

N° d'ordre: 03/2004-M/PH

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
HOUARI BOUMEDIENE
USTHB / ALGER
FACULTE DE PHYSIQUE**



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Magister En Physique

Spécialité: Energétique et Mécanique des Fluides

Par: DAIMALLAH Ahmed

SUJET

***COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DE FLUIDE DE
FORAGE EN REGIME STATIONNAIRE***

Soutenu publiquement le 10/02/2004, devant le Jury composé de:

Mr BENACHOUR Djaafar	Professeur, Univ. Sétif	Président
Mr BENHADID Salah	Professeur, USTHB	Directeur de la thèse
Mme BENTAHAR Fatiha	Professeur, USTHB	Examineur
Mme HADDOUM Nadia	Chercheur, division de forage de Hydra (Sonatrach)	Examineur
Mr KHEMMOUDJ Amar	Chargé de cours, USTHB	Examineur

Dédicace

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

Je le dédie également à mes frères et mes sœurs,

à toute ma famille,

à mes amis.

Remerciements

*Le temps que l'on prend, pour dire merci
Est le seul qui reste au bout de nos jours
Les vœux que l'on fait, l'effort que l'on sème
Chacun les récolte en soi-même
Aux beaux jardins du temps qui court
Gilles Vigneault*

Cette étude a été réalisée au laboratoire de rhéologie, faculté des sciences physiques, université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene et au centre de recherche et développement de Boumerdes (Sonatrach).

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance au professeur Salah BENHADID responsable du laboratoire de Rhéologie (USTHB), pour avoir dirigé ce travail et également pour ses encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer. Je suis heureux de pouvoir lui exprimer mes plus sincères remerciements.

Toute ma reconnaissance va à Monsieur Djaafar BENACHOUR professeur à l'université de Sétif, qui malgré ses multiples responsabilités m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Que Mme Fatima BENTAHAR professeur à l'USTHB trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour l'intérêt qu'elle a porté à l'évaluation de ce travail en acceptant de faire part du jury.

Je remercie tout particulièrement Mme Nadia HADDOUM (née Kherfellah) chercheur à la Division de forage de Hydra (Sonatrach), pour sa précieuse collaboration à la réalisation de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression ma gratitude la plus vive.

J'exprime toute mes remerciements à Mr Amar KHEMMOUDJ chargé de cours à l'USTHB pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Mes remerciements vont également à tous les membres de l'équipe de Rhéologie à l'USTHB composé de T. STAMBOUL, D. BOUHENNA, M. MAHFOUD, B. Mustapha, F. Yazid, L. ACHAB, F. IACHACHENE pour leur amitié et leurs soutiens quotidiens durant toute la durée de l'élaboration de ce modeste travail.

Un grand merci à mon meilleur ami SAHNOUNE Khaled qui n'a cessé de m'encourager durant cette période.

Je n'oublierai mon cher ami Hamid OUALLI qui m'a toujours soutenu, qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance.

J'exprime mes remerciements à Tout les membres de l'équipe de recherche du service simulation et modélisation des puits (CRD) de Boumerdes qui m'ont fait profiter de leurs expériences dans le domaine pétrolier et pour le climat d'amitié qu'ils ont su créer.

Mes pensées vont également à tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans les moments difficiles, je les remercie vivement.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

SYMBOLE ET NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : Notions sur les fluides de forage

I.1) Généralités Sur les fluides de forage	3
I.1.1) Introduction	3
I.1.2) Définition de fluide de forage	3
I.1.3) Les fonctions du fluide de forage	4
I.1.4) Circulation du fluide de forage.....	5
I.1.5) Classification des fluides de forage	7
I.1.5.1) Les fluides à base d'huile	7
I.1.5.2) Les fluides à base d'eau	7
I.1.5.3) Les fluides de forage gazeux	8
I.1.6) Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits	9
I.1.6.1) Fluide de forage de réservoir	9
I.1.6.2) Fluide de complétion et de workover	9
I.1.6.3) Fluide d'annulaire ou fluide de packer	10
I.2) Notions sur les polymères	11
I.2.1) Introduction	11
I.2.2) Propriétés physico-chimiques des polymères	11
I.2.3) Classification des polymères	12
I.2.4) Utilisation des polymères dans fluides de forage	12
I.2.4.1) Viscosifiant	12
I.2.4.2) Réducteur de filtrat	13

I.3) Conclusion	15
-----------------------	----

CHAPITRE II : Modèles rhéologiques de base

II.1) Introduction	16
II.2) Paramètres fondamentaux de la rhéologie	17
II.2.1) Définition	17
II.2.2) La contrainte de cisaillement	17
II.2.3) Déformation de cisaillement	18
II.2.4) La vitesse de cisaillement	19
II.2.5) La viscosité	19
II.2.5.1) La viscosité dynamique ou apparente	19
II.2.5.2) La viscosité cinématique	19
II.2.5.3) La viscosité relative	20
II.3) Classification des fluides réels	20
II.3.1) Les fluides indépendants du temps	20
II.3.1.1) Les fluides newtoniens	20
II.3.1.2) Les fluides non newtoniens	21
II.1.2.1) Les fluides sans contrainte seuil	22
II.1.2.2) Les fluides à contrainte seuil	23
II.3.2) Fluides dépendant du temps	25
II.3.2.1) Les fluides thixotropes	26
II.3.2.2) Les fluides rhéopexes.....	27
II.3.2.3) Les fluides viscoélastiques.....	27
II.5) Modèles issus de la théorie des milieux effectifs (Modèles structuraux)	28
II.5.1) Théories en présence	28
II.6) Conclusion	34

CHAPITRE III : Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques par une approche phénoménologique

III.1) Techniques expérimentales de viscosimétrie et protocole expérimental	35
III.1.1) Dispositif expérimental.....	35
III.1.1.2) Principe de fonctionnement du viscosimètre « Low Shear 40 » ...	35
III.1.2) Protocole expérimental et mesures rhéologiques	37
III.2) Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques	
par une approche phénoménologique	43
III.2.1) Introduction	43
III.2.2) Présentation de la méthode de calcul	43
III.2.2.1) Algorithme d'optimisation de Levenberg Marquardt	44
III.2.2.2) Calcul du coefficient de dispersion	46
III.2.3) Détermination des paramètres rhéologiques	47
III.2.3.1) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 320 g/l de NaCl	50
III.2.3.2) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 30 g/l de KCl	56
III.2.3.3) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 320 g/l de NaCl	62
III.2.3.4) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 30 g/l de KCl	68
III.3) Conclusion	74

CHAPITRE IV : Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques par une approche microscopique

IV.1) Introduction	75
IV.2) Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques	
par des modèles structuraux	75
IV.2.1) Modélisation par le modèle de Cross	77

IV.2.1.1) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 320 g/l de NaCl	77
IV.2.1.2) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 30 g/l de KCl.....	82
IV.2.1.3) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 320 g/l de NaCl	87
IV.2.1.4) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 30 g/l de KCl	92
IV.2.2) Modélisation par le modèle de Williams Carreau	97
IV.2.2.1) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 320 g/l de NaCl	97
IV.2.2.2) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE100 en présence de 30 g/l de KCl	102
IV.2.2.3) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 320 g/l de NaCl	107
IV.2.2.4) Modélisation du comportement rhéologique du polymère	
HE300 en présence de 30 g/l de KCl	112
IV.3) Conclusion	117

CHAPITRE V : Etude rhéologique de différentes formulations de fluides de forage utilisées pour le forage d'un puits d'hydrocarbure.

V.1) Introduction	118
V.2) Formations géologiques de différents phase du puits	118
V.2.1) Première phase : phase 26'' (0 à 350 m).....	118
V.2.2) Deuxième phase : phase 17'' ½ (de 350 m à 1605 m)	119
V.2.3) Troisième phase : phase 12'' ¼ (de 1605 m à 2837 m)	119
V.2.4) Quatrième phase : phase 8'' ½ (de 2837 m à 3907 m)	120
V.3) Description de l'appareil de mesure	121
V.4) Composition du fluide de forage pour chaque phase	122

V.4.1) phase 26''	122
V.4.1.1) Paramètres rhéologiques	124
V.4.2) phase 17'' ½	124
V.4.2.1) Paramètres rhéologiques	125
V.4.3) phase 12'' ¼	125
V.4.3.1) Paramètres rhéologiques	126
V.4.4) phase 8'' ½	127
V.4.4.1) Paramètres rhéologiques	128
V.4.4.2) Modélisation du comportement rhéologique de la formulation utilisée pour la phase réservoir par le modèle de Cross	129
V.5) Conclusion	131

CONCLUSION GENERALE 132

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 135

SYMBOLES ET
NOMENCLATURES

Symboles et Nomenclatures

Symboles grecques

τ	:	Contrainte de cisaillement [Pa]
τ_c	:	Contrainte seuil [Pa]
γ	:	Déformation de cisaillement.
$\dot{\gamma}$	:	Vitesse de cisaillement [s^{-1}]
μ	:	Viscosité dynamique [Pa.s]
μ_a	:	Viscosité apparente [Pa.s]
ν	:	Viscosité cinématique [m^2/s]
η_r	:	Viscosité relative.
μ_p	:	Viscosité plastique [Pa.s]
μ_0	:	Viscosité à gradient de cisaillement nul [Pa.s]
μ_∞	:	Viscosité à gradient de cisaillement infini [Pa.s]
$[\mu]$	:	Facteur de structure.
μ_s	:	Viscosité de la phase suspendante.
ρ	:	Masse volumique du fluide.
ϕ	:	Fraction volumique des particules.
ϕ_m	:	Fraction volumique de Packing.
k_e	:	Facteur d'encombrement.
k_h	:	Coefficient de Huggins.

Symboles latines

F	:	Force [N]
T	:	Température [°F]
ri, re	:	Rayon intérieur et extérieur [m]
dx	:	Variation de déplacement [m]
dy	:	Ecart entre deux couches voisines de fluides [m]
C	:	Concentration [g/l]
t	:	Temps caractéristique (s)
p	:	Paramètre caractéristique du fluide étudié.
k	:	Indice de consistance du fluide.
n	:	Indice d'écoulement du fluide.
v	:	Vitesse d'écoulement [m/s]
VA	:	Viscosité apparente (cP)
VP	:	Viscosité plastique (cP)
YP	:	Yield Point (lb _f /100ft ²)
cP	:	Centipoises

$$^{\circ}\text{C} = 5/9[^{\circ}\text{F}-32]$$

$$1\text{cP} = 1\text{mPa}\cdot\text{s}$$

$$\text{Lb}_f/100\text{ft}^2 = 0.48\cdot\text{Pa}$$

$$1\text{ppb (livre par baril)} = 2,85 \text{ g/l}$$

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le succès d'une opération de forage est assuré par plusieurs facteurs parmi eux le choix du fluide de forage dont les fonctions sont multiples (refroidir et lubrifier l'outil, maintenir les parois, assurer le transport des déblais, ...), d'où la connaissance et le contrôle des propriétés rhéologiques des fluides de forage ont une incidence majeure pour le bon déroulement d'une opération de forage. Ces fluides présentent un comportement non newtonien le plus souvent thixotrope.

Durant la dernière décennie, les boues à base d'eau sont récemment employées afin de protéger l'environnement. Ce type de fluide contient des polymères hydrosolubles dissous dans une saumure. Les saumures sont généralement des solutions de NaCl, KCl, CaCl₂, NaBr, ZnBr,... utilisées avec différentes concentrations.

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

Néanmoins la dégradation thermique des polymères utilisés dans ce type de fluide ainsi qu'une forte diminution de la viscosité lors du forage des puits profonds où les températures sont élevées entraîne un inconvénient majeur pour le bon déroulement de l'opération de forage. C'est pourquoi une modélisation au laboratoire est primordiale afin de vérifier les performances des fluides de forage et plus précisément les polymères d'ajustement.

Un des objectifs de ce travail est d'étudier l'influence de la concentration, de la température et la salinité sur les propriétés rhéologiques de polymères de type « Vinyl synthétique » commercialisés sous le nom HE100 et HE300 polymers.

Le premier chapitre de ce manuscrit fait le point sur les principales connaissances actuelles concernant les fluides de forage et les polymères utilisés dans les formulations de fluides de forage. Nous décrirons principalement les différents types de fluides de forage et leurs fonctions. Nous présenterons aussi une étude globale sur les propriétés physico-chimiques et rhéologiques des polymères d'une manière générale et plus particulièrement les polymères vinyl synthétique.

Le deuxième chapitre est réservé aux notions fondamentales de la rhéologie et aux modèles rhéologiques de bases. On exposera les différents modèles classiques et en structures. On présentera un aperçu sur les travaux antérieurs de modèle issus de la « théorie des milieux effectifs ».

Le troisième chapitre est consacré pour la présentation des résultats expérimentaux concernant la caractérisation rhéologique en régime stationnaire pour différentes concentrations des deux types de polymère (HE100, HE300) en présence de deux milieux salés respectivement 320 g/l de NaCl et 30 g/l de KCl. L'effet de la température sur le comportement de ces polymères a été également étudié. Ensuite nous avons modélisé les courbes d'écoulement obtenu expérimentalement par une approche phénoménologique. Cette dernière considère les modèles classiques (Hershel Bulkley, Casson, Bingham, Casson Généralisé, Ostwald,...).

Le quatrième chapitre porte sur la modélisation des courbes d'écoulement par une approche microscopique qui fait appel aux modèles structuraux issus de « la théorie des milieux effectifs ». Nous déterminons les paramètres du modèle de Cross et de Williams Carreau.

Le dernier chapitre consiste à la présentation des différentes formulations de fluides de forage utilisées pour le forage d'un puits d'hydrocarbure dans la région de Ain Salah à partir de la surface jusqu'au réservoir suivi par une caractérisation rhéologique pour chaque phase.

Et On terminera ce travail par une conclusion générale où on évaluera les performances des polymères « vinyl synthétiques » en présence d'un milieu fortement salé à des températures élevées, en donnant les perspectives de ce travail.

CHAPITRE I

*Notions sur les fluides de
forage*

I.1) Généralités Sur les fluides de forage :

I.1.1) Introduction :

Depuis le siècle dernier le développement des exploitations pétrolières s'avère d'une grande importance alors que l'exploitation d'un gisement pétrolière nécessite plusieurs opérations [1] :

- Localisation de la roche réservoir et confirmation de la présence des hydrocarbures.
- Evaluation de la viabilité économique du développement.
- Le forage et la mise en production des puits de pétrole et de gaz.

Par ailleurs, le succès d'une opération de forage est assuré d'une grande part du bon choix du fluide de forage.

Dans ce chapitre on présente les principaux rôles et caractéristiques des fluides de forage.

On développe ensuite l'ensemble des connaissances actuelles sur les propriétés physico-chimiques des polymères qui composent ces fluides.

I.1.2) Définition de fluide de forage :

Le fluide de forage ou boue de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile, ...) gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais, ciments, ...). C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastiques, le plus souvent thixotropes.

I.1.3) Les fonctions du fluide de forage :

Les principaux rôles du fluide de forage sont [2] :

- Assurer la remonter des déblais du front de taille jusqu'à la surface en raison de la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire.
- Maintenir les déblais en suspensions lors d'un arrêt de circulation dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais grâce à la nature thixotropique du fluide afin de redémarrer le forage sans coincement.
- Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement qui est en général supérieure à la pression des formations forées ce qui permet d'empêcher la déstabilisation des terrains et de contrôler la venue des fluides de formation traversée.

Du fait de cette différence de pression le fluide va filtrer dans les formations perméables et dépose un film à la paroi appelé «cake de filtration». Ce gâteau permet de réduire la perméabilité des parois et d'isoler le fluide de forage de la formation à moins que ce film ne doive pas être épais à fin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil.

- Remonter les informations géologiques sur les formations traversées lors du forage en raison de l'évolution des propriétés physico-chimiques du fluide (température, pH, teneur en gaz, chlore, ...).
- Enfin la boue ne doit pas être corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et ne risque pas de risques d'incendies.

I.1.4) Circulation du fluide de forage :

Le fluide de forage est en circulation continue durant toute la durée du forage et aussi bien dans le sondage qu'on surface [3].

Comme le schématise la Figure (I.1) ; Le fluide est préparé dans les bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil ensuite il remonte par l'espace annulaire chargé de déblais formés au front de taille.

A la sortie du puits, il subit divers traitement (tamisage, dilution, ajout de produit, ...) de telle façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques aux valeurs initiales (avant injection).

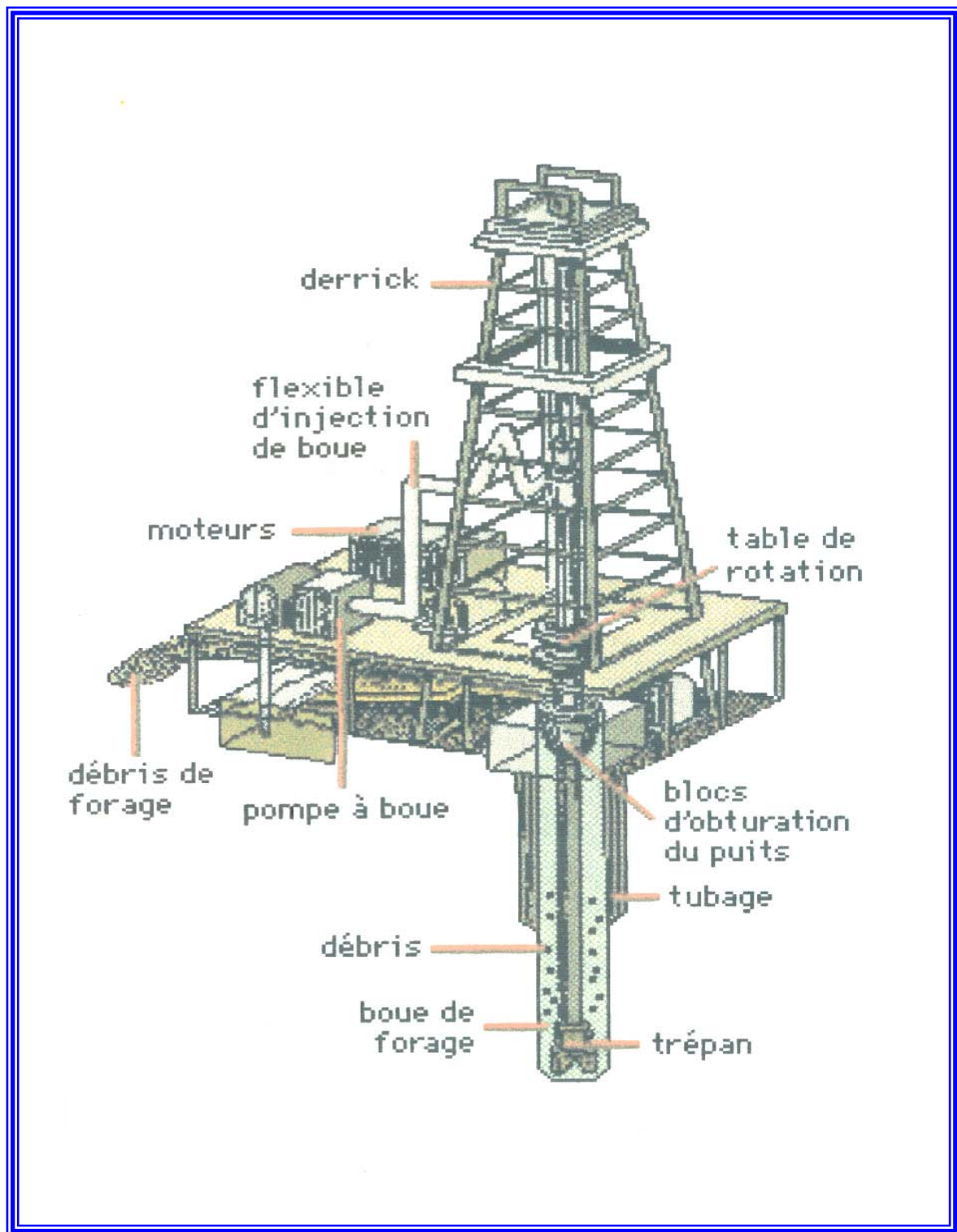


Fig I.1 : Principe du forage pétrolier

I.1.5) Classification des fluides de forage [4]:

I.1.5.1) Les fluides à base d'huile :

Ce sont des émulsions inverses dont la phase continue est une huile organique ou minérale (pétrole brut, gaz oil, ...) et la phase dispersée (discontinue) est une solution aqueuse de 50% en volume au maximum tout en gardant l'avantage d'une phase externe constituée par l'huile [5]. Des agents viscosifiants, émulsifiants, stabilisants, fluidifiants et alourdissants sont alors additionnés. Ces fluides présentent une insensibilité aux contaminants (NaCl, KCl, Argile, ...), une réduction du frottement de la garniture sur les parois du puits et un endommagement limité de la formation d'où une meilleure productivité à moins qu'ils posent des problèmes écologiques (polluantes), ils peuvent contaminer le laitier de ciment et ils sont très coûteux.

Actuellement, des fluides à base d'huile non toxique (huiles végétales) sont de plus en plus utilisés ainsi que les fluides à base d'eau.

I.1.5.2) Les fluides à base d'eau :

Ce type de fluide est le plus utilisé dans le domaine de forage. Ils sont généralement constitués par des suspensions d'argile (bentonite, ...), des solides inertes (carbonates, ...) dont les caractéristiques rhéologiques sont ajustées par addition de polymères viscosifiants (Xanthan, ...). Des réducteurs de filtrat entrent également dans la composition (carboxyméthylcellulose, polymères synthétiques) [6].

Ces fluides sont moins coûteux et moins polluants [7]; à moins que la dégradation thermique des polymères utilisés dans ces formulations présente un inconvénient majeur pour le bon déroulement d'une opération de forage.

Il est possible de classer ce type de fluides en deux catégories [8, 9]:

- Boues douces (boues bentonitiques) ;
- Boues salées.

I.1.5.3) Les fluides de forage gazeux :

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables prévenant de la formation traversée (inévitavelmente) ou ajouter intentionnellement.

Le gaz peut être de l'air, du gaz naturel, de la mousse ou du brouillard.

On cite brièvement les fluides gazeux utilisés dans les cas suivants :

- **Forage à l'air [10] :**

Le forage à l'air apporte sous toutes ses formes une solution à des problèmes compliqués parfois impossible à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que le forage des couches productrices à faible pression.

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité, son prix de revient est moins élevé mais le forage à l'air devient difficile lors des venues d'eau importantes.

- **Forage à la mousse :**

Les mousses sont des dispersions d'un volume (relativement) important de gaz dans un volume relativement faible de liquide. Elles sont utilisées comme fluide de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou, bien le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

L'avantage du forage à la mousse se résume en sa faible pression hydrostatique au fond et son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne

refroidit pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

- **Forage à la boue aérée :**

Afin d'éviter les pertes de circulation et d'avoir un fluide de forage plus léger, on utilise le forage à la boue aérée. L'avantage qu'elle présente : une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation est fortement réduite et une vitesse d'avancement plus rapide, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde..., à moins que la stabilité de la boue aérée est liée à une circulation effective des fluides.

I.1.6) Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits :

I.1.6.1) Fluide de forage de réservoir :

C'est un fluide utilisé lors du forage du réservoir à exploiter. Son rôle principal en plus de ces fonctions classiques est la limitation de l'endommagement des couches productrices.

I.1.6.2) Fluide de Complétion et de Workover :

L'opération de complétion commence au début du forage du réservoir jusqu'à la mise en place des équipements de production (dernière colonne du casing, packer, tubing, vanne de sécurité....).

Le workover est la reprise ou le reconditionnement du puits.

Le succès de ces deux opérations nécessite le choix d'un fluide dont les caractéristiques permettent :

- D'assurer une bonne stabilité des parois du puits ;
- Le nettoyage du puits en maintenant en suspension les particules et les déblais ;
- D'éviter le colmatage du réservoir ;
- La neutralisation ou la maîtrise du puits ;

- L'inhibition de la formation du cake.

I.1.6.3) Fluide d'annulaire ou fluide de packer :

C'est un fluide qui est mis en place entre le tubing et le cuvelage de production au-dessus du packer, il reste en place pendant toute la durée d'exploitation du puits.

I.2) Notions sur les polymères

I.2.1) Introduction :

L'utilisation des polymères dans les diverses industries : pharmaceutiques, cosmétiques, alimentaires et pétrolière ne cesse de se développer et certains sont conçus pour des opérations de forage particulières.

L'intérêt porté pour l'utilisation des polymères dans les formulations de fluides de forage remonte à 1931 lorsque l'on ajouta de l'amidon de maïs à la boue bentonitique pour contrôler les caractéristiques de filtration, ensuite elle s'est développée pour d'autres types de polymères on cite : la CMC, HEC, Xanthan Gum, Tanins,

Le polymère est un composé macromoléculaire constitué par la répétition d'un groupement d'atomes (carbone, oxygène, hydrogène, soufre, ...) appelé «unité structurelle» ou unité de répétition. A titre d'exemple on cite le polyéthylène qui est le plus simple des macromolécules dont l'unité de répétition est : $[-CH_2-CH_2-]$.

Les polymères peuvent se présenter :

- En chaînes linéaires avec une répétition linéaire n fois du motif A appelé homopolymère : $-A-A-A-A-A-$, ou de deux ou de plusieurs motifs appelés copolymère : $-A-B-A-B-A-B-A-B-$.
- En chaînes nonlinéaires sous formes de branchées, en étoile ou en réseau.

I.2.2) Propriétés physico-chimiques des polymères :

Les propriétés physico-chimiques sont en relation avec la structure des chaînes, le degré de polymérisation, la nature des liaisons entre les chaînes moléculaires, et de la composition de la structure du motif structural constituant le polymère.

Ces propriétés dépendent de l'intensité des interactions des chaînes, de la distribution des macromolécules et de la masse molaire.

Les forces intermoléculaires et les liaisons hydrogénées jouent un rôle capital dans les interactions des chaînes de polymères linéaires.

L'augmentation de la température a une influence importante sur la structure interne du polymère et par conséquent sur ces propriétés. Les températures élevées provoquent la rupture des liaisons intermoléculaires.

I.2.3) Classification des polymères :

Ils sont classés en trois catégories :

- Polymères naturels d'origine végétale, animale ou minérale, on cite la cellulose, l'amidon,
- Polymères synthétiques obtenus par des réactions de synthèse.
- Polymères artificiels obtenus par transformation chimique de polymères naturels.

I.2.4) Utilisation des polymères dans les fluides de forage :

Les polymères utilisés dans les formulations de fluides de forage à base d'eau sont hydrosolubles et peuvent être d'origine très variée : polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques [11]. Ils confèrent aux fluides de forage un caractère viscosifiant et réducteur de filtrat.

I.2.4.1) Viscosifiant :

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

L'augmentation de la viscosité permet de maintenir les particules en suspensions, et d'être compatible avec le milieu environnant afin de ne pas endommager la formation.

Les polymères confèrent au fluide un caractère thixotrope afin d'empêcher toute sédimentation en cas d'arrêt de forage.

I.2.4.2) Réducteurs de filtrat :

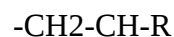
Le phénomène de filtration d'un fluide de forage résulte de la différence de pression entre la pression du fluide exercée sur les parois du puits, et la pression de la formation lorsque le fluide se trouve en contact d'une paroi poreuse et perméable.

La pression à l'intérieur du puits étant supérieure à celle de la formation, du liquide se filtre à travers la formation alors que les solides contenus dans la boue sont déposés à la paroi du puits formant ainsi une couche mince appelé «cake de filtration ».

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

Les polymères considérés dans notre étude fait partie de la famille des vinyl synthétiques de composition et de poids moléculaire différents.

La construction de la macromolécule utilise des monomères pour lesquels l'accrochage des chaînes se fait par deux carbones voisins. Les atomes sont liés de façon rigide dans le sens de la chaîne. La structure chimique du polyvinyle est de la forme [12] :



avec :

R : Radical composé de différents atomes.

Ces polymères ont été développés pour leur utilisation à des hautes températures et en présence de différents milieux salés.

Ils présentent les caractéristiques suivantes [13] :

- Résistant à l'hydrolyse à températures élevées,
- Maintient leur stabilité à températures élevées,
- Epaississant en présence des saumures de différents sels,
- Augmente la capacité de suspension de solide lors de la cimentation du puits,
- Présente une grande tolérance aux changements de pH.

I.3) Conclusion :

Dans ce premier volet nous avons présenté l'ensemble des notions fondamentales sur les fluides de forage, les différents types de fluides, leurs fonctions principales, et le rôle qu'ils remplissent pour le bon déroulement de l'opération de forage.

Nous avons ensuite donné un aperçu sur les polymères d'une manière générale, leurs propriétés physico-chimiques et l'intérêt de leur utilisation dans les formulations de fluides de forage.

Le prochain chapitre sera consacré à la présentation des notions fondamentales de la rhéologie et des modèles rhéologiques de base.

CHAPITRE II

*Modèles rhéologiques de
base*

INTRODUCTION

La rhéologie est la science qui étudie les déformations et les écoulements des corps en fonction des contraintes qui les provoquent [14]. La matière soumise à des contraintes se déforme ou s'écoule : la rhéologie s'intéresse à tous les comportements de la matière depuis le comportement parfait élastique de Hooke jusqu'au comportement parfaitement visqueux des liquides de Newton.

La détermination de la relation existante entre la contrainte appliquée et la déformation qui en résulte pour un matériau donné constitue une voie d'accès, privilégiée à certaines propriétés physiques de ce matériau en caractérisation rhéologique. La procédure la plus directe consiste à remplacer cette relation par une loi linéaire ou non linéaire plus complexe mais ayant une valeur représentative plus large. La rhéologie permet, alors de prévoir le comportement réel à condition de ne pas trop s'éloigner des hypothèses ayant servi à la construction des modèles rhéologiques utilisés.

II.2) Paramètres fondamentaux de la rhéologie :

II.2.1) Définition :

Considérons un élément de volume d'un fluide de hauteur h soumis à une contrainte de cisaillement constante τ . On note $\dot{\gamma} = \frac{v}{h}$ sa vitesse de déformation. (figure (II.1)).

Par définition, la loi de comportement d'un fluide est une relation linéaire ou non linéaire reliant la contrainte à la vitesse de déformation.

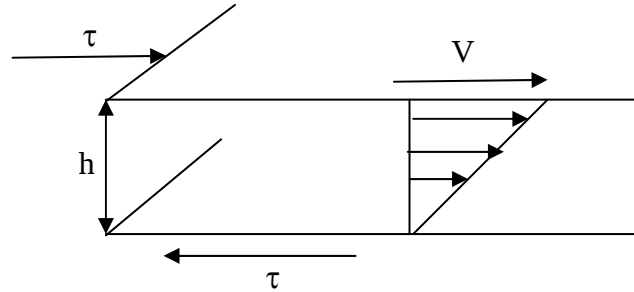


Figure II.1 : écoulement de poiseuille

II.2.2) La contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement τ est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie. Elle représente la force de contact tangentielle exercée sur un élément de surface « infiniment petit » créant ainsi des frottements favorisant le cisaillement des couches de fluide. (figure (II.2))

$$\tau = \frac{df}{ds} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{II.1})$$

avec :

df : la projection algébrique de $d\vec{f}$ sur un axe orienté parallèlement au mouvement.

$\vec{v}_1, \vec{v}_2$: vitesses des couches de fluide.

II.2.4) La vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$:

La vitesse de cisaillement ou le taux de cisaillement est le rapport de la déformation de cisaillement par le temps que mette celle ci pour se produire.

Donc :

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left[\frac{dx}{dy} \right] = \frac{d}{dy} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{du}{dy} \quad : \quad \left[\frac{1}{s} \right] \quad (\text{II.3})$$

II.2.5) La viscosité :

La notion de viscosité traduit une résistance à la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluide les unes par rapport aux autres [15].

C'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. On définit différent coefficient de viscosité :

II.2.5.1) La viscosité dynamique ou apparente μ_a :

C'est le rapport de la contrainte par la vitesse de cisaillement correspondante :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \left[\frac{N.s}{m^2} \right] \quad \text{ou} \quad [Pa.s] \quad (\text{II.4})$$

II.2.5.2) La viscosité cinématique :

Elle est définie par la relation :

$$\nu = \frac{\mu_a}{\rho} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (\text{II.5})$$

avec : ρ : masse volumique du fluide.

II.2.5.3) La viscosité relative :

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

$$\eta_r = \frac{\mu_a}{\eta_s} \quad (\text{II.6})$$

où η_s est la viscosité du solvant.

II.3) Classification des fluides réels :

Il est possible d'effectuer une classification rhéologique des fluides suivant la nature des paramètres influençant leur comportement rhéologique. Nous distinguons trois catégories principales de fluides [16,17] :

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

II.3.1) Les fluides indépendants du temps :

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement τ est fonction seulement de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$.

Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien et non newtonien.

II.3.1.1) Les fluides newtoniens :

Ils sont caractérisés par l'équation rhéologique d'état :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{II.7})$$

τ : contrainte de cisaillement $[Pa]$.

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

μ : viscosité dynamique du fluide $[Pa.s]$.

La viscosité dynamique μ est indépendante de la contrainte appliquée et du temps. Elle ne dépend que de la température, de la pression et de la nature du fluide.

II.3.1.2) Les fluides non newtoniens :

Ce sont tous les fluides pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ n'est pas proportionnelle.

Les raisons du caractère non newtonien d'un fluide sont liées à la taille de particules, leurs concentrations dans la phase continue, leur nature, leur forme, leur aptitude à la déformation ou bien encore la réactivité physico-chimique de la phase continue notamment dans le cas de suspensions colloïdales.

