fossile, composé d'un mélange d'hydrocarbures présents dans certaines strates rocheuses. Il peut être extrait et raffiné pour produire des combustibles comme l'essence, le kérosène, le diesel, etc.

La composition du pétrole brut varie selon les origines géographiques. Il est essentiellement constitué par des hydrocarbures paraffiniques, aromatiques et naphthéniques auxquels viennent s'ajouter des composés oxygénés, azotés, soufrés et même de l'eau en proportions variables. Le pétrole brut peut être considéré comme un système de suspension

colloïdal contenant des asphaltènes, qui baignent dans un solvant non-aqueux constituer par les composants du reste du brut dont le mélange est appelé maltènes [26] et [28].

I.6.1. Classification des bruts pétroliers

Les bruts sont classés selon leur degré d'API qui est une fonction de leur densité. Selon la valeur d'API on distingue : les bitumes (<8°API), les bruts extra lourds (8-10°API), les brut lourds (10-20°API), les brut moyens (20-30°API), les brut légers (30-40°API) et les condensés de pétrole (>40°API). L'équivalence entre la densité et le degré API est exprimée par la formule :

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{d(15^{\circ}C)} - 131,5 \quad (I.24)$$

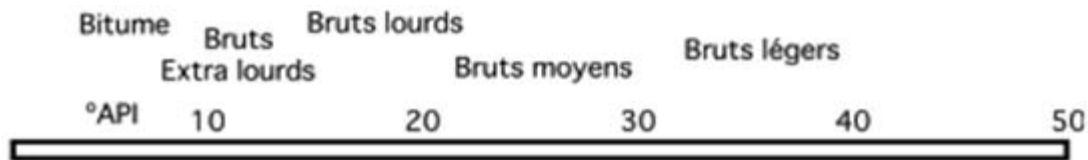


Figure I.17 : Classification des bruts pétroliers selon leur °API

I.6.2. Formation et production du pétrole

Le pétrole que nous utilisons actuellement est le résultat d'une lente dégradation progressive de la matière organique déposée dans les bassins sédimentaires au fond des océans du plancton (sédiments organiques et minéraux). Celui-ci s'est déposé par couches, entraînant la formation de strates, qui sont le siège de la formation du pétrole (mais aussi du gaz naturel). Ces strates souvent séparées par une épaisseur de dépôt argileux constituent alors une roche imperméable. La strate dans laquelle va avoir lieu la dégradation est appelée roche mère, qui est en quelque sorte une éponge dans laquelle se forme, après fossilisation des sédiments, du pétrole et du gaz naturel brut. Le pétrole, le gaz et l'eau de mer vont ensuite remonter, par pression lithostatique (pression exercée par le poids des couches supérieures).

Pour le produire il faut construire un puits jusqu'au gisement. Dans la plupart des cas, le pétrole est produit avec de l'eau et du gaz. La production de plusieurs puits est regroupée dans des stations de traitement où l'on met en œuvre les procédés de séparation du pétrole, du gaz et de l'eau associés. Selon les spécifications éventuelles, le pétrole déshydraté est soumis

à d'autres traitements avant le raffinage, principalement, pour la production et la commercialisation de l'essence et d'autres sous-produits [27].

I.6.3. Composition du pétrole

Le pétrole contient un grand nombre de composants de différentes structures constitués principalement par des atomes d'hydrogène, de carbone et quelque atome d'oxygène, d'azote, du soufre, et divers métaux.

La composition du pétrole consiste à séparer leur constituants en quatre fractions: les Saturés, les Aromatiques, les Résines et les Asphaltènes. Dans une première étape, on ajoute au pétrole brut un excès d'alcane léger, typiquement du pentane ou de l'heptane. La fraction soluble contient les maltènes, alors que les produits insolubles sont appelés asphaltènes. Les maltènes sont ensuite fractionnés par chromatographie liquide en fonction de leurs affinités pour divers supports polaires, en diluant avec des solvants de polarités différentes.

Parmi les composants du pétrole les plus importants dans les études de comportement rhéologique les asphaltènes. Ils correspondent à la fraction lourde polaire du brut et, ce sont des composés fortement polaires (ce sont des suspensions considérées comme des fluides fortement dipolaires) [29]. Les asphaltènes sont des molécules hétérogènes très grandes avec des noyaux aromatiques condensés, qui peuvent s'associer pour former les particules classées dans les systèmes colloïdales qui influencent fortement la viscosité du milieu pétrolier et affectent la cristallisation de la cire [30]. La fraction de volume et l'état d'agrégation de particules d'asphaltène dans un échantillon donné de pétrole lourde peuvent considérablement affecter sa viscosité [28] et [31].

On peut définir les asphaltènes selon la Norme américaine ASTM D 893-69 [32] comme suit : C'est la fraction insoluble dans le n-pentane et soluble dans le benzène. La quantité d'asphaltènes ainsi extraite est supérieure à celle issue de l'application de la norme française du fait que selon cette dernière, une partie des résines est classée dans la fraction asphalténique de la norme américaine.

Non seulement les asphaltènes représentent la fraction la moins valorisée du pétrole, mais aussi ils sont considérés comme la cause de divers problèmes, parmi lesquels on peut citer d'une part leur floculation qui forme des dépôts qui obstruent les tuyauteries de production et de transport, d'autre part leur aptitude à stabiliser les émulsions [29]. Par

ailleurs, leur tendance à former divers types d'agrégats qui s'enchevêtrent, les asphaltènes sont directement responsables de la viscosité élevée des bruts lourds [28].

I.7. Additif réducteur de frottement

La possibilité de la réduction de traînée est principalement influencée par les paramètres moléculaires du polymère dissous, tels que le poids moléculaire élevé, sa concentration et la structure flexibles linéaires [9]. Les polymères réducteurs de pertes de charges peuvent être de plusieurs types : des polyélectrolytes anioniques et cationiques, des polyampholytes et des polyacrylamides modifiées hydrophobes [33].

I.7.1. 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 liés ensemble habituellement par des fortes liaisons dits covalents de carbone-carbone. Les polymères (exemple le polyéthylène (figure I.18)) sont des chaînes en général très longues, composées de 10^3 à 10^6 monomères avec les poids moléculaires moyens de 10^4 à 10^7 g/mol .

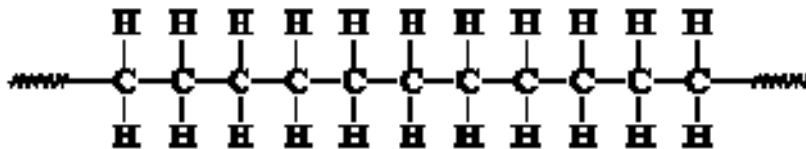


Figure I.18 : Schéma de principe de chaîne de polymère de polyéthylène.

Les polymères ont été les premiers additifs à être suffisamment étudiés en réduction de la traînée. Depuis Toms (1948), plusieurs travaux expérimentaux et numériques ont été menés. Plusieurs types de polymères sont susceptibles de réduire la traînée : les polyélectrolytes, les polyampholytes, les polyacrylamides modifiés hydrophobes. Des polymères sous forme polyoléfinés sont également développés pour être utilisés en milieu pétrolier (pipeline Trans-Alaska) dans les années 70 et en offshore dans les années 80 afin de minimiser le coût en énergie et de baisser le nombre de stations de pompage le long d'un pipeline. Une concentration de quelques ppmp est généralement suffisante pour réduire efficacement la traînée. Dans les travaux de thèse d'Amarouchène (2002), il a été mentionné

qu'une concentration de 10 ppmp en Polyéthylèneoxyde est suffisante pour obtenir une réduction de la traînée de l'ordre de 67 % à un nombre de Reynolds de 14000 [4].

I.7.2. Les tensioactifs

Les tensio-actifs appelés aussi surfactants sont de bons réducteurs de la traînée, ce phénomène est connu aussi depuis longtemps (Toms, 1948). Pourtant, il existe moins de travaux consacrés à ce type d'additifs malgré leurs avantages de régénération et leur durée de vie assez importante. Les solutions de tensio-actifs réductrices de traînée sont caractérisées par la présence de micelles cylindriques qui se forment à partir d'une concentration micellaire critique. Elles ne sont efficaces que dans une certaine plage de température et de concentration (200-2000 ppm). L'addition des salicylates (Sal) aux surfactants (CTAB) conduit à une augmentation de la température critique, du nombre de Reynolds critique et aussi de la réduction de la traînée. Cette dernière (la solution CTAB/Sal) est restée réductrice de la traînée dans le système une dizaine de semaines avec des températures allant de 9 à 40°C [4] et [33].

I.7.3. Les fibres

La réduction de la traînée est aussi observée avec des fibres. Elles sont en nylon, en coton ou en papier et peuvent mesurer jusqu'à deux millimètres. Le phénomène a été observé pour la première fois par Forrest et Grierson dans les années 1930 mais n'a pas été publié. Ce type d'additifs présente l'avantage d'être moins susceptible à la dégradation mécanique et peut être séparé du solvant facilement par filtration. En revanche, une quantité importante d'additifs est nécessaire pour une réduction de traînée significative, de l'ordre de 20 % maximum dans la plupart des cas. D'après des visualisations faites au cours de l'écoulement, les fibres s'alignent dans le sens de l'écoulement, ce qui peut expliquer en partie le mécanisme de la réduction de la traînée dans le cas de ce type d'additifs [4].

I.8. Les forces dans les milieux dispersés

D'après ce que nous avons déjà vu jusqu'à ce moment, nous constatons que la viscosité est un paramètre très important dans le domaine des suspensions (pétrole). Elle dépend de la nature des fluides (c.à.d. la composition chimique) et les concentrations des différentes particules existantes dedans. Dans ce paragraphe nous allons discuter quelque propriété d'interactions interparticulaires qui peuvent expliquer la fluctuation de ce paramètre.

Ces interactions représentent les différentes forces d'attractions et/ ou répulsives. Elles peuvent être le résultat du mouvement relatif des particules par diffusion (mouvement brownien) ou être induites par une force extérieure (cisaillement par agitation ou écoulement) ou encore être commandées par les interactions inter particulaires (attractives et/ou répulsives).

I.8.1. Le mouvement brownien

Le mouvement brownien caractérise l'ensemble des mouvements aléatoires qui tendent à éloigner de leur position initiale les particules solides en suspension dans un fluide quel que soit l'écoulement macroscopique imposé à la suspension [34] et [35]. Au sein de la suspension, une particule animée de mouvement brownien est soumise à des forces résultant de la présence des autres particules. Avec les forces de gravité, le mouvement brownien est une de ces forces qui induisent le mouvement relatif des particules. D'un point de vue macroscopique, le mouvement brownien a pour effet d'augmenter les dissipations d'énergie de type hydrodynamique au sein d'une suspension [34] [35] et [36].

Le mouvement brownien est aussi appelé « agitation thermique » car l'énergie cinétique communiquée à une particule par ce phénomène est directement liée à la température du milieu dans lequel évolue la particule. Il s'agit de l'équation fondamentale de la dynamique appliquée à la particule seule dans un liquide en tenant compte de la traînée visqueuse qui s'exerce sur elle et d'une force fluctuante résultant des chocs entre molécules [35]. Ces mouvements browniens permettent aussi d'expliquer la capacité qu'ont certaines suspensions à retrouver leurs propriétés initiales après une période de repos suffisamment longue.

I.8.2. La tension superficielle

La tension superficielle est une mesure de la force agissant à une frontière entre deux phases [37]. 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 [37]. 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 [18].

I.8.3. Les forces de Van Der Waals

Les forces de Van Der Waals, qui sont des forces attractives entre atomes ou molécules, font parties des interactions colloïdales les plus importantes. Ce sont des interactions dipolaires de faible intensité [34] et [38], en particulier ces forces jouent un rôle important et ont une grandeur considérable près du mur d'un tube capillaire [39]. Toutes les forces d'attraction intermoléculaires sont connues sous le nom général de forces de van der Waals.

Ces forces d'attraction résultent des fluctuations thermodynamiques du champ électromagnétique à l'intérieur et autour des particules. Elles sont liées aux interactions entre dipôles fluctuants. Même les atomes ou les molécules non polaires possèdent un dipôle instantané créé par le mouvement des électrons. Ce dipôle génère un champ électrique qui polarise n'importe quel atome environnant devenant alors un dipôle induit. L'interaction entre ces deux dipôles crée une force attractive instantanée dont la moyenne temporelle n'est pas nulle. La portée de ce type de force est relativement grande [34]. En discutant l'adhérence/cohésion de particules, la contribution des forces de van der Waals est typiquement évaluée et basée sur des calculs théoriques comportant l'intégration des interactions moléculaires entre deux sphères

I.8.4. Forces électrostatiques

Les forces électrostatiques sur des particules de poudre résultent principalement de la présence (ou de l'excès) de la charge électrique nette sur les particules ou les champs électriques extérieurement appliqués. Ces particules peuvent acquérir la charge de plusieurs manières comme par entrer en contact avec d'autres matériaux, par induction dans un champ électrique extérieurement appliqués, etc. Les forces de van der Waals et électrostatiques peuvent jouer des rôles significatifs dans l'adhérence de particules. La force électrostatique nette est suffisamment plus grande que l'importance de forces de van der Waals. Pour des

particules sans quantité significative de charge, des forces de van der Waals probablement s'avèreraient pour jouer un rôle dominant [40].

I.8.5. La liaison hydrogène

Schématiquement, une liaison hydrogène est un pont linéaire entre deux atomes, un donneur et un accepteur, plus électronégatif que le donneur. Ces deux atomes très électronégatifs sont généralement des atomes d'azote et d'oxygène. L'atome d'hydrogène se comporte comme un proton électro-statiquement attiré par les charges négatives : il est retenu entre N et O, ce qui oblige ces deux atomes à rester au voisinage l'un de l'autre. Cette liaison est l'un des principaux mécanismes de l'hydratation des anions en solution aqueuse. Elle est responsable de l'existence sous forme solide de nombreuses molécules organiques contenant des groupements hydroxyles (-OH). Les ponts hydrogènes dominent un grand nombre de procession biologiques : ils déterminent les structures des protéines. La liaison hydrogène est plus forte que les forces de Van der Waals, mais plus faible que les liaisons covalentes. Elle domine souvent les autres types d'interactions intermoléculaires. Elle dépend de la distance entre le donneur et l'accepteur, qui est dépendante de leur électronégativité [41].

I.9. État de l'art

Généralement pour étudier le comportement rhéologique du brut, on choisit le modèle d'écoulement le plus approprié qui décrit largement les caractéristiques rhéologiques. Ce choix est appliqué dans le laboratoire par les viscosimètres de rotation coaxiaux. Les modèles rhéologiques employés souvent pour la description des fluides visqueux non newtoniens d'après Midoux [24] (1993) sont représentés sur le tableau (1).

Du point de vue rhéologique, les pétroles bruts peuvent être classifiés dans le domaine général des suspensions [16]. Le pétrole est un mélange de déférentes composantes chimique, et selon laquelle le brut se comporte [42] et [43].

Ainsi, le comportement rhéologique du pétrole brut change selon les conditions thermiques et mécaniques d'écoulement [44]. Puisque celui-ci peut être considéré aussi bien comme un fluide newtonien, non newtonien à seuil, thixotrope et même comme un solide plastique hétérogène.

Tableau I.1 : Lois rhéologiques des fluides

MODELE	LOI RHEOLOGIQUE	PARAMETRE
Ostwald De Waele	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	k, n
Ellis	$\tau = \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 + (\tau + \tau_{1/2})^{\alpha-1}}$	$\eta_0, \tau_{1/2}, \alpha$
Sisko	$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + K\dot{\gamma}^n$	η_0, K, n
Reiner Phillipoff	$\tau = \left(\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau + \tau_c)^2} \right) \dot{\gamma}$	$\eta_0, \tau_c, \eta_\infty$
Loi Puissance tronquée de Spriggs	$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} \quad \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0$ $\tau = \eta_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} \dot{\gamma} \quad \dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0$	$\eta_0, \dot{\gamma}_0, n$
Plastique de Bingham	$\tau = \tau_c + \eta_B \dot{\gamma}$	τ_c, η_B
Herchel-Bulkley	$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n$	τ_c, K, n
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_c \dot{\gamma}}$	τ_c, η_c
Skelland	$\tau = \tau_c + \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 + c(\tau - \tau_c)^m}$	τ_c, η_0, m, c

On trouve que les pétroles bruts paraffiniques cireux montrent le point élevé de congélation et possèdent des caractéristiques d'écoulement non newtonien à la température égale ou inférieure au point de congélation dû à la formation de cristallisation. Ainsi une contrainte critique surgit et une augmentation de viscosité a eu lieu. Les propriétés rhéologiques ne deviennent plus constantes et la viscosité varie en fonction de la température et du taux de cisaillement [26]. Les pétroles bruts possèdent le comportement complexe d'écoulement dans lequel l'effort de cisaillement dépend du taux de cisaillement et du temps (la thixotropie).

I.9.1 Influence de la température

Le pétrole brut, lorsqu'il s'écoule dans des conditions thermique favorables ($T > T_{\text{wat}}$: wax appearance temperature ; est la température pour laquelle les premiers cristaux de paraffine apparaissent) se comporte comme un fluide Newtonien. Cependant, lorsqu'on diminue la température au-dessous de cette température, on observe que le comportement rhéologique devient non-Newtonien [45] et [42].

Barry dans [45] a vérifié expérimentalement sur deux bruts paraffiniques Nord Africains. Il a tracé la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) et montre ainsi qu'au dessus d'une certaine température (750F=23,88°C fig. à gauche), ce brut a un comportement Newtonien. Puisqu'il y a une relation linéaire entre la contrainte et le taux de cisaillement $\tau = \eta\dot{\gamma}$ et, lorsque la température diminue (70°F=21,11°C fig.à droite), on constate que la courbe n'obéit plus à une relation linière, mais plutôt à une loi de puissance (du type loi d'OSTWALD DE WAELE).

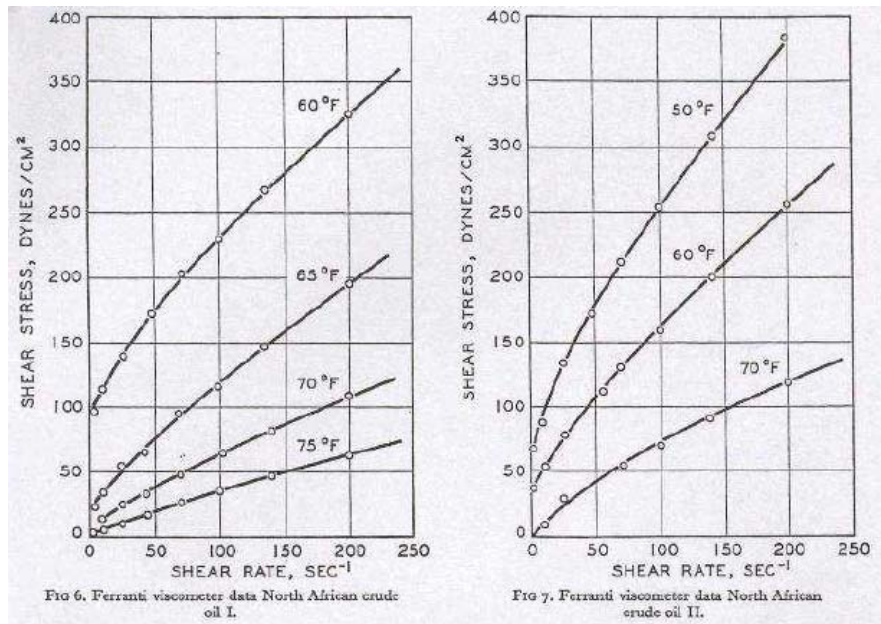


Figure I.19 : Comportement rhéologiques d'un brut paraffinique Nord Africain pour différentes températures

Enfin, si la température diminue encore, il apparaît une contrainte critique en dessous de laquelle il n'y a pas d'écoulement. Mais une fois cette contrainte dépassée, le brut se comporte comme un matériau d'Ostwald (fluide non newtonien). Ainsi, le fluide a un comportement viscoplastique qu'il est possible de représenter par la relation d'HERSCHEL-BULKLEY.

Ces données expérimentales montrent qu'un brut paraffinique a un comportement différent selon la température à laquelle il s'écoule. Cette simple étude expérimentale nous a permis de mettre en évidence le rôle important que la température joue dans le comportement rhéologique d'un brut paraffinique.

Ainsi, beaucoup d'auteurs ont fait des études sur les bruts de différente région afin de montrer l'influence de la température. Par exemple M. A. Farah et al [46] ont faits des expériences sur six bruts de différentes natures chimiques et leurs émulsions eau-pétrole. Afin de trouver leurs comportements rhéologiques en fonction de la température (une émulsion eau-pétrole est un mélange de pétrole et de l'eau, à différent teneur en eau (0, 20 et 40% dans ce cas)), ces émulsions sont très courantes dans l'industrie pétrolière. Elles forment naturellement pendant la production de pétrole brut et la teneur en eau peut être aussi élevée jusqu'au 60% en volume). La viscosité et l'effort de cisaillement (la contrainte) en fonction des taux de cisaillement pour plusieurs températures de pétroles bruts et leurs émulsions étaient déterminés en utilisant un viscosimètre numérique de modèle Brookfield, LVDIII, couplé à un micro-ordinateur.