Ils sont caractérisés par la relation générale :

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma} \quad (II.8)$$

avec μ_a : la viscosité apparente dépendant de la vitesse de déformation $[Pa.s]$

On distingue deux catégories principales de fluides non newtoniens indépendants du temps :

- Les fluides sans contrainte seuil d'écoulement.
- Les fluides à contrainte seuil d'écoulement.

II.3.1.2.1) Les fluides sans contrainte seuil :

Le comportement des fluides sans seuil d'écoulement est décrit par la plus classique des lois d'écoulement proposé par Ostwald DE Waele [18,19]; appelé loi en puissance :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (\text{II.9})$$

avec :

k : indice de consistance.

n : indice d'écoulement.

- Si $0 < n < 1$ ces fluides présentent un comportement rhéofluidifiant ou pseudo plastique. Dans ce cas la viscosité apparente de tel fluide décroît lorsque la contrainte de cisaillement s'accroît.

Parmi les fluides présentant ce type de comportement on peut citer les colles, les ciments, les polymères fondus, le savon, les suspensions détergentes, certaines peintures.

Le comportement rhéologique de ce type de fluide peut s'expliquer en admettant que les molécules où les unités structurales s'alignent progressivement dans le sens d'écoulement au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente.

L'accroissement de la vitesse de cisaillement peut provoquer la rupture des liaisons intermoléculaire et donc une diminution des interactions moléculaire ce qui justifie la diminution de la viscosité apparente.

- Si $n > 1$ le fluide est dit dilatant ou rhéoépaississant. Ils sont caractérisés par une augmentation de la viscosité apparente avec la vitesse de cisaillement. On le rencontre généralement dans le cas de dispersions très concentrées, des solutions d'amidon....

- Si $n = 1$ on retrouve le cas de fluide newtonien avec $k = \mu$.

II.3.1.2.2) Les fluides à contrainte seuil :

Ce type de fluide ne s'écoule que lorsque les contraintes exercées dépassent une certaine valeur appelée seuil d'écoulement τ_c (figure II.4).

Parmi ces fluides on cite quelques-uns dans l'industrie agro-alimentaire, tel que la mayonnaise, la moutarde, le chocolat, la margarine, ainsi que dans l'industrie chimique pétrolière tels que les peintures à huile, la pâte à papier, certaines suspensions de particules solides, les boues de forage.

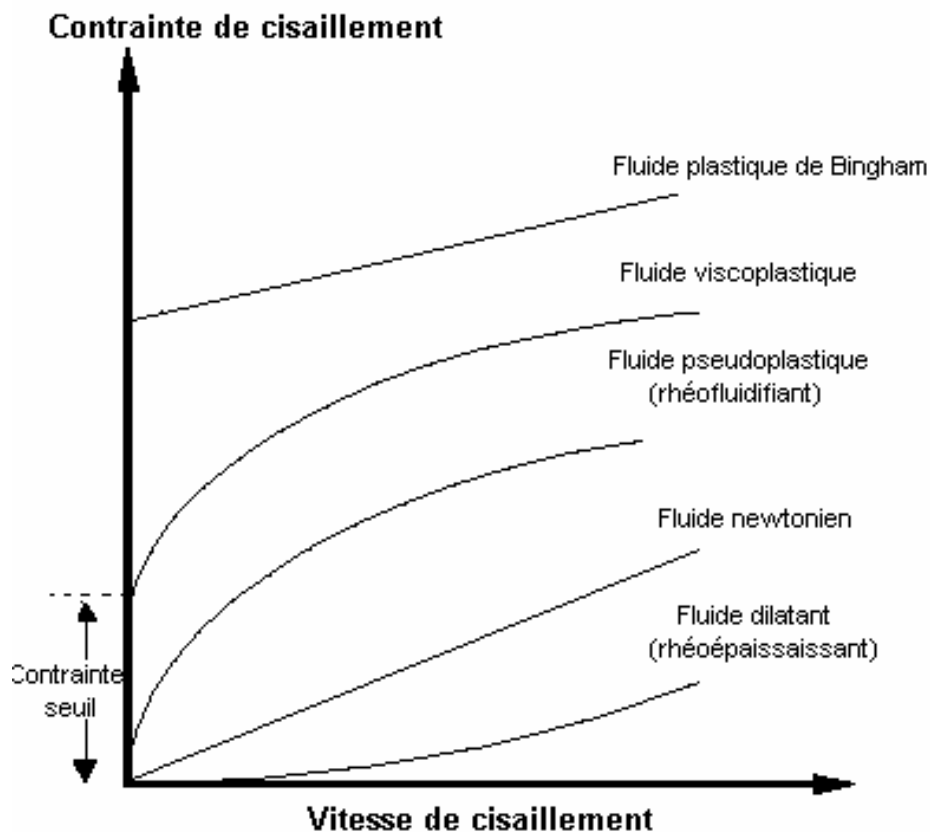


Figure II.4 : Identification des différentes courbes d'écoulement en se basant sur leur forme caractéristique

Plusieurs lois rhéologiques sont utilisées pour décrire le comportement de ce type de fluides.

- **Loi de Bingham [20]:**

$$\tau = \tau_c + \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{si } \tau > \tau_c \quad (\text{II.10})$$

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

τ_c : contrainte seuil $[Pa]$.

μ_p : viscosité plastique $[Pa.s]$.

- **Loi de Casson [21] :**

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + (\mu_\infty \dot{\gamma})^{1/2} \quad (\text{II.11})$$

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

τ_c : contrainte seuil $[Pa]$.

μ_p : viscosité plastique $[Pa.s]$.

- **Loi de Hershel Bulkley [22] :**

$$\tau = \tau_c + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{II.12})$$

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

avec :

τ_c : contrainte seuil $[Pa]$.

k : indice de consistance

n : indice d'écoulement.

- **Loi de Robertson stiff :**

$$\tau = k(\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n \quad (\text{II.13})$$

$\tau_s = k\dot{\gamma}_0^n$: seuil d'écoulement

k : indice de consistance.

n : indice d'écoulement.

- **Loi de Sisko :**

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma} + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{II.14})$$

μ_0 : viscosité à faible cisaillement.

- **Loi de Casson généralisée [23,24] :**

$$\tau = \tau_c + \mu_\infty \dot{\gamma} + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{II.15})$$

μ_∞ : viscosité à cisaillement infini.

C'est un modèle à quatre paramètres décrivant le comportement de fluides viscoplastiques [25]. Il représente une généralisation de loi de Casson classique traduisant ainsi le comportement initial du fluide et à fort taux de cisaillement.

II.3.2) Fluides dépendant du temps :

Le comportement des fluides dépendants du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne. Cette modification peut être très rapide, dans ce cas le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Par contre si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencés par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : « le temps »

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropes;

- Les fluides rhéopexes.

II.3.2.1) Les fluides thixotropes :

Ce sont des fluides dont la viscosité est une fonction décroissante de la durée de l'écoulement. Cette diminution de la viscosité est due à la destruction progressive de sa structure tridimensionnelle [26,27].

La thixotropie est un processus réversible : après suppression du cisaillement et un temps de repos suffisant, la structure initiale se régénère graduellement. Ainsi, lorsqu'on effectue une expérience de charge (cisaillement croissant) suivie d'une décharge (cisaillement décroissant) et on trace les deux rhéogrammes dans un même système d'axes, on obtient deux courbes : la courbe de retour est toujours en dessous de la courbe d'aller (figure II.5).

Les fluides thixotropes sont assez répandus dans la nature [28,29,30]. A titre d'exemple on peut citer certaines solutions huileuses, les solutions de méthylcellulose, les boues de forage et certaines émulsions...

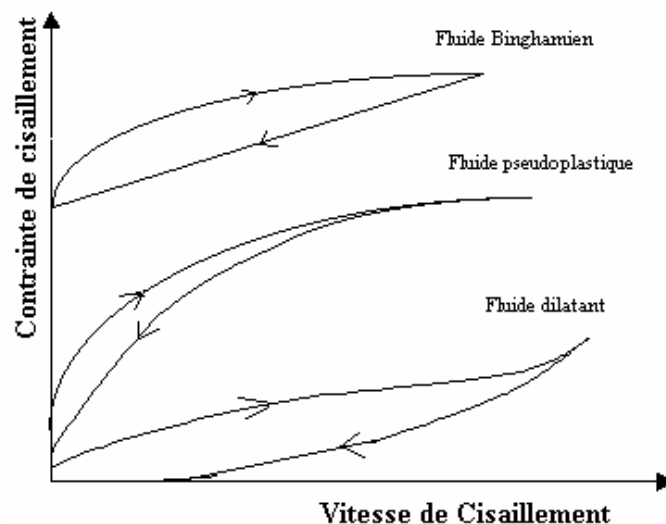


Figure II.5 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes

II.3.2.2) Les fluides rhéopexes :

Cette catégorie de fluides présente un comportement contrairement aux fluides thixotropes. Lorsqu'ils sont soumis à un faible cisaillement leurs structures interne s'organisent et par conséquent conduit à une augmentation de la viscosité.

II.3.2.3) Les fluides viscoélastiques :

Tous les matériaux présentent, à degrés divers, des propriétés viscoélastiques.

La mise en évidence de telles propriétés s'effectue par des expériences où, la sollicitation mécanique est variable avec le temps. Les résultats de telles expériences sont appelés fluage dans le cas d'une sollicitation en contrainte ou relaxation dans le cas d'une sollicitation en déformation.

II.4) Modèles issus de la théorie des milieux effectifs (Modèles structuraux)

La plupart des modèles classiques à deux ou trois paramètres dont on a cité quelques-uns auparavant ne sont valables que dans une petite gamme de vitesse de cisaillement. Ils sont généralement insuffisants pour décrire le comportement des fluides complexes dans des intervalles de cisaillement plus larges. D'où la nécessité d'utiliser des modèles plus complexes faisant intervenir quatre paramètres : les viscosités à gradient de vitesse nul μ_0 et infini μ_∞ , un indice de puissance et un taux de cisaillement critique. En effet, trois domaines caractérisent le comportement non newtonien : deux extrêmes à très faible et très fort cisaillement avec des viscosités constantes μ_0 et μ_∞ respectivement et une zone intermédiaire entre ces deux domaines de comportement rhéofluidifiant dans laquelle la viscosité diminue progressivement de μ_0 à μ_∞ .

Les trois domaines définis ci-dessus correspondent à des situations d'écoulement distinctes : pour les faibles gradient de vitesse les effets de cisaillement sont négligeables par rapport à ceux induits par le mouvement d'agitation des particules, pour les gradients élevés, les effets de cisaillement sont prépondérants et dans la zone intermédiaire les effets de cisaillement et d'agitation sont comparables.

Ces modèles sont issus de la théorie des milieux effectifs.

II.4.1) Théories en présence :

Les bases de la théorie des milieux effectifs se reposent sur les travaux d'Einstein [31,32]. Il est le premier à avoir étudié la variation de la viscosité en fonction de la fraction volumique de la phase dispersée tenant compte des hypothèses de travail suivantes :

- Les particules sont supposées sphériques rigides (non déformables),
- La phase continue ou suspendante est considérée newtonienne et incompressible,

- La fraction volumique des particules est faible afin de négliger les interactions hydrodynamiques entre sphères,
- Pas de glissement du fluide à la surface des sphères.

Einstein propose l'expression de la viscosité suivante :

$$\mu = \mu_s(1 + 2,5\phi) \quad (\text{II.16})$$

μ : viscosité de la suspension.

μ_s : viscosité de la phase suspendante.

ϕ : fraction volumique des particules.

Cette équation n'est valable que pour des faibles concentrations massiques généralement inférieures à 2%, ce qui limite son domaine d'application.

D'où pour une meilleure description du comportement des suspensions concentrées et échapper aux hypothèses imposées par la loi d'Einstein, de nombreux travaux ont été menés dans cette voie faisant intervenir des termes en ϕ^2 dans l'équation d'Einstein pour tenir compte des effets d'interaction entre les paires de particules.

En 1942 M. De Bruijn cité dans [33] prend en compte la perturbation hydrodynamique due à la présence d'autres particules, il obtient une expression de la viscosité de la forme :

$$\mu = \frac{\mu_s}{(1 - 2,5\phi + 1,552\phi^2)^2} \quad (\text{II.17})$$

En 1947, Vand [34] met en évidence l'importance des collisions entre les sphères et trouve qu'un nombre appréciable de doublets sont présent même dans les suspensions dilués. Il propose une équation de la viscosité pour une fraction volumique inférieure à 8% de la forme :

$$\mu = \mu_s(1 + 2,5\phi + 7,349\phi^2) \quad (\text{II.18})$$

En 1951, Mooney [35] introduit la théorie des milieux effectifs en appliquant l'équation d'Einstein pour des fractions volumiques maximales (ou dite de Packing) pour la phase dispersée.

Cette théorie se repose sur le principe que chaque particule «voit» autour d'elle un fluide homogène dont la viscosité dépend de la concentration en particules.

Il introduit aussi la notion d'effet d'encombrement pour interpréter les interactions entre particules en calculant un facteur d'encombrement k_e .

Il propose une expression de la viscosité de la forme :

$$\mu = \mu_s \exp \left[\frac{[\mu]\phi}{1 - k_e\phi} \right] \quad (\text{II.19})$$

μ_s : viscosité de la phase suspendante.

ϕ : fraction volumique.

k_e : facteur d'encombrement

$k_e = \frac{1}{\phi_m}$ avec ϕ_m : fraction volumique du packing.

$[\mu]$: facteur de structure.

En 1952, Roscoe [36] considère des suspensions concentrées de sphères uniformes formants des amas particulières polydisperses, en suivant l'argument de Vand sur les doublets de collisions, il obtient l'équation de la viscosité suivante :

$$\mu = \mu_s (1 - 1,35\phi)^{-2.5} \quad (\text{II.20})$$

Durant la même année également, Saito tient compte de la mise en rotation des particules flexibles dans une suspension diluée, et approxime l'équation de Navier Stokes en négligeant une partie des termes inertiels tel que :

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 u_i \quad (\text{II.21})$$

$$\sum \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

Il obtient l'expression de la viscosité :

$$\mu = \mu_s (1 + k_1 \phi + 3,75 \phi^2) \quad (\text{II.22})$$

Certains auteurs faisant intervenir un coefficient (k_h) appelé de Huggins de telle façon à écrire le terme quadratique sous la forme $k_h (2,5 \phi)^2$.

En 1959, Daugherty et Krieger [37] reprennent l'approche théorique de Mooney et considèrent que le facteur d'encombrement ne s'applique qu'à la deuxième suspension ajoutée, et la valeur de la viscosité doit être indépendante de l'ordre d'addition, ils proposent une équation de la viscosité de la forme :

$$\mu = \mu_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-[\mu] \phi_m} \quad (\text{II.23})$$

ϕ_m : fraction volumique du packing.

$[\mu]$: facteur de structure.

Tenant compte du comportement non newtonien du fluide en considérant une variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement.

Ils proposent une expression de la forme :

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \left(1 - \frac{\tau}{\tau_c} \right)^{-1} \quad (\text{II.24})$$

En 1965, Cross [38] se base sur une approche chimique selon laquelle le caractère non newtonien du fluide est lié à un ensemble de réactions chimiques réversibles qui se

traduisent par l'association et la dissociation de groupes macromoléculaires ou d'agrégats. Il propose une expression de la forme :

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + (t\dot{\gamma})^p \right]^{-1} \quad (\text{II.25})$$

t : temps caractéristique (s)

p : paramètre caractéristique du fluide étudié.

En 1966, Williams Carreau [39] propose une expression sous la même forme que celle de Cross :

$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + [(t\dot{\gamma})^2]^p \right]^{-1} \quad (\text{II.26})$$

En 1972, Batchelor et Green [40] tiennent compte des interactions hydrodynamiques de doublets de particules en absence du mouvement brownien pour des suspensions semi diluée de particules sphériques monodispersées dans un fluide newtonien, ils obtiennent que la dépendance de la viscosité en fonction de la fraction volumique fait intervenir un coefficient de Huggins égal à 1,2.

En 1977, Batchelor [41] introduit les effets du mouvement brownien dans le calcul de la viscosité. Il obtient un coefficient de Huggins égal à 1.

Durant la même année, Quemada [42] propose une relation de la viscosité en fonction de la fraction volumique $\mu(\phi)$ fondée sur le principe de dissipation minimal d'énergie.

Il obtient l'expression :

$$\mu = \mu_s \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-2} \quad (\text{II.27})$$

ϕ_m : fraction volumique du packing.

L'année suivante, il étend son modèle newtonien au domaine non newtonien, il obtient l'équation [43,44]:

$$\frac{\mu}{\mu_{\infty}} = \left[\frac{1 + (t\dot{\gamma})^p}{\chi + (t\dot{\gamma})^p} \right]^{-2} \quad (\text{II.28})$$

avec :

$$\chi = \sqrt{\frac{\mu_{\infty}}{\mu_0}}$$

Cette liste non exhaustive des différents modèles rhéologiques newtoniens et non newtoniens a permis de suivre l'évolution des idées dans cette matière.

Dans la suite nous allons déterminer les paramètres caractéristiques pour différents modèles rhéologiques classiques et structuraux.

II.5) Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'ensemble des notions rhéologiques de base.

Nous avons donné une classification des différents types de fluides.

Nous avons également présenté les différents modèles rhéologiques classiques (Hershel Bulkley, Bingham, Casson, Casson Généralisé, Ostwald) et des modèles en structure nous citons Cross et Williams Carreau que nous allons utiliser pour la corrélation de nos résultats expérimentaux.

Nous avons donné un aperçu sur les fluides dépendants du temps (thixotrope et rhéopexe) et l'intérêt qu'ils acquièrent dans l'industrie.

Une partie de ce chapitre a été réservée pour l'évolution des idées dans les modèles issus de la théorie des milieux effectifs.

CHAPITRE III

*MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE
DES SOLUTIONS POLYMERIQUES PAR UNE APPROCHE
PHENOMENOLOGIQUE*

III.1) Techniques expérimentales de viscosimétrie et Protocole expérimental :

L'étude de la rhéologie des fluides complexes consiste à établir leurs rhéogrammes ($\tau - \dot{\gamma}$) reliant la contrainte de cisaillement à la vitesse de cisaillement. Et pour ce faire, différents viscosimètres sont utilisés [45] parmi eux on cite :

- Les viscosimètres capillaires dont le principe est basé sur l'écoulement dans une conduite cylindrique.
- Les viscosimètres rotatifs dans lesquelles le fluide est cisailé entre deux cylindres coaxiaux ou entre un plan et un cône.
- Les rhéomètres à régime transitoire, utilisés pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux. Le principe consiste à exercer sur l'échantillon une sollicitation instantanée qui est maintenue constante et par la suite étudier son comportement dans les instants qui suivent.
- Les rhéomètres dynamiques, dans lesquelles l'échantillon est soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitude variant sinusoïdalement dans le temps.

III.1.1) Dispositif expérimental :

Les mesures rhéologiques que nous allons présenter dans cette partie ont été effectuées en utilisant un viscosimètre de type Couette « Low Shear 40 ». C'est un viscosimètre sophistiqué, piloté par micro-ordinateur. Il est conçu pour les tests de laboratoire (fig III.1).

III.1.1.2) Principe de fonctionnement du viscosimètre « Low Shear 40 » :

On injecte l'échantillon dans la géométrie de mesure dont les caractéristiques sont : MSDIN 406. Le rayon du cylindre intérieur égal à 3 mm, le rayon du cylindre extérieur est de 3,25 mm et la hauteur h est de 9 mm.

Le cisaillement stationnaire du fluide contenu dans ce dispositif est induit par le mouvement imposé au cylindre extérieur.



Figure III.1 : Viscosimètre Low Shear 40

Le godet de mesure thermostaté et interchangeable est entraîné par un moteur à vitesse de rotation réglée, incorporé dans l'instrument de mesure. Le corps de mesure interchangeable est relié à un ensemble pivotant, composé essentiellement d'aimants multi-pôles et d'un miroir, le tout suspendu à un fil de torsion.

Les bobines électromagnétiques, placées de manière concentrique par rapport à l'ensemble pivotant, sont fixées dans la tête de mesure.

Un dispositif photoélectrique, permet de suivre, par l'intermédiaire du miroir, l'angle de positionnement du corps de mesure. Dès qu'il se produit une déflexion due à un couple exercé sur le corps de mesure, le dispositif photoélectrique envoie par l'intermédiaire d'un amplificateur de compensation, un courant réglé qui passe à travers les bobines électromagnétiques. Il se produit alors un couple électromagnétique sur l'aimant multipôles qui s'équilibre avec le couple mécanique. Le courant réglé est proportionnel au couple appliqué sur le corps de mesure, l'affichage du couple est digital.

III.1.2) Protocole expérimental et mesures rhéologiques :

Nous allons caractériser le comportement rhéologique de deux types de polymère (HE100 et HE300) en présence de deux milieux salés 320 g/l NaCl et 30 g/l de KCl respectivement. Ces polymères sont utilisés dans les formulations de fluide de forage et spécialement pour les opérations de complétion et de workover.

Les concentrations considérées sont : 1,425 ; 2,85 ; 4,275 et 5,7 g/l.

On prépare les solutions (polymère + saumure); ensuite on les homogénéise par agitation mécanique, et on le laisse vieillir pendant 24 heures à température ambiante. On effectue ensuite les mesures rhéologiques pour différentes températures.

Nous présentons ci-après les résultats obtenus expérimentalement pour différentes concentrations de polymères et à différentes températures.

Les figures (III.2-III.5) représentent les courbes d'écoulement obtenues pour les concentrations : 1,425 ; 2,85 ; 4,275 et 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl pour différentes températures.

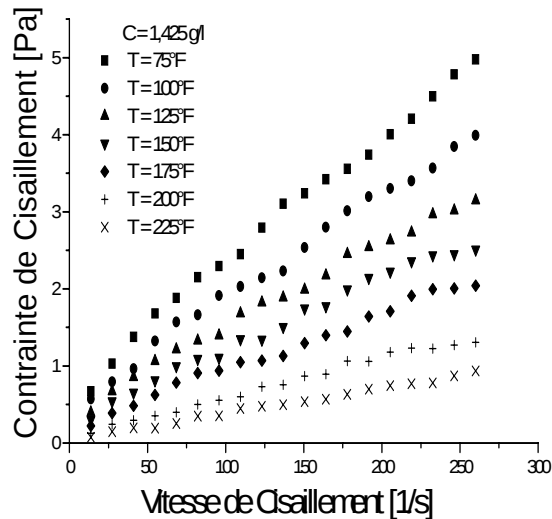


Figure III.2 : Effet de la température sur une concentration de 1,425 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

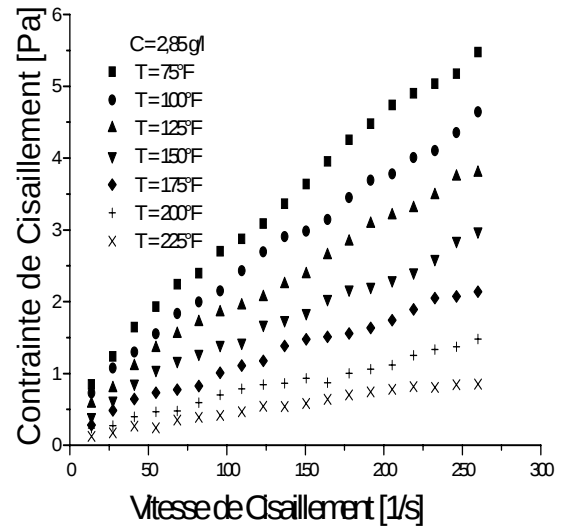


Figure III.3 : Effet de la température sur une concentration de 2,85 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

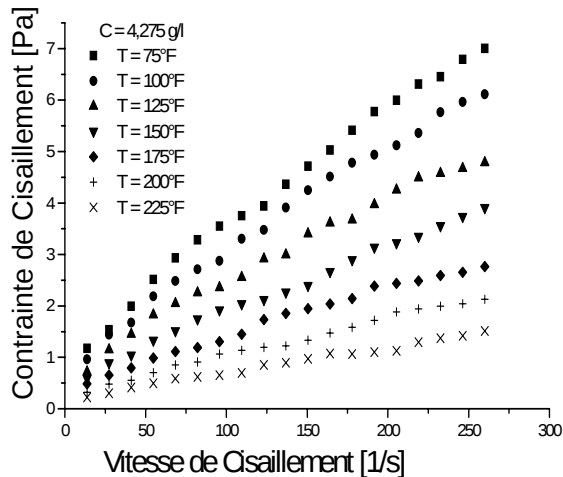


Figure III.4 : Effet de la température sur une concentration de 4,275 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

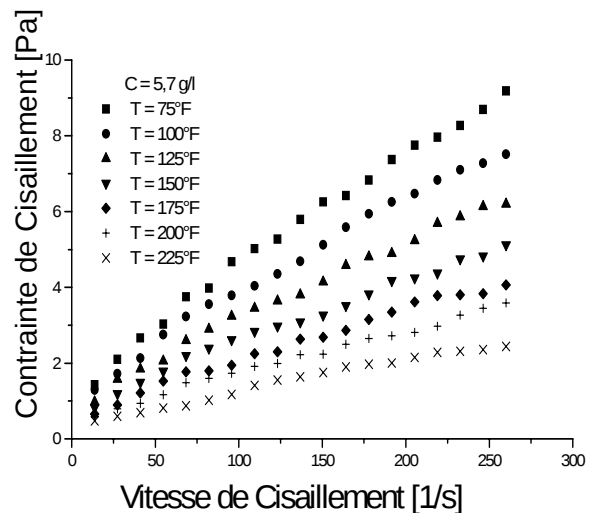


Figure III.5 : Effet de la température sur une concentration de 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

Les figures (III.6-III.9) représentent les courbes d'écoulement obtenues pour les concentrations

1,425 ; 2,85 ; 4,275 et 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl pour différentes températures.

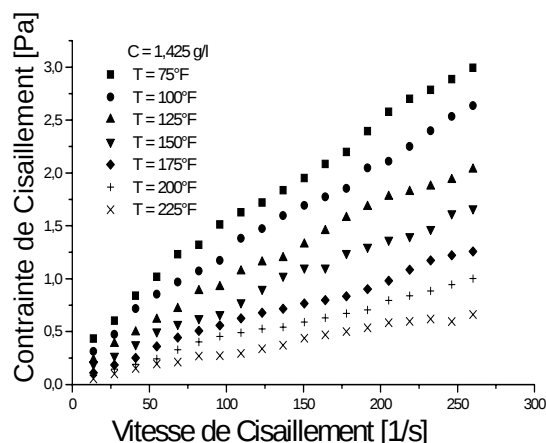


Figure III.6 : Effet de la température sur une concentration de 1,425 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

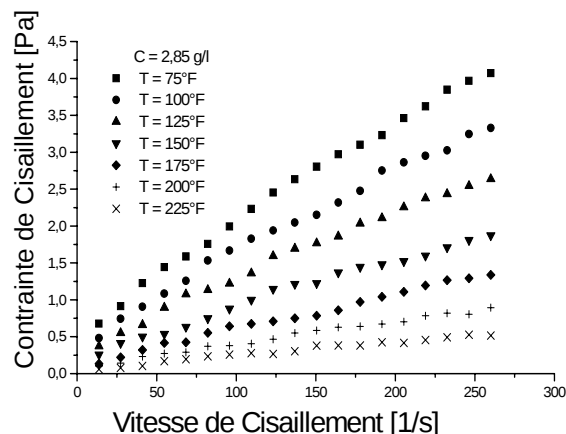


Figure III.7 : Effet de la température sur une concentration de 2,85 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

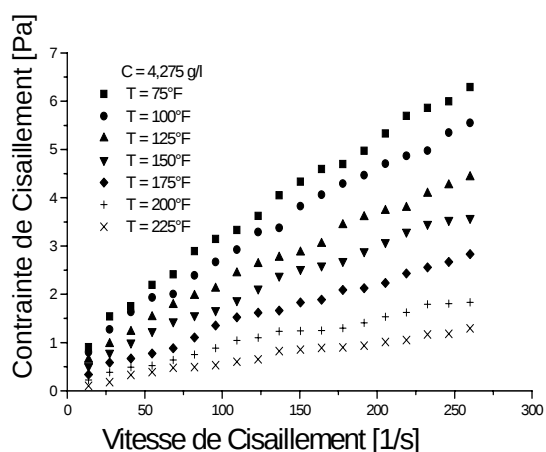


Figure III.8 : Effet de la température sur une concentration de 4,275 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

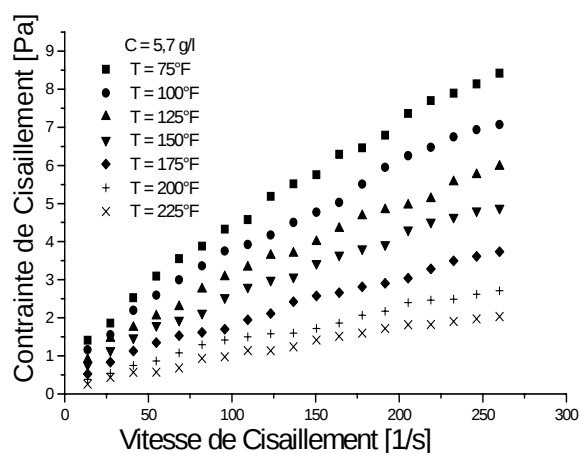


Figure III.9 : Effet de la température sur une concentration de 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Les figures (III.10-III.13) représentent les courbes d'écoulement obtenues pour les concentrations 1,425 ; 2,85l ; 4,275 et 5,7 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl pour différentes températures.

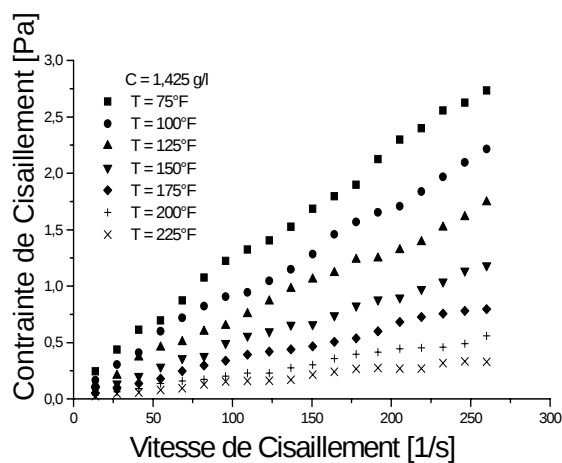


Figure III.10 : Effet de la température sur une concentration de 1,425 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

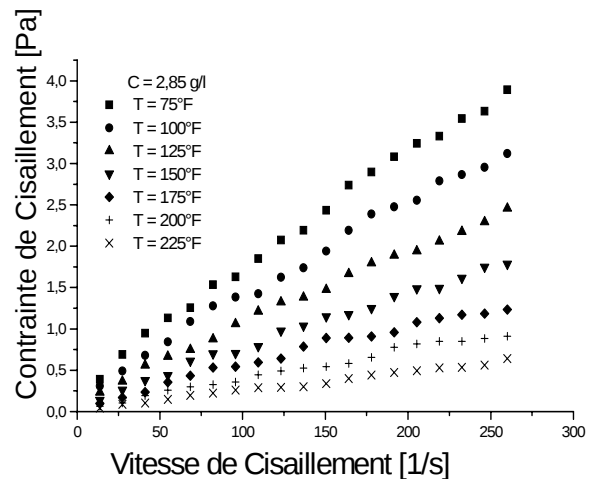


Figure III.11 : Effet de la température sur une concentration de 2,85 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

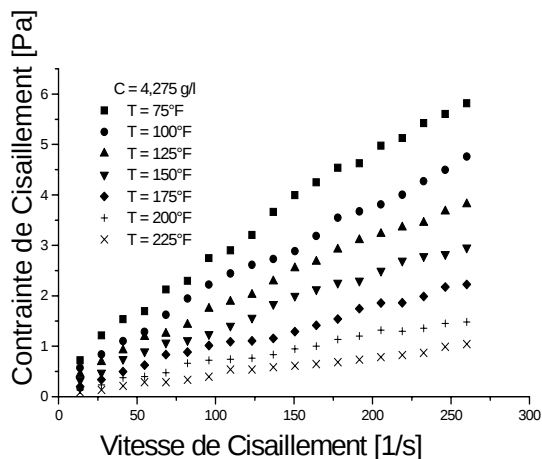


Figure III.12 : Effet de la température sur une concentration de 4,275 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl

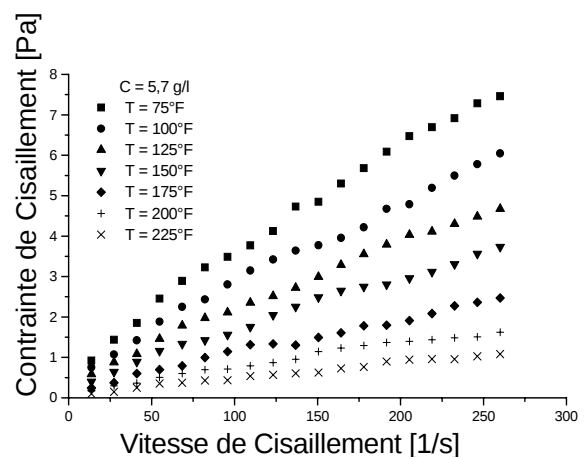


Figure III.13 : Effet de la température sur une concentration de 5,7 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl

Les figures (III.14-III.17) représentent les courbes d'écoulement obtenues pour les concentrations : 1,425 ; 2,85 ; 4,275 et 5,7 g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl pour différentes températures.

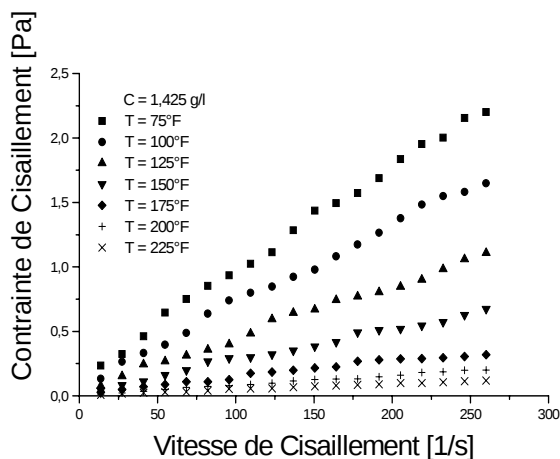


Figure III.14 : Effet de la température sur une concentration de 1,425 g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

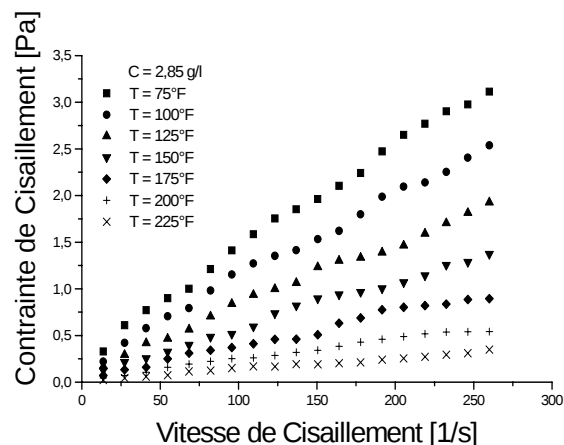


Figure III.15 : Effet de la température sur une concentration de 2,85 g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

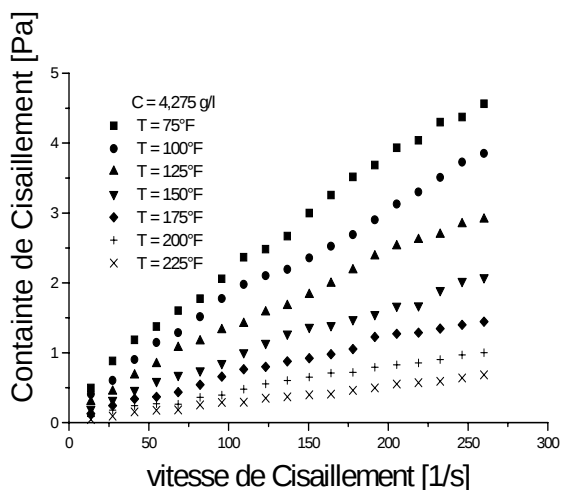


Figure III.16 : Effet de la température sur une concentration de 4,275 g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

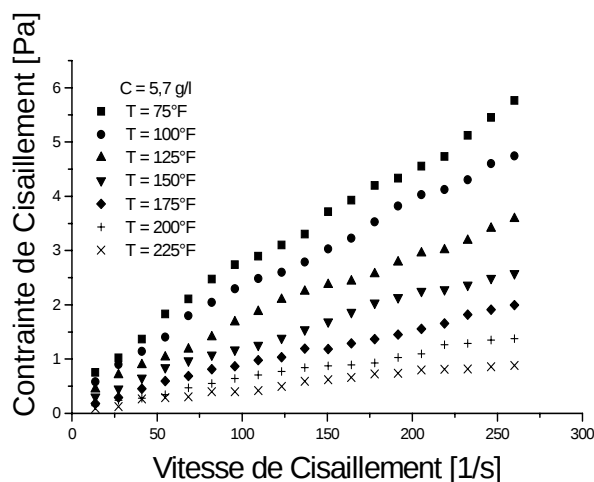


Figure III.17 : Effet de la température sur une concentration de 5,7 g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Au regard des courbes d'écoulements représentés ci-dessus, on constate que :

- Les polymères de type HE présentent un comportement non newtonien avec un faible seuil d'écoulement.
- L'origine du seuil d'écoulement peut être expliquée par le fait que les macromolécules gonflées initialement par le solvant forment un milieu continu, et sont en contact les uns des autres. Pour une contrainte de cisaillement exercée inférieure à la contrainte seuil, le système reste figé et quand la contrainte devient suffisante il se produit une rupture brutale du système favorisant ainsi l'écoulement de ce dernier [46].
- La contrainte de cisaillement prend des valeurs élevées pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl relativement aux autres expérimentations.
- Les valeurs de la contrainte de cisaillement augmentent en fonction de la concentration et décroissent en fonction de la température.
- L'élévation de la température provoque une augmentation des distances intermoléculaires, et par conséquent il en résulte des frottements plus faibles au sein du fluide et donc une viscosité également plus faible [47].
- On constate une faible valeur des contraintes de cisaillement pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl, ceci est remarquable pour les faibles concentrations du polymère et à des températures élevées.

Dans ce qui suit nous allons modéliser ces courbes d'écoulement par des modèles classiques et structuraux afin de déterminer leurs paramètres rhéologiques.

III.2) Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques par une approche phénoménologique :

III.2.1) Introduction :

A mesure que les recherches de réservoirs d'hydrocarbures s'intensifient et s'orientent vers le forage offshore où les réservoirs sont profonds, le coût d'une opération de forage devient de plus en plus en plus considérable. Ce dernier dépend principalement des performances du fluide de forage ; d'où la conception, la formulation et la maintenance des fluides de forage sont primordiales [48,49].

Les fluides de forage présentent un comportement très complexe d'où l'établissement de lois universelles pour la description de leur comportement qui reste délicat malgré l'intérêt porté pour ce domaine et les travaux consacrés pour la caractérisation du comportement rhéologique des fluides de forage [7,33,50].

La modélisation du comportement rhéologique par une approche phénoménologique consiste à modéliser les courbes d'écoulement par des modèles classiques à deux ou trois paramètres, on cite le modèle de Hershell Bulkley, Casson, Bingham, Ostwald, Newton,... Ces modèles supposent que la structure du fluide est stable et le temps d'application de la contrainte n'influe pas sur le modèle.

III.2.2) Présentation de la méthode de calcul :

Pour déterminer les paramètres rhéologiques des différents modèles étudiés qui décrivent le comportement de la substance complexe (fluide de forage), nous avons utilisé une méthode d'optimisation basée sur une régression non linéaire appelé Levenberg Marquardt [51,52]. Cette méthode présente l'avantage de condenser les deux algorithmes de Newton et du Gradient en un seul et converge même pour un estimé initial mal choisi.

III.2.2.1) Algorithme d'optimisation de Levenberg Marquardt :

Soit $\vec{x} = \langle x_i \rangle_{i=1,m}$ le vecteur des m paramètres à optimiser, et n_e ($n_e > m$) paires de points expérimentaux (x_i^e, y_i^e) pour $i = 1, n_e$.

Soit y_i^c valeur calculée par une fonction f des paramètres $\vec{x}$ et de x_i^e :

$$y_i^c = f(\vec{x}, x_i^e) \quad (\text{III.1})$$

On note E_i l'erreur absolue sur y_i^e :

$$E_i = y_i^e - y_i^c \quad (\text{III.2})$$

L'erreur au sens des moindres carrés S est donc :

$$S = \sum_{i=1}^{n_e} E_i^2 \quad (\text{III.3})$$

Le problème consiste à déterminer le vecteur optimal $\vec{x}$ qui minimise S .

L'algorithme calcule une suite de vecteur $\vec{x}_r (r=1,2,...)$ à partir d'un vecteur initial $\vec{x}^0$, suite qui converge vers $\vec{x}^*$. Le vecteur $\vec{x}^{r+1}$ est calculé à partir d'un vecteur précédent $\vec{x}^r$ par l'équation suivante :

$$\vec{x}^{r+1} = \vec{x}^r - \left[[J^r] [J^r] + \gamma^r [I] \right]^{-1} [J^r] \vec{E}^r \quad (\text{III.4})$$

où γ^r est un paramètre scalaire et $\vec{E}^r$ le vecteur erreur $\langle E_1, E_2, \dots \rangle$ à l'itération r .

La matrice $[I]$ est la matrice identité d'ordre m et $[J]$ est la matrice jacobienne d'ordre $n_e \times m$ dont l'élément J_{kl} à l'itération r est :

$$J_{kl}^r = \left. \frac{\partial E_k}{\partial x_l} \right|_{\vec{x}=\vec{x}^r} \quad k = 1, \dots, n_e; l = 1, \dots, m \quad (\text{III.5})$$

Remarque : lorsque la fonction f est connue explicitement, la matrice jacobienne $[J]$ l'est aussi ; dans le cas contraire, $[J]$ est évaluée par une méthode des différences finies. Marquardt a montré qu'il existe toujours un scalaire γ^r suffisamment grand tel que :

$$S^{r+1} < S^r \quad (\text{III.6})$$

ainsi il est clair que l'algorithme est convergent même pour une valeur mal choisie de $\vec{x}^0$.

L'étape itérative est la suivante :

Etape1 : on choisie arbitrairement le scalaire γ^0 et un paramètre $u > 1$; soit par exemple $\gamma^0 = 0.01$ et $u = 10$

Etape2 : soit $T(\gamma^r)$ et $T(\frac{\gamma^r}{u})$ les valeurs de S^r lorsque γ^r et $(\frac{\gamma^r}{u})$ sont utilisées dans

l'équation 4 à l'itération $(r - 1)$, on calcule $T(\gamma^r)$, $T(\frac{\gamma^r}{u})$ et S^{r+1}

Etape 3 :

a) si et $T(\frac{\gamma^r}{u}) < S^{r+1}$ alors $\gamma^{r+1} = \frac{\gamma^r}{u}$

b) si $T(\frac{\gamma^r}{u}) > S^{r+1}$ et $T(\gamma^r) < S^{r+1}$ alors on multiplie γ^r et γ^{r+1}

c) si $T(\frac{\gamma^r}{u}) > S^{r+1}$ et $T(\gamma^r) > S^{r+1}$ alors on multiplie γ^r par des puissances entières successives n de u jusqu'à ce que $T(\gamma^r u^n) < S^{r+1}$ et alors $\gamma^{r+1} = \gamma^r u^n$

Etape 4 : test de convergence :

a) soit $\|x_i^{r+1} - x_i^r\| < \varepsilon \quad \forall i$

b) soit $\|S^{r+1} - S^r\| < \varepsilon \quad \forall i$

s'il n'y a pas de convergence, r est incrémenté de 1 et on retourne à 2

III.2.2.2) Calcul du coefficient de dispersion :

La précision faite entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du modèle est donnée par le calcul du coefficient de dispersion :

$$D(\%) = 1/N \left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\tau_{mes} - \tau_{théo}}{\tau_{mes}} \right)^2 \right)^{1/2} \cdot 100 \quad (III.7)$$

où N étant le nombre de points expérimentaux.

III.2.3) Détermination des paramètres rhéologiques :

Les modèles rhéologiques considérés dans cette étude sont :

$$\text{Modèle d'Ostwald :} \quad \tau = k\dot{\gamma}^n \quad (\text{III.8})$$

$$\text{Modèle de Bingham :} \quad \tau = \tau_c + \mu_p \dot{\gamma} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Modèle de Casson :} \quad \tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + (\mu_\infty \dot{\gamma})^{1/2} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Modèle de Casson Généralisé :} \quad \tau = \tau_c + \eta_\infty \dot{\gamma} + k\dot{\gamma}^n \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Modèle de Hershel Bulkey :} \quad \tau = \tau_c + k\dot{\gamma}^n \quad (\text{III.12})$$

avec :

τ_c : contrainte seuil [Pa]

μ_p : viscosité plastique [Pa.s]

μ_∞ : viscosité à cisaillement infini [Pa.s]

k : indice de consistance

n : indice d'écoulement

Nous présentons dans ce qui suit les coefficients de dispersion pour les différents modèles rhéologiques considérés pour les quatre concentrations des deux types de polymères et ce, en présence des deux milieux salés respectivement (320 g/l NaCl, 30 g/l de KCl).

Tableau III.1 : Coefficient de dispersion pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l NaCl :

	1,425 g/l	2,85 g/l	4,275 g/l	5,7 g /l
Hershel Bulkey	0,800	0,725	0,651	0,593
Casson	0,997	0,899	0,840	0,765
Casson Généralisé	0,842	0,669	0,646	0,579
Ostwald	1,064	1,181	1,155	0,924
Bingham	1,744	1,622	1,682	1,885

Tableau III.2 : Coefficient de dispersion pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl :

	1,425 g/l	2,85 g/l	4,275 g/l	5,7 g /l
Hershel Bulkey	0,758	0,832	0,857	0,762
Casson	0,963	1, 014	1,038	0,979
Casson Généralisé	0,729	0,80	0,861	0,774
Ostwald	1,112	0,883	0,904	0,921
Bingham	1,898	1,548	2,269	1,902

Tableau III.3 : Coefficient de dispersion pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl :

	1,425 g/l	2,85 g/l	4,275 g/l	5,7 g /l
Hershel Bulkey	0,828	0,911	0,806	0,819
Casson	1,105	1,184	0,957	0,983
Casson Généralisé	0,866	0,886	0,788	0,80
Ostwald	0,971	1,047	1,22	0,914
Bingham	2,411	1,884	1,538	1,827

Tableau III.4 : Coefficient de dispersion pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl :

	1,425 g/l	2,85 g/l	4,275 g/l	5,7 g /l
Hershel Bulkey	0,897	0,823	0,815	0,778
Casson	1,078	0,935	0,904	0,889
Casson Généralisé	0,831	0,809	0,825	0,634
Ostwald	1,381	1,049	0,955	0,976
Bingham	1,632	1,722	2,114	2

A partir du calcul des coefficients de dispersion résumés dans les tableaux ci-dessus pour les cinq modèles, on remarque que la plus part des modèles reproduisent les courbes d'écoulement mais le modèle de Hershel Bulkley et le modèle de Casson Généralisé donnent un coefficient de dispersion plus faible donc ces deux modèles sont les mieux adaptés à modéliser le comportement des deux types de polymères.

Le modèle de Casson Généralisé est une généralisation des autres modèles classiques c.a.d les modèles de Hershel Bulkley, Casson, Bingham, Ostwald qui sont des cas particuliers du modèle de Casson Généralisé.

Donc on s'est intéressé aux résultats obtenus à partir de ce modèle.

III.2.3.1) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE100 EN PRESENCE DE 320 g/l DE NaCl :

Tableau III.5 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 1,425 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,346	0,261	0,199	0,129	0,074	0,036	0,013
μ_∞ (mPa.s)	7,124	5,310	4,182	2,908	2,245	1,195	0,817
k	0,039	0,031	0,024	0,021	0,017	0,009	0,005
n	0,758	0,774	0,779	0,790	0,793	0,844	0,854
D %	0,842	0,862	1,059	1,221	1,150	1,248	1,554

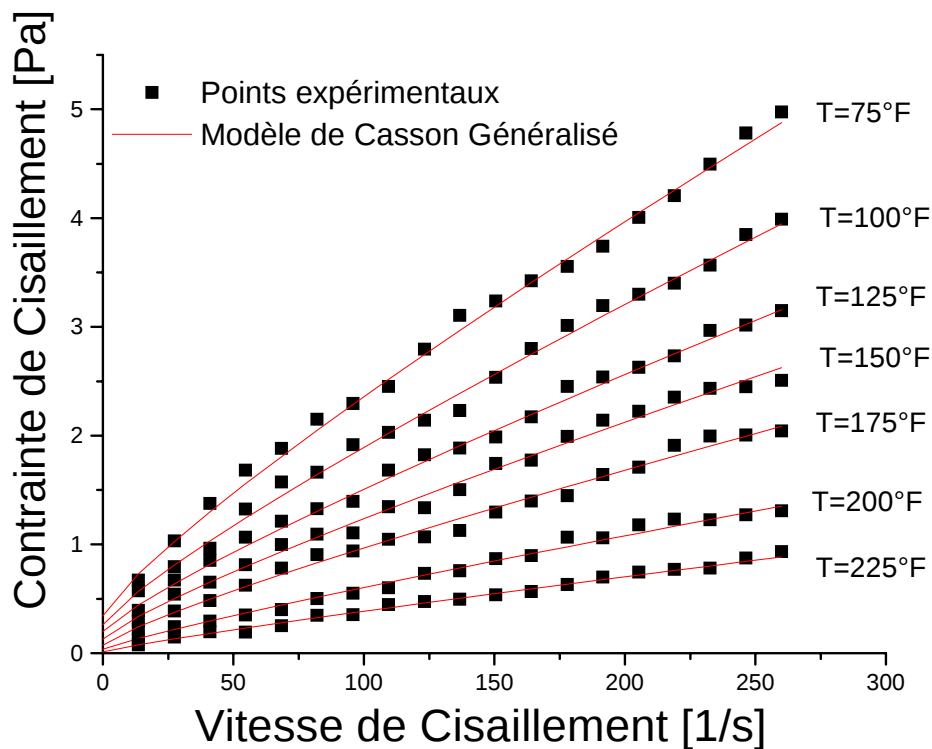


Figure III.18 : Rhéogramme ($\tau - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration C = 1,425 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.6 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l:

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,430	0,378	0,314	0,250	0,169	0,113	0,071
μ_∞ (mPa.s)	8,720	7,365	6,320	5,114	3,721	1,621	0,959
k	0,051	0,042	0,031	0,020	0,015	0,011	0,008
n	0,722	0,713	0,735	0,753	0,758	0,776	0,762
D %	0,669	0,521	0,951	1,455	1,412	1,404	1,942

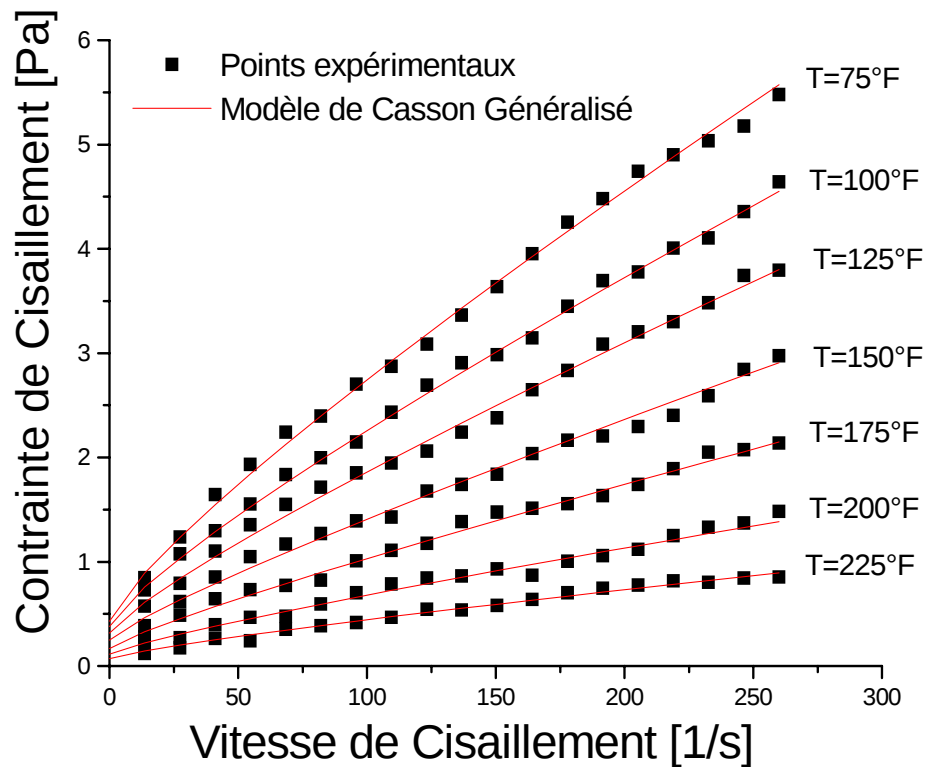


Figure III.19 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.7 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l:

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,512	0,440	0,356	0,289	0,229	0,169	0,113
μ_∞ (mPa.s)	9,785	8,421	7,235	5,974	4,318	3,120	2,070
k	0,081	0,063	0,052	0,035	0,024	0,017	0,012
n	0,704	0,725	0,710	0,723	0,742	0,747	0,758
D %	0,646	0,655	1,02	0,811	0,824	0,876	0,993

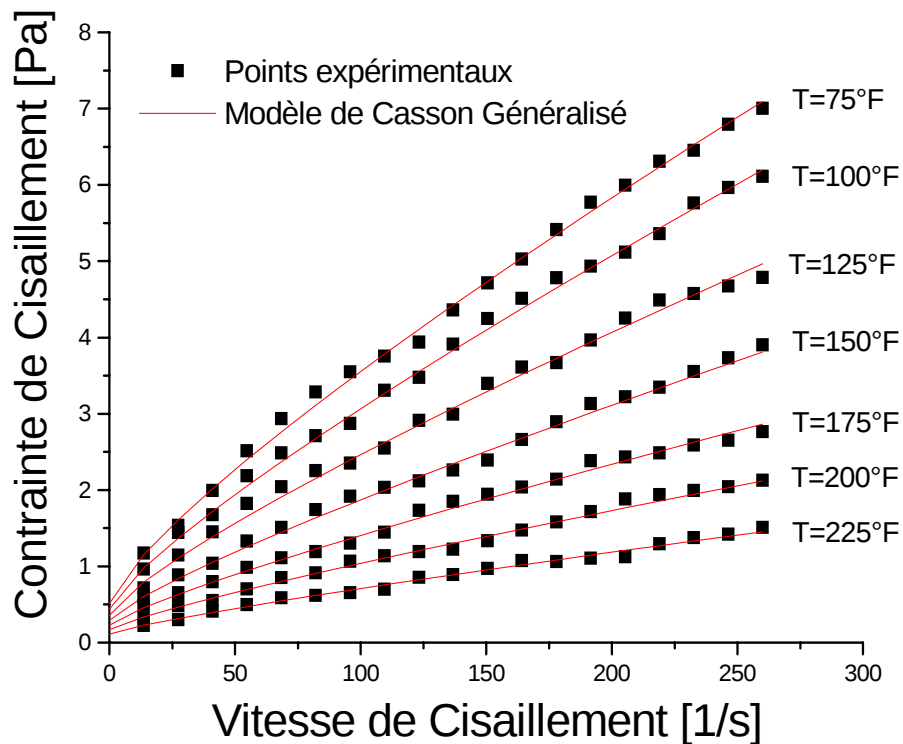


Figure III.20 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.8 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l:

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,576	0,502	0,458	0,383	0,319	0,270	0,194
μ_∞ (mPa.s)	14,30	12,14	9,425	8,124	6,801	4,564	3,340
k	0,123	0,098	0,077	0,061	0,040	0,036	0,025
n	0,657	0,665	0,679	0,673	0,711	0,725	0,736
D %	0,579	0,685	0,830	0,810	0,960	0,783	1,403

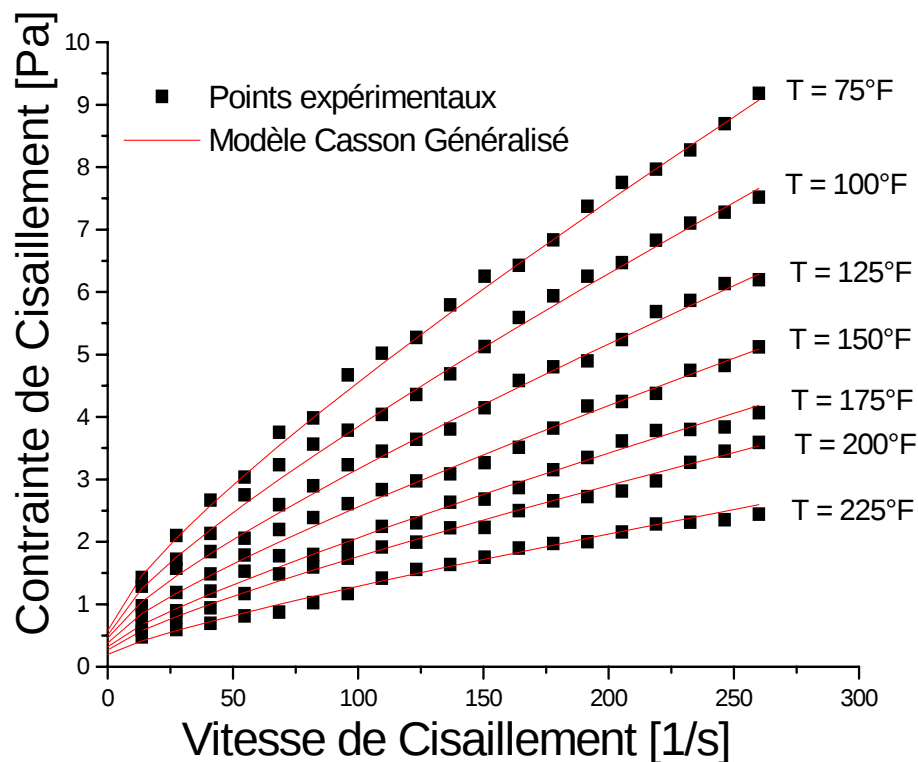


Figure III.21 : Rhéogramme ($\tau - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

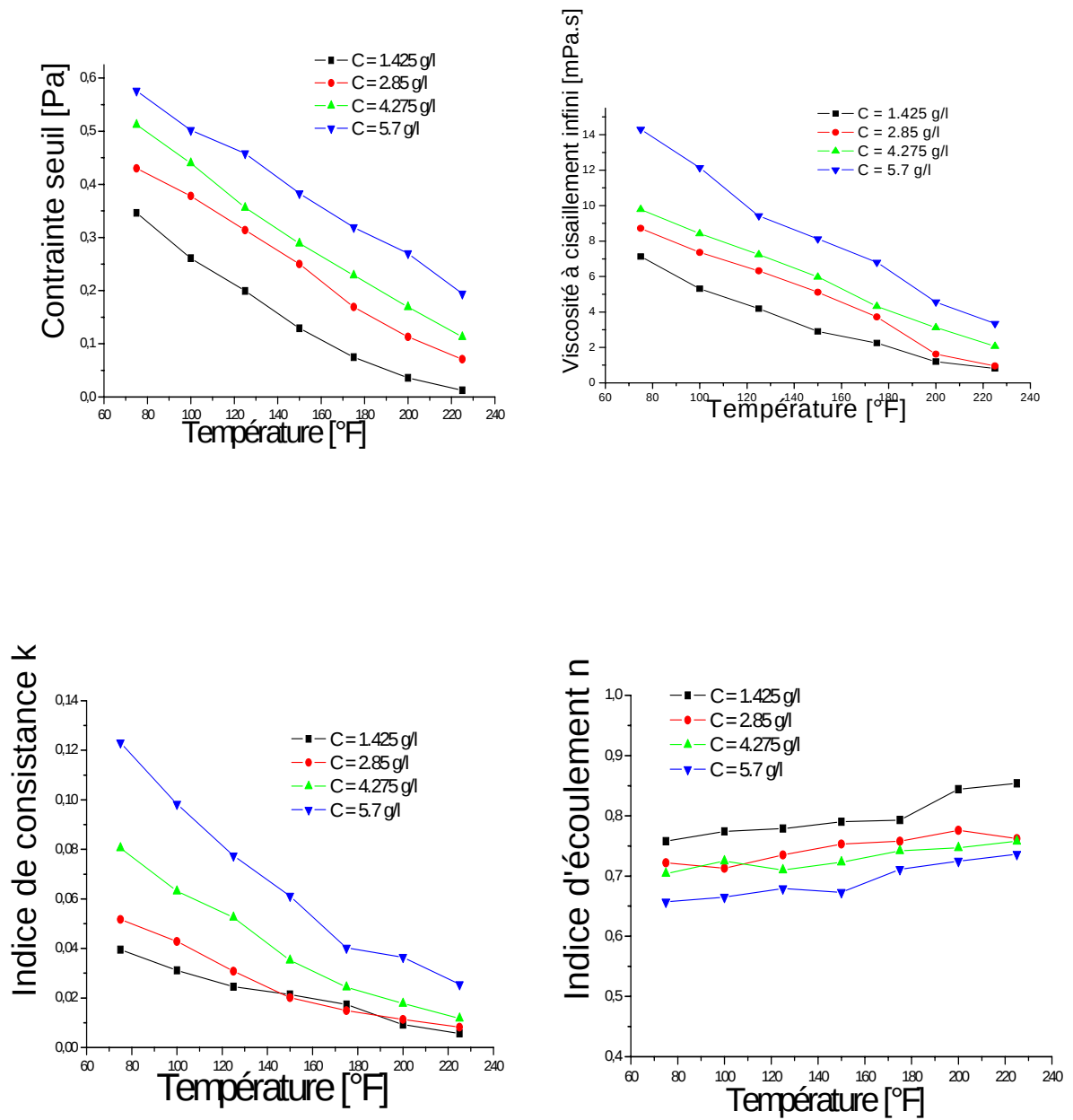


Figure III.22 : Evolution des paramètres du modèle de Casson Généralisé pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère.

On remarque que le comportement de ce type de polymère dépend de la concentration et de la température.

Les paramètres rhéologiques varient énormément en fonction de la concentration et de la température.

Les valeurs de la contrainte seuil décroissent en fonction de la température et augmentent en fonction de la concentration.

On note la même évolution que précédemment pour la viscosité à cisaillement infini ainsi que l'indice de consistance.

L'indice d'écoulement augmente légèrement en fonction de la température et décroît en fonction de la concentration, Il prend des valeurs inférieures à 1 ($0 < n < 1$), ce qui justifie le comportement rhéofluidifiant du polymère.