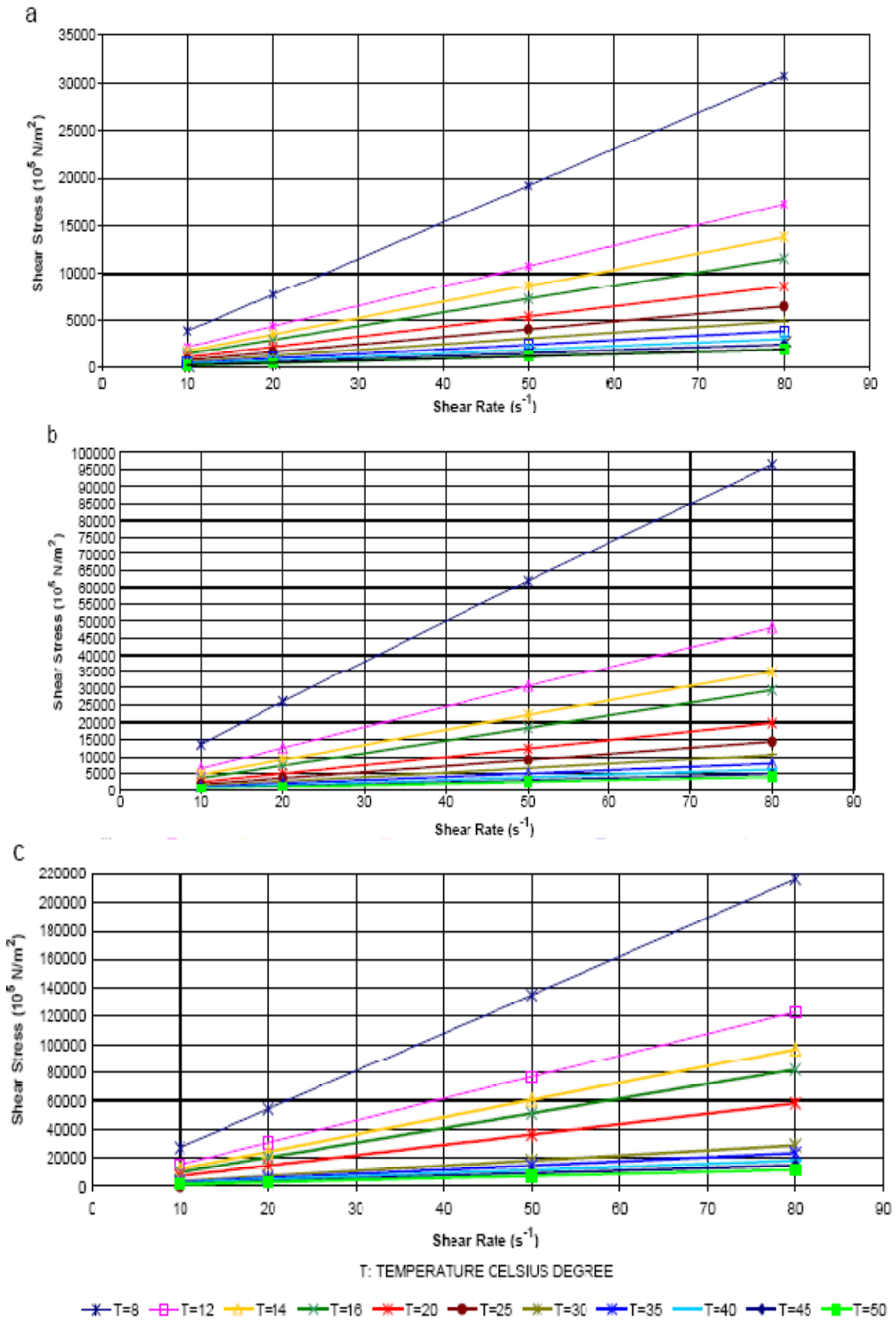


Figure I.20 : Rhéogramme aux différentes températures pour les fractions volumétriques fixes de la phase dispersée. (a) Huile déshydratée (0%) (b) émulsion Eau-pétrole (20%) et (c) émulsion Eau-pétrole (40%)

Le graphe suivant montre la variation de la viscosité en fonction de la température à des taux de cisaillements constants. On observe que la viscosité cinématique diminue avec l'augmentation de la température quelque soit le pourcentage de l'eau dans le pétrole brut.

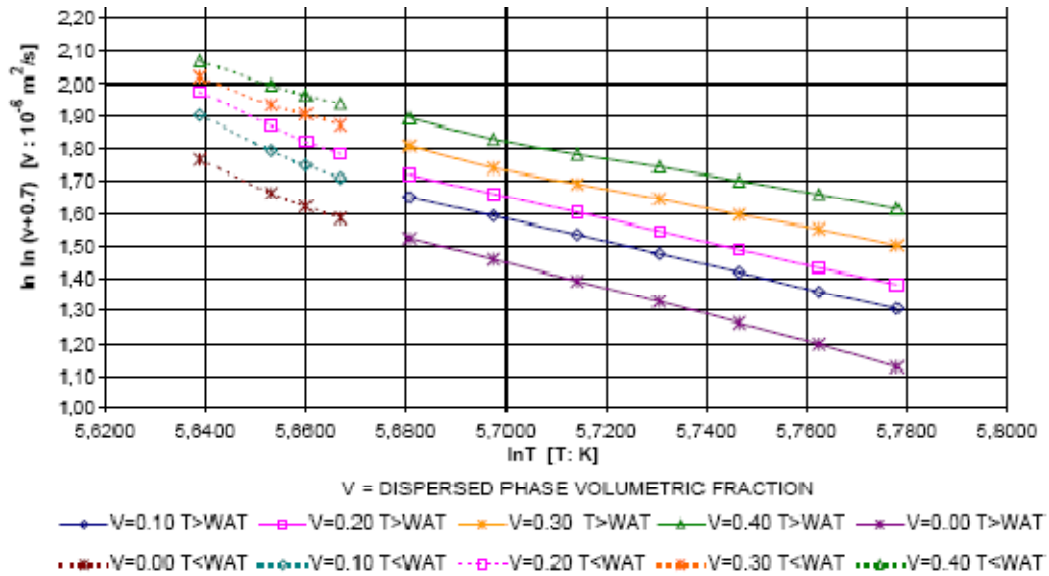


Figure I.21 : Viscosité cinématique en fonction de la température à un taux de cisaillement fixe $\dot{\gamma} = 50s^{-1}$

S. Deshmukh et D.P. Bharambe [47] montrent dans la figure. 18 les caractéristiques newtoniennes de pétrole brut de Nada à une température (33°C) supérieure à WAT.

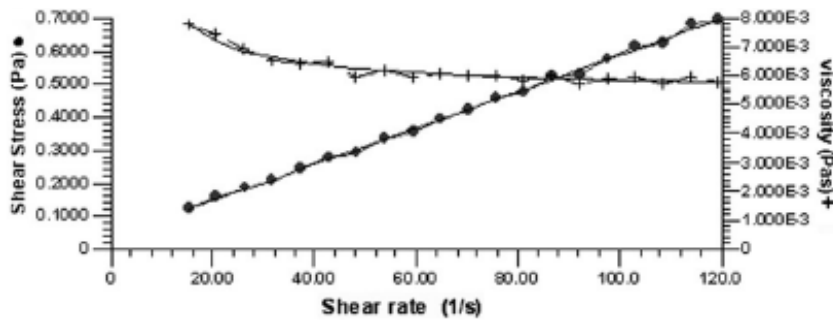


Figure I.22 : Rhéogramme de pétrole brut vierge de Nada à 33°C

A 27°C (fig 23 (b)) un effort critique de 3.681 PA est exigé pour commencer l'écoulement de pétrole brut et elle montre la nature non newtonienne et à 24 °C (fig. 23 (a)) le pétrole montre la nature plastique de Bingham avec grande viscosité (0.31 Pa.s) [47].

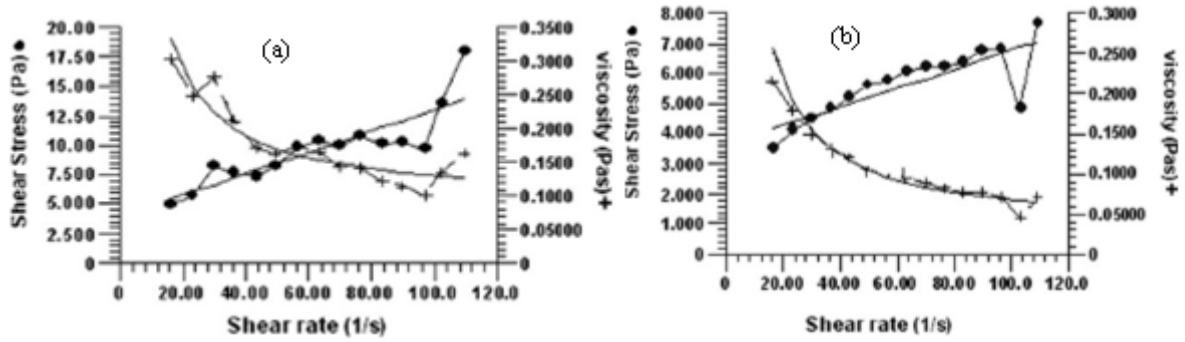


Figure I.23 : Rhéogramme de pétrole brut vierge de Nada à 24 °C (a) ; à 27 °C (b)

On peut remarquer dans l'étude expérimentale sur un brut cireux d'Umbarka représentant le désert occidental égyptien que les données rhéologiques sont adaptées à un modèle le plus populaire d'écoulement plastique, c'est le modèle de casson. Ces résultats montrent que la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la température (tableau I.2), ainsi que ce brut possède une contrainte critique. Au-dessus de cette contrainte l'écoulement est effectué tel que sa valeur diminue avec l'augmentation de la température. Les résultats sont illustrés sur la figure 20.

Tableau I.2 : Ajustement des données viscosimétriques pour le brut cireux non traité d'Umbarka au modèle d'écoulement de casson [26]

Température °C	Paramètre de Casson		
	$\sqrt{\tau_c}$	$\sqrt{\eta_c}$	R
37	1.0865	0.0430	0.9684
32	1.3484	0.0580	0.9717
27	1.5718	0.0491	0.9691
22	1.6283	0.1218	0.9839
17	2.9484	0.3954	0.9941

R Coefficient de corrélation

η_c : Viscosité de Casson

τ_c : Contrainte seuil de Casson

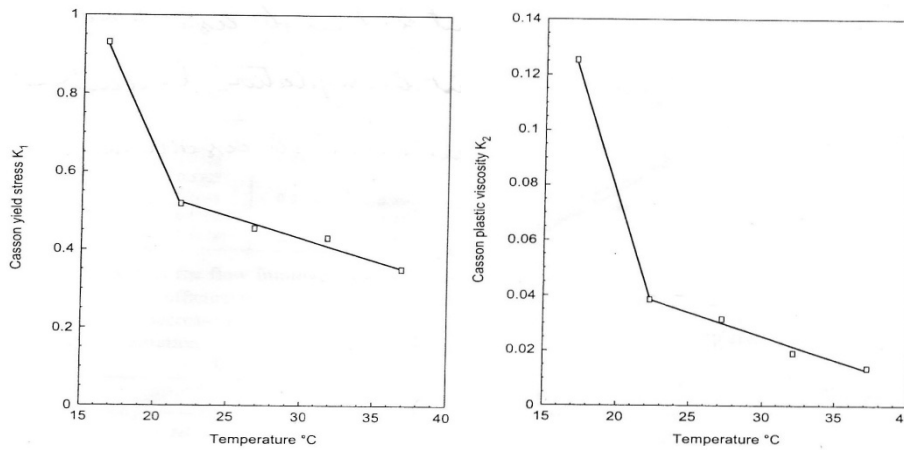


Figure I.24 : Effet de la température sur la contrainte critique (à gauche) et sur la viscosité (à droite)

S. M. Al-Zahrani [51] a aussi étudié l'effet de la température sur la viscosité sur un pétrole brut moyenne saoudien en gardant la concentration en cire et le taux de cisaillement constants. Il a trouvé expérimentalement que lorsque la température diminue, l'effort de cisaillement augmente. Cela signifie que la viscosité est augmentée en diminuant les températures.

De même, la viscosité de pétrole brut lourde diminue de manière significative par exemple, elle diminue de 10 à 2.5 PA s quand des changements des températures varient de 25 à 75°C (S. W. Hasan & al [48]).

On constate que la viscosité de tous les pétroles diminue et approche à une valeur plus ou moins constante avec l'augmentation de la température. Ceci peut être expliqué comme suit : L'augmentation de la température tend à augmenter l'échange moléculaire (mouvement) et à réduire les forces attractives entre les molécules. Cependant dans le liquide, la réduction des forces attractives est beaucoup plus significative que les augmentations de l'échange moléculaire et donc la viscosité diminue [49].

I.9.2 Influence de taux de cisaillement

Comme la température a un rôle significatif sur le comportement rhéologique du pétrole brut, le taux de cisaillement lui aussi peut influencer d'une façon ou autre sur leur comportement. Cela peut être vu dans beaucoup d'études expérimentales. Nous présentons dans ce paragraphe quelques unes qui montrent l'influence du taux de cisaillement sur le comportement et les paramètres rhéologique du brut.

On note également que le comportement newtonien se produit relativement aux valeurs élevées des taux de cisaillement. Mais avec les diminutions de la température, ces derniers deviennent limités. Le comportement non-newtonien (rhéo-fluidifiant ou le pseudo-plastique) apparue aux faible taux de cisaillement qui devient plus prononcée si la température prend des valeurs plus ou moins élevé [5].

Clark et Pilehvari [50] ont étudié la rhéologie d'émulsion de pétrole en eau utilisant le pétrole brut visqueux et l'eau de robinet et l'ont stabilisé avec un agent tensio-actif. Ils ont conclu que les émulsions ont montré le comportement rhéo-fluidifiant à basse taux de cisaillement (c.-à-d. en-dessous du de 50 s^{-1}) et du comportement newtonien aux taux de cisaillement élevés (au-dessus du 1000 s^{-1}).

R.C. Dante et al [43] ont fait des études sur le brut lourd Mexicain. Eux aussi, ont trouvé que le brut est affecté non seulement par la température mais, également du taux de cisaillement. Cependant à une température constante, on peut obtenir des courbes d'écoulements viscosité- taux de cisaillement ($\eta = f(\dot{\gamma})$) qui se décomposent a deux régions dont la première représente le comportement non newtonien (rhéo-fluidifiant) où le taux de cisaillement est inferieure à 10 s^{-1} environ et la deuxième région représente le comportement newtonien où les valeurs de taux de cisaillements sont très élevés. Tous ça est dans une température constante.

Dans la figure ci-après, nous présenterons les résultats obtenus par Y.Al-Roomi et al [5] sur un échantillon de pétrole brut collecté de la raffinerie de Shuaiba du pétrole national du Koweït. Suivant les indications de la figure. 21, la viscosité de pétrole brut a été réduite presque d'un tiers une fois augmenté la température de 298 à 348 K. De plus, le pétrole brut montre une viscosité de comportement fluidifiante considérable aux taux de cisaillement au-dessous du 10 s^{-1} environ et un comportement rhéologique newtonien est observé pour les températures plus hautes que 308 K.

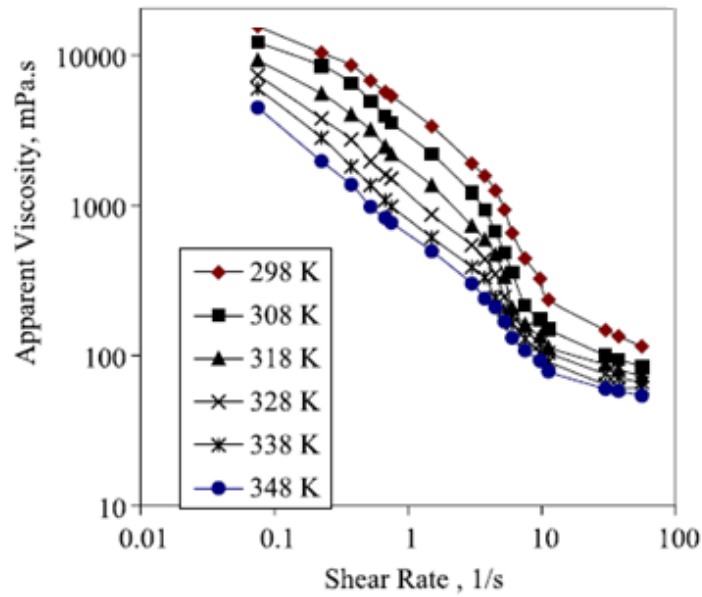


Figure I.25 : Viscosité apparente de pétrole brut contre le taux de cisaillement aux différentes températures sur l'échelle log-log.

On observe dans les travaux de M. A. Farah et al [46] que les valeurs de viscosité diminuent avec l'augmentation des taux de cisaillement à plusieurs températures pour un pétrole de différents teneurs en eau (voir les fig. 24-25-26). La réduction de la viscosité est beaucoup plus apparente au bas taux de cisaillement. À valeurs élevées du taux de cisaillement, on observe que la viscosité reste constante comme illustré dans les figure ci-après. C'est la même observation donnée par Al-Zahrani et al [51] pour la viscosité de pétrole cireux. Ce comportement de rhéo-fluidifiant est généralement connu en tant que comportement pseudo plastique. Ce comportement a été expliqué par Al-Zahrani [51] que le cisaillement appliqué sur le fluide décompose très rapidement la structure interne dans le fluide.

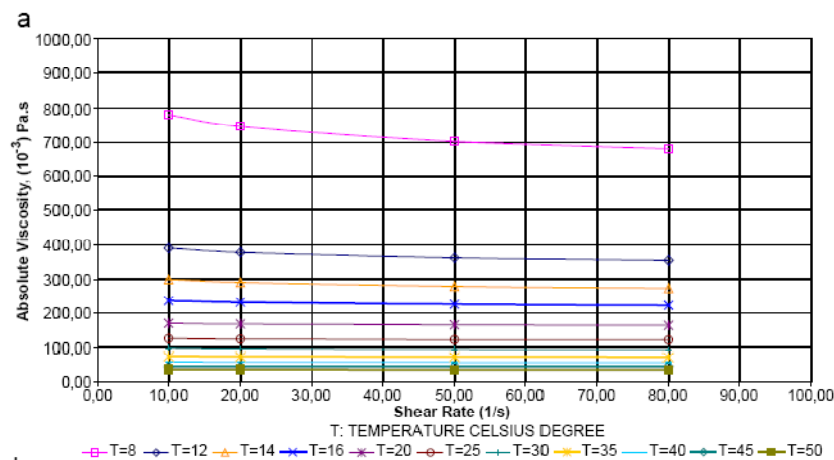


Figure I.26 : Viscosité absolue vs le taux de cisaillement aux différentes températures. (a) Pétrole déshydraté (0%). [51]

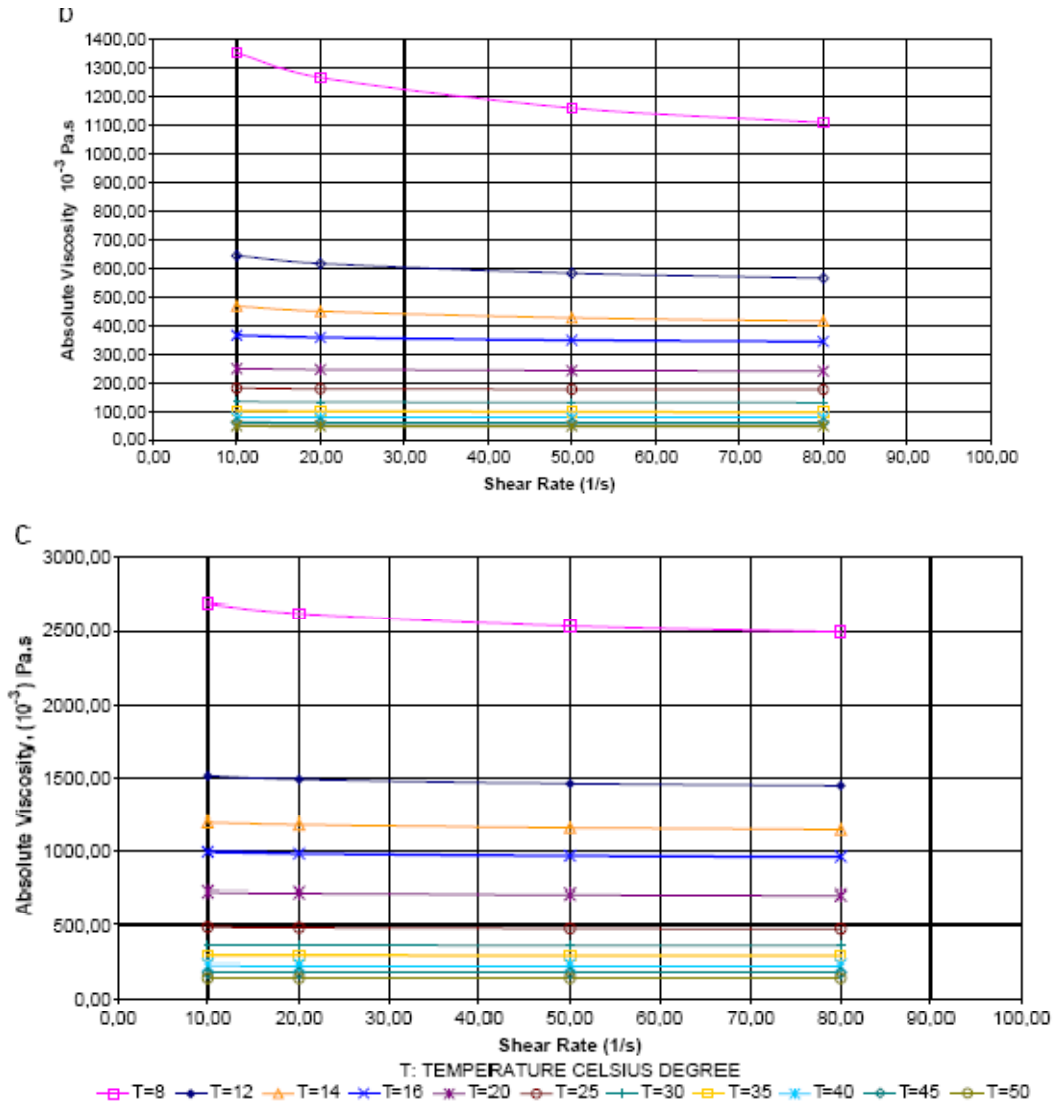


Figure I.27 : Viscosité absolue vs le taux de cisaillement aux différentes températures. (b) émulsion Eau-pétrole (20%). (c) émulsion Eau-pétrole (40%). [51]

On a également observé dans les travaux expérimentaux de S.M. Al-Zahrani et al [51] que la viscosité a chuté plus rapidement avec la diminution du taux de cisaillement dans la gamme des faibles taux de cisaillement. Même dans les températures élevés, la viscosité diminue malgré le taux de cisaillement appliqué est plus ou moins grande. Ces résultats indiquent que la viscosité dépend de la température et du taux de cisaillement au même temps.

I.9.3. Influence des additifs

S. Deshmukh et D.P. Bharambe [47] ont fait des études expérimentales sur un pétrole de Nada (Inde). Ils ont étudié le comportement rhéologique et l'effet des additifs sur ce pétrole.

Les additifs utilisés sont des esters d'acide acrylique. Ils ont été préparés en réagissant 1 mole d'acide acrylique avec 1 mole de différent alcools de n-alkyl (n=10, 12, 14, 16, 18). Le rhéomètre utilisé dans cette étude est le rhéomètre AR-500 qui possède un frottement nul et une géométrie cône plan (4 cm de diamètre, l'angle de cône de 2°) et équipé d'un dispositif de contrôle de température.

Les résultats obtenus indiquent que tous les additifs polymères sont tout à fait efficaces en réduisant la viscosité de pétrole brut de Nada qui ont été déterminée à différentes doses de concentration et de température utilisant le viscosimètre Fann. Les résultats obtenus montrent que la concentration de l'additif et le nombre de carbone dans la chaîne du polymère augmente les diminutions de la viscosité.

Tableau I.3 : Données anticipées de rhéomètre pour le pétrole brut de Nada [47]

Code	Concentration additive (ppm)	Température (C°)	Viscosité (Pa.s)	Contrainte critique (Pa)
Blanc	00	24	0,09079	3,948
		27	0,03089	3,681
A-14	100	27	0,07150	2,455
		24	0,01682	2,285
	500	27	0,01490	2,587
		24	0,01265	2,587
	1000	27	0,01127	2,748
		24	0,01100	3,455

En considérant les résultats de A-14 qu'ont été choisis pour la mesure rhéologique à 24 °C et à 27°C à des concentrations de 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm de l'additif. Les résultats sont tabulés dans le tableau 3, qui prouve que l'augmentation de la concentration de l'additif provoque la diminution des paramètres rhéologiques.

Dans l'étude qui a été faite par A. E. Kuzmic & al [52] sur différents échantillons de bruts utilisant des polymères à chaîne longue d'esters acrylate comme additif améliorant l'écoulement, le comportement rhéologique a été déterminé par la mesure de la viscosité et la contrainte. L'ajout de ces additifs aux échantillons de pétrole a réduit leur viscosité et ainsi ils ont observés que la contrainte critique avant l'addition des additifs est supérieure à celle après l'addition.

Une autre étude a été faite sur un pétrole obtenue d'Husky Energy – Lloydminster, Canada (S. W. Hasan & al [48]). L'objectif de cette étude est d'étudier les différentes solutions

réduisant la viscosité de pétrole brut lourd pour augmenter les propriétés d'écoulement. Le pétrole brut lourd montre le comportement d'écoulement non newtonien rheo-fluidifiant, qui peut être présenté mieux par le modèle de loi de puissance. L'addition d'une quantité limitée d'un pétrole brut plus léger a été étudiée pour abaisser la viscosité de pétrole brut lourd. On a constaté que ce mélange est la méthode la plus appropriée et la plus favorable pour abaisser la viscosité de pétrole brut lourde. Par exemple, au 25 °C, la présence de 20% de pétrole brut léger dans la phase lourde de pétrole brut cause la réduction de viscosité de 96%. Les autres solutions sont l'addition de l'alcool d'éthanol et l'eau à la phase de pétrole brut lourde. Dans le cas de 20% d'émulsion d'eau dans le pétrole, la viscosité de pétrole brut lourd réduit presque à 35% de sa valeur originale au 25 °C. Cependant, la présence de l'alcool de 20% dans la phase lourde de pétrole brut mène à la réduction de viscosité de 90%. Le comportement d'écoulement de pétrole brut lourd montre une contrainte critique apparente de 0.7 PA, tandis qu'on n'observe aucune contrainte dans le cas des mélanges de pétrole brut lourds avec de pétrole brut léger.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude théorique générale de la rhéologie et les lois de comportements gouvernantes l'écoulement. On peut dire que il y a beaucoup de modèle mathématique utilisé dans ce domaine tel que le modèle de Bingham, de Herchel-Bulkley et de Casson.... les plus célèbres.

Le comportement liquide est classifié selon le comportement observé entre la contrainte et le taux de cisaillement dans deux types principaux. Les fluides newtoniens sont définis en tant que ils montrent une proportionnalité directe entre la contrainte et le taux de cisaillement tandis que pour les fluides non newtoniens, la relation entre la contrainte et le taux de cisaillement est non plus linéaire.

L'équation constitutive rapportant la contrainte à son mouvement sur les fluides non newtoniens est complexe et n'a pas été encore résolue. Cependant, on a proposé beaucoup d'équations, certain permis lesquelles sont complètement empirique et d'autres basés jusqu'aux degrés variables sur la structure pour décrire des fluides pseudo-plastique qui ce n'ai pas l'objet de notre étude. Il n'y a aucune raison pour laquelle quelconque d'entre ces équations devraient exactement décrire le comportement rhéologique de pétrole brut. Généralement l'étude rhéologique prend en considération l'étude de la viscosité. On assume que les

viscosités apparentes peuvent dépendre non seulement du taux de cisaillement mais également du temps où le fluide a été soumis au cisaillement, on cite ici les fluides thixotropique.

Le pétrole brut provient de différente région du monde montre leur variation du 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.

Chapitre II : Matériaux et appareillages

Introduction

Les paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité...) des substances sont déterminés grâce aux rhéogrammes obtenus à l'aide de rhéomètres et viscosimètres. Ces appareils feront l'objet de la partie qui va suivre. Il existe différents types d'appareils de mesures rhéologiques, on peut citer, les viscosimètres capillaires, viscosimètres à billes sans omettre les rhéomètres à contraintes et cisaillement imposés. Ces derniers sont dotés de godets avec différentes géométries. Les plus utilisés dans le cas des pétroles sont les rhéomètres et viscosimètres coaxiaux à géométrie rotative.

Le pétrole utilisé dans notre étude provient des gisements de Tin Fouye Tabankort (TFT) gérés, par la direction régionale de Tin Fouye Tabankort (TFT), elle fait partie de la division de production de la société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures (SONATRACH). Elle est chargée de la production du pétrole et du gaz dans les différents gisements qui existent dans la région et qui recouvre une aire de 4000km². La région de TFT est située dans la partie Nord-Ouest du bassin d'ILLIZI, à 350 km au Nord-Ouest d'Aïn Amenas et 1450 km au Sud d'Alger.

Le T.F.T. se divise en deux secteurs, secteur nord et secteur sud. Dans ce mémoire de magister on va étudier le comportement rhéologique du pétrole brut provenant du gisement de T.F.T (Illizi- Algérie) secteur nord.

Dans ce secteur il y a plus de 200 puits parmi lesquels il y a une vingtaine de puits d'injection d'eau dans le gisement pour maintenir la pression de production lorsque le gisement est épuisé, pour pouvoir extraire le brut sans utiliser les systèmes de pompes. Ce brut se dirige vers les bacs de séparation, où on sépare le gaz et l'eau du brut (figure II.1). Ce dernier se dirige à son tour vers le centre principal de collecte (C.P.C.) où il y a plusieurs bacs de stockage. Dans ces bacs en ajoutant de l'eau douce pour avoir lavé le brut, en laissant ce mélange pendant 10 heures de décantation afin de minimiser la salinité (en diminuant la teneur de sel NaCl).

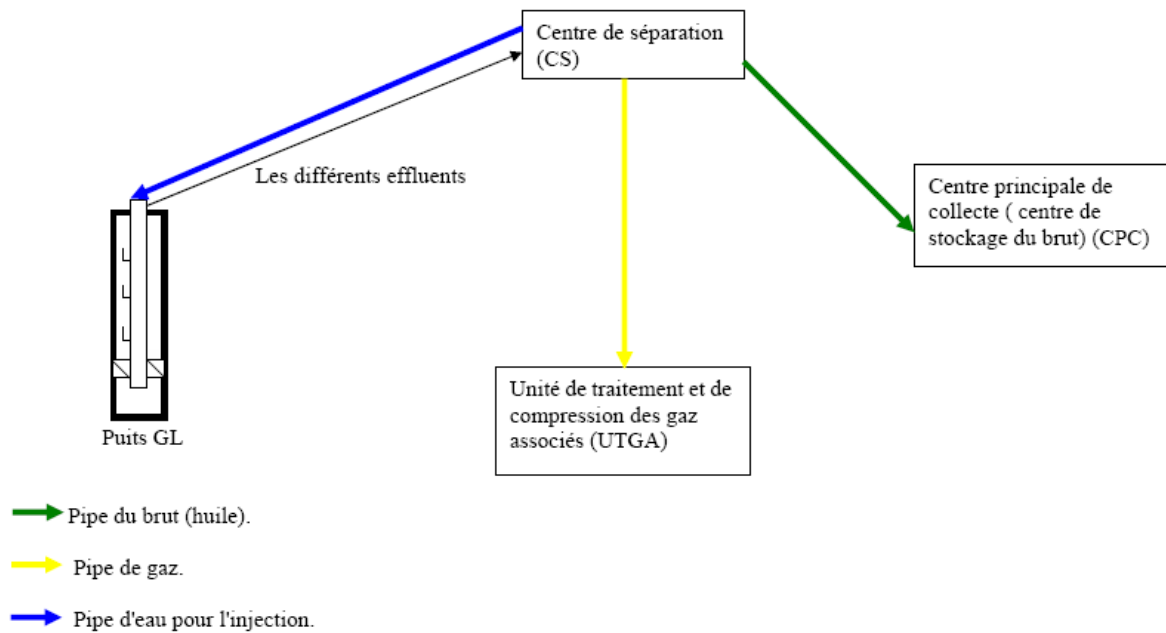


Figure II.1 : Schéma principal d'évacuation des effluents au TFT [53].

Dans une dernière étape, le produit sera expédié vers HOUD ELHAMRA par des pipes en utilisant un système de pompage. Nos échantillons seront récupérés au niveau de cette station de pompage.

Dans un premier temps, nous avons procédé à la caractérisation physico-chimique du brut étudié.

II.1. Tests physico-chimiques

II.1.1. Densité

La densité est un paramètre qui peut caractériser un brut, elle est très importante dans le cas des produits pétroliers. A chaque instant on doit pouvoir dans l'industrie du pétrole transformer les poids en volumes ou inversement.

La détermination de la densité se fait avec des densimètres gradués. Il se fait comme suit : en remplissant une éprouvette jusqu'à son lèvre par le brut et on met un densimètre et un thermomètre dans le brut, en attendant jusqu'à la stabilité, et on fait la lecture directe sur les deux appareils. La densité trouvée correspond à une température connue sera rapportée à 15 °C au moyen d'une table de conversion (table de la Chapelle) [53].

II.1.2. Viscosité

La viscosité est une des plus importantes propriétés des liquides. Un grand nombre de recherche ont été faites pour relier la viscosité à la nature chimique du produit ainsi qu'à la structure moléculaire des liquides. On distingue la viscosité absolue et la viscosité cinématique (voir chapitre I section I.2), c'est cette dernière qui est surtout utilisée dans les mesures courantes lorsqu'on ne tient pas compte de la densité du liquide [53].

La viscosité a été déterminée par le viscosimètre à bille (Photo II.1) à 20°C et à 37,8°C, dont le principe est l'application de la loi de Stokes. En mettant l'échantillon de brut à l'intérieure du tube de chute qui est au centre de la chambre de chauffage où l'eau circule avec la température désirée, cette eau est injectée à travers le vis d'injection (1) à partir d'un bain de chauffage, et est récupéré par le vis (2). La mesure de la viscosité se fait par la mesure du temps de chute que met la bille pour parcourir une certaine distance bien déterminée (la distance entre le point A et le point B), et ce temps on l'introduit dans la formule suivante :

$$\eta = k(\rho_1 - \rho_2)t \quad (\text{II.1})$$

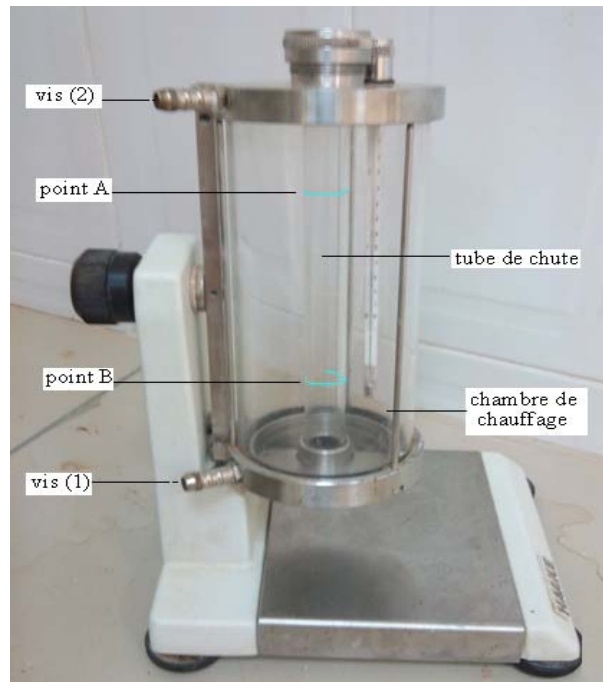
η : viscosité dynamique

k : Constante de bille en mPa.s

ρ_1 : Masse volumique de la bille en g/cm^3 .

ρ_2 : Masse volumique du liquide en g/cm^3 .

t : Temps de chute en seconde.



Photographie II.1 : Viscosimètre à chute de bille

II.1.3. Teneur en eau

La teneur en eau est le rapport du poids d'eau au poids d'un matériau donné (pétrole brut). En chimie et dans le domaine pétrolier, la teneur en eau permet de quantifier la quantité d'eau dans un liquide donné. Du fait de sa formation en terrains sédimentaires, les hydrocarbures sont normalement saturés d'eau dans les conditions du gisement. Après détente jusqu'aux conditions admises pour les puits producteurs, une partie de cette eau se condense, et le gaz reste saturé en eau dans ces nouvelles conditions.

Cette eau peut avoir deux inconvénients principaux pour le transport ou le changement de conditions des hydrocarbures (pression et température) :

- elle peut se condenser et former des bouchons d'eau générateurs de pertes de charge.
- elle peut aussi, sous des conditions déterminées, former avec les hydrocarbures des corps solides durs comme de la glace (des hydrates d'hydrocarbures).

La teneur en eau est mesurée en utilisant une centrifugeuse, constituée de 4 flacons en verre gradués jusqu'à 100 ml qui ressemblent aux poires et un moteur électrique qui fait tourner ces derniers. Pour obtenir des résultats, on conserve l'échantillon au froid (0 à 4°C) afin d'éviter l'évaporation des parties légères. En mettant l'échantillon de brut dans les flacons

jusqu'à la graduation 100 et on les agite énergétiquement afin d'homogénéiser l'échantillon, on les place dans les porte-tubes équilibrés au moyen d'une balance à double plateau, on fait marcher l'appareil par une vitesse de rotation 5000 tr/min pendant quelque minutes (5min environ).

Après centrifugation, l'eau va se séparer du pétrole et se décante en bas du flacon. En fin, quand l'appareil sera arrêté on fait la lecture du dépôt, à travers les parois du flacon construit de verres pour permettre l'observation visuelle de niveau de l'eau [53].



Photographie II.2 : Centrifugeuse

II.1.4. Tension de Vapeur Reid (T.V.R.)

La pression ou la tension de vapeur Reid est la pression que développe l'essence placé à 37,8°C dans un appareil appelé BOMBE REID. Cette pression ne doit pas dépasser certaine valeur donnée par les spécifications, elle est en fonction de la teneur de l'essence en fraction très légère [53].



Photographie II. 3 : Bombe Reid destinée pour mesurer la TVR.

L'appareil se compose d'une chambre de produit, une chambre à air, un bain d'eau, régulateur de la température et un manomètre.

On prend un échantillon de brut dans un flacon ou une bouteille de verre et on le conserve au froid (0 à 4°C) afin d'éviter la perte des gaz légers.

Puis on fait remplir la chambre de produit par le brut froid qui doit se faire rapidement en évitant les bulles et en fermant le robinet avant de retourner l'ensemble chambre / manomètre afin de passer le produit de l'une à l'autre. En fin, on met l'ensemble dans le bain d'eau à température de 37.8°C. À la stabilité de la température de l'échantillon on lit la pression affichée par le manomètre. On doit connaître la température de l'air et la pression atmosphérique. Utilisant la formule suivante pour trouver la T.V.R.

$$TVR = \frac{37,7 - T_{amb}}{273 + T_{amb}} \times P_{atm} + P_{man} \quad (II.2)$$

T_{amb} : Température ambiante

P_{atm} : Pression atmosphérique

P_{man} : Pression qui affiche le manomètre

II.1.5. Teneur en asphaltène

La détermination de la teneur en asphaltène a été réalisée au Centre de Recherche et Développement (CRD) de la Sonatrach (ALGERIE).

Les asphaltènes sont définis par leur solubilité. Ainsi, la nature, la qualité, et la composition des asphaltènes précipités d'une même charge, changent avec le mode opératoire utilisé pour leur obtention. Plusieurs méthodes sont utilisées pour extraire les asphaltènes à partir d'un résidu ou d'un pétrole brut. Celle retenue dans notre travail est la Norme ASTM D 893-69 utilisée en U.S.A. Ils sont définis comme fraction sans cire de pétrole brut qui est insoluble dans le n-pentane et soluble dans le benzène (voir chapitre I section I.7.3.). Quelques investigateurs le définissent également comme fraction insoluble de l'heptane de pétrole brut, bien que les quantités et le caractère de la précipitation d'asphaltènes soient différents.

II.1.6. Point d'écoulement

De même, ce paramètre a été réalisé au niveau de CRD. Dans l'industrie pétrolière, le point d'écoulement d'un produit est la température la plus basse à laquelle le produit commence à s'écouler. On mesure souvent le point d'écoulement d'un brut, d'un gazole, d'un résidu ou d'un fioul pour définir la faisabilité d'un pompage. La technique et la procédure de la mesure sont définies par des normes françaises (**NF**), anglaises (**IP**) ou américaines (**ASTM**). La norme DIN ISO3016 permet une mesure internationale de cette propriété physique.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Viscosifiant

Le viscosifiant utilisé dans ce travail est celui de la compagnie pétrolière américaine Halliburton (USA), le produit est appelé GELTON, c'est une argile de bentonite qui a été traité avec un composé d'amine pour favoriser sa dispersion en huiles, il fait augmenter la viscosité des suspensions aux fluides de forage à base d'huile. Le produit est commercialisé sous forme de poudre de couleurs gris bronzage et possède une densité de 1.7, emballé dans des sacs de 50 livres (22.7 kg) [53].

L'**argile** est une roche sédimentaire, composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (phyllosilicates) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse (sépiolite et palygorskite) qui explique leurs qualités d'absorption.

La **bentonite** est une argile naturelle contenant une forte proportion de montmorillonite, un silicate d'aluminium hydraté natif dans lequel quelques atomes d'aluminium et de silice ont été remplacés naturellement par d'autres atomes tels que le magnésium et le fer (...).

II.2.2. Additif Quickflow X-2433

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 II. 1 : 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

II.3. Appareil de mesure la viscosité (viscosimètre)

II.3.1. Définition

Pour la mesure de la viscosité, il y a plusieurs appareils, parmi lesquelles ; les viscosimètres capillaires dont le fluide à la sortie de capillaire est immédiatement en contact avec le fluide de réservoir inférieure. C'est le temps d'écoulement d'un volume donné de fluide, qui est mesuré. Cet écoulement se fait en général sous la pression hydrostatique du fluide. Il y a aussi le viscosimètre à bille définie précédemment.

Dans cet étude, pour déterminer le comportement rhéologique, nous utilisons un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550 » (photo II.4), c'est un viscosimètre de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique (détermination de la viscosité et de la contrainte seuil) piloté par un logiciel facultatif de HAAKE installé sur un micro ordinateur, et est posséder d'un

régulateur de température de type « HAAKE DC 30 » utilisé pour tout nos essais pour but de maintenir la température à la valeur voulu.

La technique la plus utilisée avec ce type de viscosimètre, consiste à imposer une vitesse de cisaillement (gradient de vitesse) et calculer la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente.



Photographie II. 4 : Viscosimètre HAAKE VT550

Dans cette étude, nous avons utilisé la géométrie MV-DIN (voir Photo II.5) qui a été choisie selon la norme de Thermo HAAKE, ce dispositif de mesure normalisé s'utilise pour la mesure des viscosités de nombreuses substances. Ce dispositif est constitué d'un godet et d'un corps tournant DIN appariés et nécessite l'emploi d'un manchon thermostatique.

Le dispositif comportant un cylindre intérieur (de rayon 19,36 mm, de longueur 58,08 mm) en rotation dans un cylindre extérieur (de rayon 21 mm et de volume de remplissage 46 cm³) fixe. Il est recommandé pour les fluides de viscosité moyenne et faible (de 2 à 2000 m.Ps.s) et de taux de cisaillement (de 27 à 27 000 s⁻¹).



Photographie II.5 : Géométrie MV-DIN

Dans ce viscosimètre, la substance étudiée est soumise à un mouvement laminaire de cisaillement indépendant du temps : les différentes couches s'écoulent sans que vitesse et contrainte de cisaillement ne subissent aucune modification au cours du temps. L'utilisation de tels viscosimètres se réduit donc à l'étude des seules substances possédant le comportement liquide, capables par conséquent de suivre un processus d'écoulement permanent, l'objectif expérimental recherché étant la détermination de leur rhéogramme $\tau - \dot{\gamma}$. C'est un viscosimètre de type Couette dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre mobile [54].

II.3.2. Principe de fonctionnement

La substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayon R_1 et R_2 , et de hauteur h (figure II.2).

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω_0 (cylindre intérieur), l'autre cylindre demeurant immobile (extérieur).

La substance se décompose en couche cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre extérieur fixe) à ω_0 (pour couche en contact avec le cylindre intérieur mobile).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ et une contrainte de cisaillement τ .