III.2.3.2) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE100 EN PRESENCE DE 30 g/l DE KCl :

Tableau III.9 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,183	0,114	0,070	0,035	0,014	0,006	0,003
μ_∞ (mPa.s)	2,010	1,420	1,000	0,613	0,464	0,338	0,253
k	0,032	0,025	0,018	0,015	0,0101	0,008	0,006
n	0,768	0,794	0,816	0,817	0,845	0,835	0,833
D %	0,729	0,866	0,630	0,992	1,099	1,118	1,172

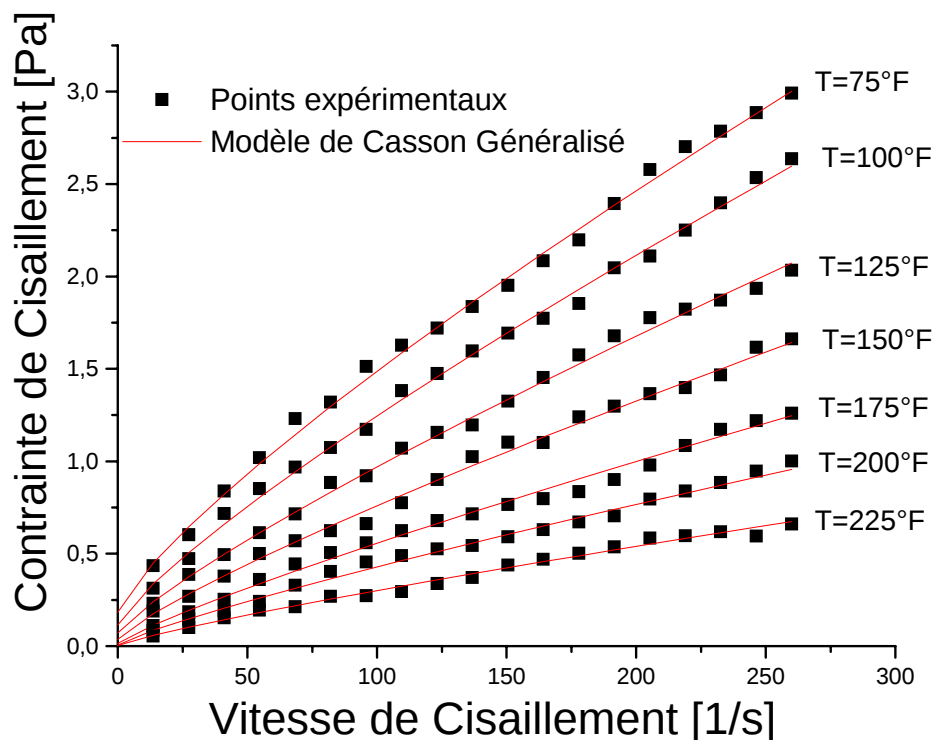


Figure III.23 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.10 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,283	0,224	0,129	0,090	0,039	0,018	0,007
μ_∞ (mPa.s)	7,840	4,120	2,898	1,785	0,984	0,714	0,466
k	0,039	0,034	0,028	0,019	0,013	0,009	0,005
n	0,690	0,735	0,753	0,754	0,782	0,768	0,777
D %	0,800	0,699	0,726	1,115	1,356	1,221	1,841

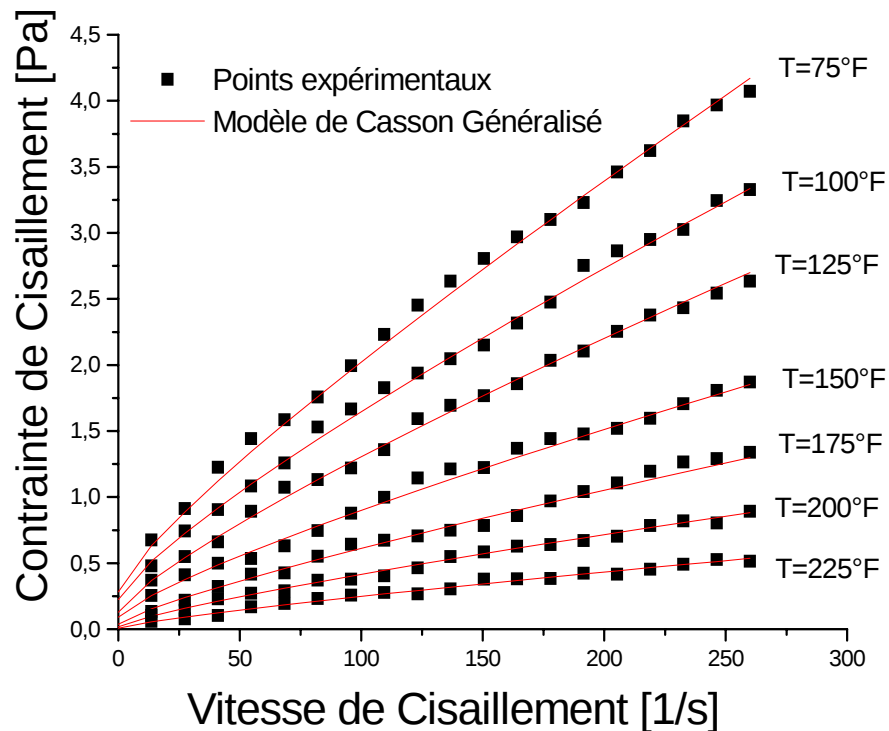


Figure III.24 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.11 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,364	0,309	0,240	0,163	0,121	0,064	0,031
μ_∞ (mPa.s)	8,785	5,520	3,930	2,872	1,100	0,838	0,628
k	0,071	0,068	0,051	0,047	0,032	0,020	0,012
n	0,705	0,722	0,741	0,729	0,769	0,783	0,806
D %	0,861	0,740	0,627	0,615	1,515	1,158	2,448

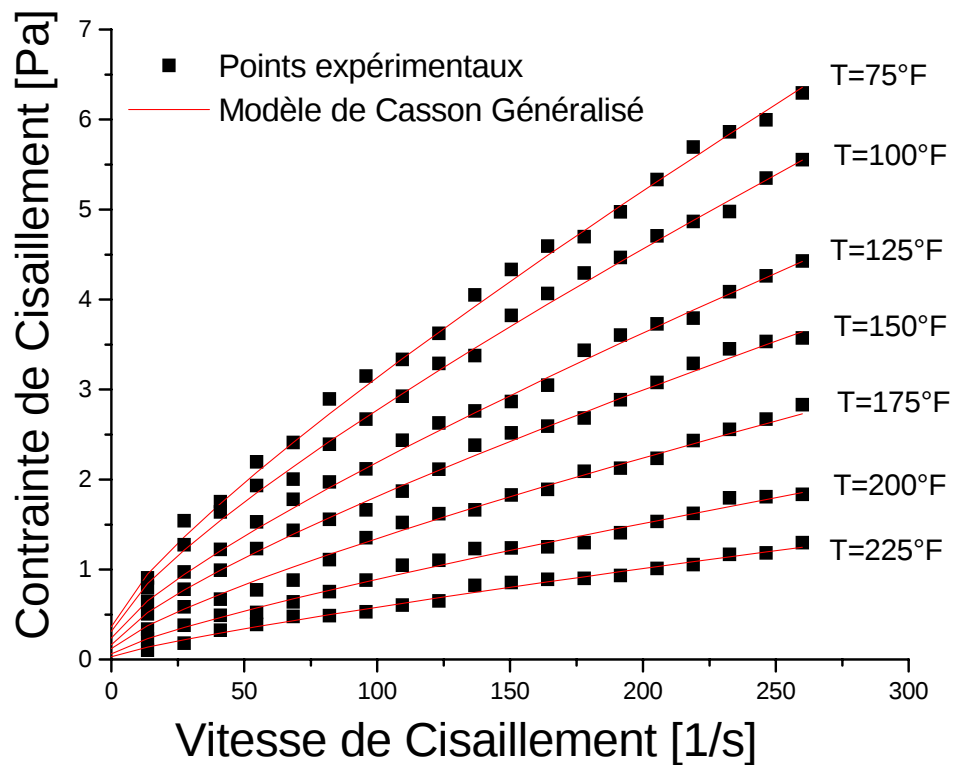


Figure III.25 : Rhéogramme ($\tau - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.12 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,415	0,362	0,314	0,263	0,187	0,115	0,068
μ_∞ (mPa.s)	9,920	8,541	6,192	4,350	2,627	1,441	0,912
k	0,127	0,096	0,078	0,067	0,044	0,031	0,023
n	0,679	0,697	0,711	0,716	0,747	0,770	0,784
D %	0,774	0,984	0,797	0,667	1,204	1,056	1,303

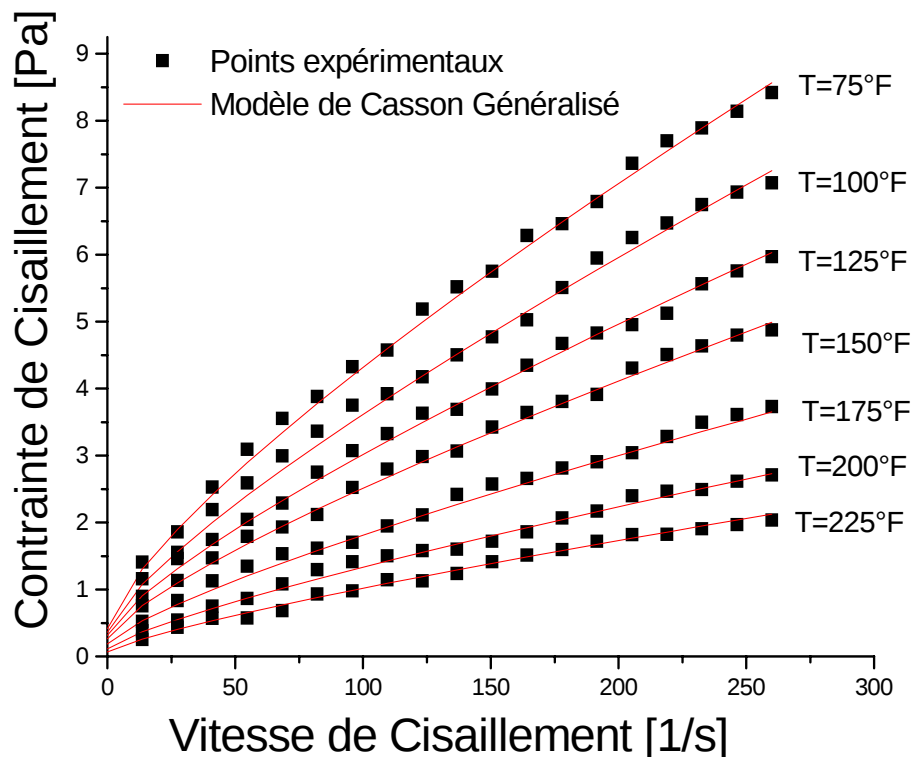


Figure III.26 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

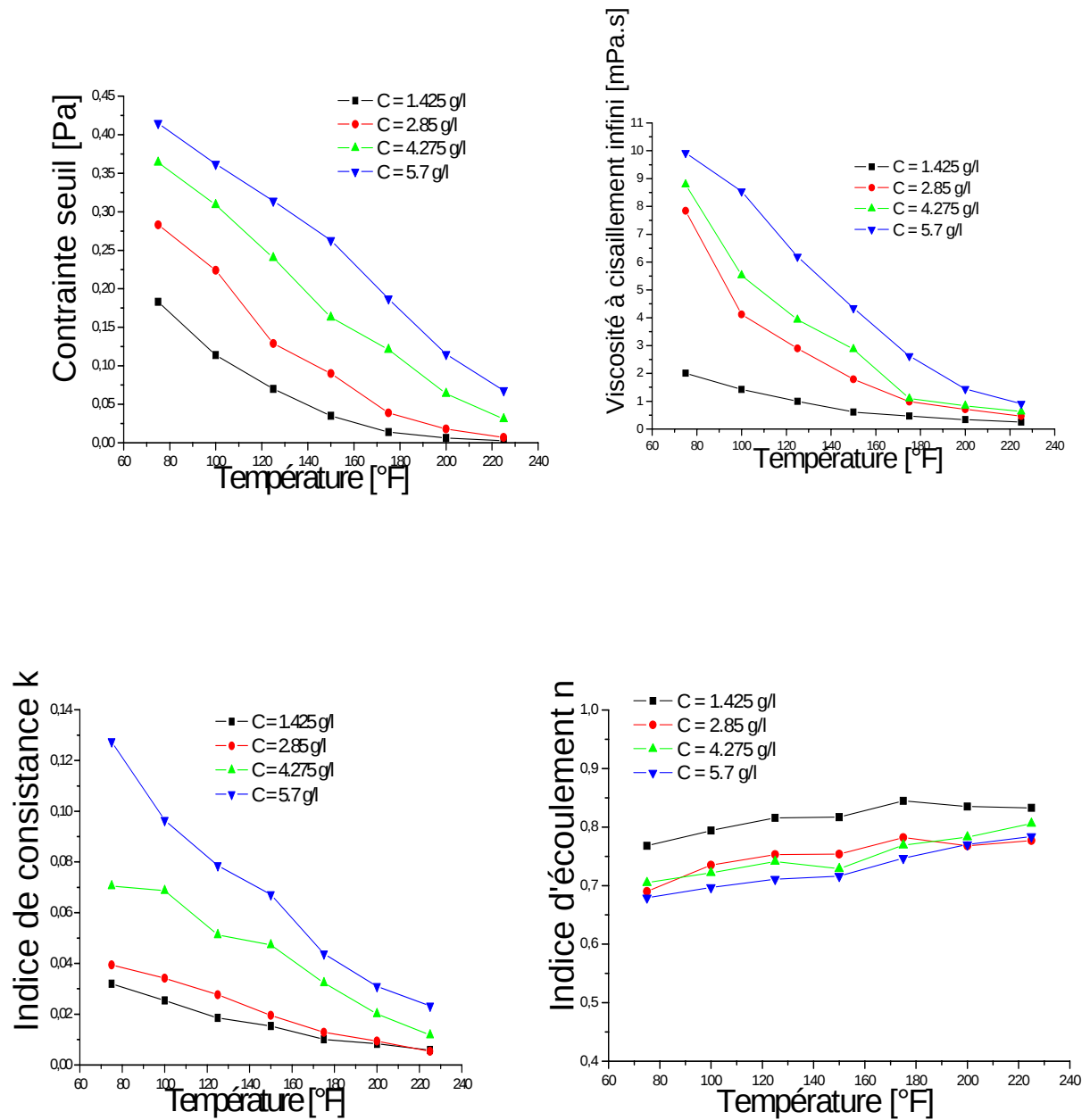


Figure III.27 : Evolution des paramètres du modèle de Casson Généralisé pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère.

Les résultats obtenus pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl sont quasiment identiques à ceux obtenus pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl sauf que les contraintes de cisaillement sont relativement faibles.

On retrouve la même évolution des paramètres rhéologiques du modèle de Casson Généralisé par rapport aux précédents, tout en notant que les valeurs du seuil d'écoulement, viscosité à cisaillement infini et l'indice de consistance sont relativement faible par rapport à ceux obtenus pour HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

L'indice d'écoulement reste pratiquement dans le même domaine d'évolution ($0 < n < 1$), ce qui explique le comportement rhéofluidifiant du polymère.

III.2.3.3) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 320 g/l DE NaCl :

Tableau III.13 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,085	0,045	0,019	0,0042	0,0026	0,0009	0,0007
μ_∞ (mPa.s)	1,310	1,029	0,654	0,423	0,276	0,159	0,0614
K	0,015	0,012	0,01	0,006	0,004	0,003	0,002
n	0,902	0,907	0,891	0,916	0,921	0,920	0,919
D %	0,831	1,173	1,168	1,068	1,113	1,318	1,756

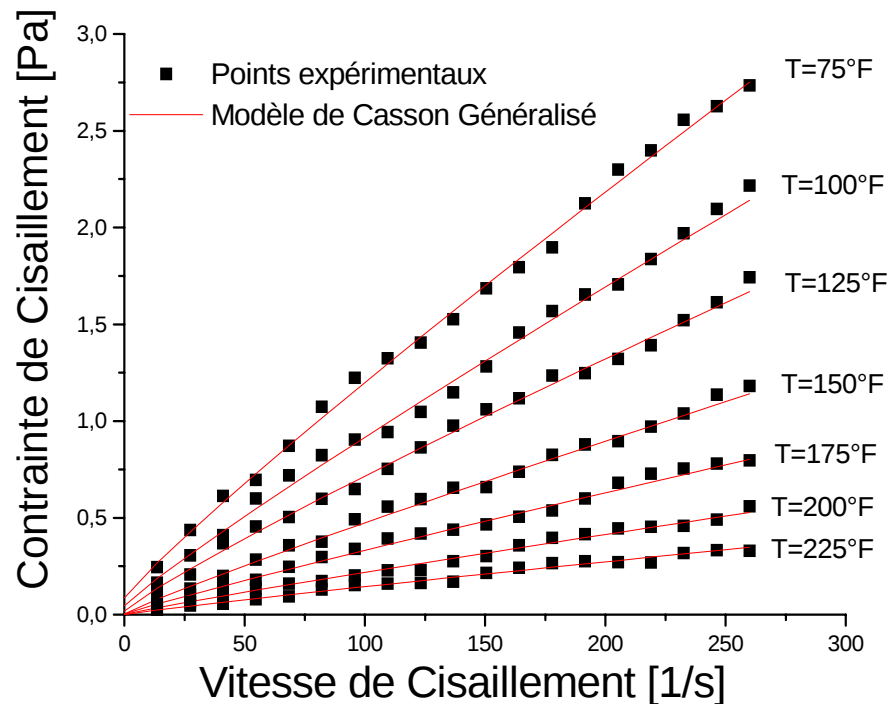


Figure III.28 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.14 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,139	0,087	0,056	0,022	0,0089	0,0055	0,0026
μ_∞ (mPa.s)	1,984	1,210	0,796	0,575	0,324	0,189	0,123
k	0,026	0,021	0,017	0,012	0,008	0,006	0,0041
n	0,868	0,879	0,871	0,878	0,893	0,889	0,890
D %	0,809	0,779	0,705	1,093	1,371	1,726	1,341

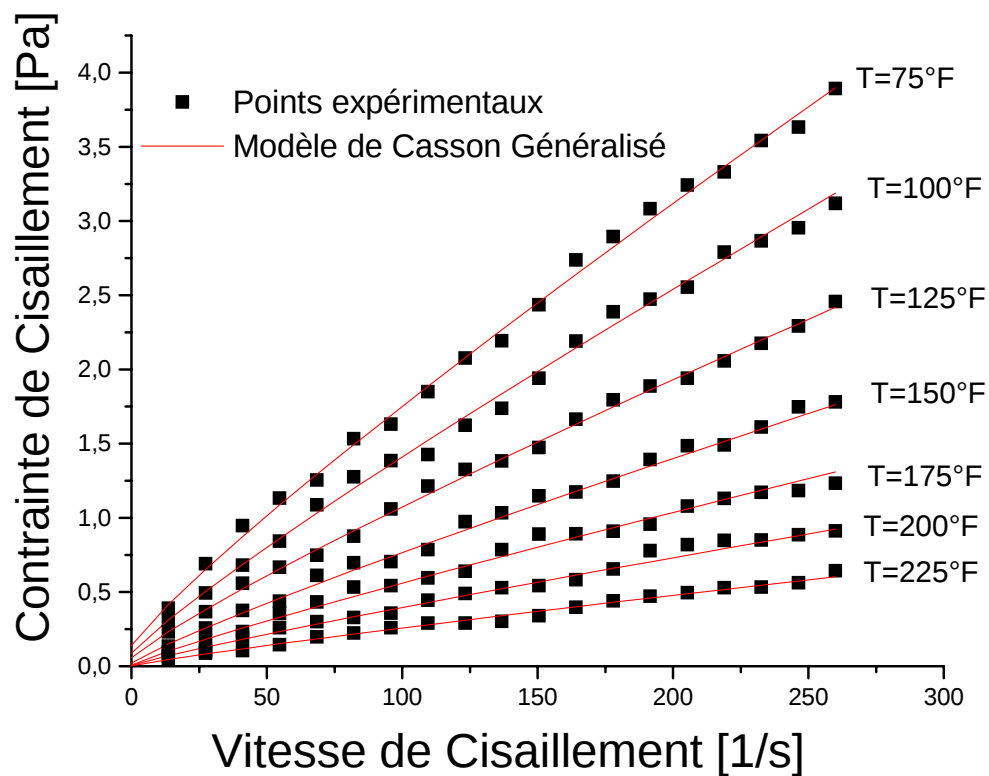


Figure III.29 : Rhéogramme ($\tau - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.15 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,247	0,194	0,125	0,088	0,058	0,028	0,012
μ_∞ (mPa.s)	2,303	1,866	1,398	0,989	0,726	0,478	0,292
K	0,051	0,038	0,032	0,024	0,017	0,012	0,007
n	0,831	0,837	0,836	0,844	0,849	0,850	0,853
D %	0,825	0,684	0,737	1,006	1,436	1,367	1,419

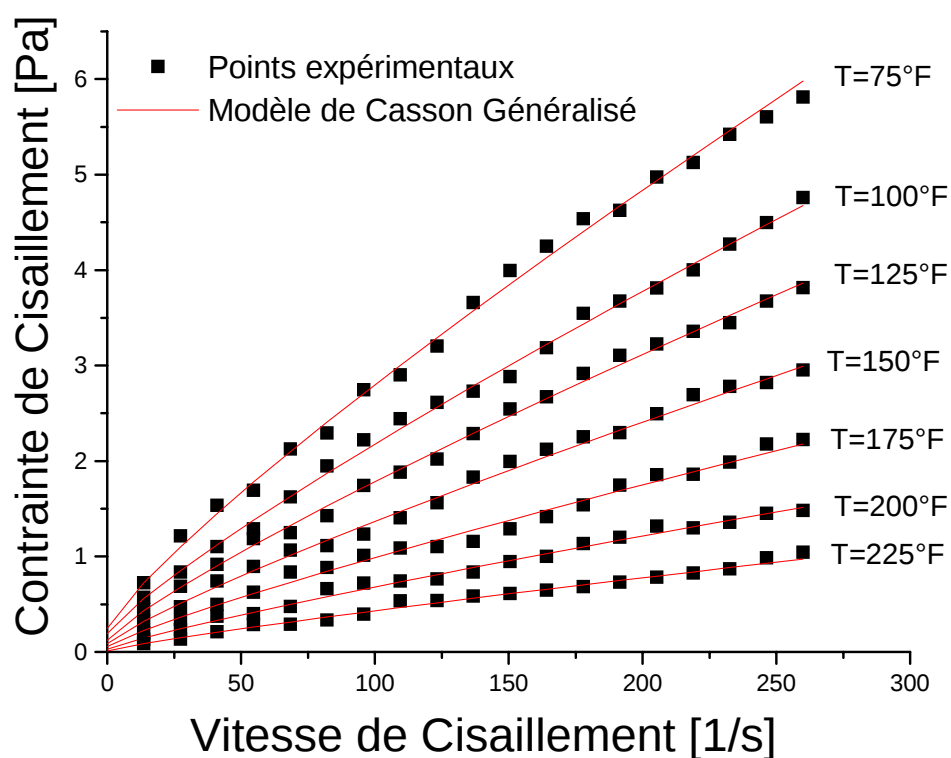


Figure III.30 : Rhéogramme ($\tau - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau III.16 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,327	0,284	0,196	0,114	0,076	0,051	0,029
μ_∞ (mPa.s)	3,362	2,264	1,615	1,014	0,778	0,605	0,381
K	0,070	0,055	0,041	0,031	0,019	0,014	0,009
n	0,810	0,811	0,827	0,836	0,838	0,839	0,838
D %	0,634	0,781	0,680	0,836	1,282	1,100	1,821

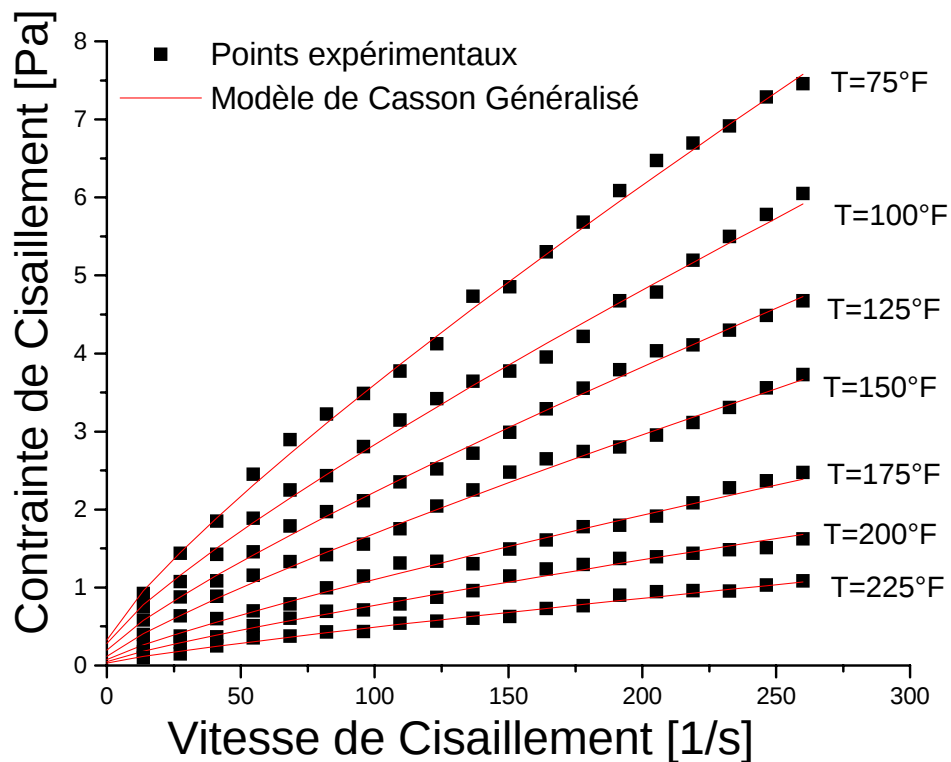


Figure III.31 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

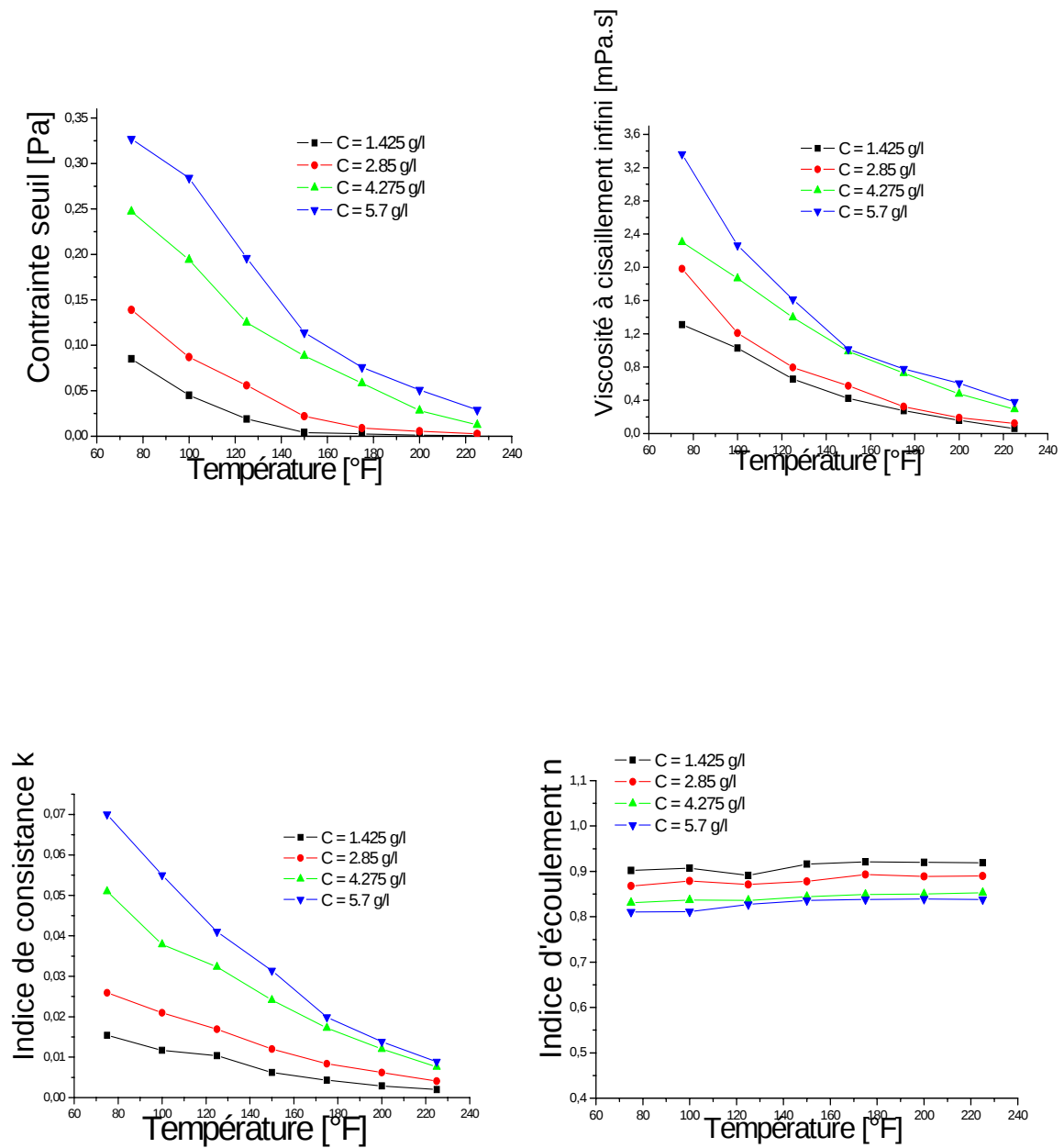


Figure III.32 : Evolution des paramètres du modèle de Casson Généralisé pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère.

On note la même évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl qu'aux précédents avec des valeurs de contraintes de cisaillement plus faible.

Le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl présente un seuil d'écoulement qui varie en fonction de la concentration et de la température et prend des valeurs pratiquement faibles comparativement aux cas précédents.

On note la même évolution pour la viscosité à cisaillement infini.

L'indice d'écoulement et l'indice de consistance conserve la même évolution que les situations précédentes.

Le comportement rhéofluidifiant du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl est confirmé par les valeurs de l'indice d'écoulement et qui sont toujours inférieures à 1.

III.2.3.4) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 30 g/l de KCl :

Tableau III.17 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,064	0,024	0,006	0,0017	0,0008	0,0003	0,00009
μ_∞ (mPa.s)	1,073	0,761	0,284	0,118	0,058	0,041	0,009
k	0,013	0,01	0,006	0,004	0,002	0,001	0,0007
n	0,881	0,887	0,9	0,912	0,901	0,91	0,901
D %	0,866	1,004	1,207	1,269	1,697	1,397	1,505

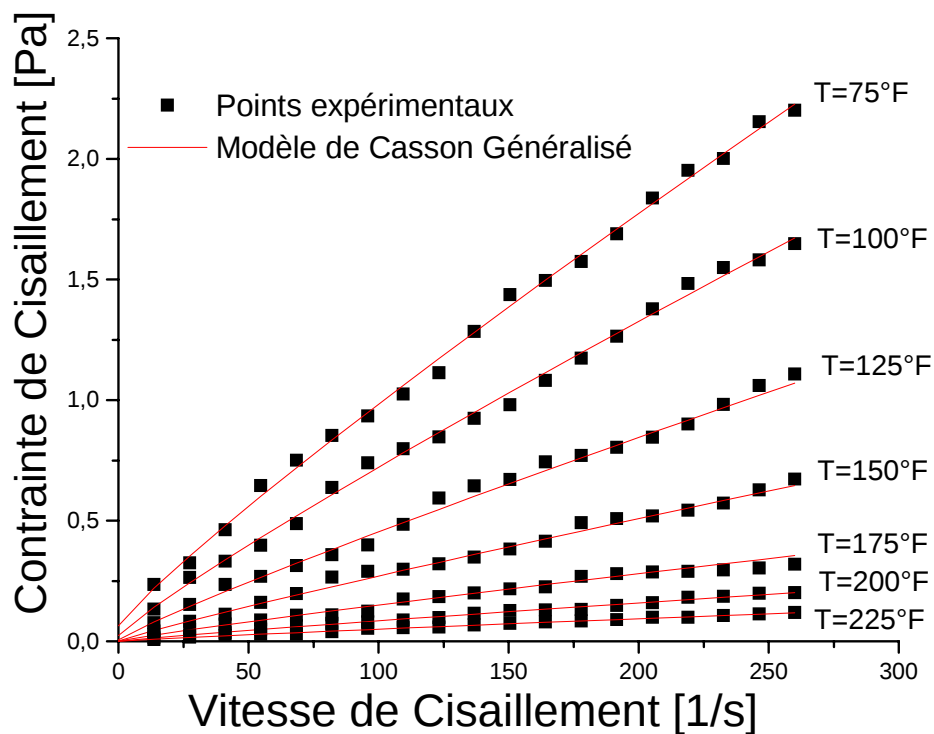


Figure III.33 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.18 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,095	0,054	0,019	0,005	0,0019	0,006	0,0002
μ_∞ (mPa.s)	1,355	0,921	0,549	0,323	0,183	0,105	0,060
K	0,024	0,019	0,015	0,01	0,006	0,004	0,002
n	0,845	0,851	0,844	0,863	0,887	0,882	0,875
D %	0,886	0,945	0,871	1,395	1,614	1,228	1,676

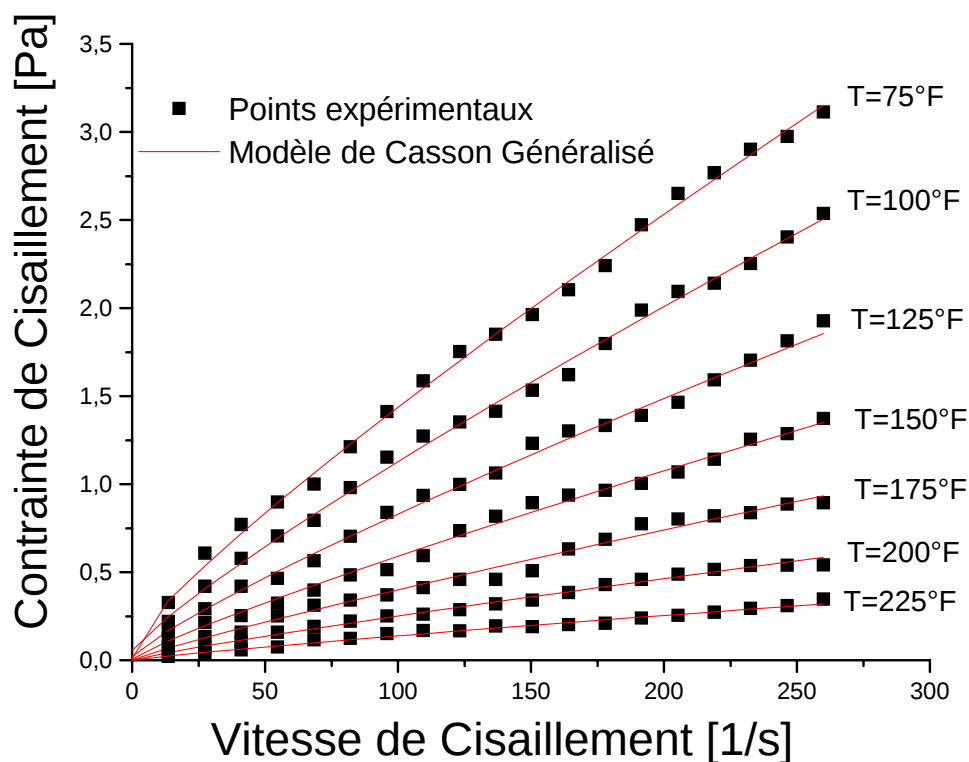


Figure III.34 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.19 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,154	0,110	0,06	0,026	0,008	0,005	0,001
μ_∞ (mPa.s)	1,755	1,389	0,920	0,666	0,385	0,231	0,089
K	0,041	0,034	0,025	0,017	0,012	0,008	0,003
n	0,825	0,823	0,837	0,845	0,844	0,852	0,853
D %	0,788	0,808	0,784	0,803	1,104	1,773	1,489