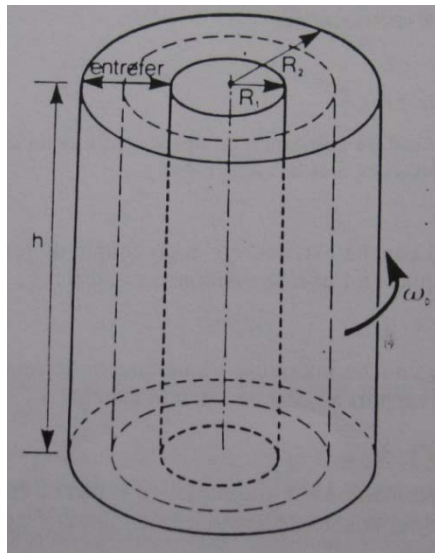


Figure II.2 : Cylindres de révolution

II.3.3. Equation générales

Nous repérerons les différentes couches cylindriques de l'échantillon par leur distance r à l'axe de rotation (figure II. 3)

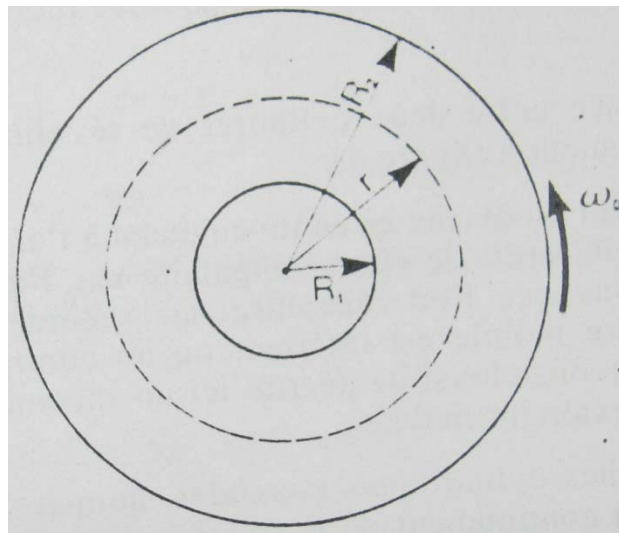


Figure II. 3 : Différentes couches cylindriques de l'échantillon par leur distance r

Par raison de symétrie, la contrainte et la vitesse de cisaillement sont constantes sur toute la surface d'une couche, mais dépendent de sa position : nous les noterons $\tau(r)$ et $\dot{\gamma}(r)$. Le problème qui se pose est de déterminer $\tau(r)$ et $\dot{\gamma}(r)$ à partir des données expérimentales.

II.3.3.1. Détermination de $\tau(r)$

Considérons la portion de substance comprise entre deux couches de rayon r et r' , de surface respectives S et S' (figure II. 4)

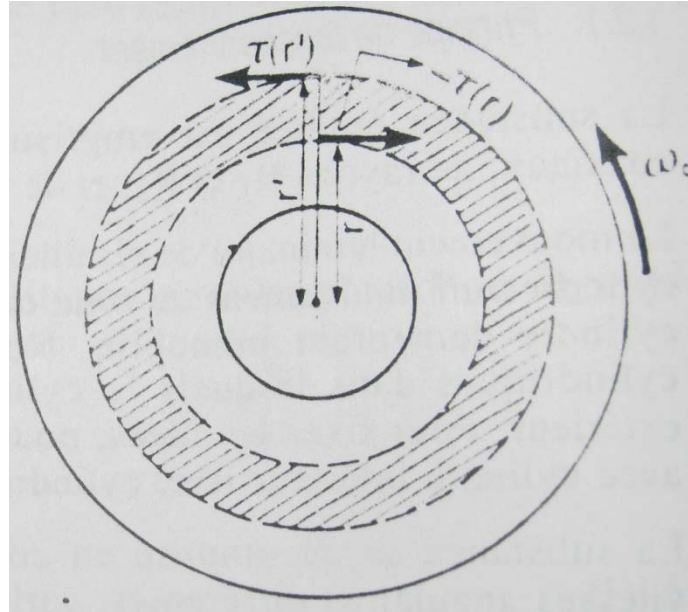


Figure II. 4 : Portion de substance comprise entre deux couches de rayon r et r'

Elle est soumise :

- de la part de la couche intérieur r à un couple de rotation de moteur dont le moment par rapport à l'axe de rotation est égale à :

$$M(r) = r \cdot \tau(r) \cdot S \quad (II.3.a)$$

- de la par de la couche extérieur r' à un couple de rotation de freinage dont le moment par rapport à l'axe de rotation est égale à :

$$-M(r') = -r' \cdot \tau(r') \cdot S' \quad (II.3.b)$$

Quand le régime permanent est atteint, la substance n'étant soumise à aucune accélération angulaire, la somme des moments doit être nulle, si bien que

$$M(r) = M(r') = \text{constante}$$

En particulier, si l'on désigne par M_1 et M_2 les moments des couples appliqués aux cylindres intérieurs et extérieurs, il vient :

$$M(r) = M_1 = M_2 = M$$

Ce qui entraîne, puisque :

$$M(r) = r \cdot \tau(r) \cdot S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau(r) \quad (\text{II.3})$$

$$\tau(r) = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (\text{II.4})$$

Si l'entrefer utilisé est petit, c'est-à-dire si la distance entre les cylindres est petite devant leur rayon :

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = x \ll 1$$

Alors, en se reportant à la relation (II.5), on voit que, puisque le rayon r varie très peu, on peut admettre en première approximation que la contrainte de cisaillement τ demeure constante dans l'entrefer. La valeur constante de la contrainte sera prise égale à :

$$\tau = \frac{\tau(R_1) + \tau(R_2)}{2}$$

soit :

$$\tau = \frac{M}{4 \pi h} \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_1^2 R_2^2} \quad (\text{II.5})$$

II.3.3.2. Détermination de $\dot{\gamma}(r)$

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I section I.3.2.1, la symétrie du problème n'étant plus plane, il n'est plus possible d'utiliser la relation (I.2).

Pour établir l'expression de $\dot{\gamma}(r)$, nous considérons deux couches cylindriques infiniment voisines de rayons r et $r + dr$, et de vitesse angulaires de rotation $\omega(r)$ et $\omega(r + dr)$. Soient deux particules de matière appartenant à ces deux couches et situées à l'instant t en A et B, sur le même rayon.

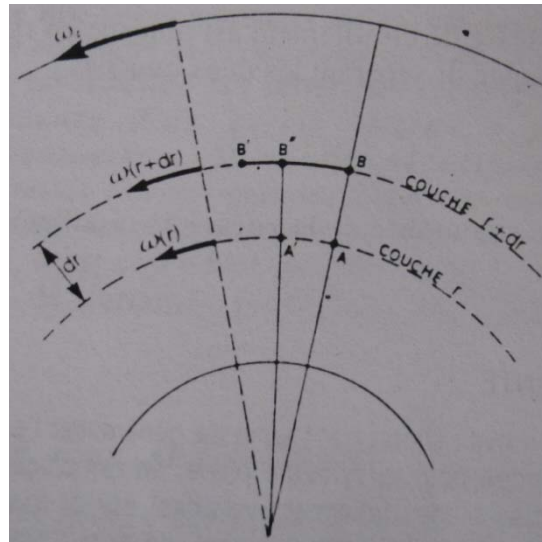


Figure II. 5 : Deux couches cylindriques infiniment voisines de rayons r et $r + dr$.

A l'instant $t + dt$, la particule qui était en B atteint le point B' , et la particule qui était en point A atteint le point A' . Prolongeant le rayon passant par A' jusqu'à la couche $r + dr$, on observe que le point B' est au-delà du point de concours B'' (la vitesse angulaire de la couche $r + dr$ étant supposée plus faible que celle de la couche r). Il faut remarquer que, lors d'une rotation d'ensemble (sans déformation) des différentes couches la vitesse angulaire de rotation étant constante, les particules en A et B à l'instant t viendraient en A' et B'' à l'instant $t + dt$. C'est donc par rapport au point B'' que doit être repéré le déplacement relatif de la couche $r + dr$ par rapport à la couche r . Il vient donc pour expression de la vitesse de déplacement de la couche $r + dr$ par rapport à la couche r :

$$V(r) = \frac{B'B''}{dt}$$

et, puisque :

$$\begin{aligned} B'B'' &= B'B - B''B \\ &= \omega(r + dr) \cdot \{r + dr\} \cdot dt - \omega(r) \cdot \{r + dr\} \cdot dt \end{aligned}$$

Soit encore, en posant :

$$\begin{aligned} \omega(r + dr) &= \omega(r) + d\omega(r) \\ B'B'' &= d\omega \cdot r \cdot dr \end{aligned} \quad (\text{II.6})$$

Si bien que :

$$V(r) = r \cdot d\omega \quad (\text{II.7})$$

L'expression de la vitesse de cisaillement est obtenue en rapportant la vitesse de déplacement à la distance dr séparant les deux couches :

$$\dot{\gamma}(r) = r \cdot \frac{d\omega}{dr} \quad (\text{II.8})$$

En intégrant cette équation ($\dot{\gamma}(r)$) entre le cylindre intérieur et le cylindre extérieur, il vient :

$$\int_{\omega_0}^0 d\omega = K \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r}$$

$$\omega_0 = K \ln \frac{R_2}{R_1}$$

Si bien que :

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega_0}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

On peut simplifier cette expression, en remarquant que :

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \ln \left(1 + \frac{R_2 - R_1}{R_1} \right) = \ln(1 + x) \cong x, \text{ si } x \ll 1$$

On obtient, par conséquent :

$$\dot{\gamma} = \frac{R_1 \cdot \omega_0}{R_2 - R_1} \quad (\text{II.9})$$

Chapitre III : Etude expérimentale et interprétations des résultats

Introduction

Dans le deuxième chapitre, on a illustré les appareils et la procédure des tests que nous avons utilisé, soit pour la détermination des propriétés physico-chimiques, soit pour le comportement rhéologique (les rhéogrammes) du brut modifié. Alors que dans ce chapitre, on va s'intéresser à la présentation et l'interprétation des résultats trouvés.

Lorsqu'on étudie le comportement d'un brut paraffinique, ce dernier peut être considéré aussi bien comme étant un fluide Newtonien, non-Newtonien avec ou sans seuil, même comme un solide plastique hétérogène, et cela selon les conditions thermiques et mécaniques dans lesquelles le produit se trouve.

Cependant dans tous les cas, la température joue un rôle très important. L'influence de la température sur le comportement rhéologique de pétrole modifié sera étudiée. Dans ce chapitre, il sera traité le comportement rhéologique du brut modifié et l'influence de la température, on étudiera par la suite l'effet du polymère réducteur de frottement sur les courbes d'écoulement et les paramètres rhéologiques et ceux pour différentes concentrations de l'additif réducteur de frottement à différentes températures. On étudie l'effet du vieillissement de la solution polymérique sur le comportement rhéologique.

III.1. Préparation des solutions

Lors de la recherche du protocole on a rencontré un sérieux problème, où le rhéogramme donné par le viscosimètre n'a aucun sens c'est à dire il n'a aucune signification physique. Dans ce cas, on a essayé plusieurs géométries (les cylindres coaxiaux du viscosimètre), et on a constaté que celles-ci ne s'adaptent pas sur le pétrole brut à cause de la faible viscosité de ce dernier. Pour remédier à ce problème, on doit ajouter un viscosifiant à base d'huile dont le nom commercial est « GELTON » pour augmenter la viscosité du brut dont l'objectif principal est de permettre le tracé des rhéogrammes avec les géométries disponibles dans le laboratoire. Dans ce cas là, nous avons procédé à chercher une concentration minimale du viscosifiant pour laquelle le viscosimètre puisse donner des résultats fiables.

III.1.1. Préparation de la solution en viscosifiant

Pour cela, on a préparé une solution mère avec une concentration de 8% en poids de Gelton. Nous avons pris 100g de brut et 8 grammes du viscosifiant qu'on dissout progressivement dans un bécher posé sur un agitateur magnétique réglé à une vitesse d'agitation moyenne à la température de 50°C pendant cinq (5) minute pour faciliter la dissolution du viscosifiant. Les résultats donnés par le viscosimètre pour cette solution étaient valables, mais dans le but de se rapprocher le plus de la réalité, nous avons été conduit à réduire cette concentration en la diluant dans le même solvant. La concentration minimale trouvée est de 4% en poids.

III.1.2. Préparation des échantillons

Les adjuvants réducteurs de frottement doivent répondre à un certain nombre de critère, entre autre leur solubilité dans le fluide transporté. Dans le cas de notre étude, notre choix s'est porté sur le polymère « Quikflow X-2433 » dont la chaîne moléculaire est linéaire. Avant de commencer la préparation, il faut choisir les concentrations pour lesquelles on voulait travailler. Pour cette étude on a fait le choix sur les concentrations 10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppmp, ainsi on a choisi les températures 20, 25, 30 et 40 °C pour montrer l'influence de la température sur le comportement rhéologie de brut modifié.

Pour la préparation des solutions polymériques, nous avons procédé à la préparation d'une solution mère de 420 g de brut modifié à une concentration de 40 ppmp de polymère Quikflow X-2433. À partir de cette solution on prépare les échantillons pour des concentration de 10, 20, 30 et 40 ppmp par dilution.

Concernant les concentrations de 60, 80 et 100 ppmp, on les a préparé chacune à part de la même façon que l'échantillon de 40 ppmp, seulement ici, la quantité change (que ce soit pour le brut ou pour la quantité de l'additif).

III.2. Le protocole suivi

Dans les études rhéologique, et pour un même dispositif, le protocole d'essai peut changer d'un fluide à un autre, d'où la nécessité de chercher le protocole d'essai qui convient le plus à notre fluide et à la géométrie utilisée dans le cas du viscosimètre utilisé. Le protocole retenu dans notre cas est le suivant : Après un pré cisaillement d'une minute, on fait

augmenter le taux de cisaillement de 0 à 100 s⁻¹ pendant une durée d'essai de 180 s avec une prise des valeurs de la viscosité et de la contrainte de cisaillement chaque 1,8 s.

III.3. Caractéristiques du pétrole brut

Dans le tableau ci-dessous on présente les caractéristiques physico-chimiques du pétrole brut provenant de champs de T.F.T. (willaya d'Illizi) secteur nord déterminées sur site.

Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques du brut de secteur nord

Caractéristiques	Résultats
Densité à 15°C	0,8126
°API	42,2
Viscosité cinématique en (cSt) à :	
20 °C	4,1
37,8°C	3,05
TVR (kg/cm ²)	0,64
teneur en eau % volume	nulle
teneur en asphaltène % poids	0,04
point d'écoulement °C	<-27

III.4. Présentation et discussion des résultats expérimentaux

III.4.1. Étude rhéologique de pétrole brut modifié sans additif

III.4.1.1. Etude des courbes d'écoulement et l'influence de la température

Pour étudier l'effet de la température sur le comportement rhéologique de pétrole modifié, nous avons représenté l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité en fonction du gradient de vitesse.

Les figures de III.1 à III.6 représentent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse ($\tau = f(\dot{\gamma})$) pour un échantillon du pétrole modifié. Le gradient de vitesse étant imposé de façon croissante à l'échantillon, on mesure la contrainte de cisaillement engendrée. Plusieurs températures ont été testées (20, 25, 30, 35, 40 et 50 °C), pour chacune de ces températures d'essai, les résultats expérimentaux ont été corroborés aux différents modèles rhéologiques. La fiabilité du modèle proposé avec les paramètres obtenus a été évaluée par le coefficient de corrélation R qui est obtenu par la relation suivante :

$$R = \frac{\sum(\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{pr}})^2}{\sum(\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{moy}})^2}$$

η_{exp} données expérimentales de la viscosité d'huile,

η_{pr} viscosité prévue par le modèle proposé,

η_{moy} valeur de moyenne arithmétique.

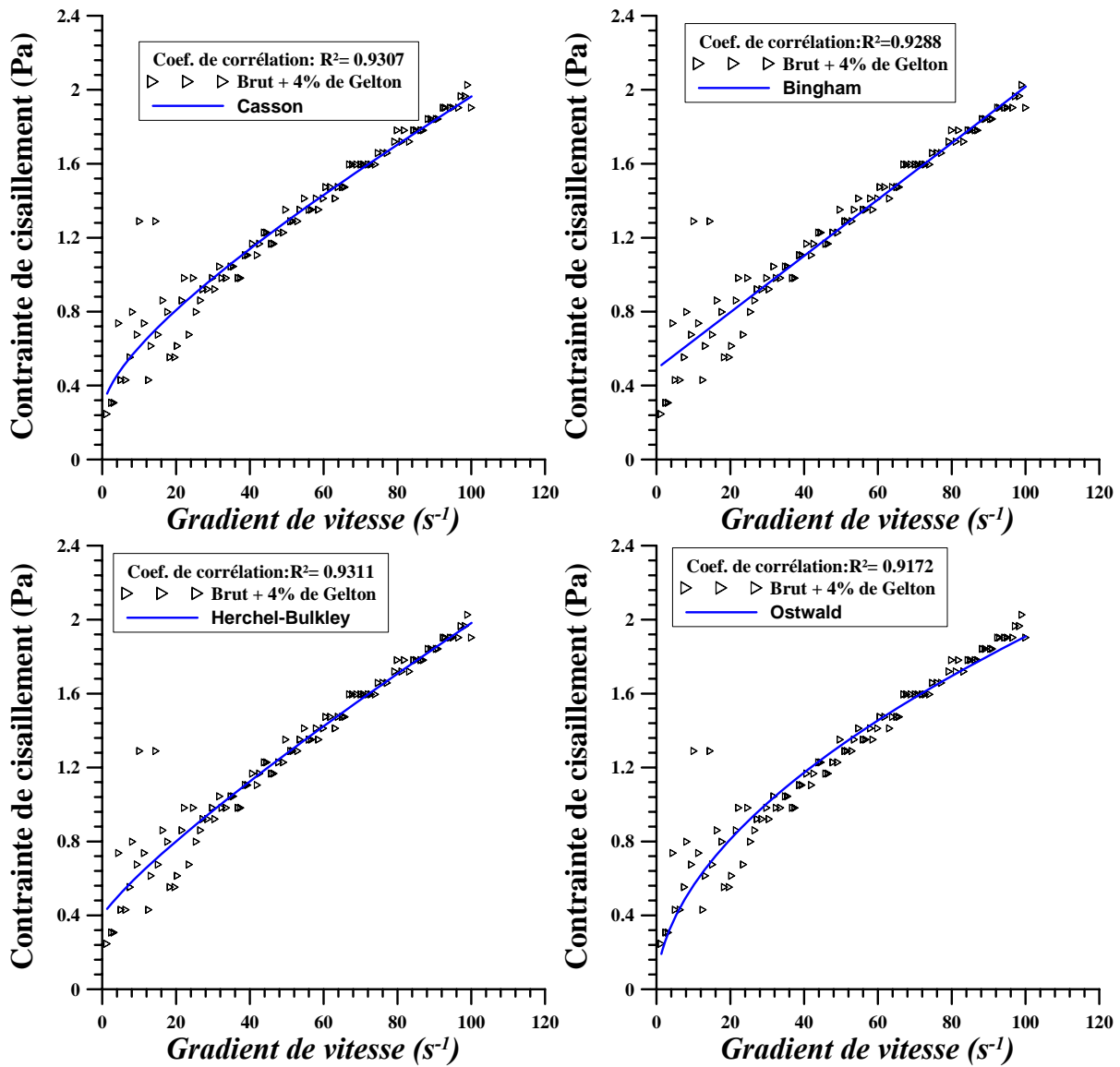


Figure III.1 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 20°C.

L’analyse des courbes d’écoulement de la figure III.1, correspondant à la température de 20°C montre que tous les modèles rhéologiques s’ajustent bien avec les données obtenus et offrent des coefficients de corrélations comparables. Ces résultats sont résumés dans le tableau III.2. Le modèle d’Herchel-Bulkley, offre un bon ajustement avec un coefficient de corrélation $R^2= 0.931156$.

Tableau III.2 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 20 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R^2
Casson	0.930791
Bingham	0.928863
Herchel-Bulkley	0.931156
Ostwald	0.917202

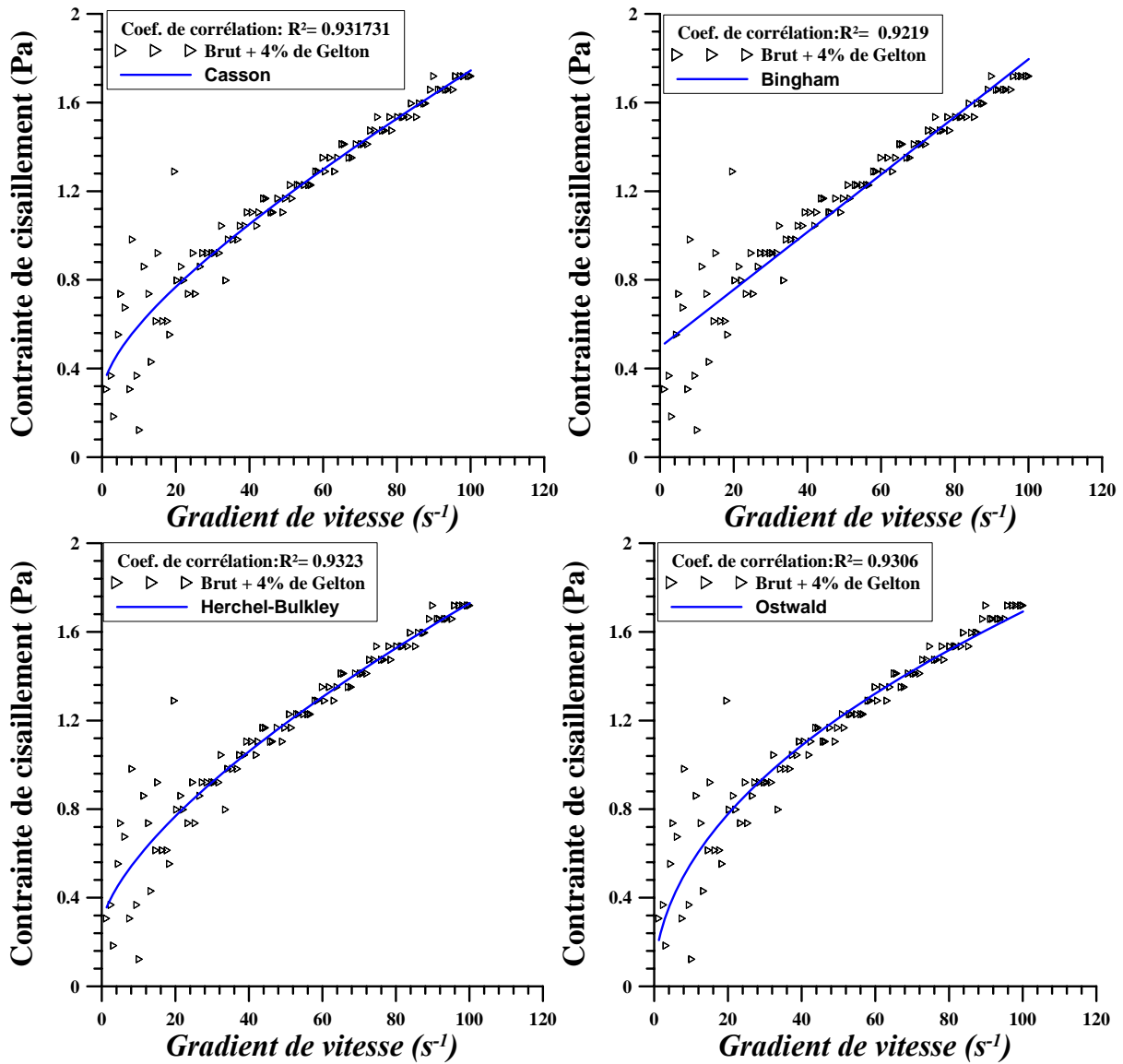


Figure III.2 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 25°C.

De même, pour la température 25 °C, les données expérimentales s’ajustent mieux au modèle d’Herchel-Bulkley, ceci est montré par le coefficient de corrélation dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 25 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R ²
Casson	0.914303
Bingham	0.902772
Herchel-Bulkley	0.914376
Ostwald	0.908117

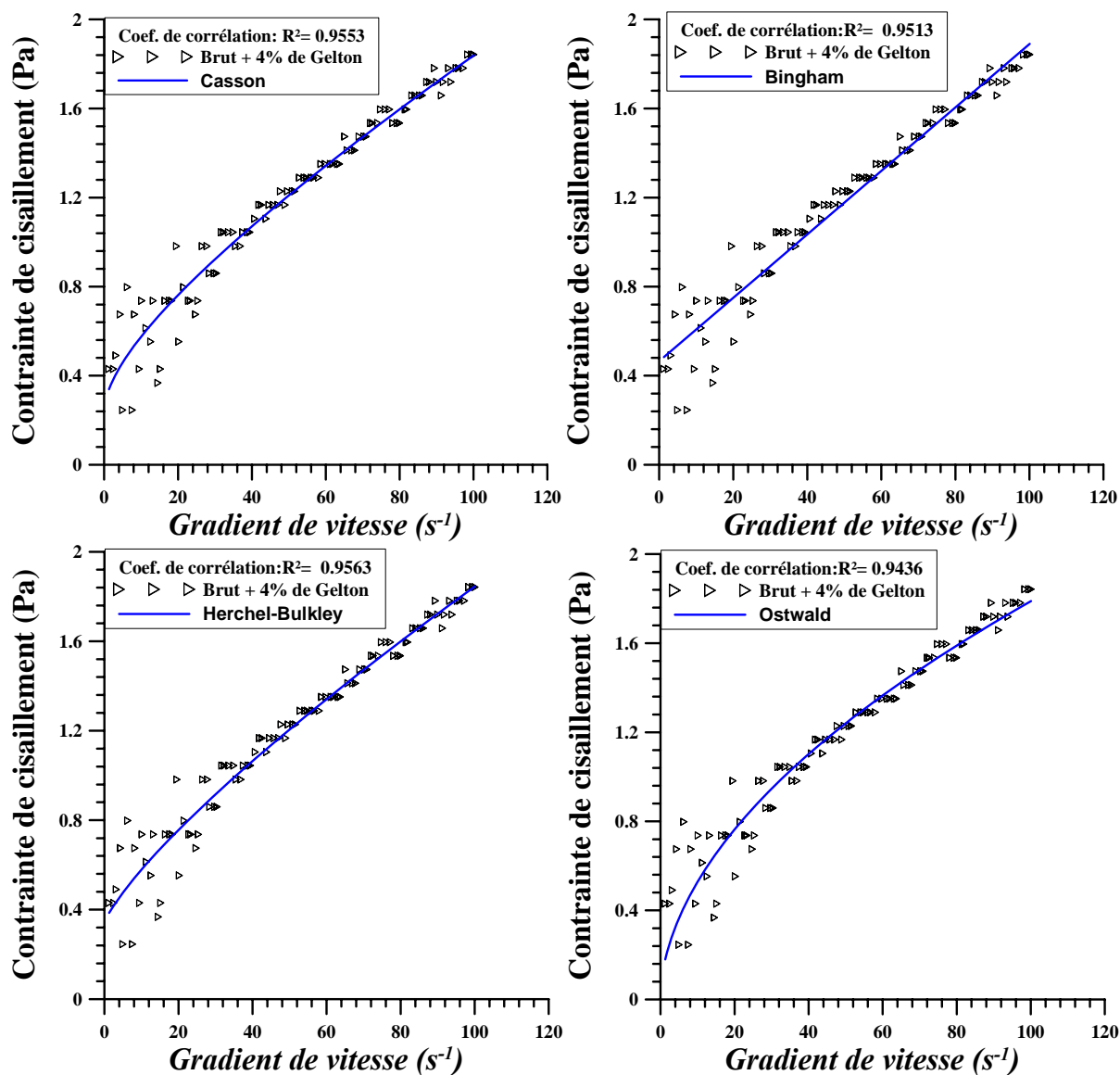


Figure III.3 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 30°C.

Pour la température de 30 °C, le modèle de Casson, et d’Herchel-Bulkley ont des coefficients de corrélations presque égaux, alors que le premier modèle offre un bon ajustement, donc on constate qu’il y a un changement dans le comportement rhéologique du pétrole modifié.

Tableau III.4 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 30 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R ²
Casson	0.904409
Bingham	0.898208
Herchel-Bulkley	0.904354
Ostwald	0.89732

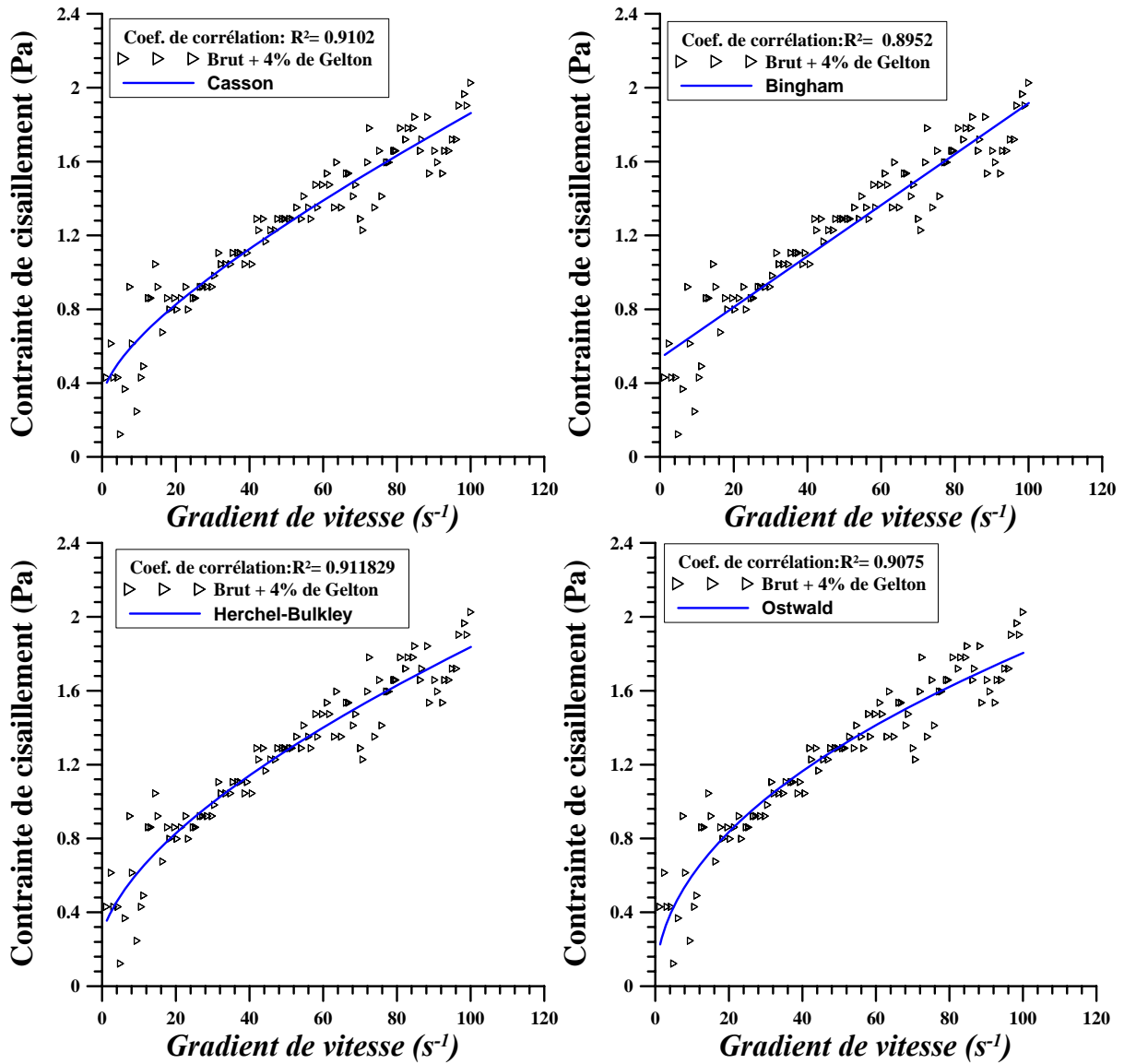


Figure III.4 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 35°C.

D’après le tableau III.5, on constate que la corrélation des points expérimentaux avec les modèles rhéologiques devient faible (figure III 4). Le modèle d’Herchel-Bulkley de nouveau s’ajuste bien avec les points expérimentaux.

Tableau III.5 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 35 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R ²
Casson	0.910296
Bingham	0.895252
Herchel-Bulkley	0.911829
Ostwald	0.907589

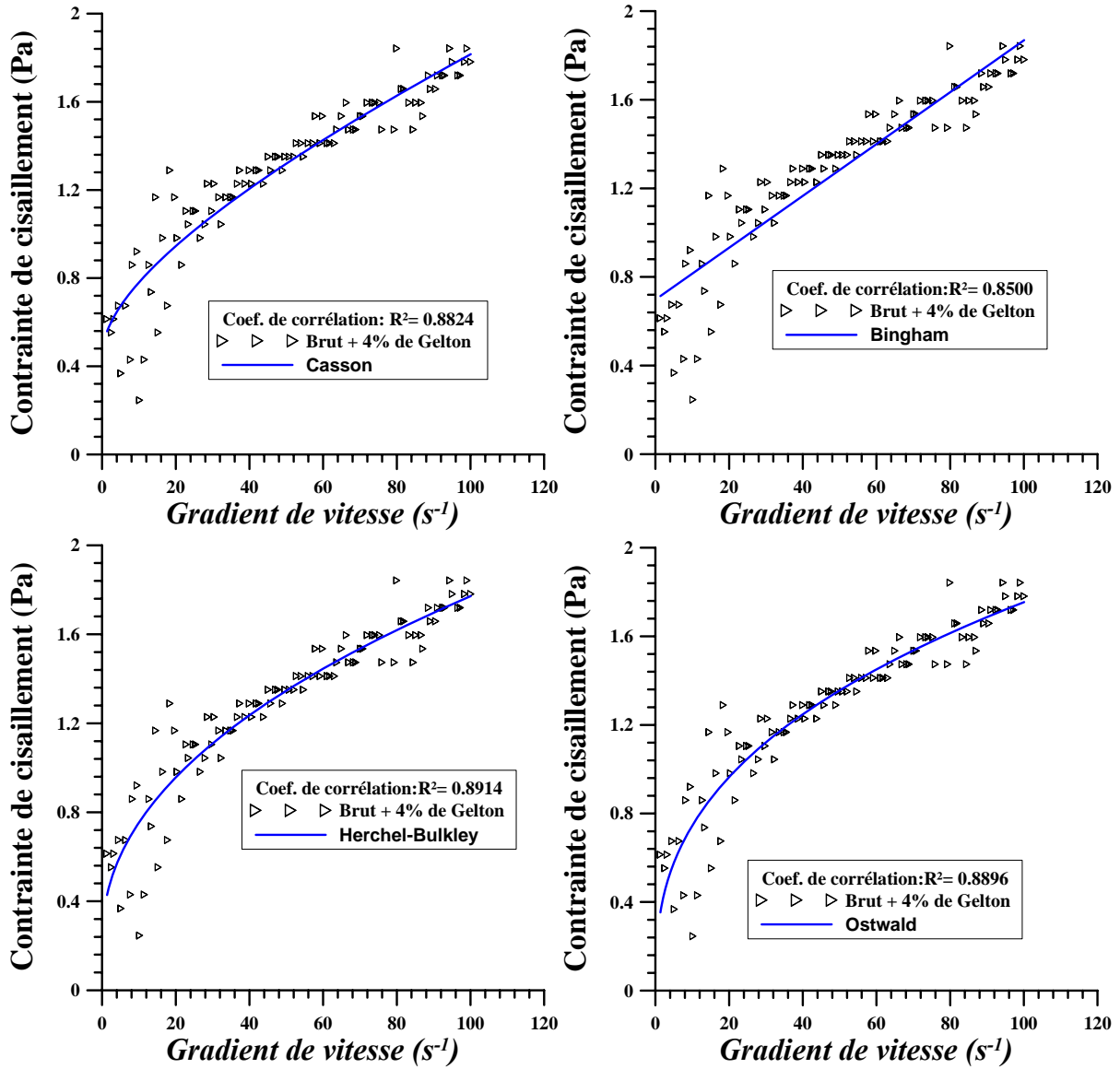


Figure III.5 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 40°C.

Dans le cas de la température de 40 °C, on remarque que les points expérimentaux s’approchent des courbes rhéologiques des modèles d’Ostwald et d’Herchel-Bulkley mieux que les autres modèles. Les coefficients de corrélations (r^2) sont illustrés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Coefficient de corrélation à différents modèles rhéologiques à 40 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R^2
Casson	0.882488
Bingham	0.850042
Herchel-Bulkley	0.891466
Ostwald	0.889690

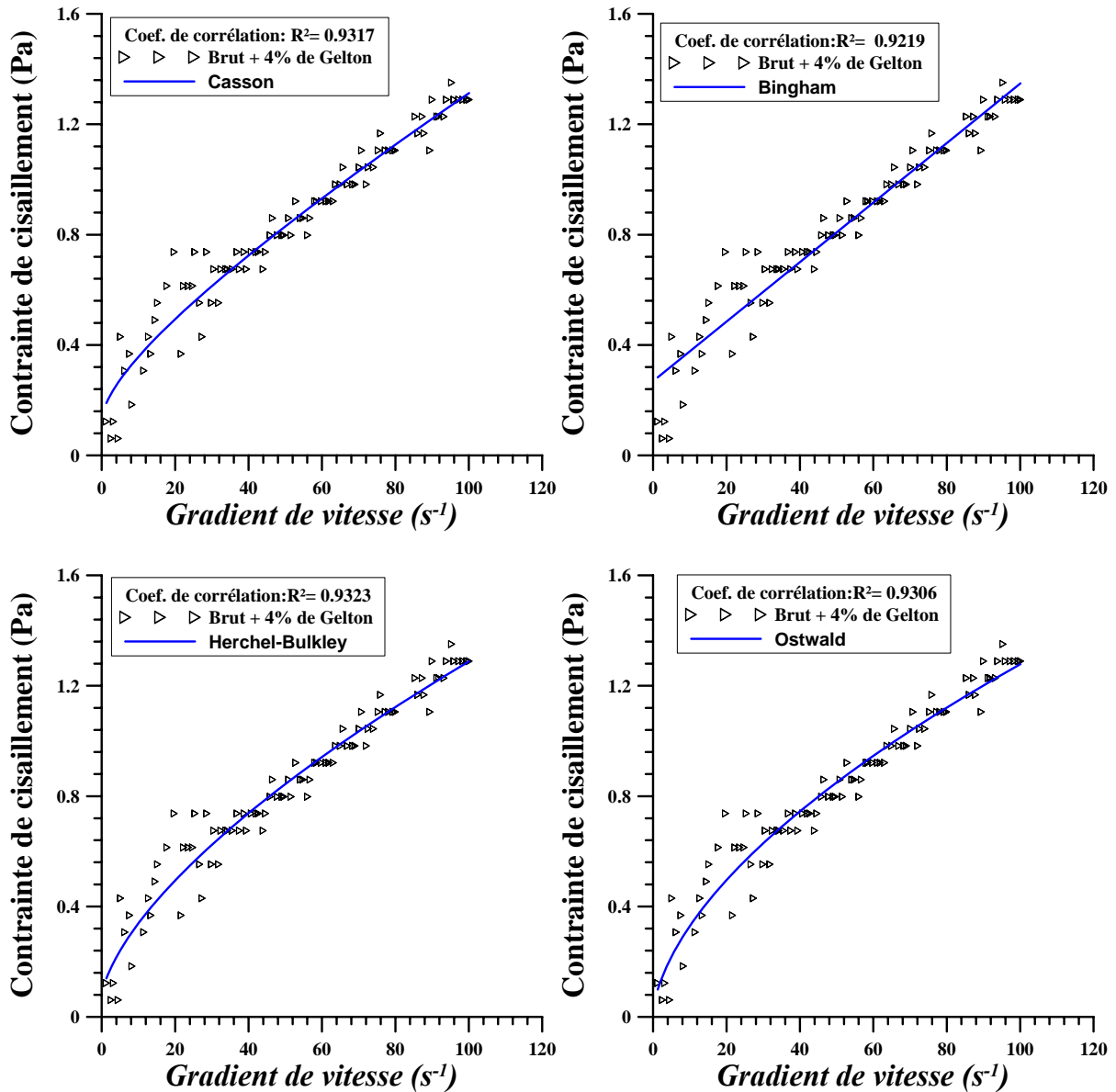


Figure III.6 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse du brut modifié à la température 50°C.

Pour la température de 50°C, c'est le modèle de Herchel-Bulkley qui s'adapte le mieux avec les résultats expérimentaux.

Tableau III.7 : Coefficient de corrélation pour différents modèles rhéologiques à 50 °C

Modèle	Coefficient de corrélation R ²
Casson	0.947615
Bingham	0.934442
Herchel-Bulkley	0.948667
Ostwald	0.947938

Donc, pour toutes les valeurs de température, les courbes d'écoulement obtenues ont montrées que les points expérimentaux s'ajustent plus ou moins aux modèles rhéologiques utilisés.

D'une première analyse, les figures ci-dessus, pour les différentes températures envisagées, présentent des courbes d'écoulement où leurs fonctions ont des formes non-linéaires (loi de Bingham, de Casson et d'Herchel-Bulkley sont des fonctions non-linéaires). Cependant, ces fonctions représentent les liquides plastiques c'est-à-dire elles ont des contraintes critiques (contrainte seuil) où le liquide ne s'écoule que au-delà de cette contrainte.

On remarque que le modèle d'Herchel-Bulkley offre le meilleur ajustement pour toutes les températures sauf à la température de 30 °C où le modèle de Casson offre le meilleur ajustement. Il semble que le comportement rhéologique demeure constant, mais si on traite les coefficients de corrélations, on trouve pour les températures de 20, 25 et 30 °C, le modèle de Casson offre un bon ajustement après Herchel-Bulkley, par contre pour les températures élevées (40 et 50 °C), le modèle d'Ostwald est celui qui offre un bon ajustement des données expérimentales après Herchel-Bulkley. On constate qu'il y a un début de changement au comportement rhéologique, mais celui-ci est très long car le pétrole modifié demeure toujours obéir à la loi d'Herchel-Bulkley.

La figure III.7 illustre une comparaison entre les courbes d'écoulement à différentes températures. Il est clair que la contrainte de cisaillement augmente avec le gradient de vitesse. Toutefois, on remarque que les courbes d'écoulement se superposent l'une au-dessus de l'autre et la contrainte de cisaillement engendré par le gradient de vitesse décroît progressivement avec l'accroissement de la température pour une valeur de gradient de vitesse donnée. Ainsi, On peut observer deux régions; pour lesquelles le pétrole modifié se comporte différemment. Dans ces courbes, la première région a des gradients de vitesse élevés ($> 30 \text{ s}^{-1}$) tandis que la deuxième a des gradients de vitesse faibles ($< 30 \text{ s}^{-1}$). À faible vitesse de cisaillement les points expérimentaux sont disséminés contrairement à forte vitesse de cisaillement où les points expérimentaux sont presque alignée sur la courbe d'ajustement.