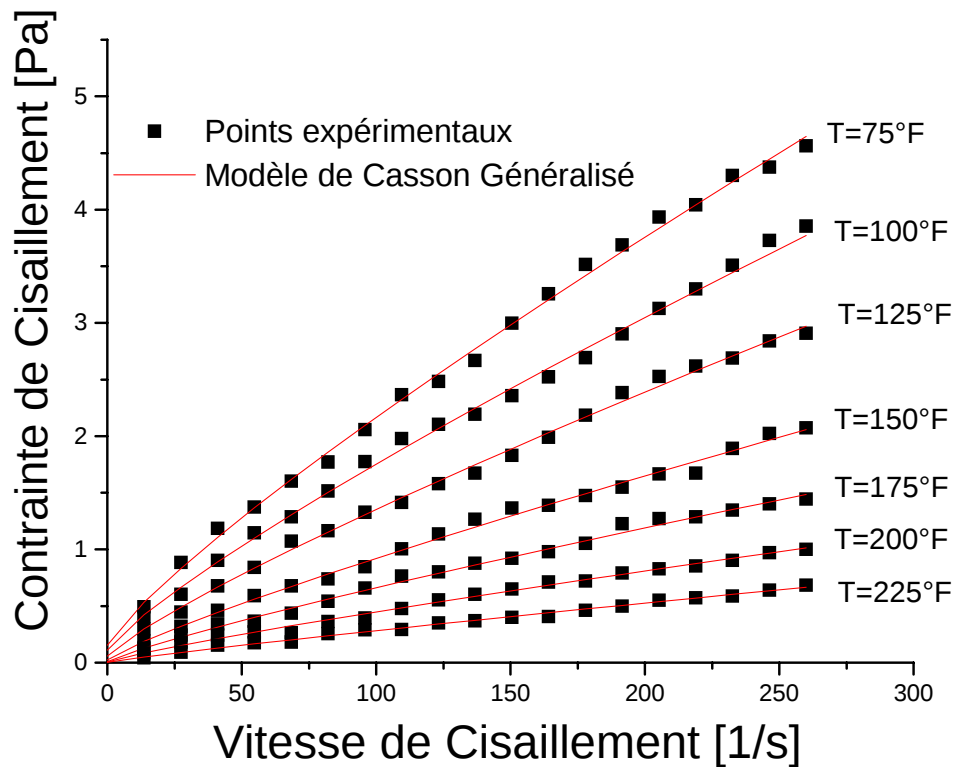


Figure III.35 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau III.20 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Casson généralisé pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
τ_0 (Pa)	0,234	0,166	0,101	0,063	0,029	0,011	0,003
μ_∞ (mPa.s)	2,511	1,838	1,124	0,816	0,572	0,349	0,203
k	0,061	0,05	0,04	0,028	0,021	0,014	0,010
n	0,780	0,791	0,785	0,793	0,794	0,810	0,802
D %	0,800	0,605	0,846	0,802	1,281	1,291	1,968

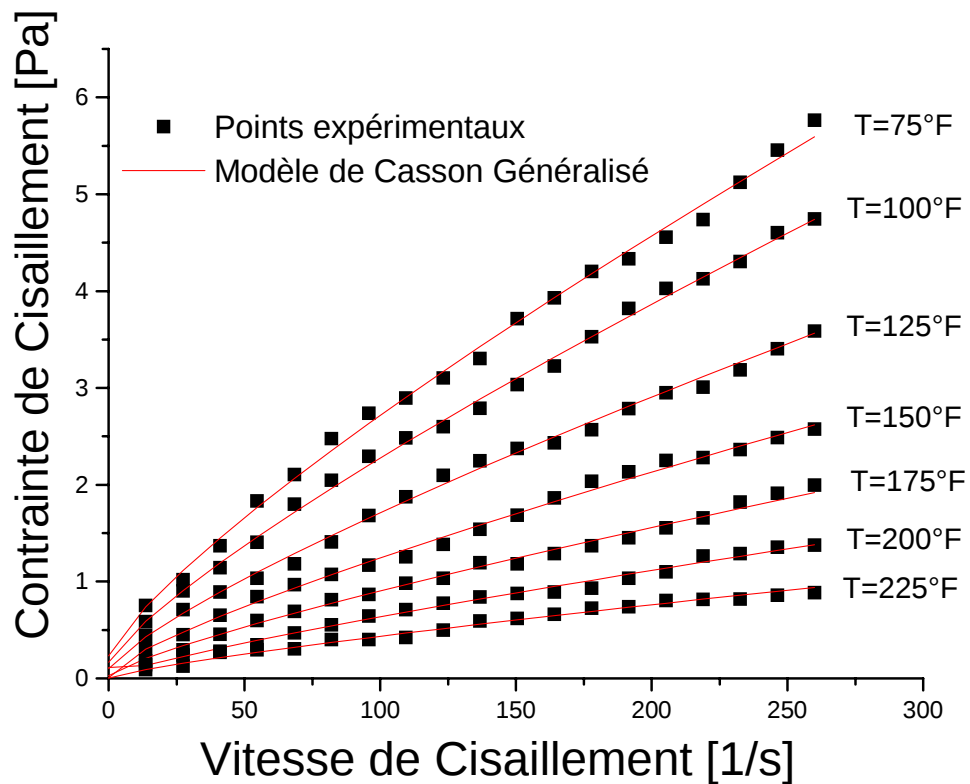


Figure III.36 : Rhéogramme $(\tau - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Casson généralisé pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

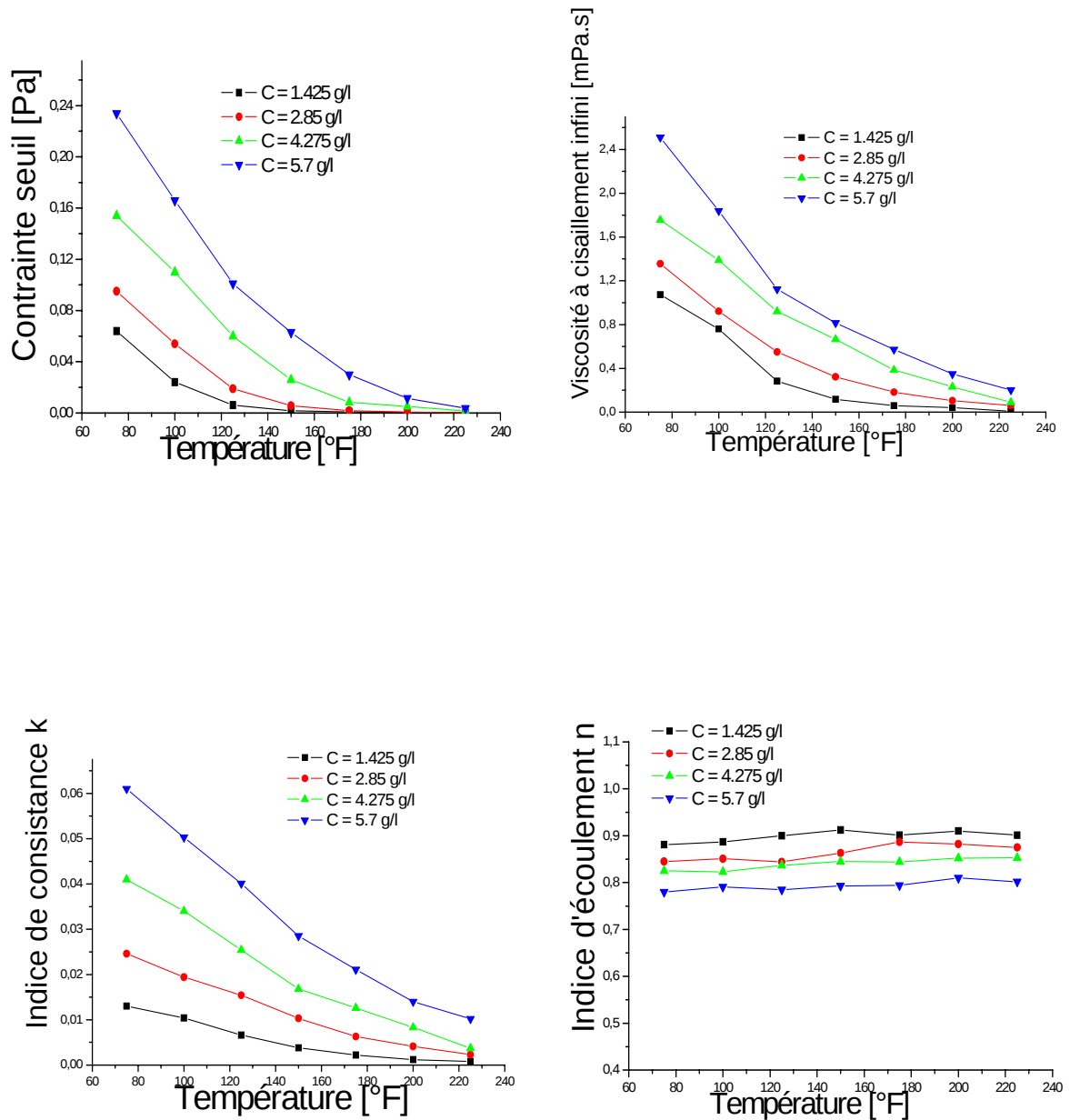


Figure III.37 : Evolution des paramètres du modèle de Casson Généralisé pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère.

Le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl conserve le comportement rhéofluidifiant tout en notant que les contraintes de cisaillement sont plus faibles.

Le seuil d'écoulement, la viscosité à cisaillement infini et l'indice de consistance sont aussi plus faibles.

Les valeurs de l'indice d'écoulement tendent vers « 1 » pour une faible concentration et à températures élevées, ce qui peut être expliqué par le fait que le polymère tend vers un fluide newtonien.

III.3) Conclusion :

Nous avons caractérisé le comportement rhéologique de deux types de polymères HE100, HE300 en présence de deux milieux salés respectivement 320 g/l de NaCl et 30 g/l de KCl pour différentes concentrations de polymère, en régime stationnaire.

On a étudié également l'influence de la température sur le comportement rhéologique de ces polymères.

L'étude a montré une évolution du comportement rhéologique des deux polymères en fonction de la concentration, de la température et de la salinité [53].

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation des courbes d'écoulement par des modèles classiques (Hershel Bulkley, Bingham, Casson, Casson Généralisé, Ostwald), et parmi ces modèles nous avons présenté les paramètres obtenus à partir du modèle de Casson Généralisé qui donne une bonne concordance avec les valeurs expérimentales tout en notant que le modèle de Hershel Bulkley présente des coefficients de dispersion proche de ceux de Casson Généralisé.

On constate que le seuil d'écoulement ainsi que la viscosité à cisaillement infini augmentent en fonction de la concentration et décroissent en fonction de la température pour tous les échantillons étudiés.

Cette modélisation a permis d'obtenir un indice d'écoulement noté « n » inférieur à « 1 » pour les deux types de polymères en présence des deux milieux salés 320 g/l de NaCl et 30 g/l de KCl ce qui permet de conclure que le comportement des deux polymères est rhéofluidifiant [54,55].

A partir de ces résultats, nous concluons que le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl résiste mieux à la température.

CHAPITRE IV

MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE
DES SOLUTIONS POLYMERIQUES PAR UNE APPROCHE
MICROSCOPIQUE

IV.1) Introduction :

Les fluides de forage appelés aussi boues de forage caractérisés par leurs densités et leurs complexités peuvent conduire aux graves incidents apparaissant dans la conduite des opérations de forage et dans l'exploitation future d'un puits. Dans le premier cas, ces problèmes peuvent être la cause d'une interruption ou d'un arrêt complet du forage [59]. Dans le deuxième cas, ils peuvent faire chuter considérablement la productivité du puits. La complexité du forage d'un puits est liée étroitement aux performances rhéologiques et de filtrations de la boue utilisée. C'est pour cela, une grande attention a été prise en considération pour l'amélioration de ces caractéristiques par l'ajout de plusieurs additifs tel que les polymères [60].

Dans cette partie nous utilisons une approche microscopique pour modéliser les courbes d'écoulements. Cette approche est issue d'une théorie appelée « théorie des milieux effectifs » introduite par Mooney et Daugherty Krieger dont les bases reviennent aux travaux d'Einstein en 1906 et 1911.

Ces modèles introduisent la notion de fraction volumique de la phase dispersée et tiennent compte de l'évolution de la structure de la substance sous l'effet de cisaillement. Ils sont aussi appelés modèles en structure, on cite parmi eux: modèle de Dougherty Krieger, Cross, Williams Carreau et Quemada.

Ils subdivisent le rhéogramme décrivant le comportement du fluide en trois domaines : une zone pour les faibles gradients de cisaillement caractérisée par une viscosité à cisaillement nul μ_0 et une zone pour les forts gradients de cisaillement caractérisée par une viscosité à cisaillement infini μ_∞ et une zone intermédiaire dans laquelle la viscosité décroît de μ_0 à μ_∞ .

IV.2) Modélisation du comportement rhéologique des solutions polymériques par des modèles structuraux :

Nous allons déterminer les paramètres rhéologiques de deux modèles structuraux : modèle de Cross et de Williams Carreau, qui sont d'après la littérature les

modèles les plus appropriés pour décrire le comportement rhéologique des polymères.

Nous utilisons la méthode d'optimisation de Levenberg-Marquardt cité dans le chapitre précédent pour déterminer les paramètres rhéologiques.

Modèle de Cross :
$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + (t\dot{\gamma})^p\right]^{-1} \quad (V.1)$$

Modèle de Williams Carreau :
$$\frac{\mu - \mu_{\infty}}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \left[1 + [(t\dot{\gamma})^2]^p\right]^{-1} \quad (IV.2)$$

Avec :

μ_{∞} : viscosité à gradient de cisaillement infini [Pa.s].

μ_0 : viscosité à gradient de cisaillement nul [Pa.s].

t : temps caractéristique (s).

p : paramètre caractéristique du fluide étudié.

IV.2.1) MODELISATION PAR LE MODELE DE CROSS :

IV.2.1.1) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE100 EN PRESENCE DE 320 g/l DE NaCl :

Tableau IV.1 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	14,200	11,800	9,500	7,900	5,810	3,700	2,040
μ_0 (mPa.s)	158,000	117,000	94,800	58,900	42,000	28,100	15,200
t (s)	0,277	0,257	0,275	0,201	0,228	0,566	0,912
p	0,796	0,808	0,803	0,781	0,709	0,588	0,469
D%	0,615	0,904	0,874	1,078	1,434	1,240	1,570

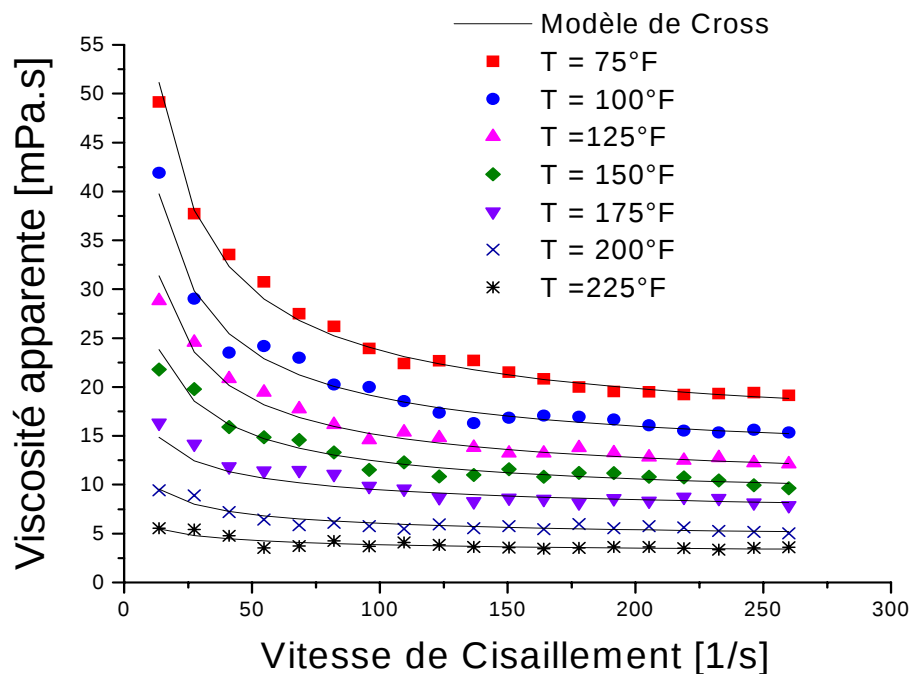


Figure IV.1 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.2 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	15,400	12,800	11,000	8,500	6,200	4,100	2,500
μ_0 (mPa.s)	202,900	149,200	104,800	90,600	80,600	46,000	31,470
t (s)	0,293	0,216	0,155	0,197	0,319	0,238	0,255
p	0,788	0,821	0,872	0,871	0,805	0,841	0,822
D %	0,504	0,414	0,833	1,200	1,270	1,504	1,903

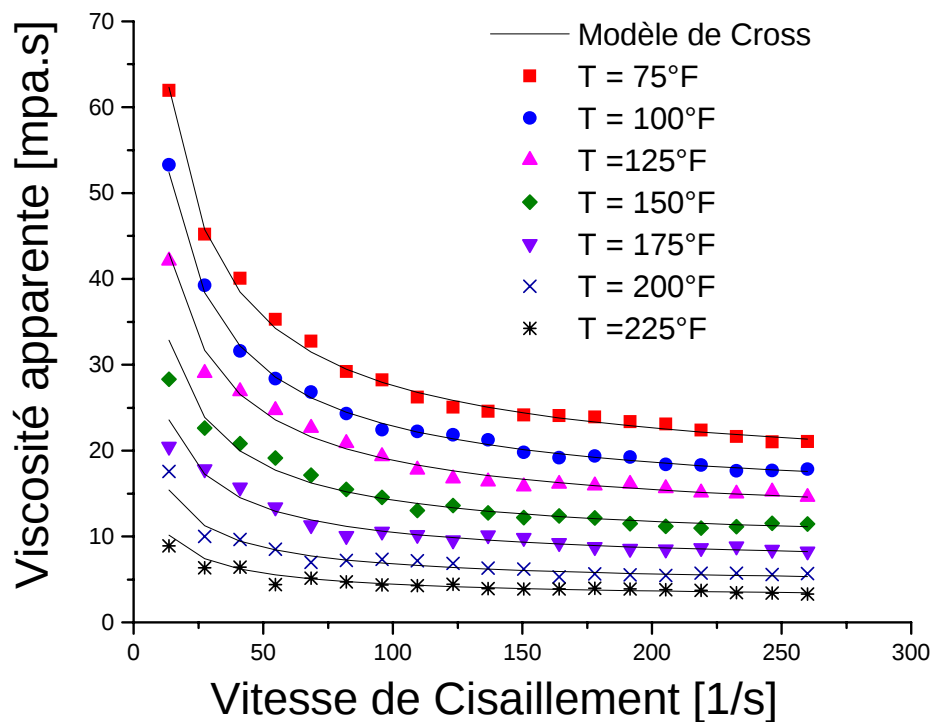


Figure IV.2 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.3 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 4,275 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	18,400	16,300	13,100	10,300	7,500	6,100	4,200
μ_0 (mPa.s)	253,700	236,200	199,800	141,500	124,500	95,310	74,500
t (s)	0,284	0,341	0,353	0,289	0,394	0,448	0,564
p	0,747	0,745	0,751	0,783	0,754	0,777	0,783
D %	0,693	0,599	0,797	0,683	0,888	0,818	0,972

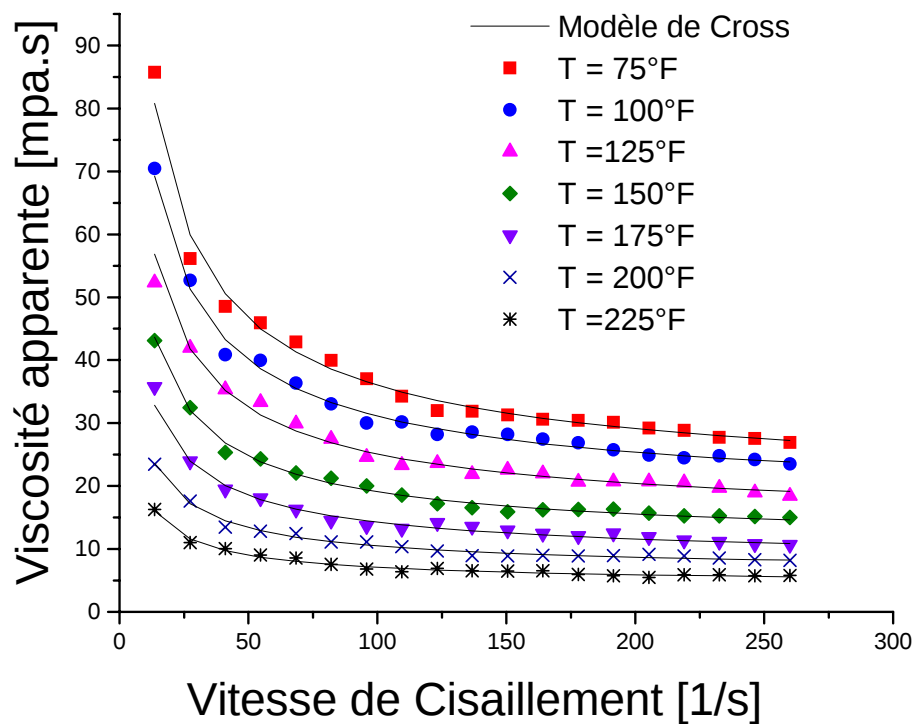


Figure IV.3 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration C = 4,275 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.4 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 5,7 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	21,600	18,400	16,100	12,500	11,040	9,100	6,500
μ_0 (mPa.s)	360,400	316,300	228,100	209,800	178,500	124,400	111,870
t (s)	0,378	0,395	0,271	0,325	0,387	0,265	0,742
p	0,695	0,704	0,756	0,746	0,756	0,770	0,696
D %	0,444	0,722	0,693	0,653	0,872	0,850	1,575

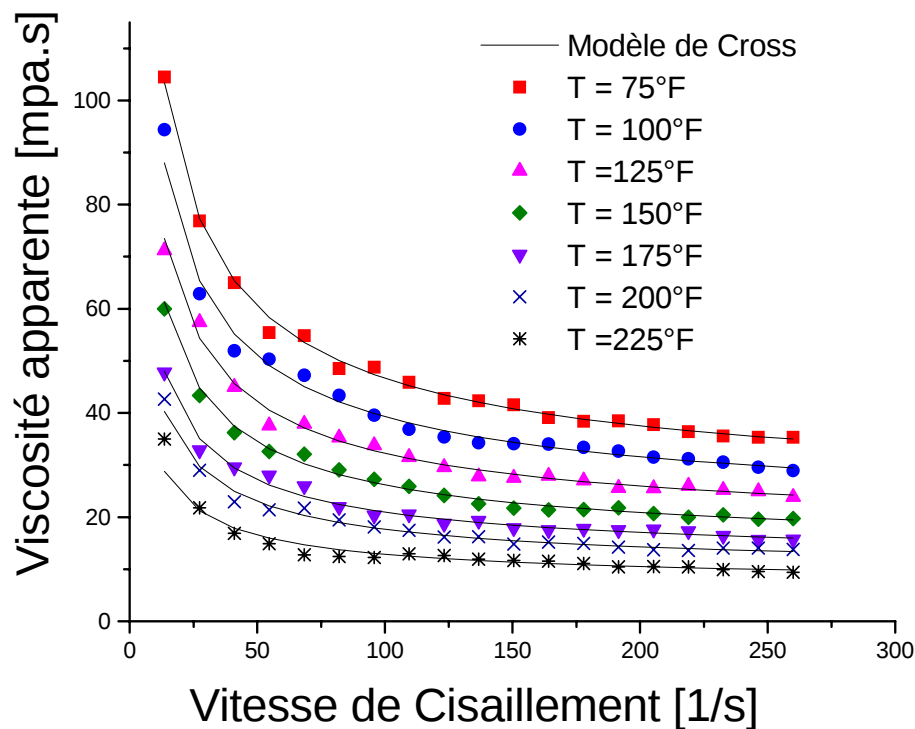


Figure IV.4 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration C = 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

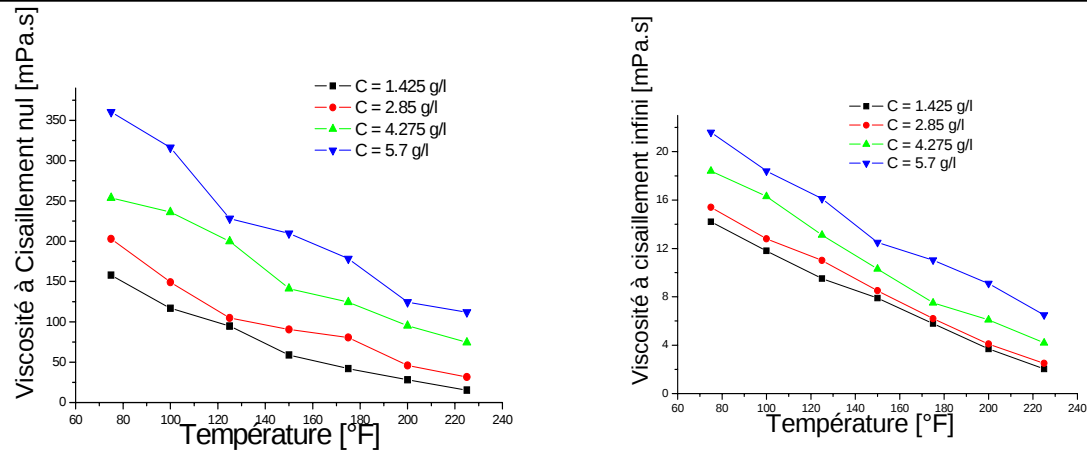


Figure IV.5 : Evolution de la viscosité à cisaillement infini et à cisaillement nul du modèle de Cross en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

Au regard de ces résultats, il apparaît clairement que la viscosité apparente décroît en fonction de la vitesse de cisaillement. Ceci indique que le comportement du polymère est rhéofluidifiant.

Les paramètres rhéologiques du modèle de Cross varient en fonction de la concentration et de la température, ce qui indique un changement du comportement rhéologique et de la microstructure du polymère.

La viscosité à cisaillement infini et à cisaillement nul augmente en fonction de la concentration et décroît en fonction de la température.

L'augmentation des viscosités en fonction de la concentration peut être expliquée par l'enchevêtrement des chaînes macromoléculaires, formant ainsi une structure rigide qui résiste aux contraintes extérieures.

Le paramètre « p » évolue légèrement en fonction de la concentration et de la température.

Le modèle de Cross subdivise le rhéogramme décrivant le comportement du fluide en trois domaines [58] :

- Une zone pour les faibles gradients de cisaillement caractérisée par une viscosité μ_0 , dans laquelle les effets de cisaillement sont négligeables par rapport à ceux induits par le mouvement d'agitation des particules.
- Une zone pour les fortes gradients de cisaillement caractérisée par une viscosité μ_∞ , où les effets de cisaillement sont prépondérants.
- Une zone intermédiaire dans laquelle la viscosité décroît progressivement de μ_0 à μ_∞ . Dans cette région, les effets de cisaillement et d'agitation sont comparables.

MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE100 EN PRESENCE DE 30 g/l DE KCl :

Tableau IV.5 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	7,900	7,100	5,600	3,500	2,900	1,800	0,800
μ_0 (mPa.s)	111,900	81,180	55,200	36,600	25,800	13,500	9,200
t (s)	0,398	0,465	0,541	0,802	0,983	0,287	0,351
p	0,718	0,675	0,604	0,449	0,460	0,471	0,297
D %	0,693	0,785	0,596	1,140	1,104	1,138	1,149

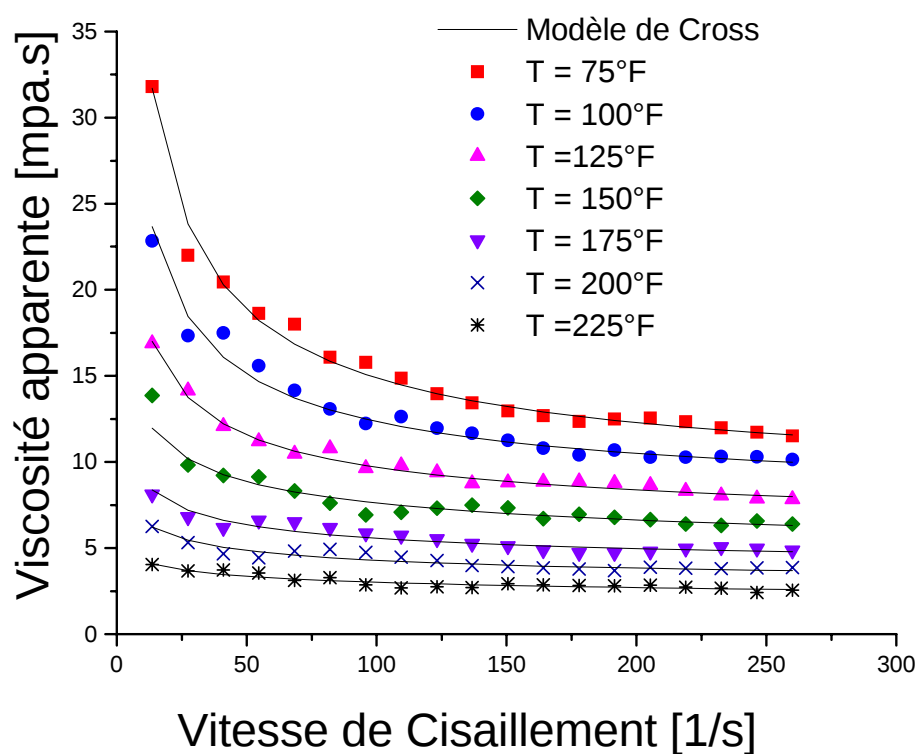


Figure IV.6 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.6 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	10,100	8,800	6,800	4,500	3,500	2,300	1,200
μ_0 (mPa.s)	165,500	122,000	94,600	72,100	38,400	16,700	11,800
t (s)	0,409	0,385	0,799	0,867	0,682	0,369	0,703
p	0,696	0,717	0,619	0,589	0,599	0,464	0,482
D %	0,573	0,581	0,791	1,208	1,231	1,358	1,869

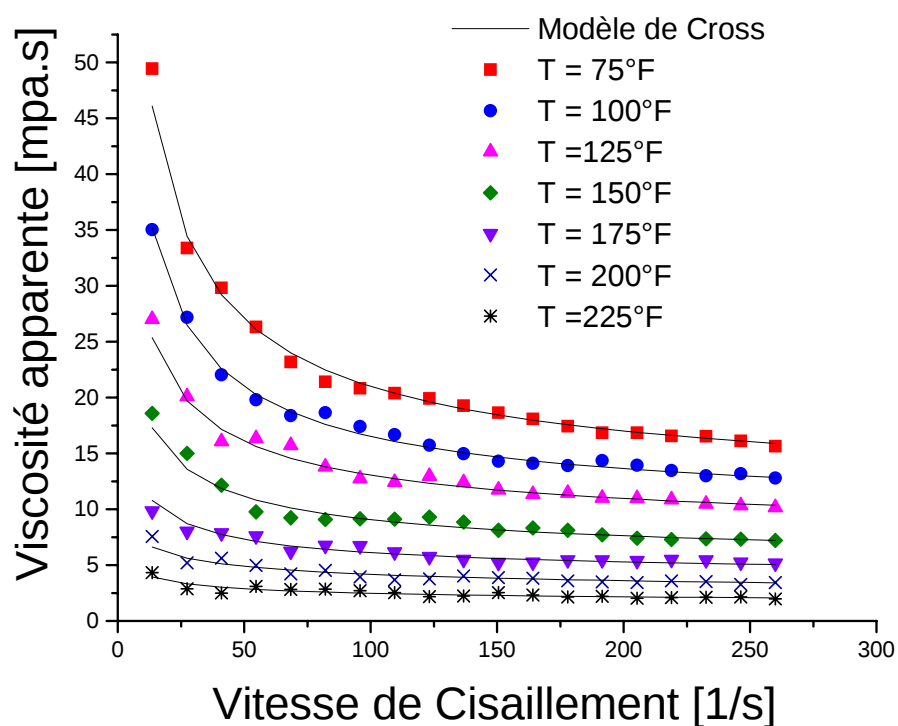


Figure IV.7 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.7 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	15,440	13,900	11,400	9,500	7,300	4,700	3,270
μ_0 (mPa.s)	184,200	136,900	106,900	86,000	56,650	39,100	30,800
t (s)	0,216	0,157	0,111	0,169	0,143	0,218	0,562
p	0,718	0,739	0,784	0,729	0,734	0,642	0,568
D %	0,625	0,678	0,483	0,589	1,459	1,173	2,353

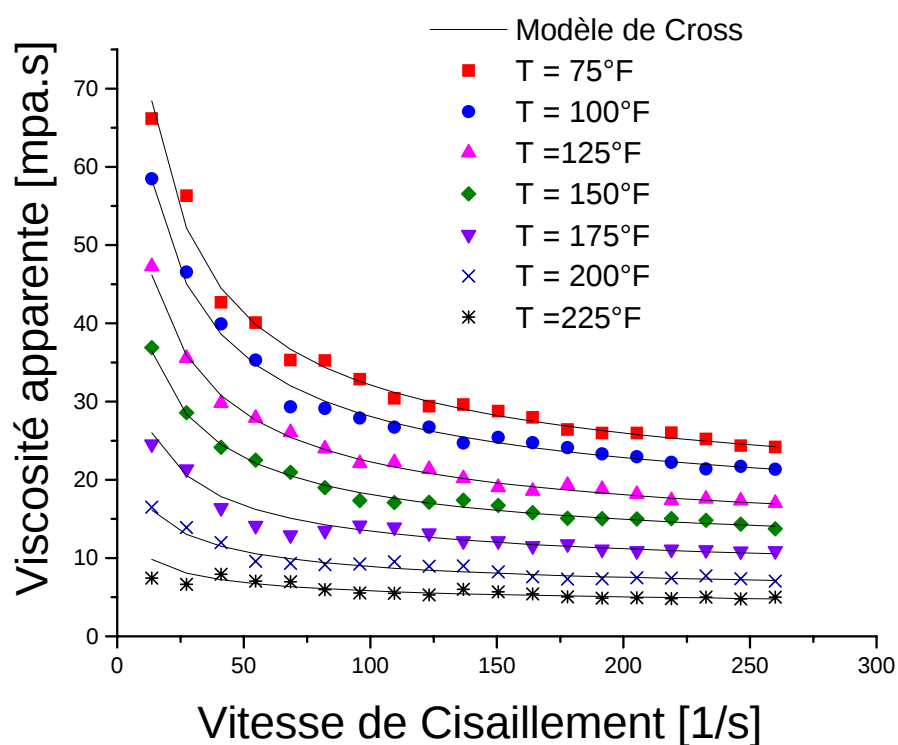


Figure IV.8 : Rhéogramme $(\mu_a - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.8 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	17,800	15,750	13,120	10,070	8,440	6,290	4,440
μ_0 (mPa.s)	301,900	237,300	209,100	188,900	152,100	103,300	65,670
t (s)	0,345	0,265	0,321	0,462	0,484	0,569	0,619
p	0,641	0,675	0,665	0,626	0,660	0,622	0,546
D %	0,643	0,692	0,579	0,596	0,818	0,959	1,365

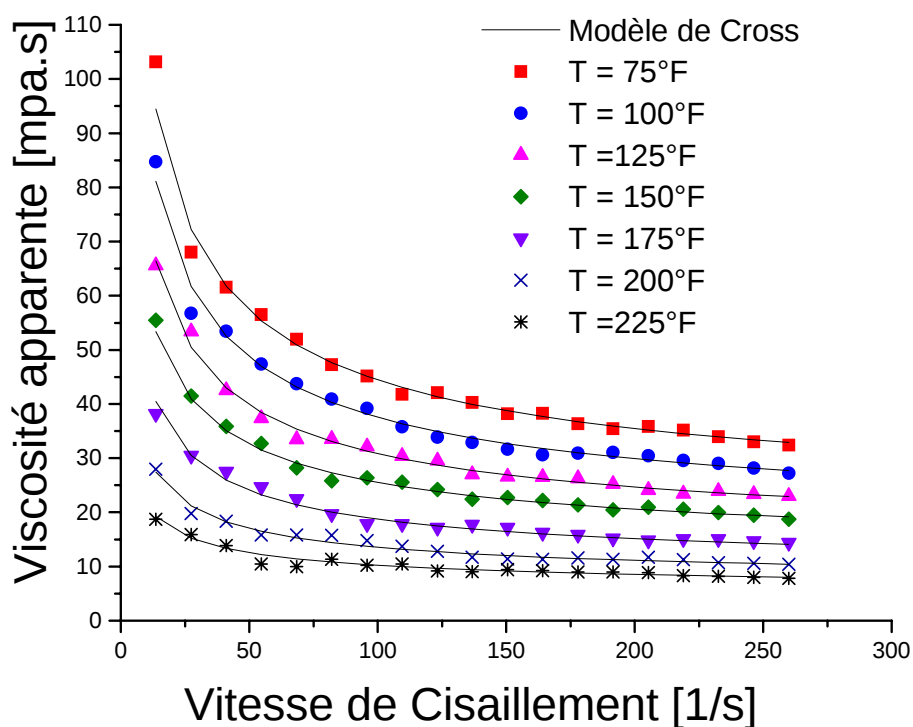


Figure IV.9 : Rhéogramme $(\mu_a - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

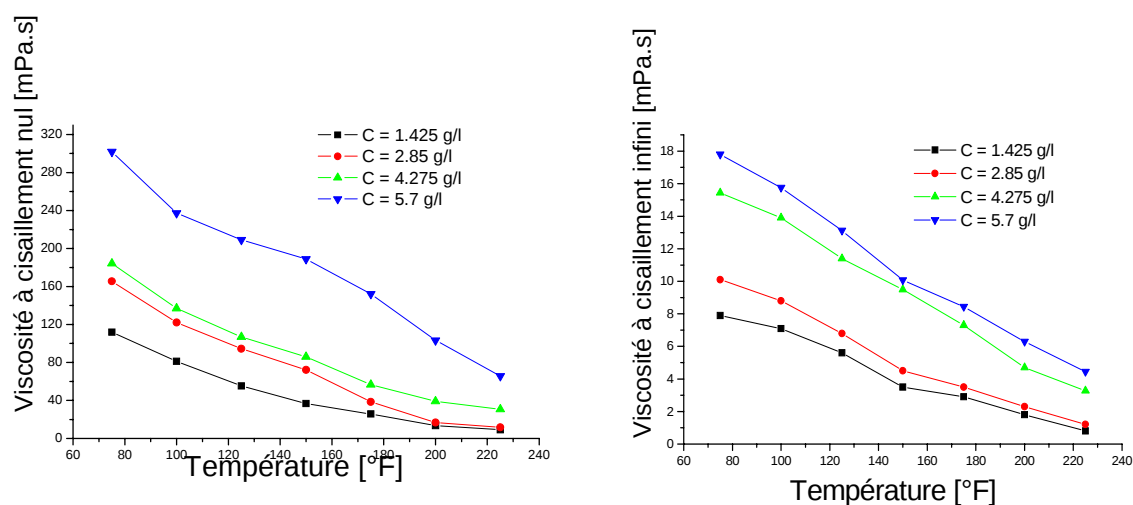


Figure IV.10 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Cross en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

A partir de ces résultats, on remarque la même évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement, de la concentration et de la température sauf que les valeurs prises par la viscosité apparente sont faibles comparées au cas précédent.