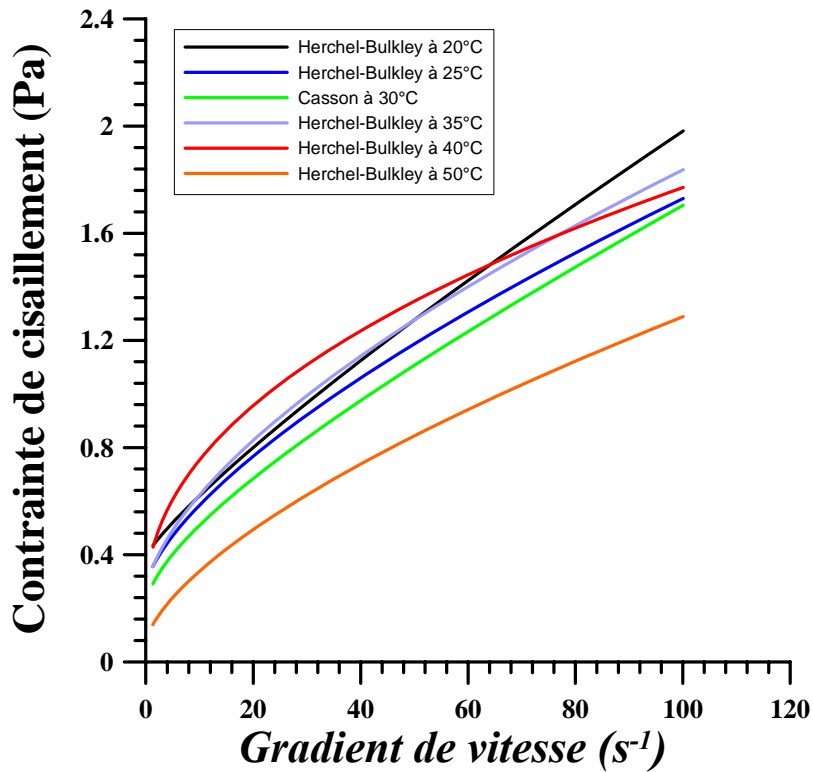


Figure III.7 : Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse aux différentes températures.

Le comportement de l'écoulement de pétrole modifié peut être considéré comme plastique, le modèle semblant le plus adapté pour décrire le comportement de ce liquide serait alors celui de Herchel-Bulkley. La détermination des paramètres de ce modèle de mesure est toutefois délicate, car pour les plus faibles valeurs du gradient de vitesse les mesure sont assez peu reproductibles et de forts écart-type entre les diverses mesures peuvent être enregistrés, ceci peut être du au fait du problème de sédimentation des particules de pétrole modifié dans la cellule de mesure.

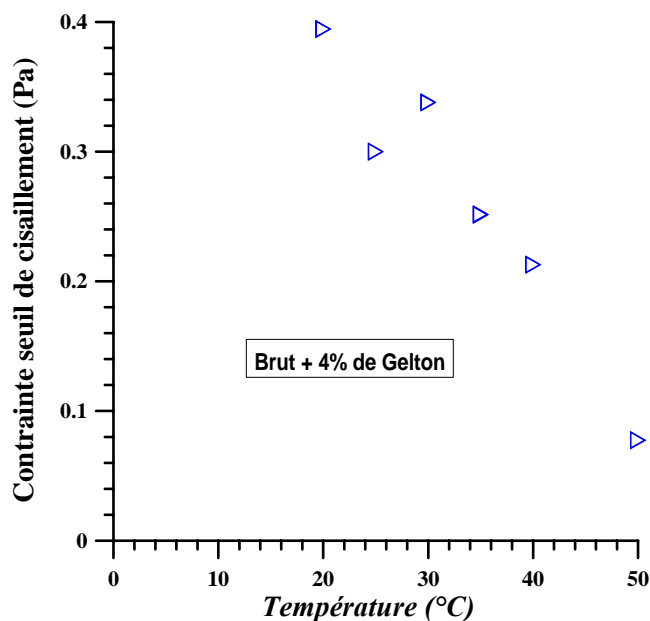


Figure III.8 : Evolution de la contrainte seuil de cisaillement en fonction de la température

En augmentant la température les paramètres rhéologiques changent : la contrainte seuil d'écoulement, la consistance (k) et même l'indice d'écoulement (n). Pour toutes les températures prises, on a des contraintes critiques, celles-ci sont atténuées avec l'augmentation de la température comme le montre la figure III.8. La pente de la droite représentant la contrainte seuil en fonction de la température change de -0.007 pour les températures disant moyennes (jusqu'au 30 °C) à une pente de -0.011 pour les hautes températures. Ce changement se fait à la température 30 °C où le coefficient de corrélation des deux modèles (Casson et Herchel-Bulkley) s'approche entre eux ($R^2(\text{Casson}) = 0.904409$ et $R^2(\text{d'Herchel-Bulkley}) = 0.904354$).

Le tableau III.8 suivant montre la variation de la contrainte seuil en fonction de la température ainsi que les autres paramètres rhéologiques.

Tableau III.8 : Evolution des paramètres rhéologiques d'Herchel-Bulkley en fonction de la température

Température (°C)	20	25	30	35	40	50
τ_c (Pa)	0.394	0.279	0.337	0.251	0.213	0.060
k	0.0321	0.0645	0.0386	0.0873	0.1880	0.0603
n	0.847	0.677	0.796	0.639	0.459	0.653

Plusieurs expériences [17] et [56] montrent que les propriétés rhéologiques des bruts dépendent fortement de la température. Effectivement, on observe que la température non seulement affecte la contrainte de cisaillement mais elle affecte ainsi la viscosité apparente, comme nous verrons dans le paragraphe ci-dessous.

III.4.1.2. Etude de l'évolution de la viscosité et l'influence de la température

Nous avons représenté également l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse à différentes températures.

La figure III.9 montre que la viscosité apparente diminue progressivement et fortement avec l'accroissement du gradient de vitesse.

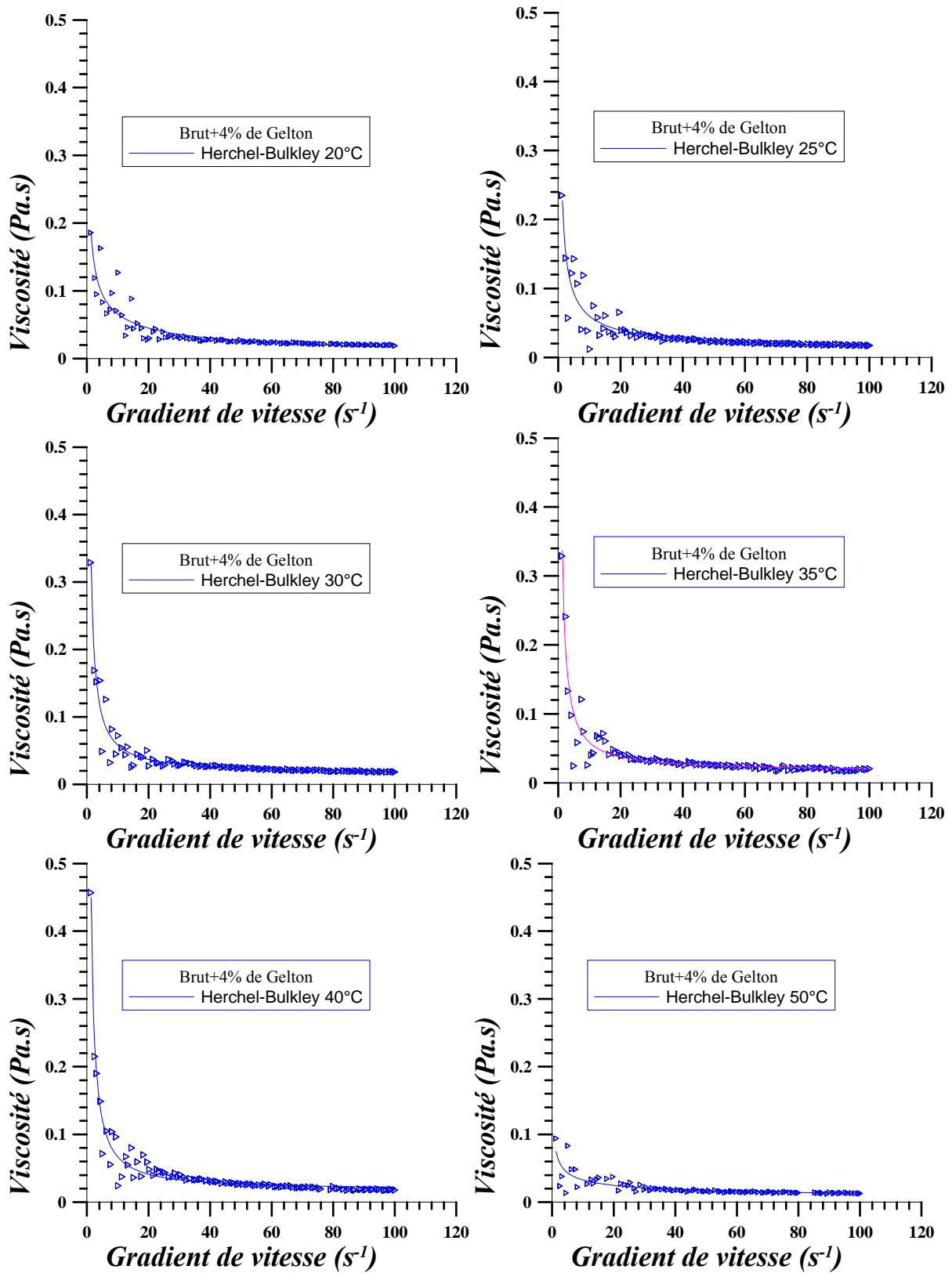


Figure III.9 : Evolution de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesse à différentes températures

Comme on a indiqué ci-dessus, il existe deux régions différentes, à faible et à fort gradient de vitesse. La viscosité apparente de pétrole modifié diminue fortement dans la première région jusqu'à ce que des gradients de vitesses supérieures à 30 s^{-1} soient atteints, tandis que, pour les plus fortes valeurs de gradient de vitesse la viscosité apparente se stabilise

Pour les faibles valeurs de gradient de vitesse il est clair que le comportement est celui d'une substance plastique et d'après l'analyse des modèles rhéologiques, le modèle d'Herchel-Bulkley peut alors décrire convenablement le comportement rhéologique de notre liquide. Cependant pour les grandes valeurs de gradient de vitesse supérieures à 30 s^{-1} on observe que la viscosité apparente commence à se stabiliser et tend vers une valeur constante généralement à partir de 70 s^{-1} , la viscosité demeure constante et le comportement du liquide devient Newtonien.

La figure III.10 illustre l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse et la température. La viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la température, ainsi qu'elle diminue en augmentant le gradient de vitesse. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs auteurs [45] sur des pétroles bruts, mais cela, n'est pas bien visible qu'à hautes températures.

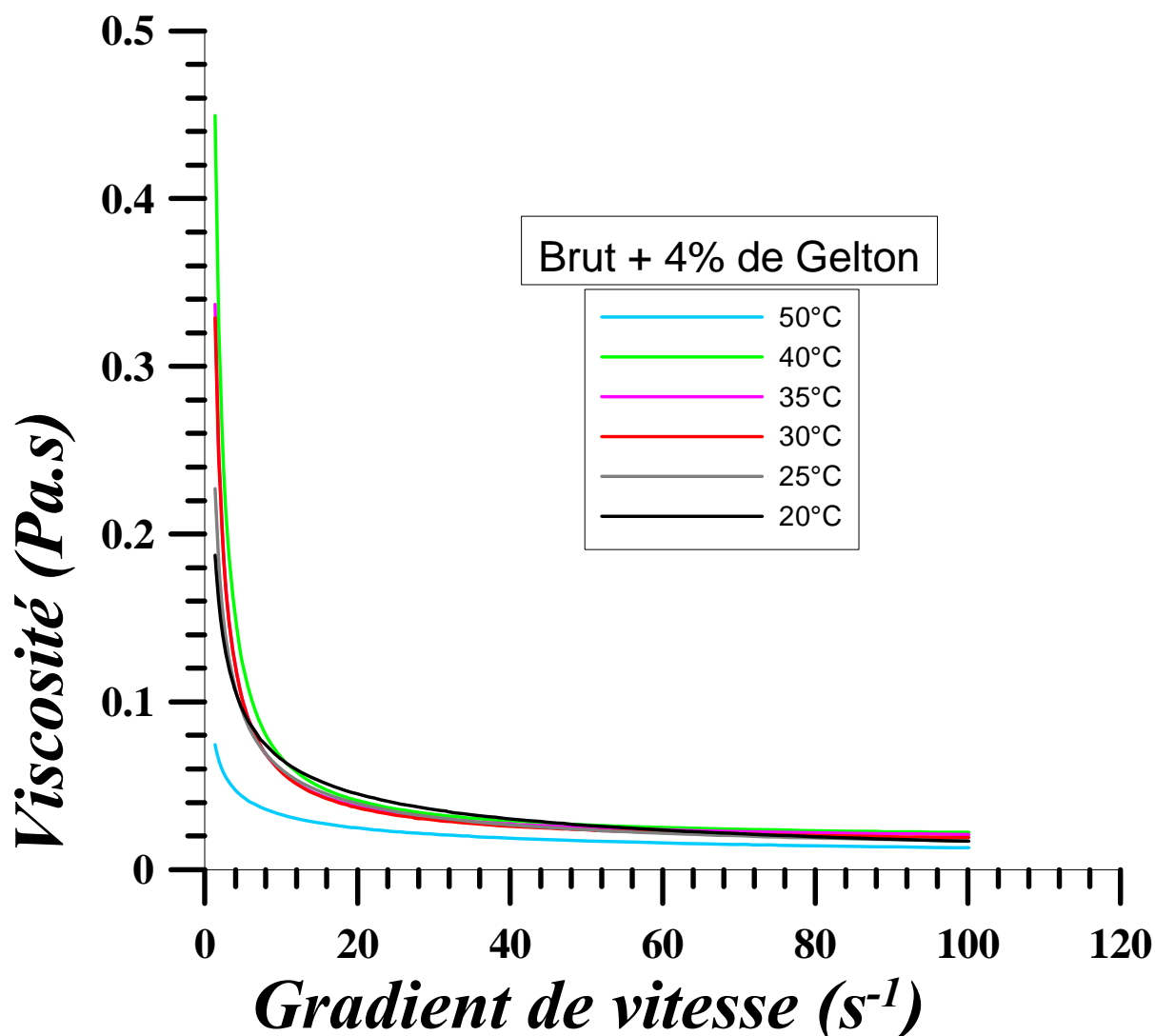


Figure III.10 : Evolution de la viscosité apparente en fonction du gradient de vitesse à différentes températures

Les résultats obtenus du pétrole brut modifié montrent que les données expérimentales, à faible gradient de vitesse, sont dispersées et les courbes d'écoulement prennent une allure zigzag. Ainsi avec l'augmentation de la température, on observe que ce zigzag réapparaisse aux forts gradients de vitesse avec des températures élevées. On sait que dans les milieux de suspensions il existe plusieurs types de forces de liaisons interparticulaires telles que, les forces de mouvement browniens, les forces de Van Der Waals et électrostatiques (voir chapitre I) qui sont responsables d'une manière générale de la consistance et de la viscosité d'une substance quelconque. Ces liaisons se trouvent rigides dans la région des plus faibles valeurs de gradient de vitesse ce qui explique l'apparition de la contrainte seuil. Dans ce cas là, la substance se comporte comme un solide, car il n'y a pas

d'écoulement au-dessous de cette contrainte. Dans cette région l'énergie exercée par le cisaillement est absorbée dans la matrice du liquide, elle tend à briser partiellement les liens secondaires de cisaillement et de la réduction de la viscosité apparente, et de cette façon en dépassant la contrainte seuil, le fluide commence à s'écouler [45]. Par ailleurs, les molécules constituant la matrice du pétrole modifié s'orientent par l'effet des forces hydrodynamiques dans le sens de l'écoulement. On constate que plus la vitesse augmente plus les molécules s'orientent et plus le frottement des molécules diminue [58].

Également, avec l'augmentation de la température ces forces généralement diminuent considérablement, ceci est indiqué dans [58] et le mouvement Brownien intervient d'où l'apparition d'un nuage de point à fortes températures. Vu la diminution de ces forces en fonction de l'augmentation de la température, on observe, ainsi, une diminution dans la contrainte seuil (figure III.7) et une diminution dans la viscosité apparente (figure III.8). On constate donc que la température joue un rôle primordial dans l'affaiblissement de certaines liaisons inter-particulaires et ceci apparaît dans la décomposition de la structure. Alors, on déduit que plus la structure se décompose plus les particules du fluide s'alignent ce qui implique que l'effort nécessaire à l'écoulement devient faible. Signalant ici que la faible variation (diminution) pour la viscosité apparente est due peut être au viscosifiant ajouté au début de la préparation de l'échantillon.

III.4.2. Étude rhéologique de pétrole brut modifié avec l'ajout de l'additif réducteur de frottement

III.4.2.1 Etude de l'effet de la concentration en polymère réducteur de frottement

Les courbes d'écoulements et de viscosité du brut modifié d'Illizi ont été déterminées pour différentes concentrations de l'additif réducteur de frottement « Quikflow X-2433 » (10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppm). Plusieurs températures ont été testées.

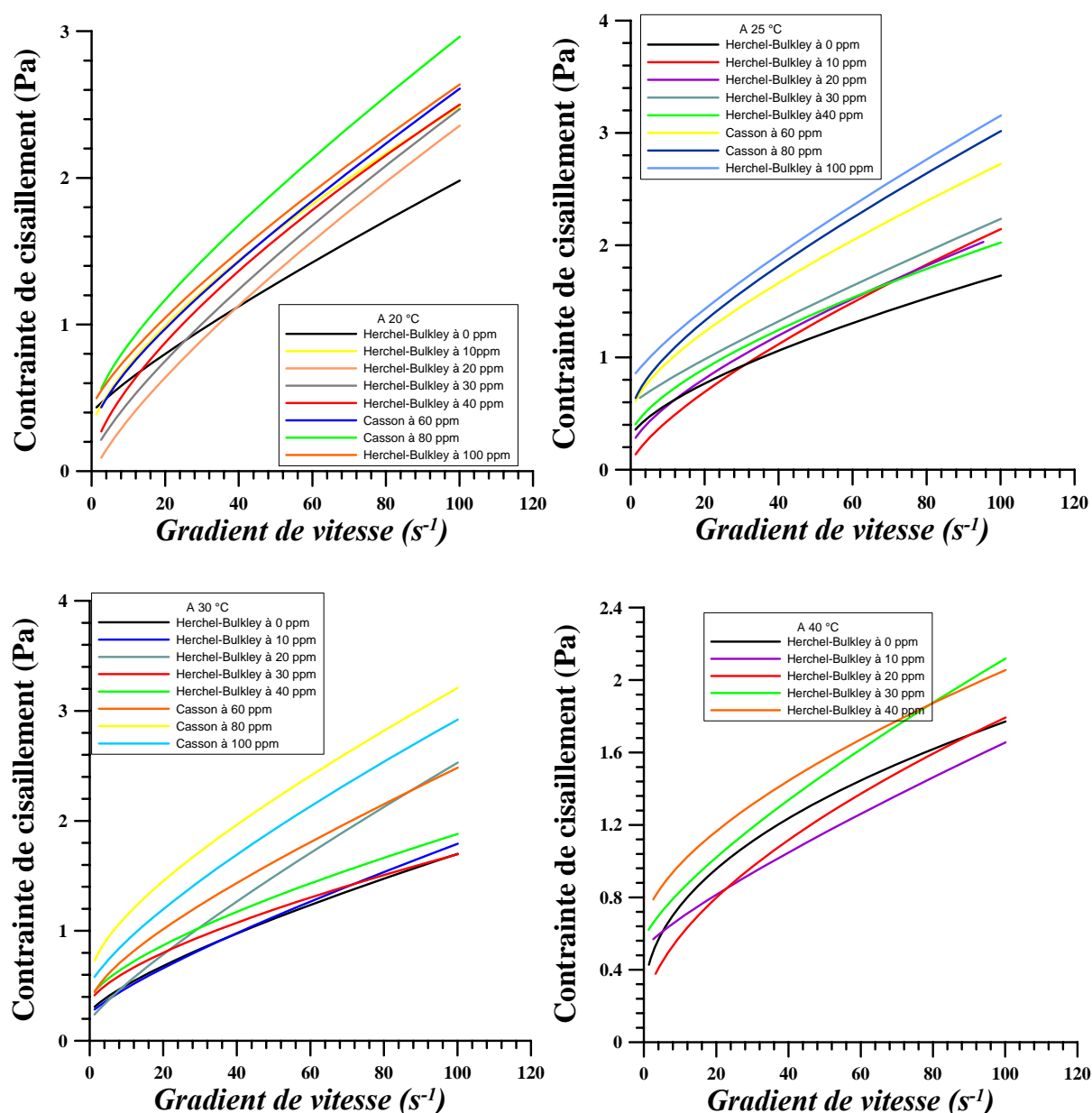


Figure III.11 : Contrainte de cisaillement en fonction de gradient de vitesse à la température 20°C, 25°C, 30°C et 40°C pour différents concentrations Quikflow X-2433.

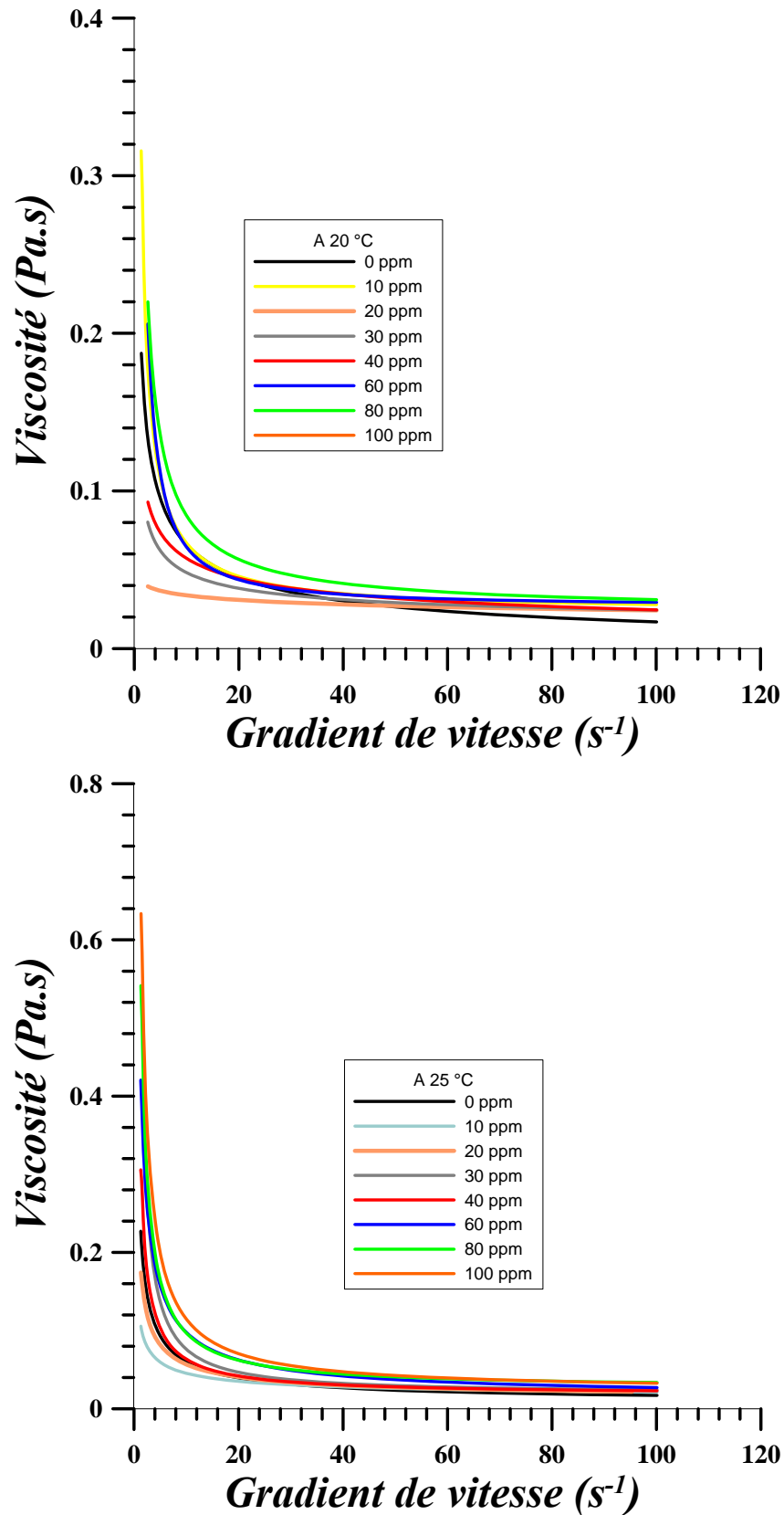


Figure III.12 : Influence de l’additif Quikflow X-2433 sur l’évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse pour les concentrations de 0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppmp. Haut à 20 °C. Bas à 25 °C

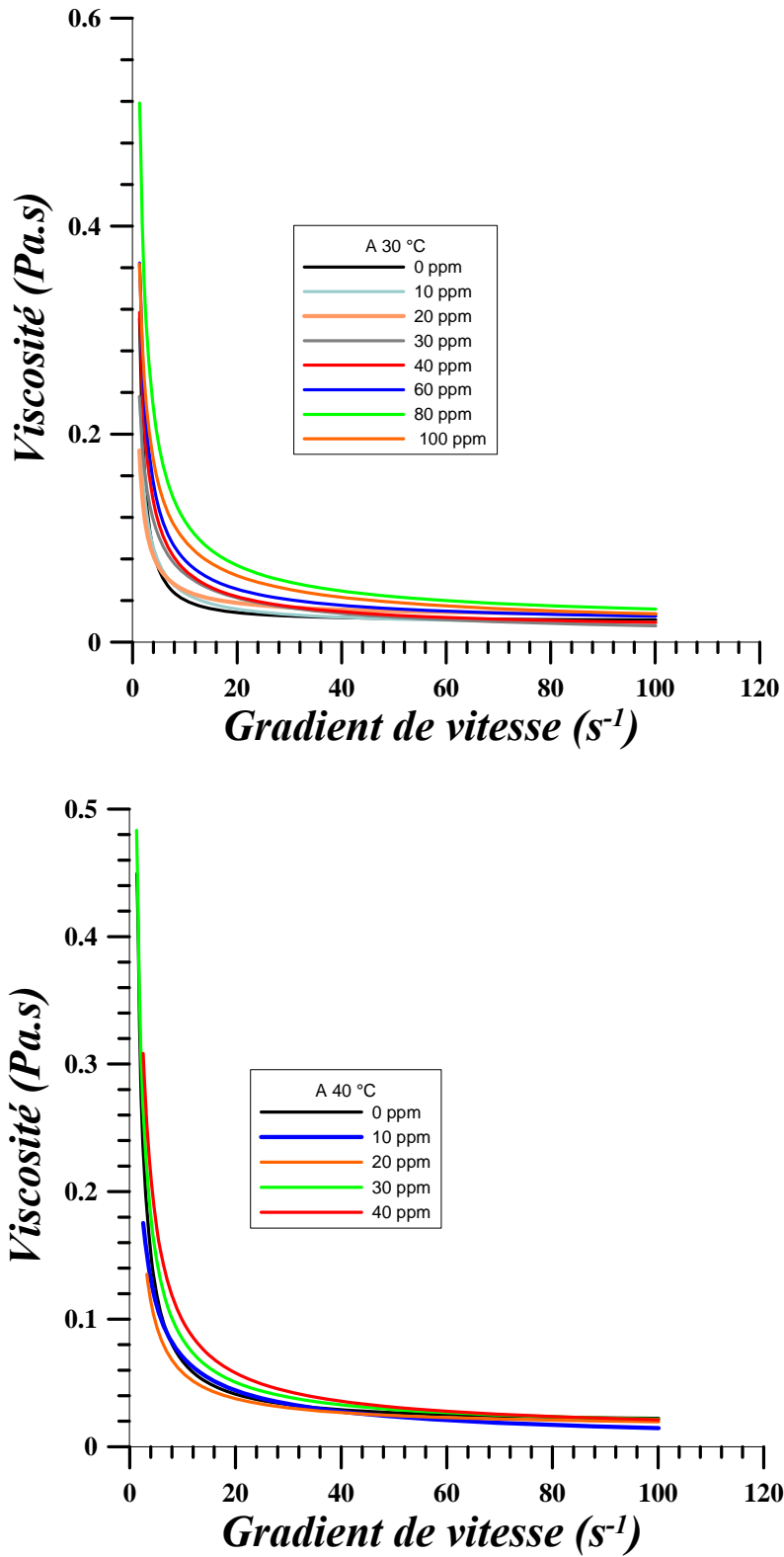


Figure III.13 : Influence de l’additif Quikflow X-2433 sur l’évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse pour les concentrations de 0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 et 100 ppmp. Haut à 30 °C. Bas à 40 °C

Chapitre III : Etude expérimental et interprétations des résultats

Pour les concentrations de 10, 20, 30 et 40 ppmp et pour toutes les températures d'essais, la modélisation des courbes d'écoulement et de viscosité (figures III 11, 12 et 13) obtenues par différents modèles rhéologiques (Herchel-Bulkley, Bingham, Casson et Ostwald) s'ajustent bien avec les points expérimentaux avec des coefficients de corrélation présentés dans le tableau III 9, ce qui nous permet de prendre le modèle d'Herchel-Bulkley.

Pour les concentrations de 60 et 80 ppmp, c'est le modèle de Casson qui convient pour ajustement des résultats expérimentaux pour toutes les températures. Enfin pour la concentration de 100 ppmp, c'est le modèle d'Herchel-Bulkley qui offre un bon ajustement pour les températures de 20 et 25 °C. Pour la température de 30 °C on trouve que le modèle de Casson offre un meilleur ajustement.

Dans ce qui suit, on va décrire et commenter les courbes obtenues selon leurs concentrations en polymère et leurs températures d'essais.

La figure III.11 montre les rhéogrammes de pétrole modifié avec l'ajout d'additif à des concentrations indiquées ci-dessus. Ceux-ci montrent la nature non newtonienne du liquide, c'est-à-dire la nature plastique d'Herchel-Bulkley et de Casson à des concentrations plus au moins élevées, donc une contrainte seuil est nécessaire pour commencer l'écoulement. Il découle que la présence de l'additif réducteur de frottement cause une augmentation forte de la contrainte seuil de cisaillement et de la viscosité.

Les résultats obtenus (figures III.12 et 13) montrent que la viscosité apparente augmente de plus en plus en augmentant la concentration de l'additif ; à titre d'exemple, pour une température de 20 °C, la viscosité croît de 2.7×10^{-2} , 3.16×10^{-2} , 3.45×10^{-2} , 3.45×10^{-2} et 4×10^{-2} Pa.s pour les concentrations respectives de 20, 30, 40, 60 et 80 ppmp et cela à un gradient de vitesse constant de 40 s^{-1} .

Ainsi, on peut voir que cette viscosité apparente diminue graduellement avec l'augmentation du gradient de vitesse (dont l'explication a été donnée ci-dessus). Cependant, à faible vitesse de déformation le taux de diminution de la viscosité est très important et cette diminution continue jusqu'à la valeur de gradient de vitesse de 60 s^{-1} environ, après elle devient presque constante.

Le tableau III 9 indique les paramètres et les modèles rhéologiques auxquels le pétrole modifié obéit en faisant varier la concentration de l'additif et la température.

Tableau III.9 : Données rhéologique du pétrole modifié à différentes températures et concentrations d'additif réducteur de frottement

Concentration (ppmpp)	Température (°C)	Modèle	r ²	Paramètre rhéologique		
				τ_c	k	n
10	20	Herchel-Bulkley	0.98513	0.28184	0.08619	0.70399
	25	Herchel-Bulkley	0.98010	0.047955	0.07189	0.73215
	30	Herchel-Bulkley	0.95584	0.237756	0.03782	0.80662
	40	Herchel-Bulkley	0.92055	0.155784	0.11253	0.58134
20	Température	Modèle	r ²	τ_c	k	n
	20	Herchel-Bulkley	0.98737	0.047641	0.06684	0.7778
	25	Herchel-Bulkley	0.98123	0.18877	0.07786	0.6938
	30	Herchel-Bulkley	0.96802	0.172670	0.05095	0.83167
	40	Herchel-Bulkley	0.89266	0.51543	0.02476	0.83154
30	Température	Modèle	r ²	τ_c	k	n
	20	Herchel-Bulkley	0.98036	0.08143	0.06320	0.78847
	25	Herchel-Bulkley	0.96396	0.5717	0.03064	0.86701
	30	Herchel-Bulkley	0.95759	0.33901	0.06239	0.66860
	40	Herchel-Bulkley	0.92337	0.64154	0.08215	0.61772
40	Température	Modèle	r ²	τ_c	K	n
	20	Herchel-Bulkley	0.98291	0.07598	0.10193	0.68796
	25	Herchel-Bulkley	0.94808	0.30475	0.08285	0.65836
	30	Herchel-Bulkley	0.96007	0.37628	0.06183	0.69285
	40	Herchel-Bulkley	0.93724	0.56361	0.04678	0.76065
60	Température	Modèle	r ²	τ_c	η_c	
	20	Casson	0.96094	0.22738	0.01294	
	25	Casson	0.96365	0.44777	0.00963	
	30	Casson	0.96314	0.30126	0.01053	
80	Température	Modèle	r ²	τ_c	η_c	
	20	Casson	0.97225	0.31837	0.01338	
	25	Casson	0.97922	0.46009	0.01119	
	30	Casson	0.96844	0.53506	0.01122	
100	Température	Modèle	r ²	τ_c	K	n
	20	Herchel-Bulkley	0.97024	0.42654	0.05821	0.78959
	25	Herchel-Bulkley	0.97355	0.78608	0.05719	0.80843
	30	Casson	0.98653	0.36533	$\eta_c = 0.01219$	

III.4.2.2 Etude de l'influence de la température des solutions polymériques

Nous avons représentés les courbes d'écoulement et de viscosité à différentes températures pour des concentrations données (figure III-14 à 16), dans le but de relever l'influence de la température sur les paramètres rhéologiques des solutions polymériques.

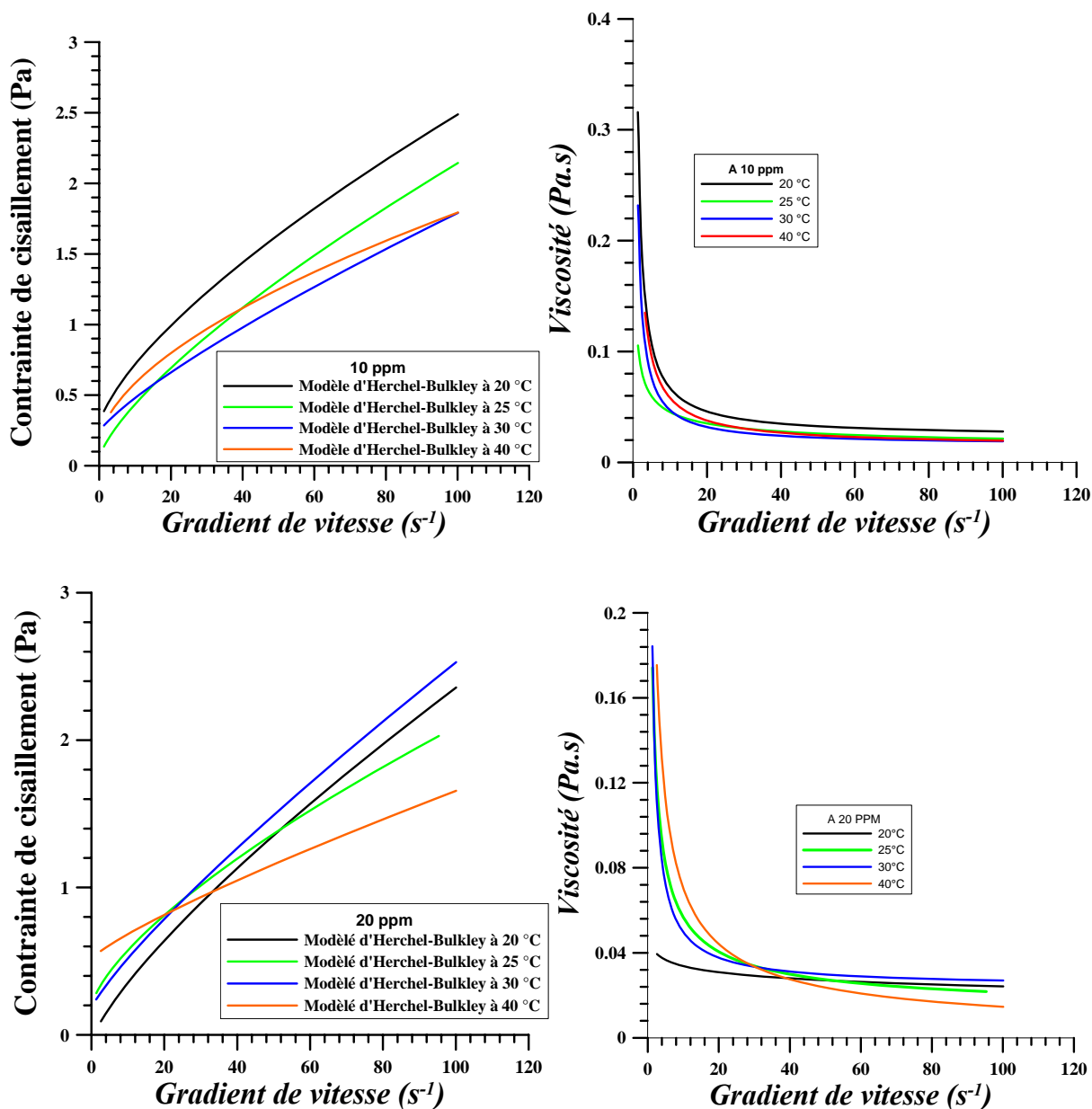


Figure III.14 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 10 et 20 ppm.

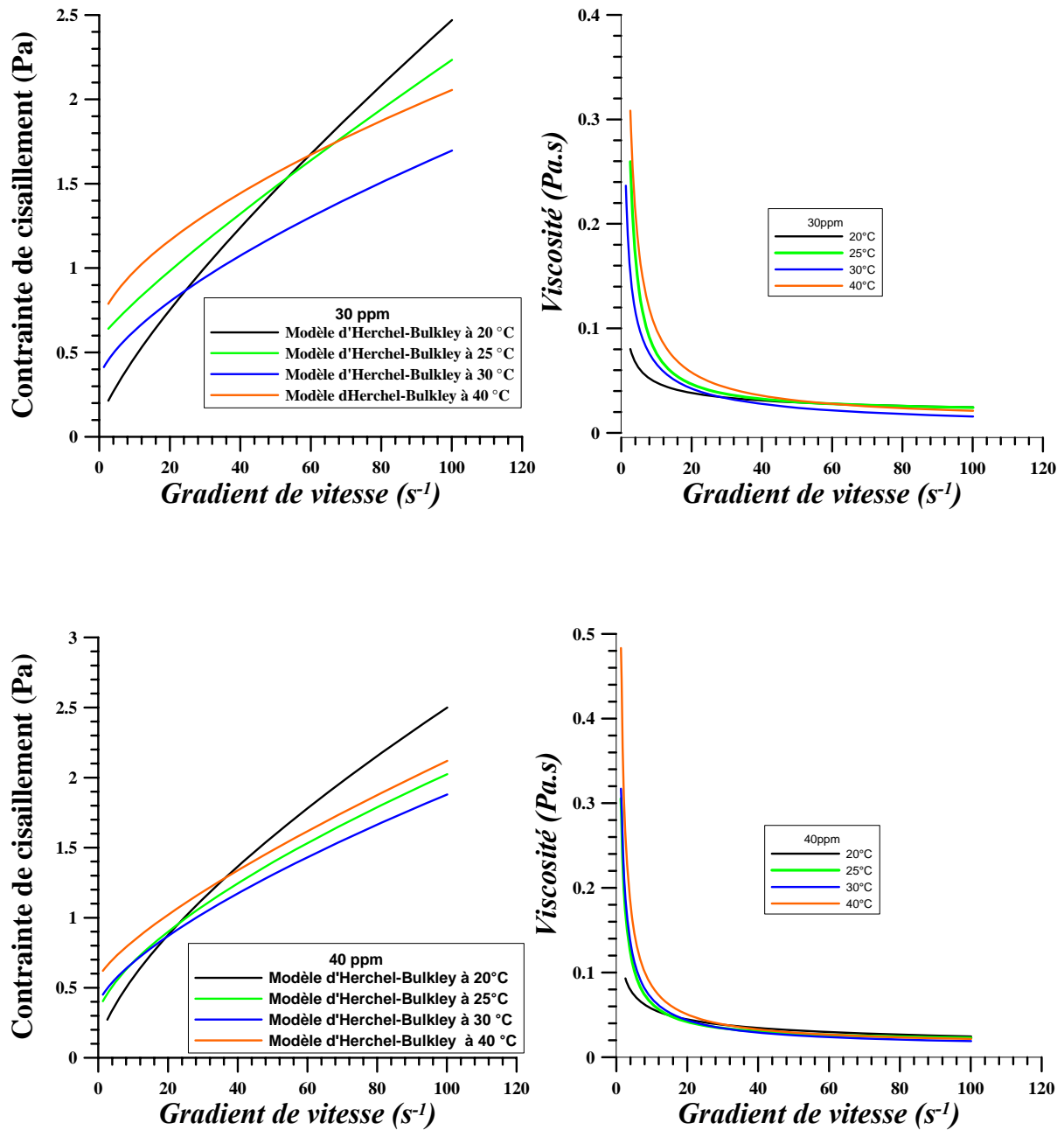


Figure III.15 : Influence de l’additif Quikflow X-2433 sur l’évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 30 et 40 ppm

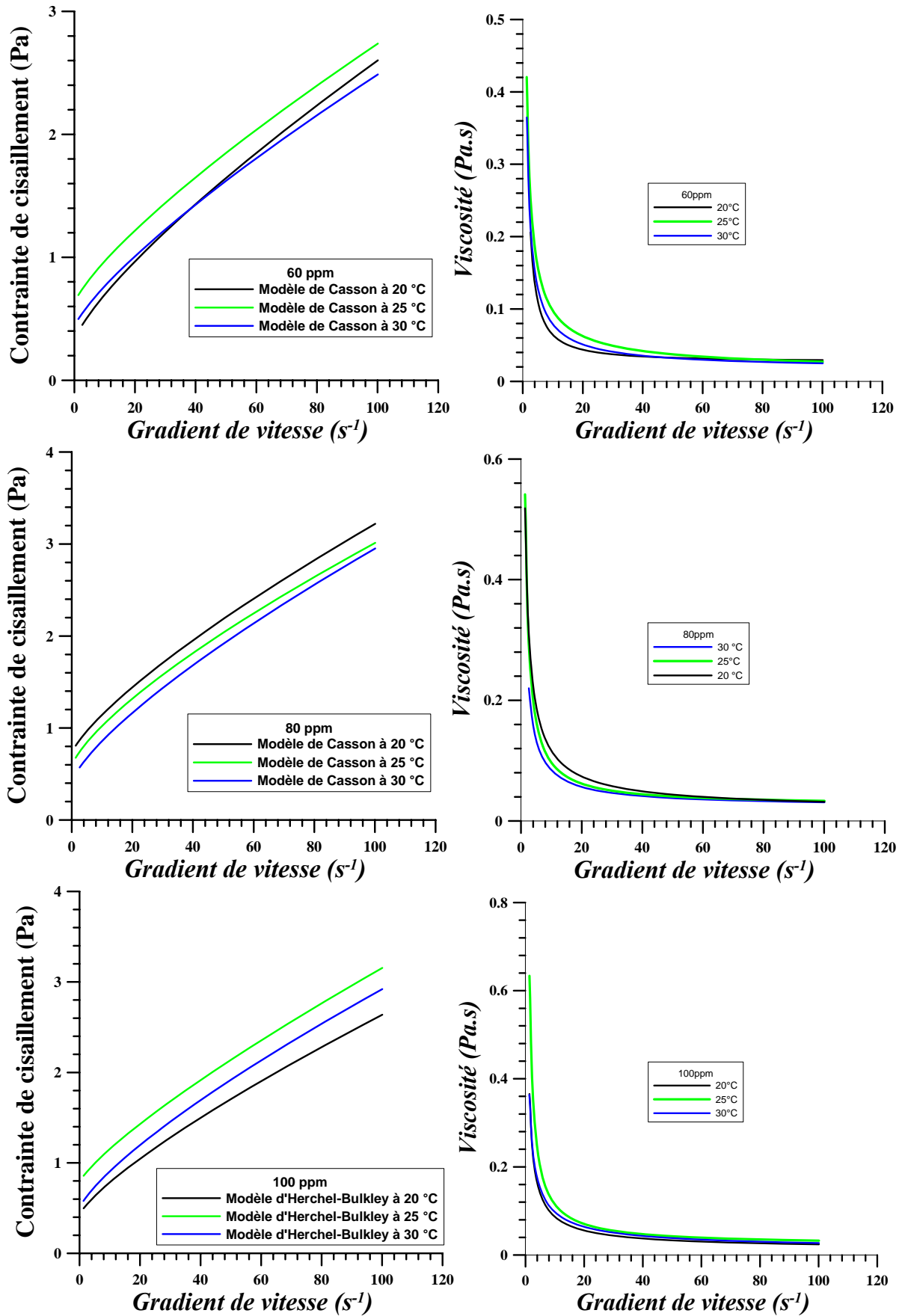


Figure III.16 : Influence de l'additif Quikflow X-2433 sur l'évolution de la contrainte et de la viscosité à différentes températures à 60, 80 et 100 ppmp

Les résultats trouvés coïncident avec les travaux de [57] à savoir la présence des polymères réducteurs de frottement dans la solution fait augmenter la viscosité apparente du fluide. Donc sa présence modifie seulement l'interaction hydrodynamique entre les particules de polymère et le solvant qui l'entoure. L'observation de l'augmentation de la viscosité est due à la présence du polymère ayant le pouvoir de se regrouper partiellement. Le processus d'agrégation est considéré comme réaction de floculation et défloculation dont le taux est déterminé par les forces attractives de Van der Waals et l'agitation thermique (mouvement Brownien). Ainsi, ce phénomène est similaire au cas de l'adsorption à la surface des particules de la phase qui est favorable avec ce genre de polymère.