Les valeurs de la viscosité à gradient de cisaillement infini et à gradient de cisaillement nul sont également faibles.

Le paramètre « t » évolue en fonction de la concentration et de la température.

Le paramètre « p » décroît légèrement en fonction de la température.

IV.2.1.3) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 320 g/l DE NaCl :

Tableau IV.9 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	8,980	7,030	5,070	3,660	2,530	1,520	0,870
μ_0 (mPa.s)	65,420	39,900	26,090	11,930	8,490	6,020	4,290
t (s)	0,689	0,736	0,905	0,661	1,023	2,878	5,854
p	0,679	0,619	0,487	0,452	0,407	0,308	0,251
D %	0,745	1,110	1,175	1,135	1,157	1,323	1,766

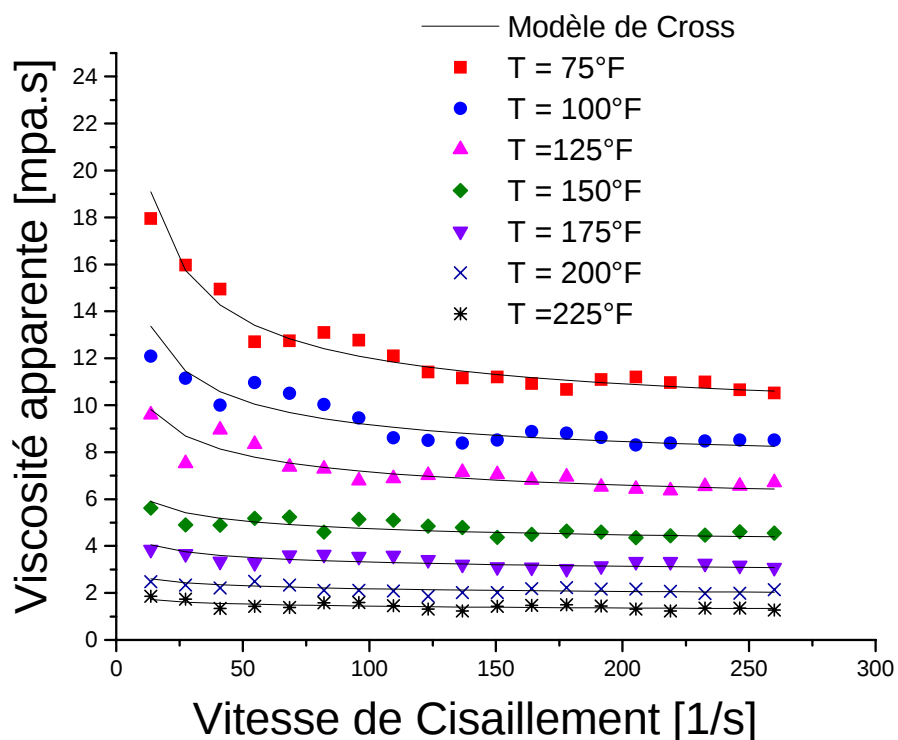


Figure IV.11 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.10 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	11,710	9,710	7,080	5,230	3,980	2,760	1,620
μ_0 (mPa.s)	103,300	70,870	53,530	29,520	17,750	12,480	8,390
t (s)	0,612	0,752	0,859	0,766	0,699	0,657	1,337
p	0,649	0,593	0,552	0,507	0,475	0,469	0,368
D %	0,700	0,775	0,705	1,084	1,418	1,812	1,350

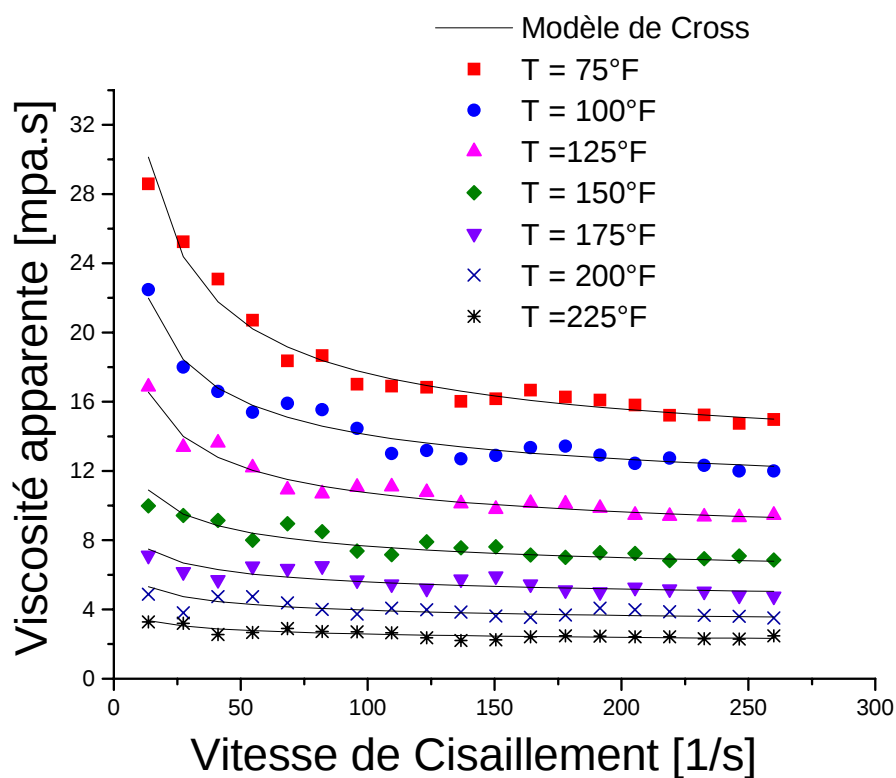


Figure IV.12 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.11 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	16,500	13,470	10,460	8,490	5,920	4,150	2,570
μ_0 (mPa.s)	160,400	109,500	87,140	62,650	47,810	34,570	21,730
t (s)	0,433	0,336	0,464	0,402	0,675	0,978	1,570
p	0,638	0,672	0,582	0,606	0,532	0,511	0,454
D %	0,853	0,788	0,860	1,012	1,290	1,332	1,434

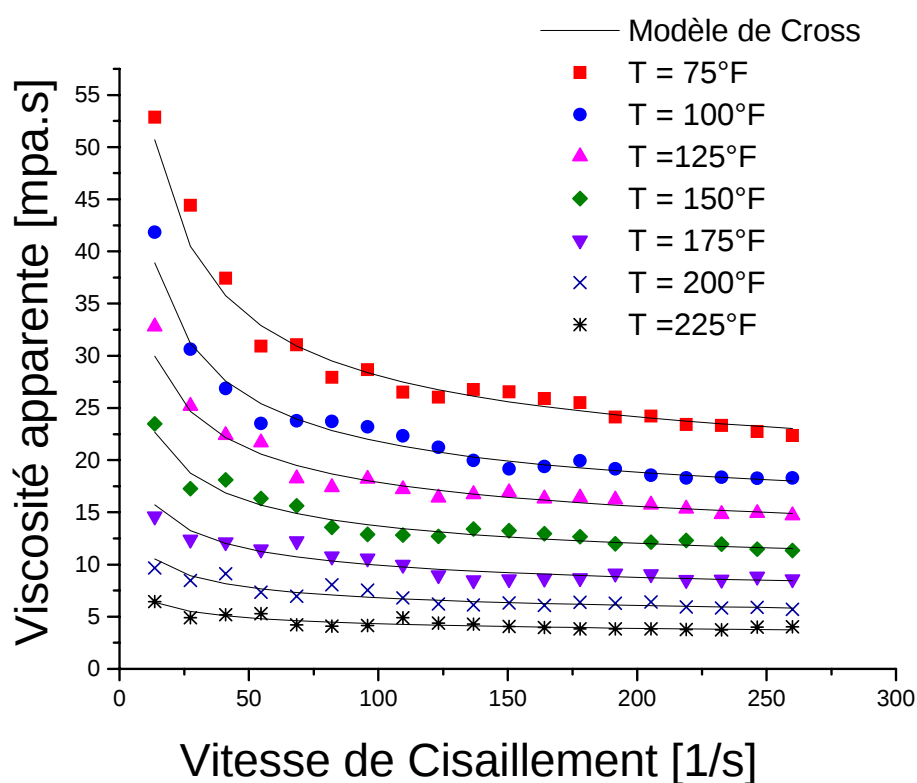


Figure IV.13 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.12 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	21,110	17,140	13,500	10,180	6,840	4,670	3,110
μ_0 (mPa.s)	194,800	122,100	99,570	77,940	58,850	43,760	21,600
t (s)	0,329	0,166	0,226	0,365	0,474	0,682	0,322
p	0,676	0,755	0,698	0,611	0,631	0,585	0,642
D %	0,584	0,806	0,743	0,808	1,252	1,088	1,822

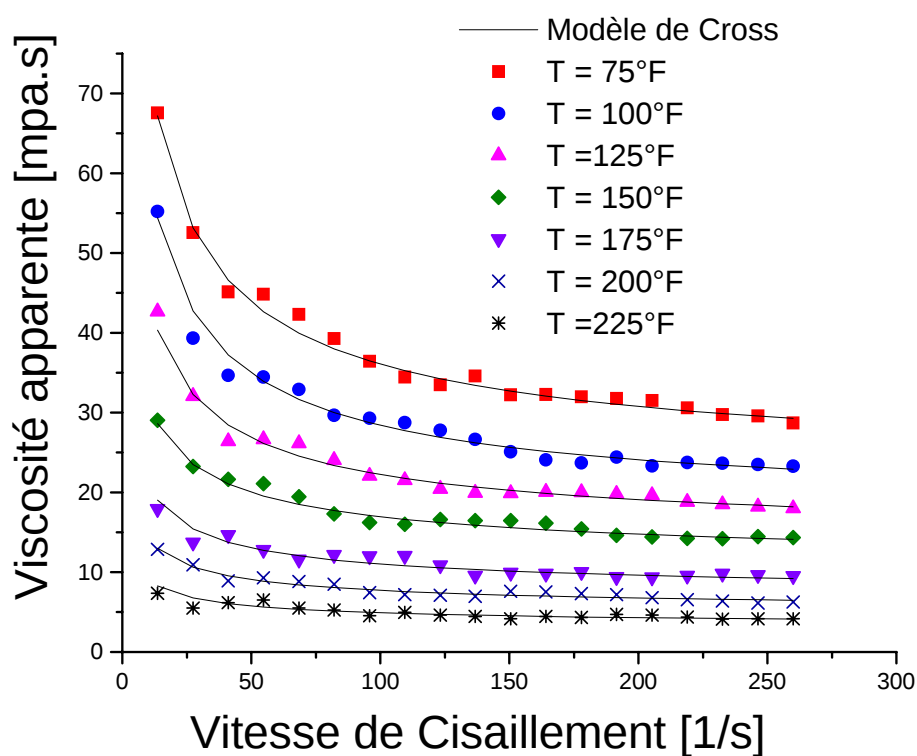


Figure IV.14 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

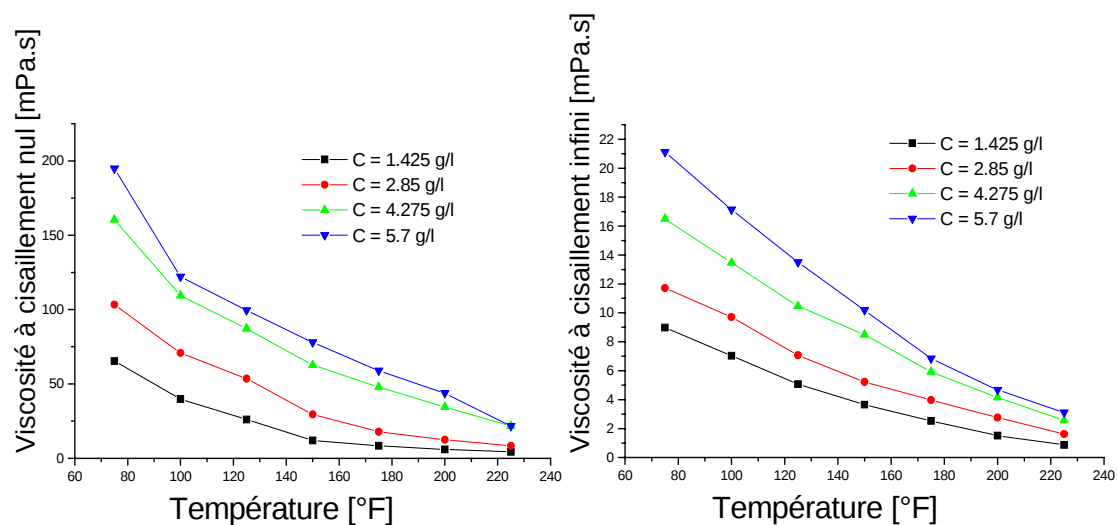


Figure IV.15 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Cross en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

A partir des résultats représentés ci dessus, il apparaît clairement que la viscosité apparente conserve la même évolution pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l NaCl.

Le polymère présente un comportement rhéofluidifiant.

La viscosité à cisaillement infini et à cisaillement nul décroît en fonction de la température et augmente en fonction de la concentration. Elle prend des valeurs faibles comparées avec le polymère HE100.

Le paramètre « t » augmente légèrement en fonction de la concentration et de la température.

Le paramètre « p » présente la même évolution que les cas précédents.

IV.2.1.4) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 30 g/l de KCl

Tableau IV.13 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	6,790	4,870	2,770	1,980	0,650	0,570	0,250
μ_0 (mPa.s)	65,110	32,400	15,500	8,530	5,100	3,020	1,720
t (s)	1,415	1,977	0,295	1,921	7,336	5,486	7,170
p	0,585	0,449	0,321	0,397	0,218	0,332	0,241
D %	0,944	0,975	1,191	1,331	1,665	1,482	1,512

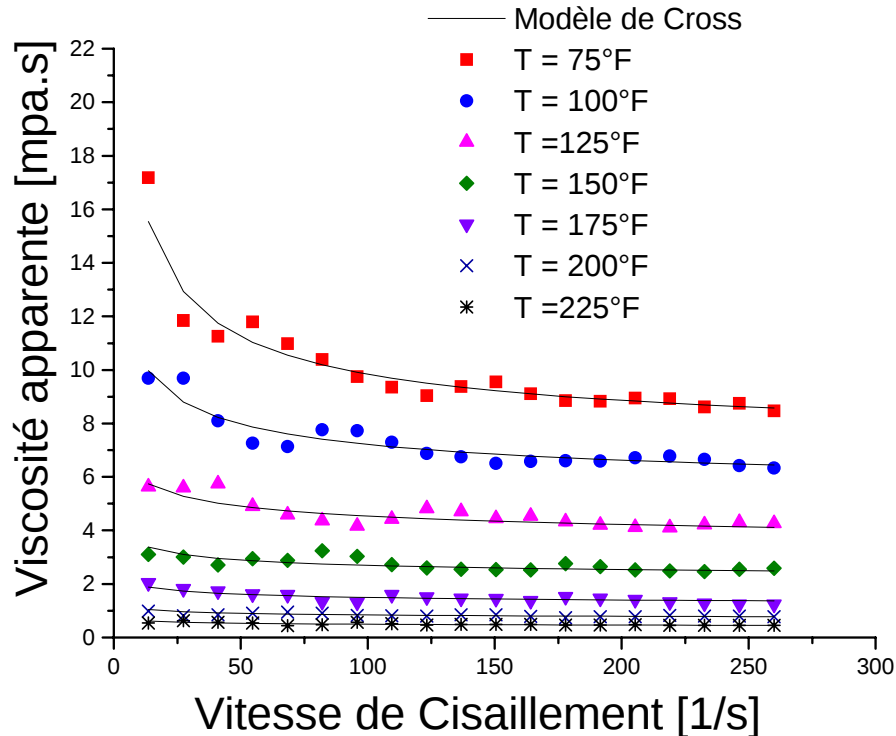


Figure IV.16 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.14 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	8,880	7,230	4,480	2,700	1,850	1,110	0,870
μ_0 (mPa.s)	89,600	59,680	36,170	22,500	12,870	8,420	5,450
t (s)	0,966	0,798	1,108	2,101	2,319	2,173	1,921
p	0,570	0,567	0,422	0,3043	0,261	0,298	0,405
D %	0,860	0,984	0,878	1,443	1,623	1,242	1,863

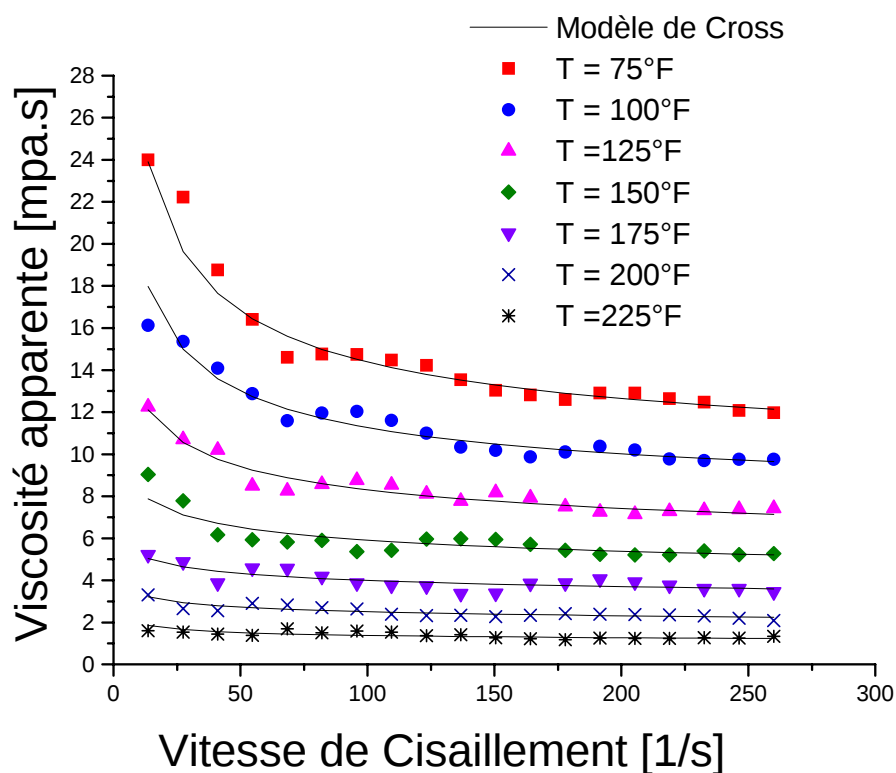


Figure IV.17 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.15 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	12,370	10,20	7,270	4,970	2,370	1,320	0,890
μ_0 (mPa.s)	140,500	101,000	69,490	43,810	26,780	17,590	10,760
t (s)	0,844	0,669	0,793	1,494	1,837	2,266	1,987
p	0,575	0,578	0,528	0,419	0,298	0,249	0,254
D %	0,685	0,788	0,801	0,815	1,142	1,822	1,703

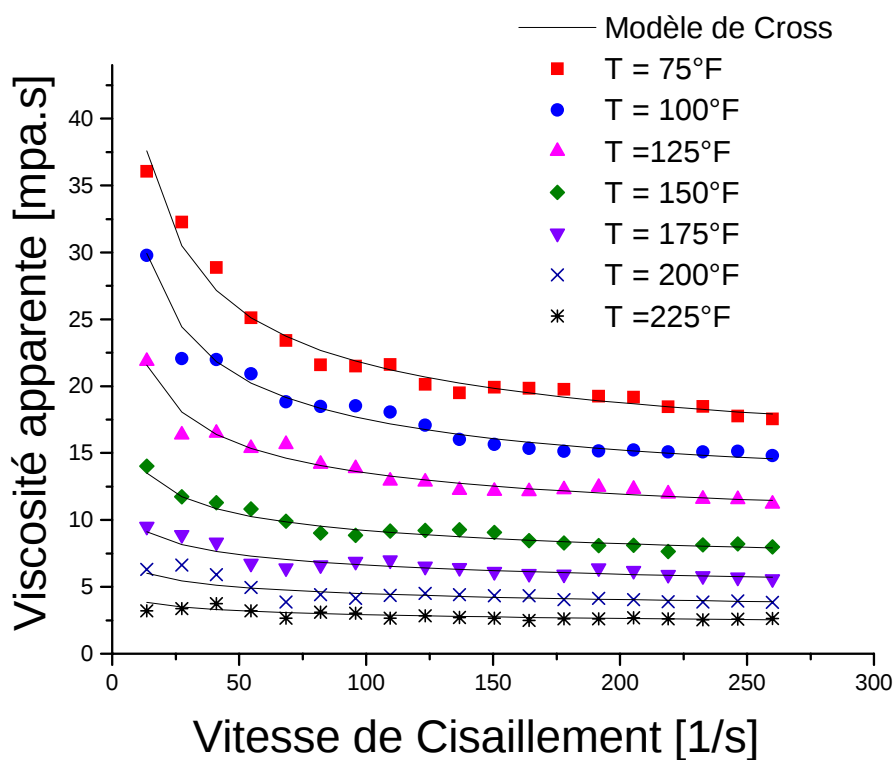


Figure IV.18 : Rhéogramme $(\mu_a - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 4.275$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.16 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	14,350	11,960	7,980	5,610	4,530	2,360	0,930
μ_0 (mPa.s)	166,000	137,500	119,200	82,910	64,570	35,590	24,900
t (s)	0,415	0,513	1,182	1,304	1,997	2,666	4,720
p	0,641	0,600	0,492	0,478	0,479	0,356	0,291
D %	0,851	0,637	0,934	0,829	1,203	1,333	1,957

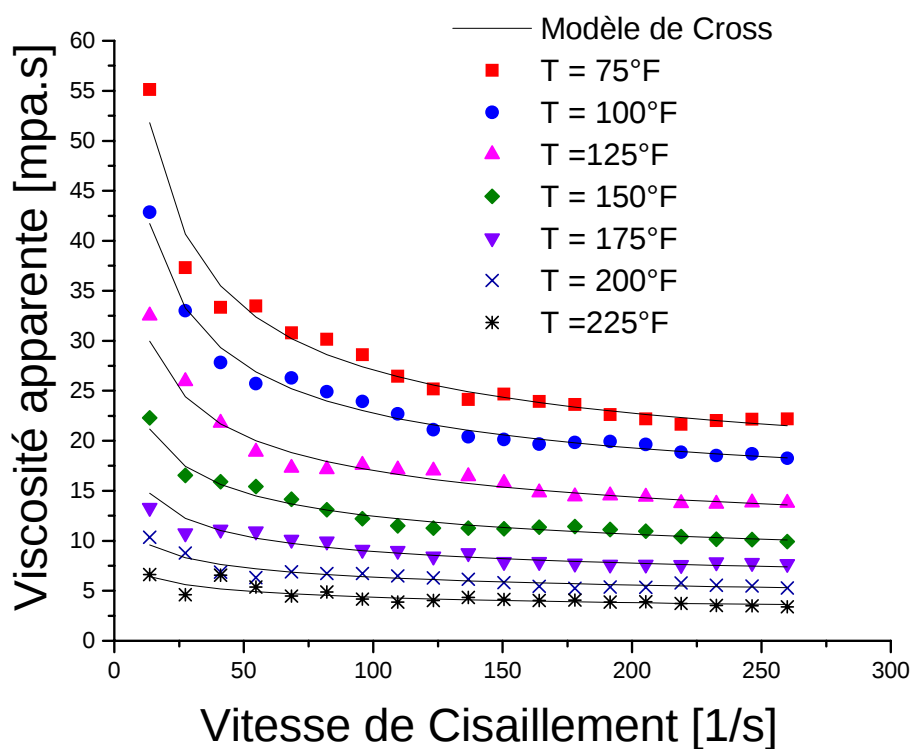


Figure IV.19 : Rhéogramme $(\mu_a - \dot{\gamma})$ représentant le modèle de Cross pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

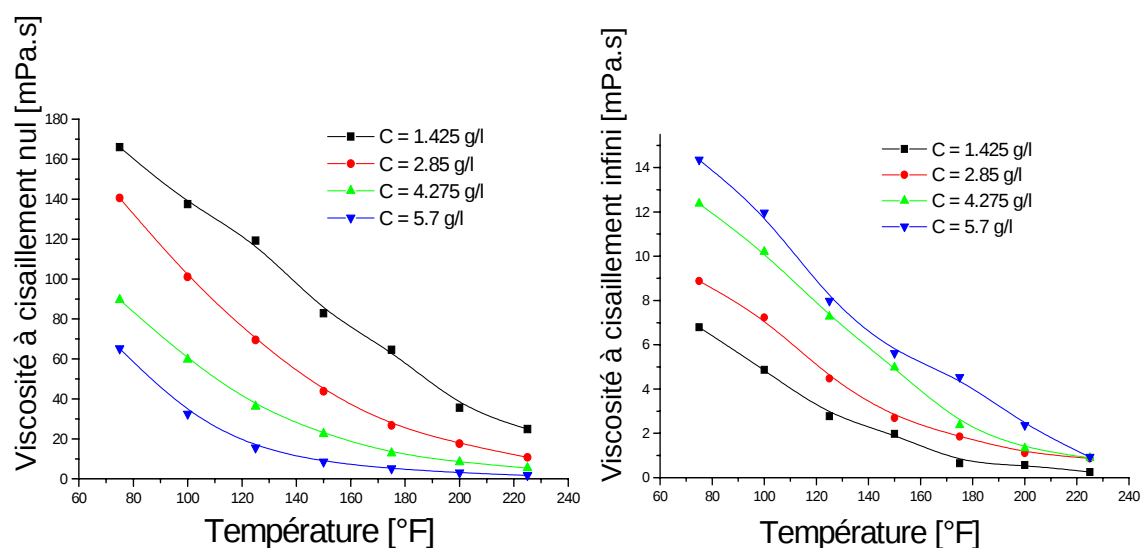


Figure IV.20 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Cross en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

On retrouve quasiment les mêmes résultats tout en notant que les valeurs de la viscosité apparente sont plus faibles.

Les viscosités à cisaillement infini et à cisaillement nul conservent la même évolution et prennent des valeurs pratiquement faibles par rapport aux précédentes.

Les valeurs de la viscosité à cisaillement infini sont très faibles par rapport à ceux en cisaillement nul ($\mu_{\infty} \ll \mu_0$) ce qui peut être expliqué par le fait que les polymères en solution s'alignent progressivement dans le sens de l'écoulement au fur et à mesure que la vitesse de cisaillement augmente favorisant ainsi leur comportement pseudo plastique [59,60].