À des gradients de vitesse élevés, les grains sont totalement entraînés par le solvant à cause de la force de frottement entre polymère-solvant et cela engendre un affaiblissement de cette force de frottement et par conséquent l'influence de mouvement Brownien diminue.

La modification des paramètres rhéologiques et l'augmentation de la viscosité en fonction de la concentration du polymère comme observées dans les figures III.11, III.12 et III.13 peut être expliquée par la description moléculaire ; l'augmentation de la viscosité est liée à l'existence d'enchevêtrement entre les chaînes macromoléculaires du polymère. Les polymères de longue chaîne moléculaire et de masse molaire élevée sont entravés dans leurs mouvements par des boucles d'enchevêtrement avec la chaîne adjacente.

III.4.3. Dégradation de polymère

Les polymères réducteurs de trainée sont sensibles à la dégradation mécanique et thermique [9]. Dans ce paragraphe on va étudier le phénomène de dégradation des polymères, et pour cela, on doit faire des essais rhéologiques sur deux échantillons de pétrole modifié qui ont été déjà examinés. Ces échantillons ont été soumis à un gradient de vitesse croissant de 0 à 100 s^{-1} , à 25 °C et pour les concentrations de 20 et 30 ppmp de polymère. Après trois jours ils seront soumis à une autre série d'essais. Tous les résultats obtenus sont représentés dans les figures III.17 et III.18.

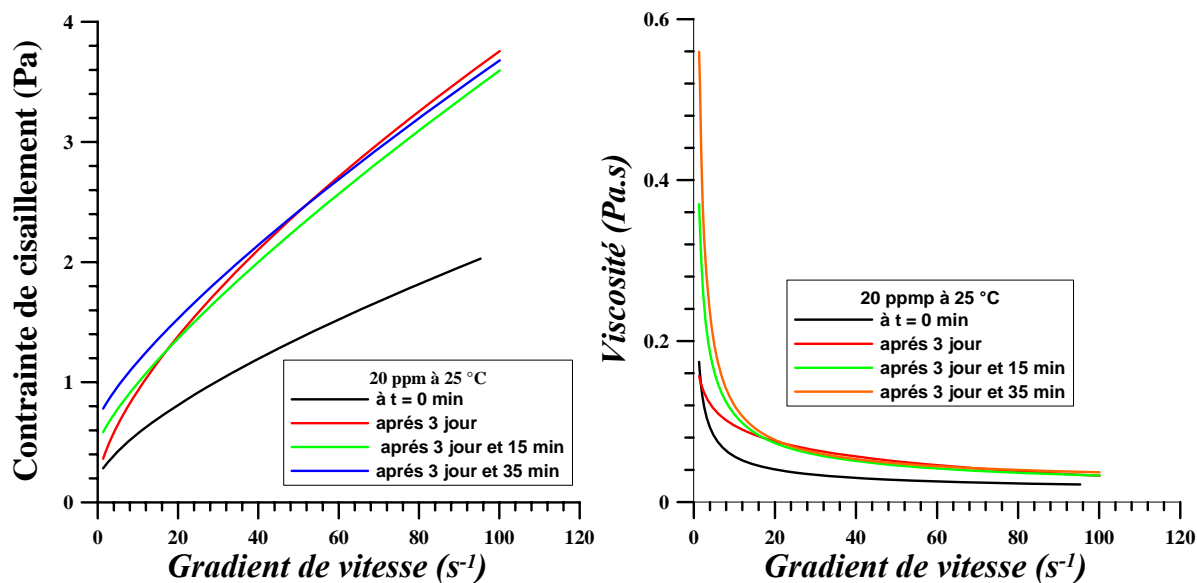


Figure III.17 : Influence du vieillissement de la solution polymérique (Quikflow X-2433) sur l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour $C_p = 20$ ppmp à 25°C.

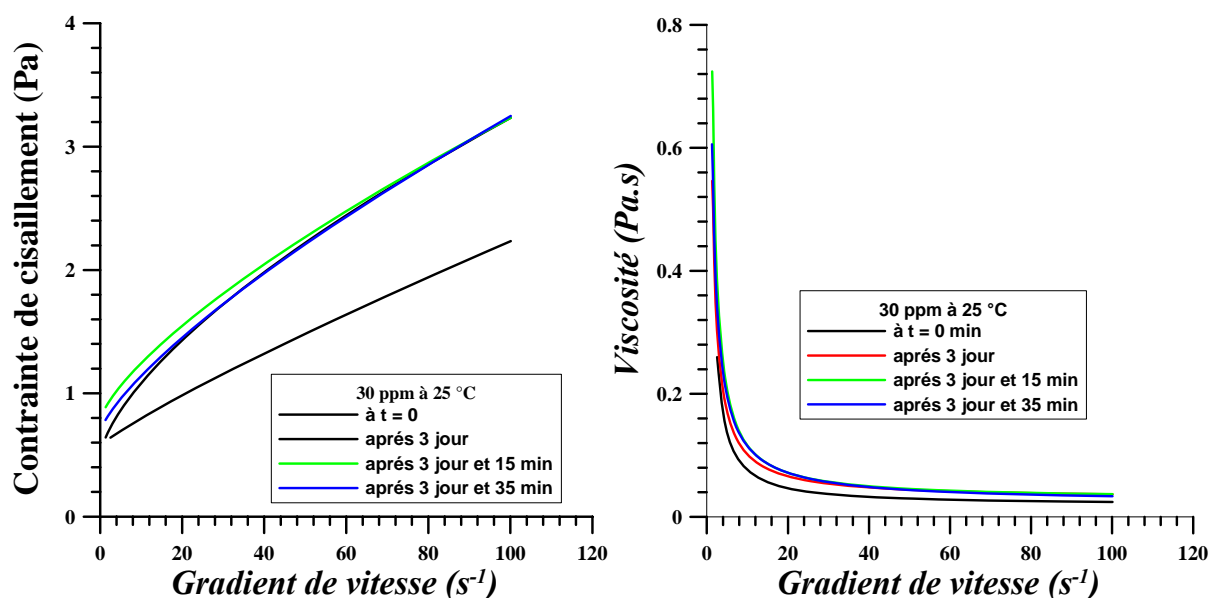


Figure III.18 : Influence du vieillissement de la solution polymérique (Quikflow X-2433) sur l'évolution de la contrainte de cisaillement et de la viscosité pour $C_p = 30$ ppmp à 25°C

Les résultats trouvés montrent que la contrainte de cisaillement non seulement augmente avec l'accroissement du gradient de vitesse mais elle augmente également avec le temps de repos ; d'ailleurs, le premier essai qui a été effectué au temps original envisagé par la couleur noire est situé au dessous des courbes des essais effectués dans le troisième jour.

De même, le résultat est similaire dans le cas de l'évolution de la viscosité, ces courbes montrent l'augmentation de la viscosité apparente quand on passe d'un instant à l'autre ceci est traduit par un changement dans les paramètres rhéologiques. Ce changement peut être expliqué par un changement dans la structure de la phase, ou à cause d'une dégradation à l'aptitude de la décantation des particules de la matrice étudiée causé par le phénomène de l'adsorption et de l'enchevêtrement du polymère, ainsi ce changement est dû à la gélification du viscosifiant Gelton.

L'étude des courbes découlement et de viscosité montre l'existence de la dégradation mécanique des chaînes polymériques du fait de l'augmentation de la viscosité.

Conclusion

Nous avons fait dans ce chapitre une étude rhéologique de pétrole algérien en le modifiant par l'ajout d'un viscosifiant nommé GELTONE.

On a assumé que les données rhéologiques sont adaptées à un des modèles les plus utilisés pour l'écoulement plastique, à savoir, les équations rhéologiques de Casson et de Herchel-Bulkley. On a constaté que le pétrole modifié se comporte comme un liquide plastique et il suit le modèle d' Herchel-Bulkley dans toute la marge de températures d'essais sauf à la température de 30 °C où on a trouvé que notre liquide suit la loi de Casson. Ainsi que les paramètres rhéologiques varient avec le changement de la température.

L'ajout du polymère réducteur de frottement au pétrole modifié, à différentes concentrations, nous a permis de montrer que la solution devient plus visqueuse et la viscosité apparente augmente de plus en plus avec l'augmentation de la concentration.

Conclusion et recommandations

Le travail présenté dans ce mémoire est une introduction à l'étude de transport de pétrole brut dans les pipelines. Nous avons étudié le problème lié au transport des bruts paraffiniques d'un point de vue expérimental. Un brut paraffinique s'écoule comme un fluide Newtonien, non Newtonien à seuil (plastique), thixotrope et même comme un solide selon les conditions thermiques et mécaniques. Les caractéristiques et les propriétés physiques du pétrole brut paraffinique dépendent de la température dans laquelle il se trouve, et du cisaillement qu'on lui impose.

Plus précisément, c'est le pétrole brut provenant du champ d'Illizi qui a été étudié. Lors des expériences, on a utilisé le viscosimètre de laboratoire UR-MPE de l'Université M'Hamed Bouguerra de Boumerdes. Les paramètres rhéologiques déterminés sont la viscosité et la contrainte de l'écoulement.

Les paramètres qui influent sur le transport du pétrole dans les canalisations, sont la viscosité, la température et la concentration en polymère réducteur de frottement.

La variation des conditions d'écoulement que se soit la température ou le gradient de vitesse est accompagnée d'un changement de caractéristique rhéologique. Il a été constaté que :

- la température influe considérablement sur les courbes d'écoulement, son augmentation provoque une diminution dans la viscosité apparente du pétrole modifié ainsi sur la diminution de la contrainte seuil de cisaillement ;
- l'augmentation de la vitesse de cisaillement (gradient de vitesse) à une température donnée peut causer une diminution significative de la viscosité apparente de pétrole modifié ;
- le modèle rhéologique auquel le pétrole modifié obéit est celui de d'Herchel-Bulkley ainsi que celui de Casson
- lorsqu'on ajoute le polymère réducteur de frottement au brut modifié, on constate qu'il y a un changement dans la structure du fluide. En augmentant la concentration de l'additif, la viscosité apparente du fluide augmente et le pétrole modifié devient de plus en plus visqueux ;

Conclusion et recommandations

On a constaté également que l'étude rhéologique d'un brut paraffinique est complexe, car son comportement est régi par un grand nombre de paramètres dépendant les uns des autres. Au terme de ce travail, il ressort quelques pistes de recherche futures, à savoir mener les mêmes expériences sur un rhéomètre à contrainte imposée, une deuxième proposition, qui consiste à prendre d'autres additifs réducteurs de frottement. Un deuxième axe consiste à faire des travaux expérimentaux sur la réduction de la traînée à différents régimes d'écoulement utilisant plusieurs additifs de différents types (polymère et agents tension actifs). Un troisième axe sera basé sur l'établissement d'une relation reliant le comportement rhéologique au comportement hydrodynamique de l'écoulement.

Références

- [1] D. Mowla et al, Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes. *Chemical Engineering Science* 61 (2006) 1549 – 1554.
- [2] Toms, B.A., 1948. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers. *proceeding of the 1st International Congress on Rheology*, vol. 2. North Holland Publication Company, Amsterdam, pp. 135–141.
- [3] Y. Kawaguchi et al, Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives—spatial structure of turbulence investigated by PIV system. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 23 (2002) 700–709.
- [4] M. Ferhat HADRI. Contribution à l'étude de la réduction de la traînée en écoulement turbulent d'une solution de CTAC. Thèse doctorat université de Caen. Spécialité : Mécanique des milieux fluides (2008).
- [5] Y. Al-Roomi et al. Use of a novel surfactant for improving the transportability/transportation of heavy/viscous crude oils. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 42 (2004) 235– 243.
- [6] D. Mowla et al, Experimental study of drag reduction by a polymeric additive in slug two-phase flow of crude oil and air in horizontal pipes, *Chemical Engineering Science* 61 (2006) 1549 – 1554
- [7] T. Al-Wahaibi et al, Effect of drag-reducing polymers on horizontal oil–water flows, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 57 (2007) 334–346
- [8] I. Sher, G. Hetsroni. A mechanistic model of turbulent drag reduction by additives. *Chemical Engineering Science* 63 (2008) 1771 – 1778
- [9] Z. Matras et al, The influence of polymer–surfactant aggregates on drag reduction. *Thin Solid Films* (2007) TSF-24189; No of Pages 4
- [10] R.G. Larson, Analysis of polymer turbulent drag reduction in flow past a flat plate. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 111 (2003) 229–250
- [11] G. Courraz et J.L. Grossiord. *Initiation à la rhéologie*. Laboratoire de physique pharmaceutique centre de Châteny-Malabry Université Paris XI. 2^e édition. Lavoisier-Tec & Doc, 1991
- [12] Rakesh K. Gupta. *Polymer and composite rheology*. West Virginia University Morgan, West Virginia, Second Edition. Marcel Dekker, 1977
- [13] Julie DRAPPIER. Plateaux de contrainte et bandes de cisaillement dans les fluides complexes. Thèse de doctorat de l'Université Paris 7 (2004)

- [14] Philippe Coussot et Jean - Louis Grossiord. Comprendre la rheology: de la circulation du sang à la prise du béton. EDP Sciences 2001
- [15] W. Littmann. Polymer flooding; Developments in Petroleum Science. ELSEVIER 1988
- [16] Stephen L Rosen. Fundamental Principles of Polymeric Materials. Second Edition. Department of Chemical Engineering, University of Missouri-Rolla, (1993).
- [17] Li-ming Che & al. Rheological properties of dilute aqueous solutions of cassava starch. Carbohydrate Polymers 74 (2008) 385–389
- [18] Etienne Guyon Jean-Pierre Hulin, Luc Petit. Hydrodynamique physique. EDP sciences/CNRS Edition, (Juin 2001).
- [19] Jim W. Goodwin. Colloids and Interfaces with Surfactants and Polymers – An Introduction. Interfacial Dynamics Corporation. Portland, Oregon, USA. Wiley, (1998).
- [20] Philippe Coussot & Christophe Ancey. Rhéophysique des pâtes et des suspensions. EDP Sciences 1999
- [21] ZHANG Fan, CHEN Guo-qun. Viscoelastic properties of waxy crude oil. J. Cent. South Univ. Technol. (2007) s1–0445–04. DOI: 10.1007/s11771–007–0303–x
- [22] Saeed M. Al-Zahrani, Tariq F. Al-Fariss. A general model for the viscosity of waxy oils. Chemical Engineering and Processing 37 (1998) 433–437.
- [23] R.P. Chhabra J.F. Richardson. Non-Newtonian flow and applied rheology. Second Edition, Engineering Applications, HB (2008)
- [24] Midoux, N. 1993 Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique. Technique et Documentation Lavoisier, 3ème édition, 513p.
- [25] Nicolas TIXIER. Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées. Thèse doctorat de FACULTE des Sciences et Techniques de l'Université de Limoges. Discipline : Chimie et Microbiologie de l'Eau (2003)
- [26] I. M. EL-GAMAL & E.A.M. GAD. Etude du comportement rhéologique du brut paraffinique d'Umbarka à basse température et de l'influence d'un additif pour l'amélioration des caractéristiques d'écoulement. Revue de l'institut français du pétrole. Vol. 52 n° 3. mai-juin 1997.
- [27] Alain Béghin. Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux. Thèse doctorat de l'université de Paris 6. Laboratoire central des ponts et chaussées (2003)
- [28] P. Luo, Yongan Gu, Effects of asphaltene content on the heavy oil viscosity at different temperatures, Fuel 86 (2007) 1069–1078

- [29] L. Rejon & al. Rheological, dielectric and structural characterization of asphaltène suspensions under DC electric fields. *Fuel* 83 (2004) 471–476.
- [30] D. Chanda et al. Combined effect of asphaltenes and flow improvers on the rheological behaviour of Indian waxy crude oil. *Fuel* Vol. 77, No. 11, pp. 1163-1 167, 1998.
- [31] Peng Luo, Yongan Gu. Effects of asphaltene content on the heavy oil viscosity at different temperatures. *Fuel* 86 (2007) 1069–1078.
- [32] Miguel Rondon. Influence de la formulation physico-chimique et des propriétés interfaciales sur la stabilité des émulsions asphaltènes-eau-huile. Application à la déshydratation du pétrole (2006).
- [33] B. Herzhaft. Additifs réducteurs de perte de charge en écoulement. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 55 (2000), No. 5, pp. 501-509.
- [34] Adel Benchabane. Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères. Effets de l'ajout de polymères. THÈSE doctorat. École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur, l'Université Louis Pasteur ULP – INSA – ENGEES, (2006).
- [35] Mallorie Tourbin. Caractérisation et comportement de suspensions concentrés de nanoparticules sous écoulement : Application aux processus d'agrégation et de rupture. thèse doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse, (2006).
- [36] Christopher J.S. Petrie. The rheology of fibre suspensions. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 87 (1999) 369–402.
- [37] S. Dehkissiaa et al. Characterization of Doba–Chad heavy crude oil in relation with the feasibility of pipeline transportation. *Fuel* 83 (2004) 2157–2168.
- [38] J. Q. Feng & D. A. Hays. Relative importance of electrostatic forces on powder particles. *Powder Technology* 135–136 (2003) 65– 75.
- [39] Gregory C. Herdt. Van der Waals forces on thin liquid films in capillary tubes. *journal of colloid and interface* 160, 72-78 (1993).
- [40] J. Q. Feng et D. A. Hays . Relative importance of electrostatic forces on powder particles. *Powder Technology* 135–136 (2003) 65– 75
- [41] Jean-Christophe BAUDEZ. Rhéologie et physico-chimie des boues résiduelles pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage. Thèse de doctorat, Sciences de l'Environnement (avril 2001).
- [42] Hongying Li et Jinjun Zhang. A generalized model for predicting non-Newtonian viscosity of waxy crudes as a function of temperature and precipitated wax. *Fuel* 82 (2003) 1387–1397
- [43] R. C. Dante et al. Viscoelastic models for Mexican heavy crude oil and comparison with a mixture of heptadecane and eicosane. Part I. *Fuel* 85 (2006) 559–568

- [44] ZHANG Jin-jun, LIU Xin, Some advances in crude oil rheology and its application, J. Cent. South Univ. Technol. (2008) 15(s1): 288–292. DOI: 10.1007/s11771-008-365-4
- [45] Guillaume VINAY, (November 2005). Modélisation du redémarrage des écoulements de bruts paraffiniques dans les conditions pétrolières. Thèse de doctorat, Spécialité Mécanique numérique ; Ecole des Mines de Paris.
- [46] M. A. Farah et al. Viscosity of water-in-oil emulsions: Variation with temperature and water volume fraction. Journal of Petroleum Science and Engineering 48 (2005) 169– 184.
- [47] S. Deshmukh et D.P. Bharambe. Synthesis of polymeric pour point depressants for Nanda crude oil (Gujarat, India) and its impact on oil rheology. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY 89 (2008) 227–233
- [48] S. W. Hasan & al. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. Fuel 89 (2010) 1095–1100
- [49] W.B. Wan Nik et al. Rheology of bio-edible oils according to several rheological models and its potential as hydraulic fluid. Industrial Crops and Products 22 (2005) 249–255
- [50] Clark, P.E., Pilehvari, A.,. Characterization of crude oil-in water emulsions. J. Pet. Sci. Eng. 9, (1993) 165– 181.
- [51] S.M. Al-Zahrani, A generalized rheological model for shear thinning fluids. Journal of Petroleum Science and Engineering 17 (1997) 21 1-215
- [52] A. E. Kuzmic & al. Studies on the influence of long chain acrylic esters polymers with polar monomers as crude oil flow improver additives. Fuel 87 (2008) 2943–2950
- [53] Documentation de la direction regionale de TFT, SONATRACH.
- [54] Manuel de l'appareil de viscosimètre thermo HAAKE VT 550
- [55] R. A. Almehaideb Asphaltene precipitation and deposition in the near wellbore region: a modeling approach. Journal of Petroleum Science and Engineering 42 (2004) 157– 170
- [56] A. C.S. Ramos et al. Interfacial and colloidal behavior of asphaltenes obtained from Brazilian crude oils. Journal of Petroleum Science and Engineering 32 (2001) 201– 216
- [57] V.N. Matveenko et al. Rheology of highly paraffinaceous crude oil. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 101 (1995) 1 7
- [58] SAFRI et al. Étude du comportement rhéologique du pétrole brut de Hassi R'mel et de l'influence de l'additif Quickflow X-2433 sur les paramètres rhéologiques, 18^{ème} Congrès Français de mécanique, 2007.