IV.2.2) MODELISATION PAR LE MODELE DE WILLIAMS CARREAU :

IV.2.2.1) Modélisation du comportement rhéologique du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl :

Tableau IV.17 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	13,200	11,000	9,800	7,200	5,600	3,700	2,400
μ_0 (mPa.s)	124,400	98,400	67,400	54,300	41,200	28,000	12,000
t (s)	0,353	0,363	0,287	0,392	0,554	1,452	1,167
p	0,330	0,335	0,335	0,301	0,268	0,236	0,469
D%	0,666	0,880	0,931	1,128	1,09	1,242	1,554

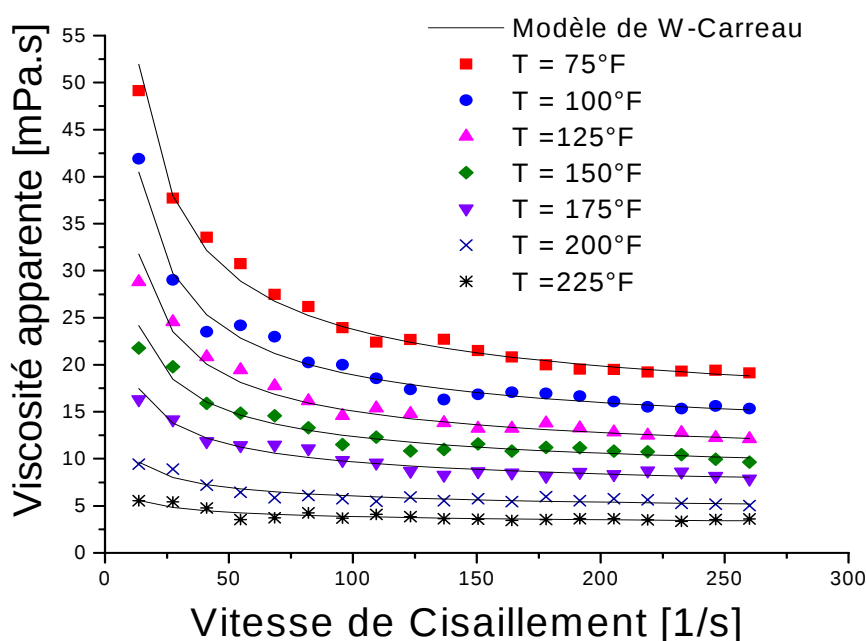


Figure IV.21 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.18 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 2,85 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	14,100	11,500	9,800	7,810	5,790	3,800	2,400
μ_0 (mPa.s)	172,300	147,900	114,500	92,100	59,100	35,300	20,700
t (s)	0,428	0,425	0,372	0,384	0,345	0,286	0,233
p	0,327	0,331	0,339	0,354	0,343	0,349	0,347
D %	0,534	0,410	0,872	1,304	1,333	1,465	1,912

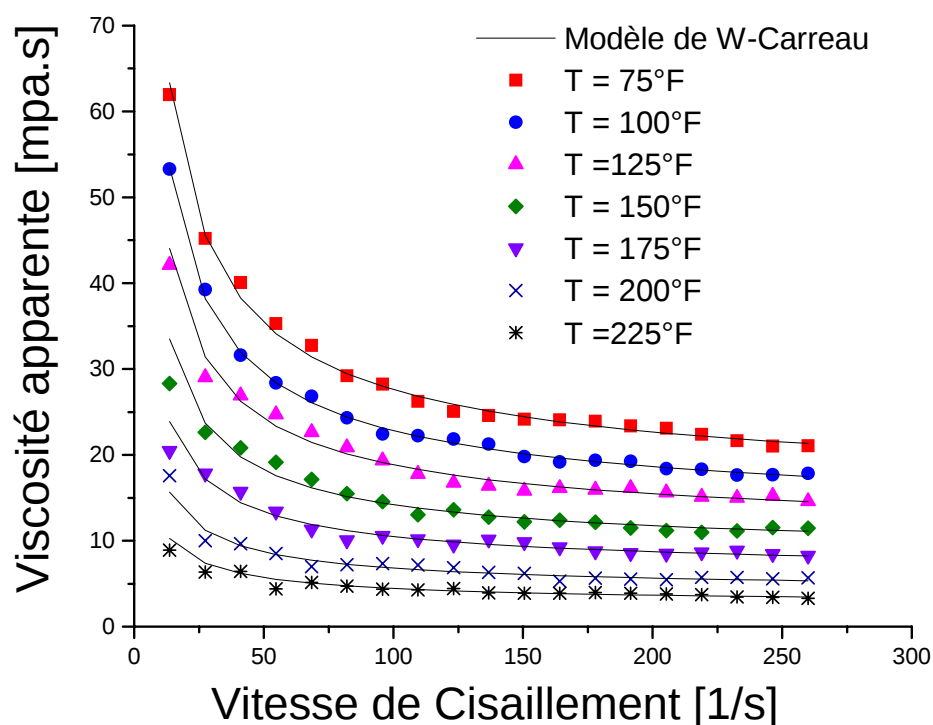


Figure IV.22 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration C = 2,85 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.19 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	16,100	14,700	11,830	9,400	7,100	5,700	4,100
μ_0 (mPa.s)	231,900	205,400	172,000	156,000	133,600	111,100	93,500
t (s)	0,505	0,535	0,537	0,665	0,923	1,027	1,280
p	0,303	0,309	0,313	0,323	0,328	0,337	0,348
D %	0,652	0,586	0,853	0,704	0,838	0,819	0,975

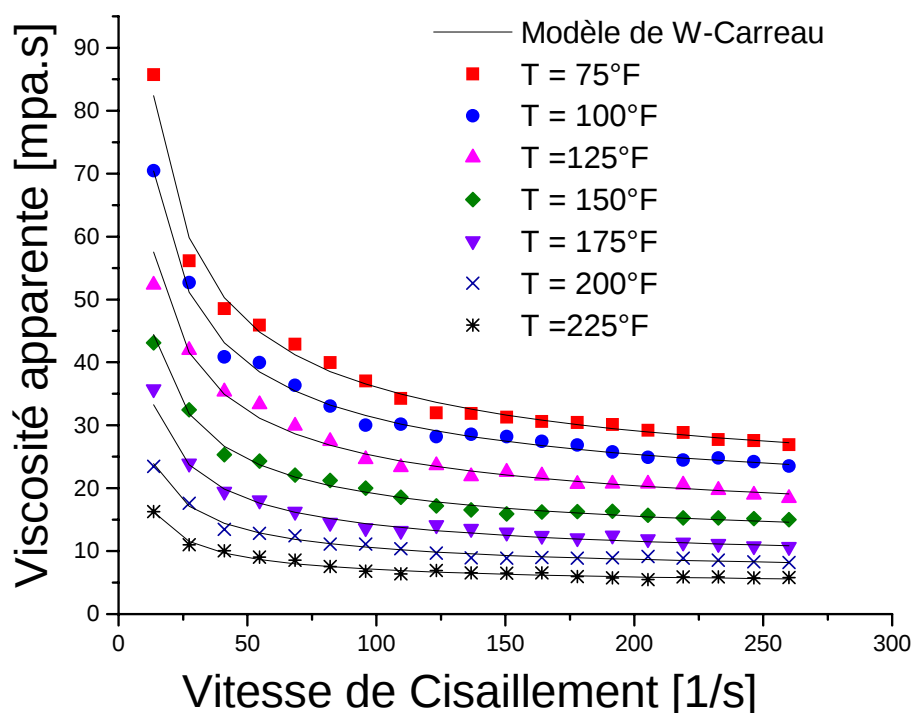


Figure IV.23 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.20 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 5,7 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	18,800	16,300	14,100	11,110	10,100	8,100	6,000
μ_0 (mPa.s)	282,000	216,400	180,800	162,500	145,700	117,100	103,500
t (s)	0,508	0,363	0,371	0,413	0,441	0,481	0,734
p	0,285	0,293	0,307	0,310	0,321	0,314	0,311
D %	0,431	0,686	0,721	0,674	0,881	0,809	1,513

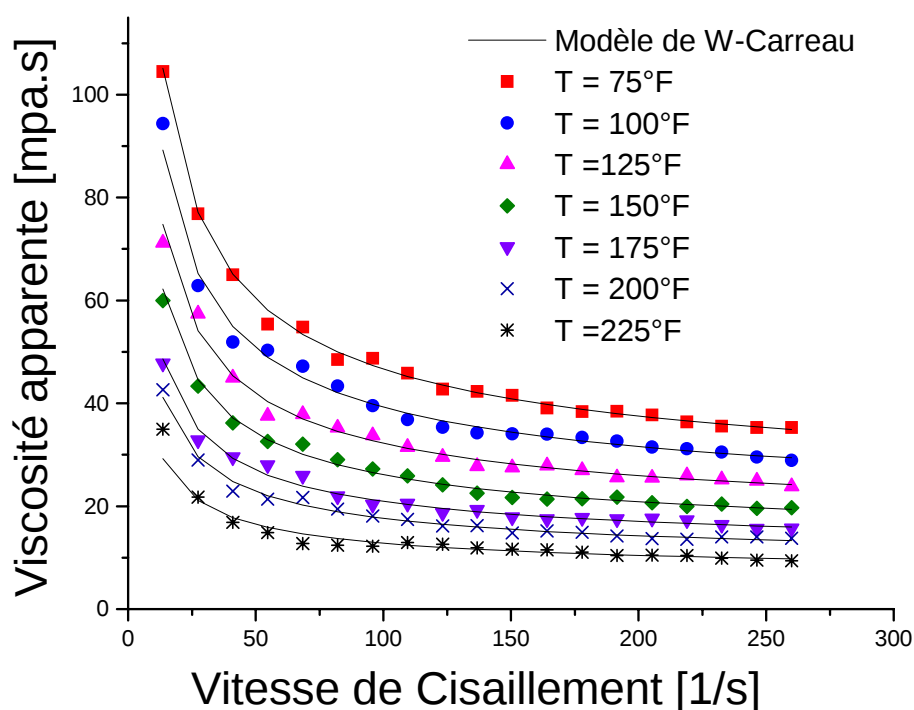


Figure IV.24 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration C = 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

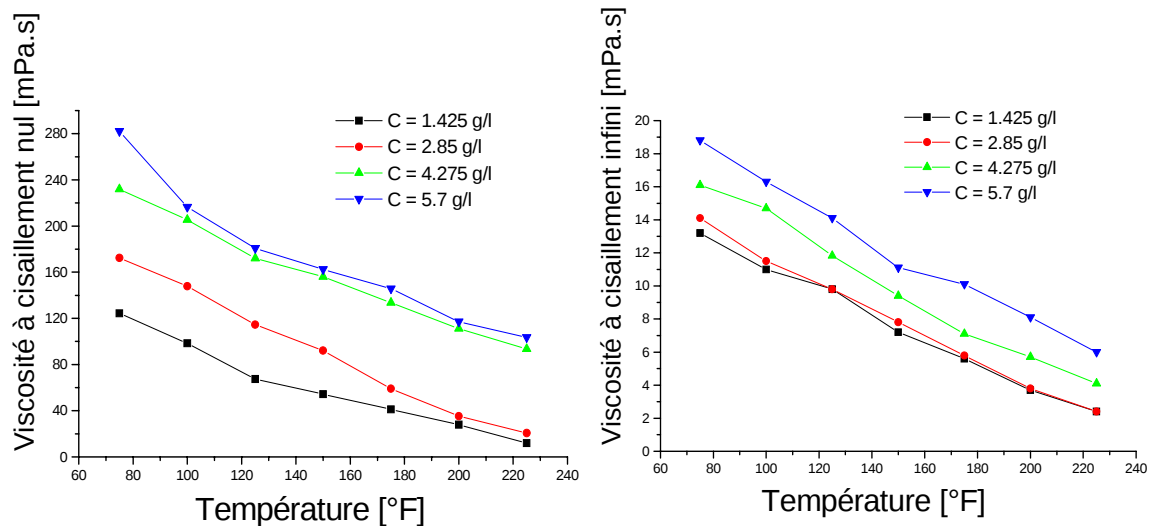


Figure IV.25 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Williams Carreau en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl

On remarque que les valeurs de la viscosité à cisaillement infini et à cisaillement nul sont proches de celles obtenues à partir du modèle de Cross et conservent la même évolution.

Les valeurs des paramètres « t » et « p » ne sont pas comparables avec ceux du modèle de Cross

IV.2.2.2) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE100 EN PRESENCE DE 30 g/l de KCl :

Tableau IV.21 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	7,300	6,600	5,100	3,400	2,700	1,500	0,900
μ_0 (mPa.s)	80,200	66,400	45,500	25,400	14,300	10,500	6,300
t (s)	0,430	0,649	0,842	0,775	0,654	0,615	0,583
p	0,301	0,281	0,246	0,191	0,168	0,157	0,116
D %	0,70	0,818	0,60	1,060	1,091	1,137	1,168

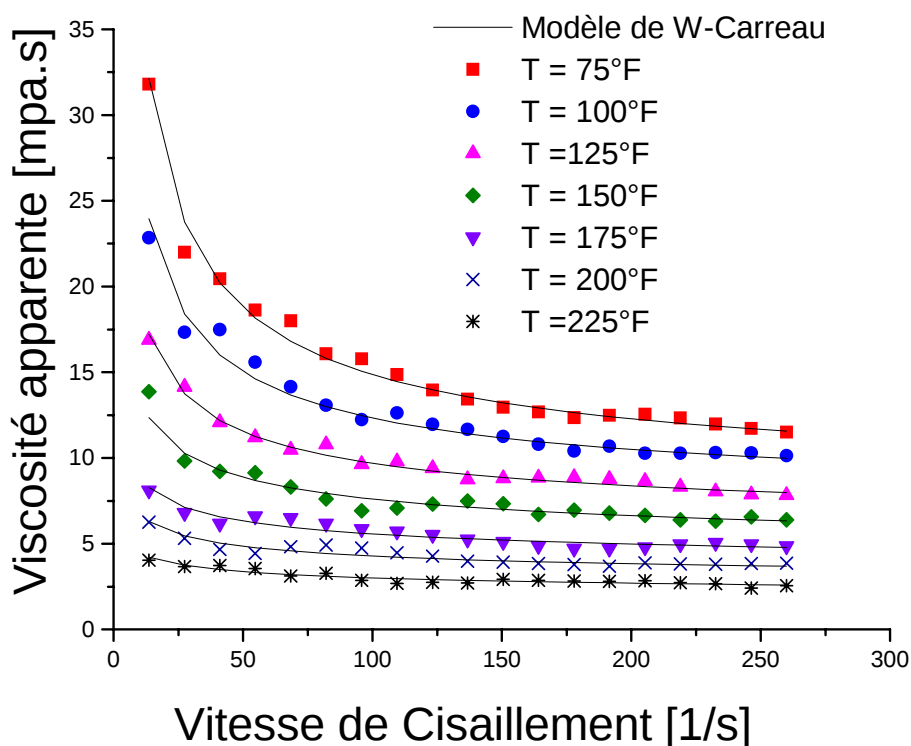


Figure IV.26 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.22 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration C = 2,85 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	8,900	8,000	6,200	4,100	3,200	1,900	1,100
μ_0 (mPa.s)	131,000	88,910	72,200	49,900	29,800	12,300	7,200
t (s)	0,550	0,432	0,741	0,8632	0,896	0,554	0,552
p	0,289	0,299	0,264	0,249	0,248	0,177	0,186
D %	0,520	0,587	0,774	1,184	1,255	1,311	1,873

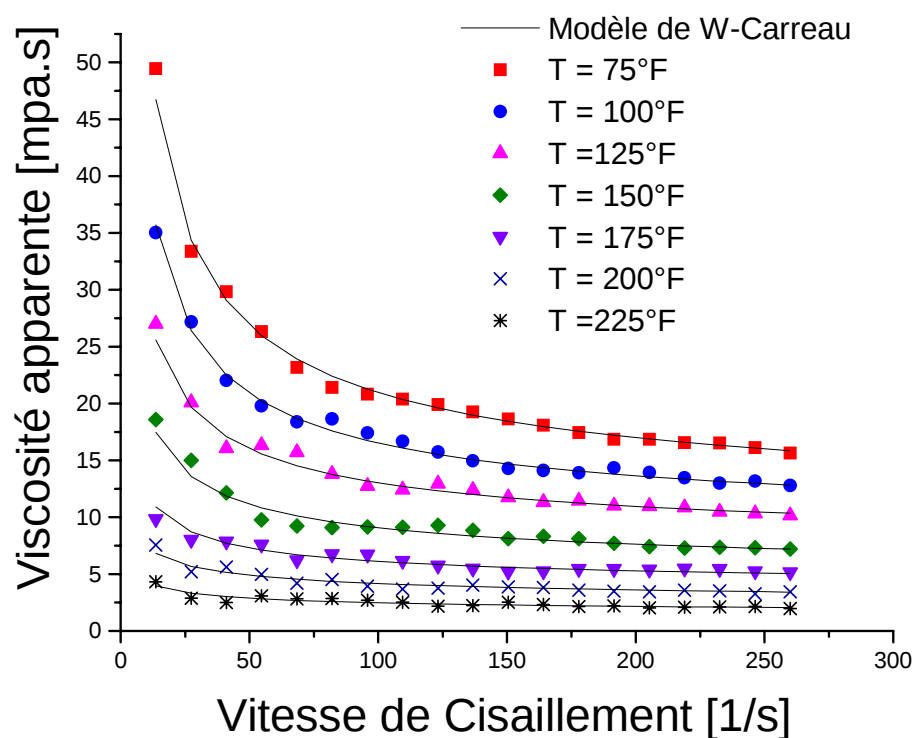


Figure IV.27 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration C = 2,85 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.23 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	12,700	11,200	8,900	7,890	5,910	3,900	2,900
μ_0 (mPa.s)	158,600	134,400	98,800	70,100	54,100	39,200	24,700
t (s)	0,398	0,408	0,338	0,288	0,373	0,669	0,901
p	0,274	0,268	0,271	0,269	0,257	0,233	0,225
D %	0,662	0,683	0,468	0,586	1,452	1,159	1,409

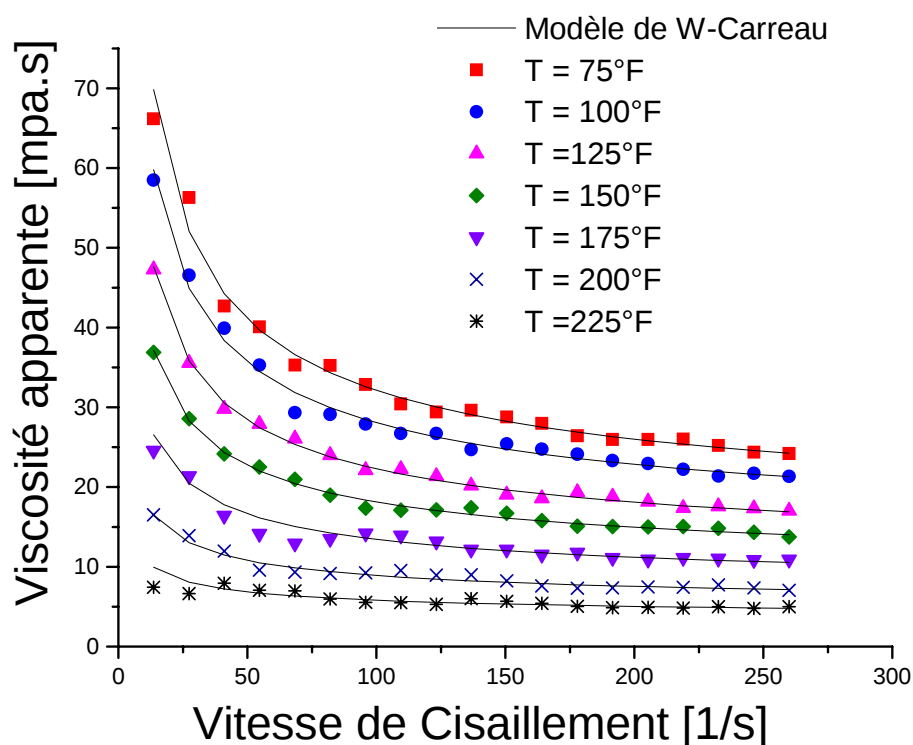


Figure IV.28 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.24 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration C = 5,7 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	14,200	12,400	10,700	9,000	7,340	5,500	3,600
μ_0 (mPa.s)	212,800	191,600	154,500	130,300	106,400	87,500	64,700
t (s)	0,416	0,439	0,420	0,450	0,521	0,909	1,695
p	0,256	0,255	0,263	0,245	0,274	0,258	0,217
D %	0,591	0,672	0,588	0,579	0,863	0,957	1,368

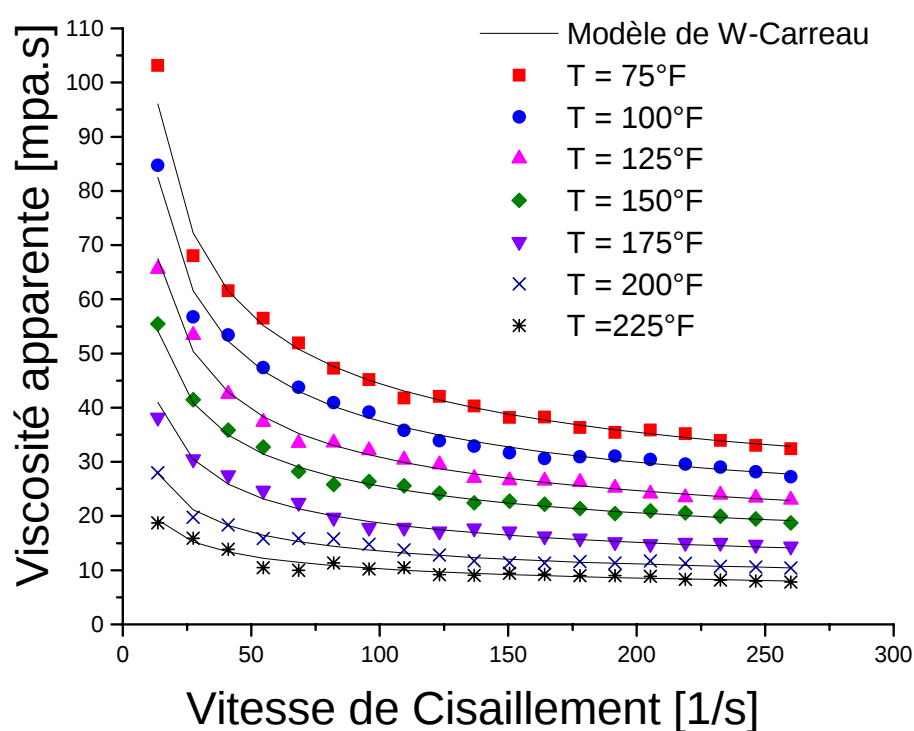


Figure IV.29 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration C = 5,7 g/l du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

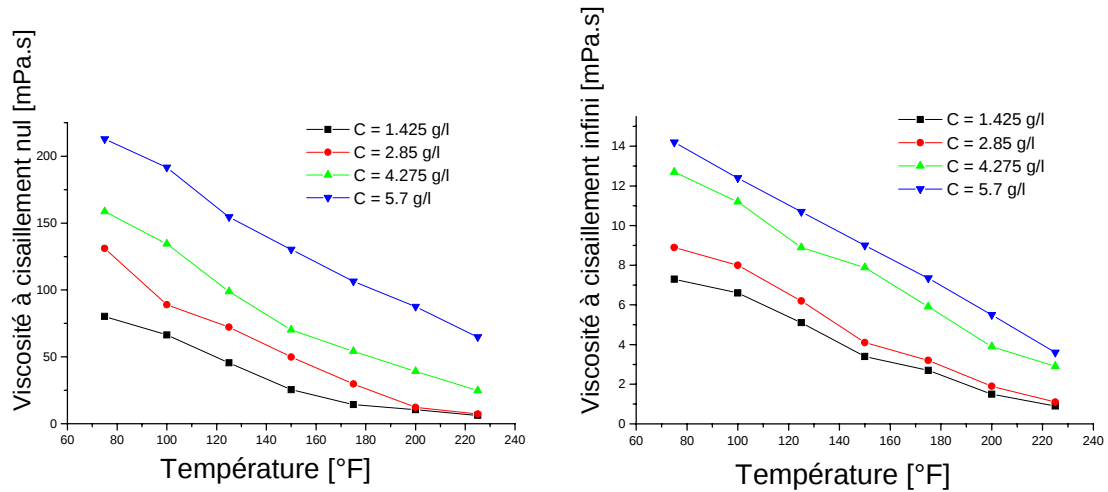


Figure IV.30 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Williams Carreau en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE100 en présence de 30 g/l de KCl.

On retrouve pratiquement les mêmes résultats que ceux obtenus par le modèle de Cross, tout en notant que l'ordre de grandeur des valeurs des paramètres « p » et « t » diffèrent légèrement.

IV.2.2.3) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 320 g/l DE NaCl :

Tableau IV.25 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	8,720	6,810	4,920	3,680	2,590	1,700	1,060
μ_0 (mPa.s)	67,440	46,960	32,970	17,130	11,960	8,560	5,870
t (s)	1,408	2,366	4,659	5,479	7,243	11,44	2,479
p	0,292	0,259	0,206	0,202	0,194	0,189	0,162
D %	0,762	1,127	1,204	1,193	1,217	1,394	1,241

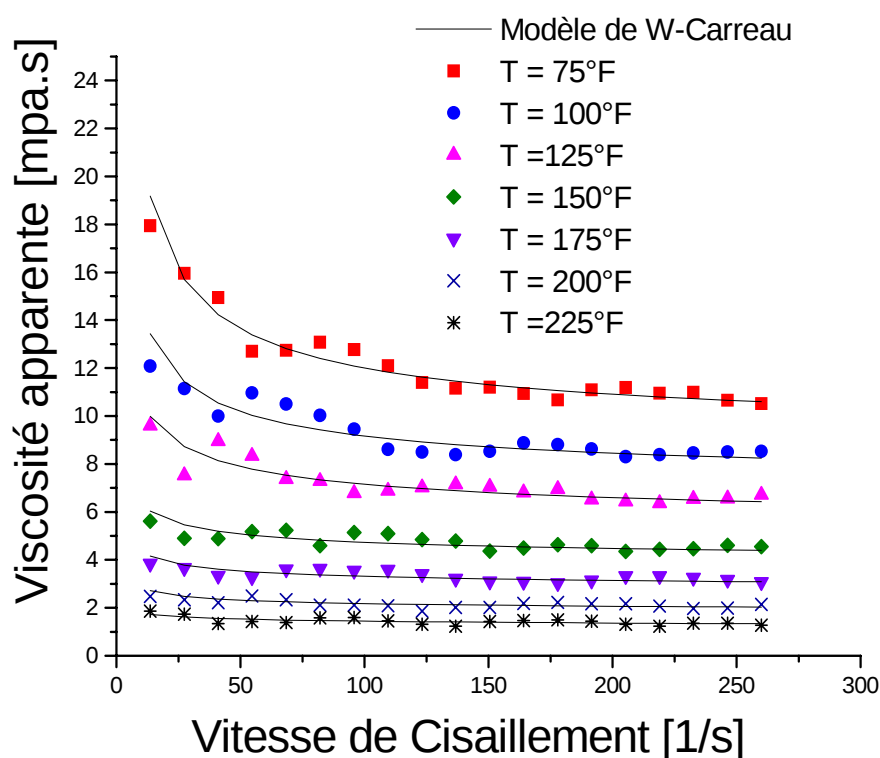


Figure IV.31 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 1,425$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.26 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	11,080	9,250	6,590	4,920	3,650	2,680	1,730
μ_0 (mPa.s)	98,160	79,000	63,550	40,410	24,880	21,520	14,290
t (s)	1,1730	2,231	3,665	6,007	10,250	10,620	1,690
p	0,271	0,246	0,221	0,200	0,171	0,194	0,182
D %	0,724	0,772	0,703	1,107	1,415	1,872	1,370

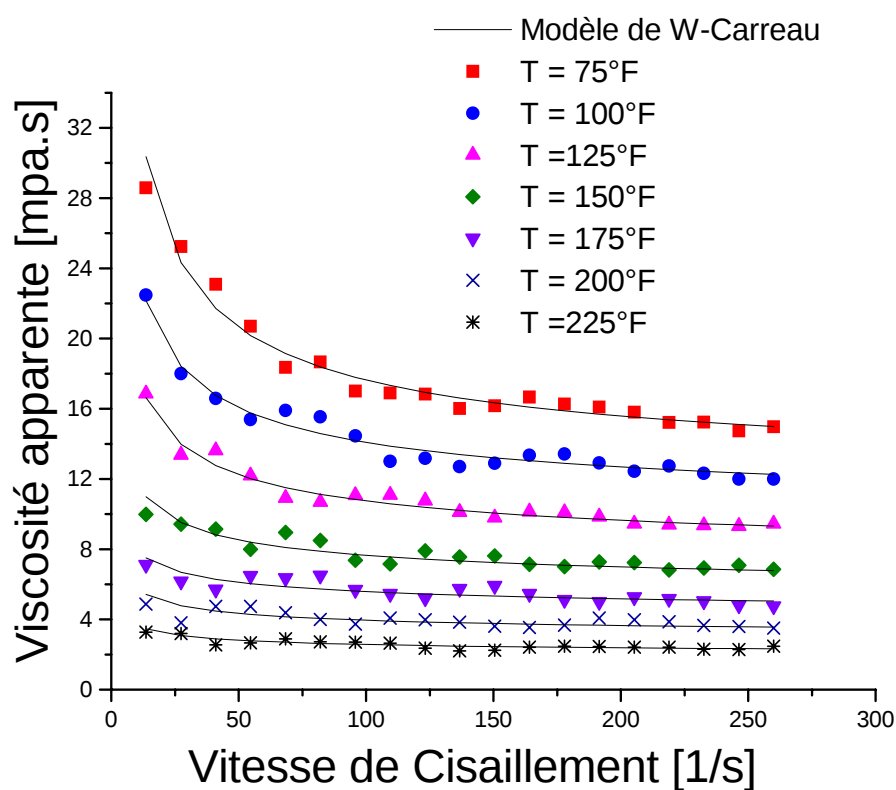


Figure IV.32 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.27 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	15,170	12,460	9,460	7,540	5,900	3,870	2,460
μ_0 (mPa.s)	120,100	104,000	77,240	63,940	49,270	33,740	22,670
t (s)	0,561	0,689	0,942	1,278	1,300	2,534	4,68
p	0,260	0,270	0,229	0,228	0,245	0,209	0,194
D %	0,835	0,743	0,823	1,011	1,412	1,356	1,440

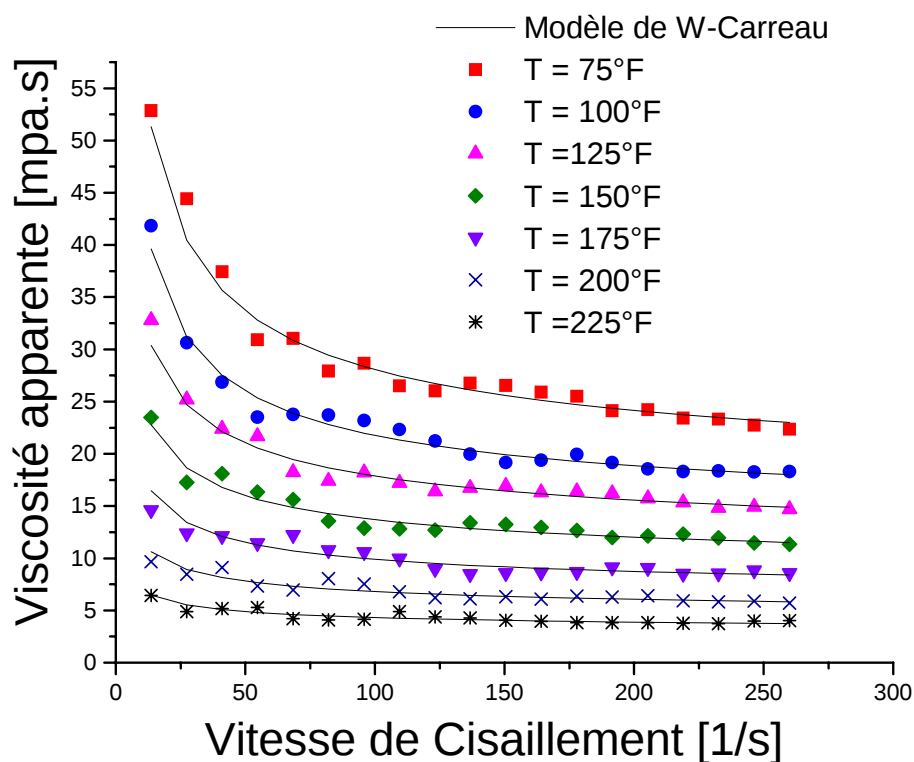


Figure IV.33 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

Tableau IV.28 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl en fonction de la température pour une concentration C = 5,7 g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	19,100	15,220	12,100	9,170	6,360	4,310	2,820
μ_0 (mPa.s)	154,500	128,700	103,800	74,740	56,650	44,580	32,750
t (s)	0,479	0,456	0,631	0,916	1,016	1,778	2,303
p	0,268	0,281	0,265	0,236	0,257	0,238	0,245
D %	0,588	0,781	0,707	0,811	1,276	1,089	1,835

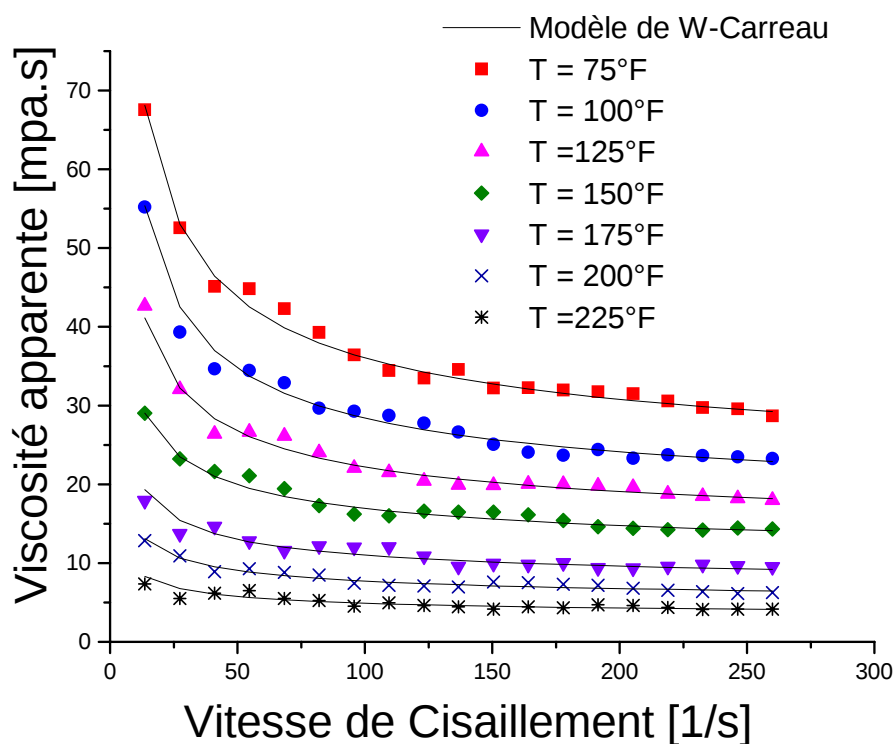


Figure IV.34 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration C = 5,7 g/l du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

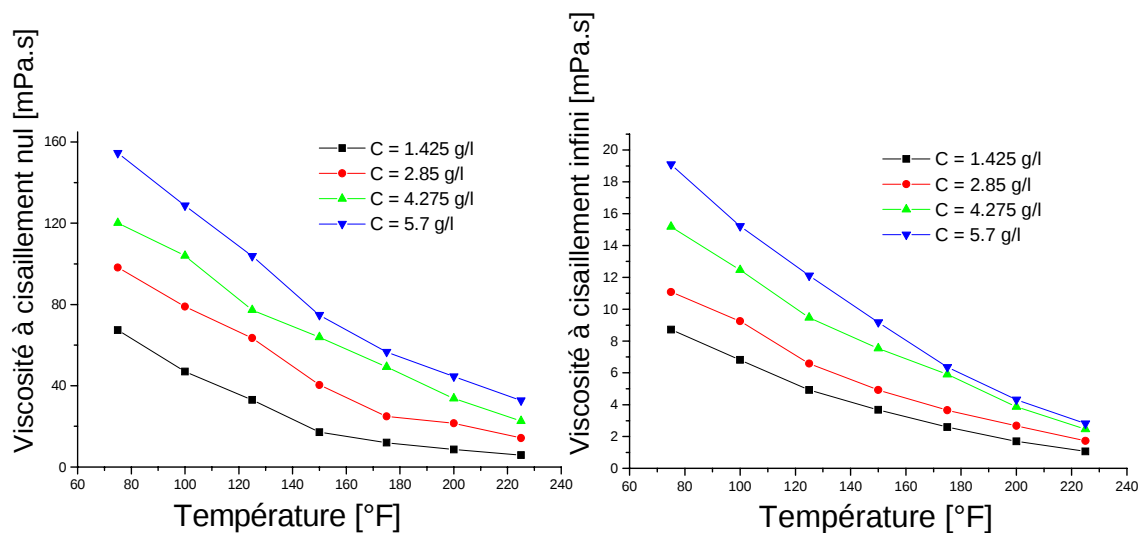


Figure IV.35 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Williams Carreau en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE300 en présence de 320 g/l de NaCl.

On remarque la même évolution du paramètre «p», et même ordre de grandeur de la viscosité à cisaillement infini et à cisaillement nul comparée avec les résultats donnés par le modèle de Cross.

IV.2.2.4) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU POLYMER HE300 EN PRESENCE DE 30 g/l de KCl :

Tableau IV.29 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 1,425 \text{ g/l}$:

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	6,550	4,600	2,980	1,920	0,820	0,610	0,300
μ_0 (mPa.s)	66,310	32,860	18,60	11,280	5,290	4,080	2,370
t (s)	2,890	6,739	13,680	19,790	41,160	25,480	91,080
p	0,256	0,182	0,160	0,164	0,113	0,172	0,128
D %	0,927	0,974	1,187	1,346	1,665	1,554	1,574

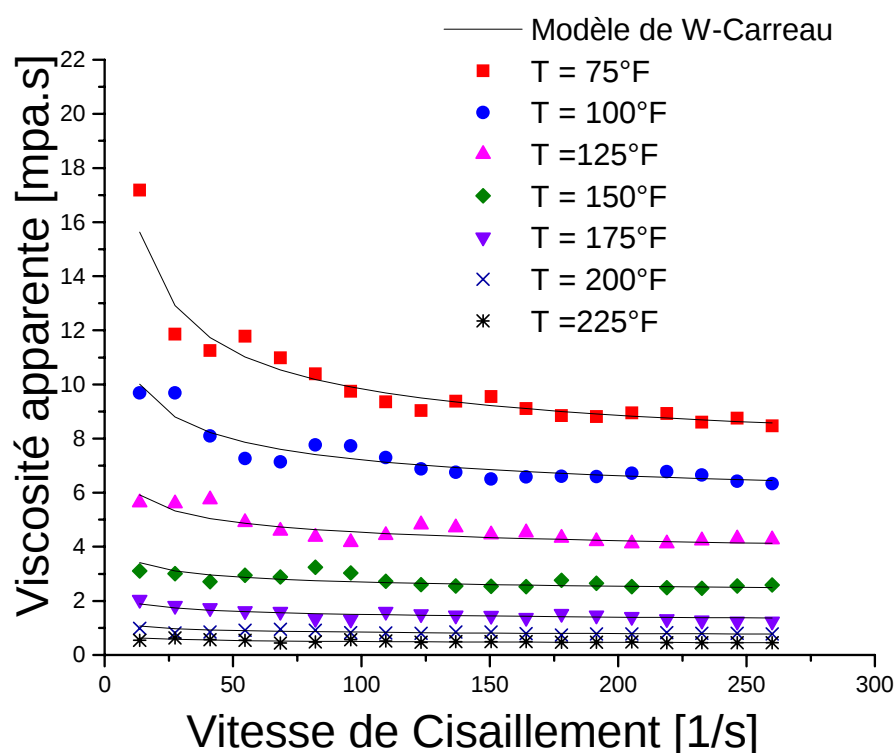


Figure IV.36 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 1,425 \text{ g/l}$ du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.30 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 2,85$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	8,160	6,720	4,260	3,110	2,500	1,490	0,830
μ_0 (mPa.s)	85,920	65,050	42,240	29,310	16,800	11,360	9,280
t (s)	2,168	2,596	5,968	9,423	13,690	21,230	16,440
p	0,235	0,229	0,175	0,164	0,157	0,148	0,198
D %	0,867	0,915	0,881	1,398	1,618	1,277	1,985

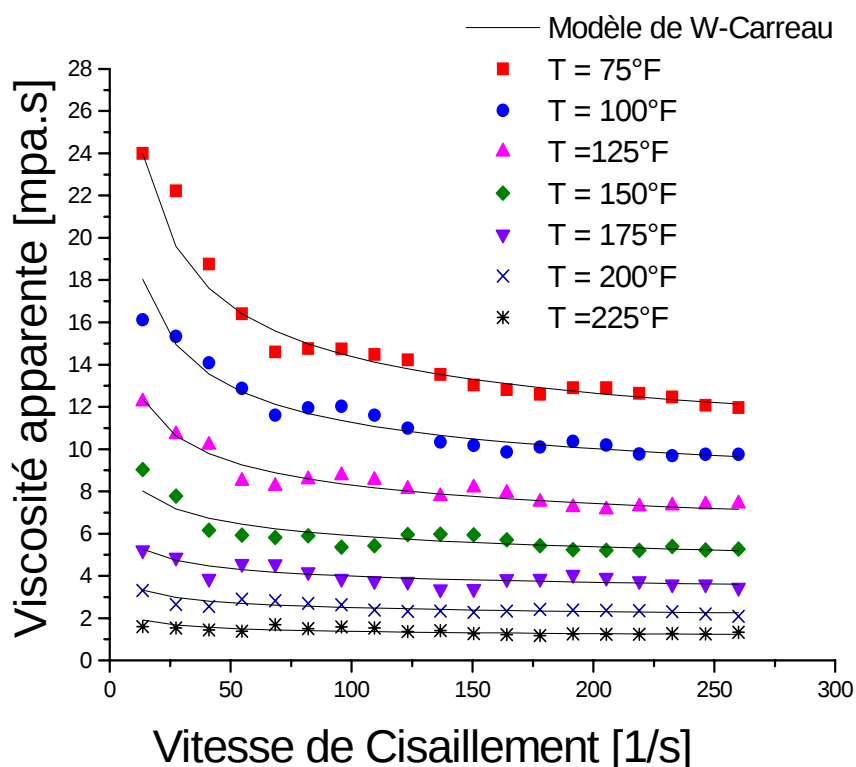


Figure IV.37 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 2,85$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.31 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 4,275$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	11,360	9,460	6,250	4,700	2,750	1,730	0,930
μ_0 (mPa.s)	115,860	99,260	72,290	45,970	29,910	20,430	15,430
t (s)	1,299	1,536	2,651	5,506	11,860	21,960	13,390
p	0,238	0,239	0,209	0,175	0,137	0,124	0,163
D %	0,704	0,80	0,797	0,796	1,098	1,765	1,991

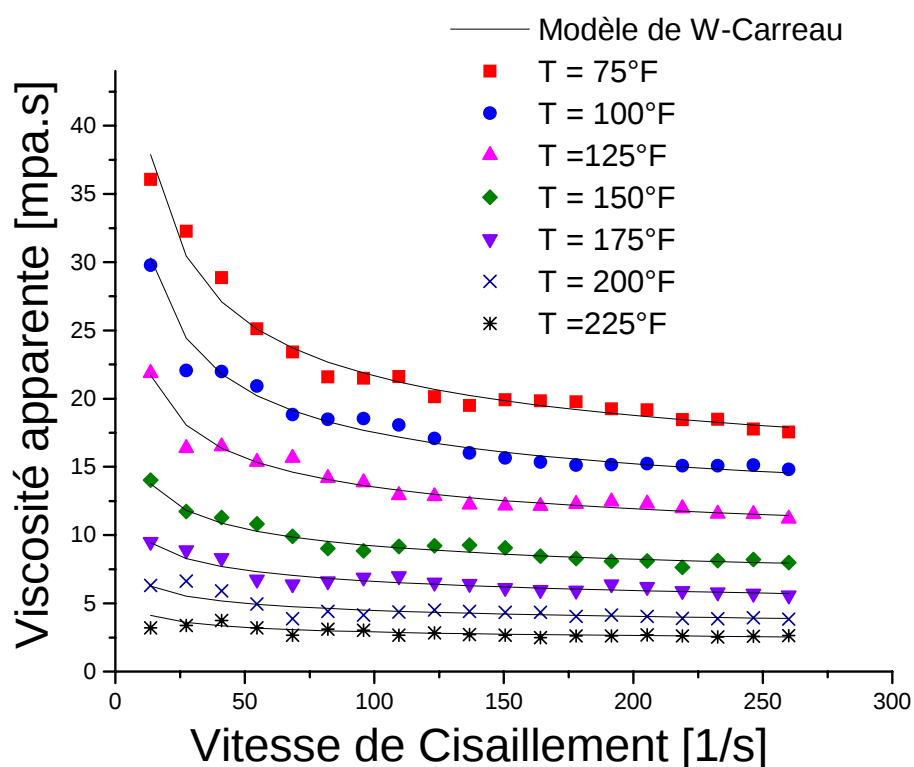


Figure IV.38 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 4,275$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Tableau IV.32 : Variation des paramètres rhéologiques du modèle de Williams Carreau pour le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl en fonction de la température pour une concentration $C = 5,7$ g/l :

	T=75°F	T=100°F	T=125°F	T= 150°F	T= 175°F	T=200°F	T =225°F
μ_{∞} (mPa.s)	12,820	10,640	7,220	5,170	4,290	2,140	1,590
μ_0 (mPa.s)	153,800	128,600	99,700	75,920	57,060	34,050	22,970
t (s)	0,839	1,111	2,100	2,594	3,292	9,074	18,650
p	0,258	0,242	0,202	0,204	0,209	0,148	0,122
D %	0,823	0,620	0,902	0,811	1,260	1,311	1,975

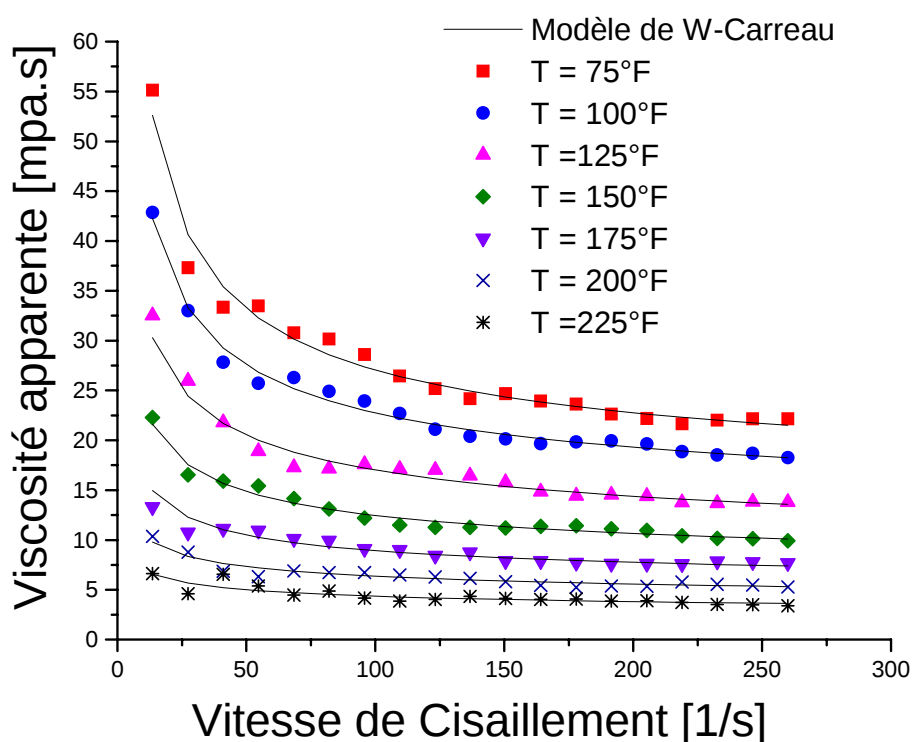


Figure IV.39 : Rhéogramme ($\mu_a - \dot{\gamma}$) représentant le modèle de Williams Carreau pour une concentration $C = 5,7$ g/l du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

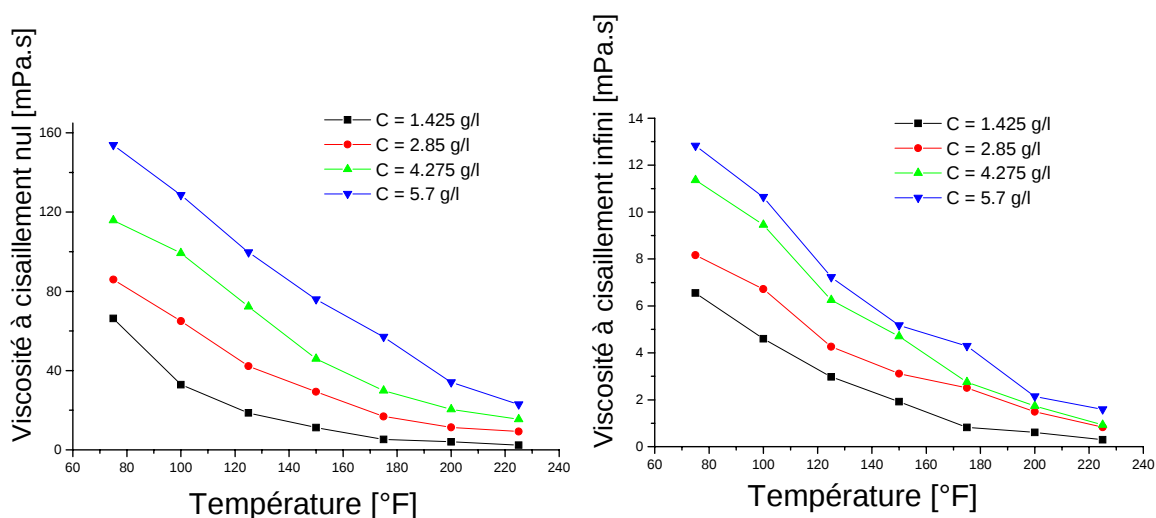


Figure IV.40 : Evolution de la viscosité à cisaillement nul et à cisaillement infini du modèle de Williams Carreau en fonction de la température pour différentes concentrations du polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl.

Au regard de ces résultats on remarque que les viscosités à cisaillement infini et à cisaillement nul sont pratiquement proches de ceux obtenu par le modèle de Cross.

Le paramètre « p » conserve la même évolution que les cas précédents.

Conformément aux paramètres établis, on remarque pratiquement la même évolution des paramètres du modèle de Williams Carreau par rapport à ceux obtenus à partir du modèle de Cross.

Les valeurs de la viscosité à gradient nul et à gradient infini déterminée à partir des deux modèles en structure sont sensiblement égales.

Les valeurs du paramètre « p » obtenues à partir du modèle de Cross et de Williams Carreau présentent la même évolution pour la plupart des cas.

Les valeurs du temps caractéristique calculé à partir des deux modèles considérés ne sont pas comparables.

Les valeurs des viscosités à cisaillement infini et nul obtenu pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl sont pratiquement élevées comparés aux autres, ce qui peut être expliquer par l'influence de la salinité sur les chaînes macromoléculaires composant le polymère.

IV.3) Conclusion :

Dans ce volet nous avons modélisé les courbes d'écoulement par deux modèles en structure : modèle de Cross et Williams Carreau. Ces deux modèles tiennent compte de l'évolution de la microstructure de la substance sous l'effet des diverses contraintes extérieures.

Ils reproduisent d'une manière très satisfaisante les courbes d'écoulements obtenus expérimentalement.

En effet la modélisation du comportement rhéologique par des modèles structuraux permet d'étudier profondément l'évolution de la structure de la substance sous l'effet des diverses contraintes extérieures.

L'application de ces modèles a permis de montrer que la viscosité prend des valeurs élevées à faible gradient de cisaillement ce qui peut être expliqué par une forte résistance des macromolécules au cisaillement et lorsque le gradient de cisaillement augmente, la structure sera détruite progressivement d'où une faible résistance à l'écoulement et par conséquent une viscosité minimale à gradient de cisaillement infini ; ceci confirme le comportement rhéofluidifiant du fluide [61].

Il apparaît clairement que les valeurs des viscosités obtenues à partir de ces deux modèles sont très proches. Elles décroissent en fonction de la température et augmentent en fonction de la concentration.

Le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl présente une viscosité élevée comparé avec le polymère HE300 en présence de 30 g/l de KCl ce qui permet de dire que le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl possède une structure qui résiste mieux à la température et aux effets de cisaillement.

Donc on peut conclure que les polymères de type HE confèrent un caractère viscosifiant au fluide et une bonne stabilité thermique, ceci est bien remarqué dans le cas du polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl.

CHAPITRE V

*ETUDE RHEOLOGIQUE DE DIFFERENTES
FORMULATIONS DE FLUIDES DE FORAGE UTILISEES
POUR LE FORAGE D'UN Puits D'HYDROCARBURE*

V.1) INTRODUCTION :

La découverte de gisements d'hydrocarbures n'est pas une tâche aisée. En effet, il n'existe pas de moyens techniques permettant à partir de la surface, de détecter avec certitude la présence d'hydrocarbures dans le sol.

Des forages pétroliers sont effectués afin de confirmer cette présence possible et la nature des hydrocarbures éventuellement contenus dans la roche réservoir.

Le forage d'un puits d'hydrocarbure nécessite l'utilisation de différentes formulations de fluides de forage à partir de la surface jusqu'au réservoir, ceci dépend de la nature du terrain traversé et de l'opération effectuée. Le succès d'un forage dépend principalement des performances du fluide qui circule dans la tige de forage en rotation et dans l'outil, pour remonter ensuite dans l'espace annulaire entre la tige et la formation ou le tubage d'acier vers la surface.

En fonction des connaissances acquises sur le sous-sol et de la topographie du terrain, on détermine la meilleure position pour mettre en oeuvre l'appareil de forage. Généralement à la verticale de l'épaisseur maximale de la couche supposée contenir des hydrocarbures, les foreurs vont réaliser un trou dans des conditions parfois difficiles. De faible diamètre (de 20 à 50 centimètres), ce trou de forage aura généralement une profondeur comprise entre 2000 et 4000 mètres. Exceptionnellement, certains forages dépassent les 6000 mètres. L'un d'entre eux a même dépassé 11000 mètres.

Dans cette section nous allons présenter une étude géologique de la formation qui sera traversée lors du forage d'un puits dans la région de Ain Salah ainsi que les formulations de fluides de forage utilisées pour le forage de chaque phase, suivi par une étude de sa rhéologie. Le forage de ce puits se fait en quatre phases.

V. 2) Formations géologiques des différentes phases du puits [62] :

V. 2.1) Première phase : Phase 26'' (de 0 à 350 m)

La section débute au crétacé supérieur, constitué de Calcaire Microcristallin avec des nodules de silex et d'argile au sommet suivi d'une alternance de Marnes et d'argile plastique avec de nombreuses passées de Calcaires à la base.

Puis elle pénètre dans un Continental intercalaire jusqu'à la profondeur de 350 m environ de la formation est essentiellement composée de sable moyen à grossier avec passées d'argile rouge sableuse.

V.2.2) Deuxième phase : Phase 17'' ½ (de 350 m à 1605 m)

Formation traversée : cette section traverse respectivement :

- le continental intercalaire (350 m – 900 m) constitué essentiellement de sable moyen à grossier avec des passées d'argile sableux au sommet et d'alternance d'argile et marnes plastiques à la base.
- Le Viseen : (960 m – 1560 m) composé surtout d'argile noir tendre à induire avec passées de grès fin et des calcaires ; suivi d'une alternance de grès de carbonate et d'argile indurée silteuse avec des passées de calcaire.
- Le Tournaisien (1560 m – 1630 m) dont la formation est constituée d'argile noire indurée silteuse au sommet de grès à la base. Cette formation gréseuse constitue l'un des objectifs. La section pénètre dans le Tournaisien jusqu'au toit du réservoir vers 1605 m.

V.2.3) Troisième phase : Phase 12'' ¼ (de 1605 m à 2837 m)

Formation traversée : cette section traverse respectivement :

- Le tournaisien argilo-gréseux (1615 m – 1630 m) constitué d'alternance de grès fin siliceux avec de nombreux joints argileux et d'argile indurée, silteuses, micacés, très pyriteuse.
- Le Strunien (1630 m – 1880 m) composé d'alternances centrimétriques d'argile indurée, silteuse et de grès fin siliceux à quartzite avec passées d'argile indurée, silteuse parfois feuilletée à la base.
- Le Famenien (1880m– 2370m) constitué essentiellement d'argile indurée plus au moins feuilletée, silteuse parfois pyriteuse avec rares fines passées de grès très fin.

- Le Frasnien (2370 m - 2770m) composé d'argile indurée localement tendre, silteuse avec passées de calcaire argileux.
- Le Givetien –Couvenien (2770 m - 2847 m) dont la formation est du calcaire argileux tendre avec passées d'argile indurée au sommet et de l'argile indurée silteuse avec passées de calcaire à la base.

La section s'arrête à la base de l'étage vers 2837 m.

V.2.4) Quatrième phase : Phase 8'' ½ (de 2837 m à 3907 m)

Cette section constitue la phase finale du forage, appelée aussi phase réservoir car il s'agit de forer à l'intérieur du réservoir d'hydrocarbure pour mettre ensuite le puits en production.

Formations traversées : cette section traverse respectivement :

- L'Emsien (2847 m- 2907 m) composé de l'Emsien gréseux qui constitue un objectif dont la formation est essentiellement gréseuse grès poreux au sommet et grès quartizique à la base.
- De l'Emsien argileux constitue d'alternance de fines passées d'argile indurée et de grès fin
- Le siegenien (2907 m– 3202 m) qui constitue également en objectif, il est composé :
- Au sommet par la basrre Siegenienne dont la formation est principalement des grès fins quartzitiques, finement micacés avec intercallations cintrimitriques d'argile.
- Les alternances Siegeniennes formées de passées d'épaisseur variable de grès fin à moyen, silicieux, quartzitique, de grès moyen friable à ciment d'argile, présence de nombreux films lamination, nodules et passées d'argile noire.
- Le Gedinien (3202 m – 3387 m) cette série est de même nature sédimentologique que les alternances Siégeniennes.

- Le Silurien (3387 m – 3807 m) la formation est essentiellement argileuse : argile grise à gris noire, très silteuse, légèrement feuilletée avec rares et fines passées de silt stone.
- L'ordevicien : la section pénètre dans l'Ordevicien jusqu'à une profondeur finale vers 3907 m.

A l'exception du Silurien qui est essentiellement argileux (400 m environ) nous constatons que tous les autres étages traversés sont constitués de grès et d'argile avec la prédominance des grès.

V.3) DESCRIPTION DE L'APPAREIL DE MESURE :

Le dispositif expérimental utilisé est un viscosimètre à cylindres coaxiaux de type Couette à vitesse de cisaillement imposé « Fann 35A » utilisé fréquemment sur chantier (fig V-1). Ce viscosimètre fonctionne à six vitesses de cisaillement.

On mesure la résistance au cisaillement de la boue contenue dans l'espace annulaire entre le rotor (cylindre extérieur) et le stator (cylindre intérieur immobile).

Le gradient de vitesse est obtenu par la vitesse de rotation du rotor et le gradient de déformation par la résistance à l'écoulement qui est engendré entre les deux cylindres, cette résistance est transformée par des ressorts tarés en lecture directe par l'intermédiaire d'un cadran gradué.



Fig V-1 : Viscosimètre Fann 35A

V.4) Composition du fluide de forage pour chaque phase :

V.4.1) Phase 26'' :

C'est le début de forage, il s'agit de creuser le trou, et de remonter les premiers déblais.

Cette section sera forée à la boue bentonitique de démarrage avec une rhéologie moyenne de faible densité et qui n'est pas très coûteuse.

- Carbonate de soude : 1g/l
- Bentonite : 60 g/l
- Soude caustique : 1g/l
- Viscosifiant (Id-Vis) : 1g/l

Les mesures rhéologiques ont été réalisées à l'aide du viscosimètre de chantier Fann 35A décrit précédemment.

Les paramètres rhéologiques que nous allons mesurer sont ceux calculés fréquemment sur chantier [63] :

$VP = L_{600} - L_{300}$: Viscosité plastique (cP).

$VA = L_{600} / 2$: Viscosité apparente (cP).

$YP = (VA - VP)/2$: Yield Point ($lb_f/100ft^2$)

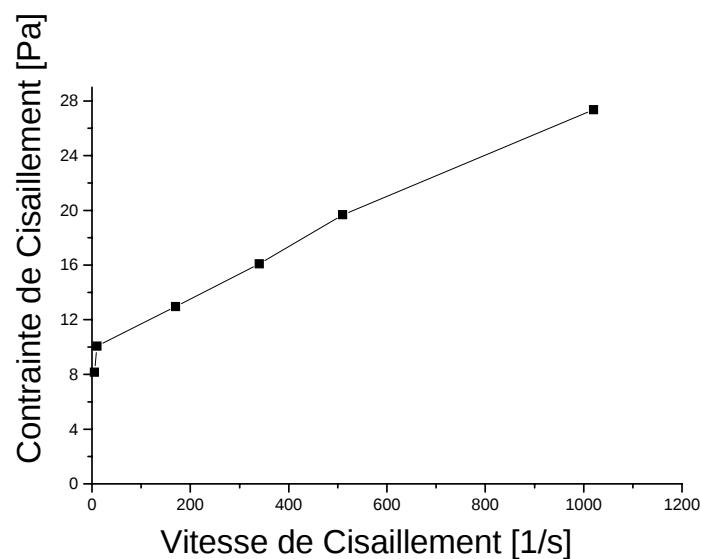


Fig. V-2 : Rhéogramme représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement pour la formulation de la phase 26''.

V.4.1.1) PARAMETRES RHEOLOGIQUES :

Les paramètres rhéologiques obtenus à partir de cette expérimentation sont :

VP = 16 cP

VA = 28,5 cP

YP = 25 lb_f/100ft²

V.4.2) Phase 17'' ½ :

Pour cette phase, une boue avec le polymère PAC (polyanionique cellulosique) de faible densité et de rhéologie moyenne sera utilisée pour la traversée de cette section qui normalement ne présente pas de problème particulier.

- Carbonate de soude : 1g/l
- Bentonite : 20 g/l
- Soude caustique : 2g/l
- PAC R : 4 g/l
- PAC L : 2 g/l
- CMC LV : 10 g/l
- Fluidifiant (si nécessaire) : 1ml

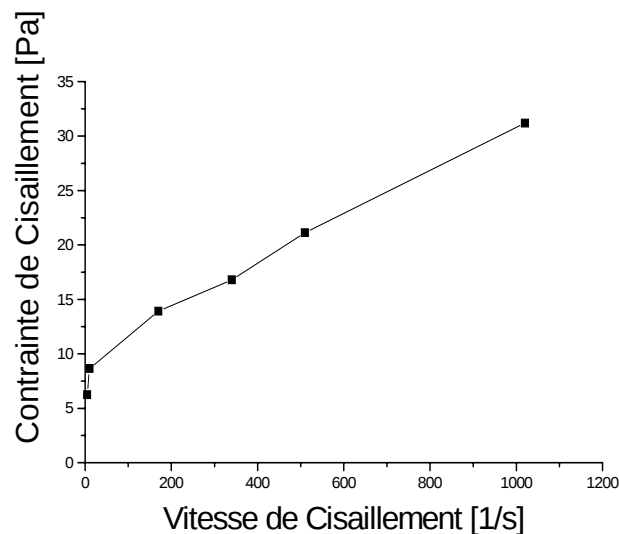


Figure V-3 : Rhéogramme représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement pour la formulation de la phase 17'' ½

V.4.2.1) PARAMETRES RHEOLOGIQUES :

Les paramètres rhéologiques obtenus sont :

VP = 21 cP

VA = 32,5 cP

YP = 23 lb_f/100ft²

V.4.3) Phase 12'' ¼ :

Compte tenu de la prédominance des argiles indurées feuilletées dans cette section, la boue aux polymères de la phase précédente sera utilisée, mais après avoir subi un traitement spécifique avec des agents stabilisateurs des argiles pour une bonne tenue des parois du puits.

- Carbonate de Soude : 1g/l
- Bentonite : 10 g/l
- Soude Caustique : 2 g /l
- PAC R : 2 g/l
- PAC L : 4 g /l
- Réducteur de filtrat CMC : 8 g/l
- Stabilisateur d'argile : 8 g/l
- Fluidifiant (si nécessaire) : 2 ml

Dans le but d'étudier les performances de la boue utilisée pour le forage de cette phase et celle du réservoir, des tests rhéologiques ont été effectués sur des systèmes de boue afin d'étudier leur degré de dégradation en fonction du paramètre température.

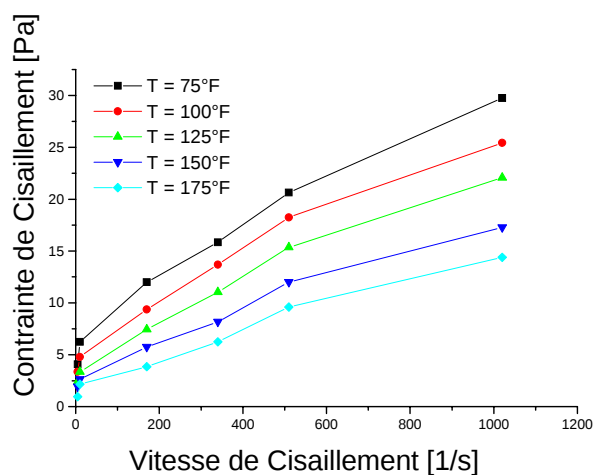


Fig V-4 : Rhéogramme représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement pour la formulation de la phase 12'' ¼ .

V.4.3.1) PARAMETRES RHEOLOGIQUES :

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

	T = 75°F	100°F	125°F	150°F	175°F
VP(cP)	21,0	15,0	14,0	11,0	10,0
VA(cP)	31,0	26,5	23,0	18,0	15,0
YP(lbf/100ft ²)	20,0	19,0	18,0	14,0	10,0

V.4.4) Phase 8'' ½ :

Cette section sera forée à la boue aux polymères de la phase précédente avec une rhéologie plus faible.

- Carbonate de soude : 1 g/l
- Bentonite : 10 g/l
- PAC R : 2 g/l
- PAC L : 4 g/l
- CMC : 8 g/l
- Idtex (Composé à base d'asphalte utilisé pour l'inhibition des argiles) : 6 g/l
- Therma thin (fluidifiant utilisé à température élevée) : 3 ml
- Baryte pour une densité d : 1,15

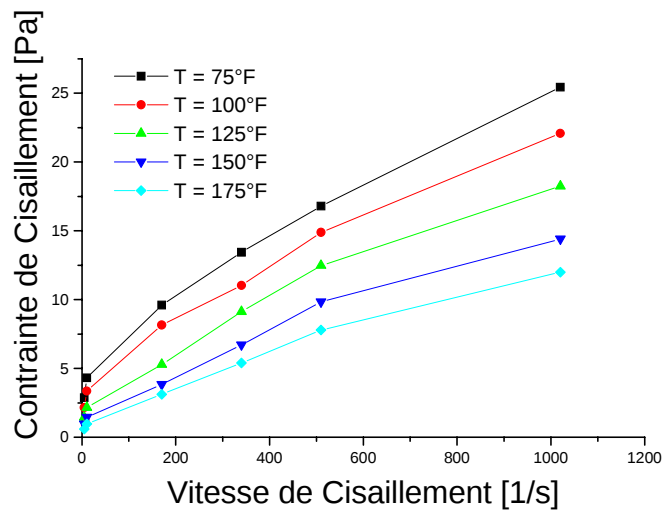


Fig V-5 : Rhéogramme représentant l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement pour la formulation de la phase 8'' ½.

V.4.4.1) PARAMETRES RHEOLOGIQUES :

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

	T = 75°F	100°F	125°F	150°F	175°F
VP(cP)	18,0	15,0	13,0	9,5	8,0
VA(cP)	26,5	23,0	19,0	15,0	12,5
YP(lb _f /100ft ²)	17,0	16,0	12,0	11,0	9,0

V.4.4.2) MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DE LA FORMULATION UTILISEE POUR LA PHASE RESERVOIR PAR LE MODELE DE CROSS :

Nous présenterons dans ce qui suit les paramètres caractéristiques du modèle de Cross qui est un modèle qui tient compte de l'évolution de la microstructure du fluide sous l'effet de cisaillement.

	T = 75°F	T= 100°F	T=125°F	T=150°F	T=175°F
μ_{∞} (mPa.s)	15,752	13,461	10,854	8,377	6,508
μ_0 (Pa.s)	1,848	1,636	1,315	1,178	0,751
t(s)	0,461	0,630	0,954	4,658	10,500
p	0,858	0,814	0,745	0,622	0,528

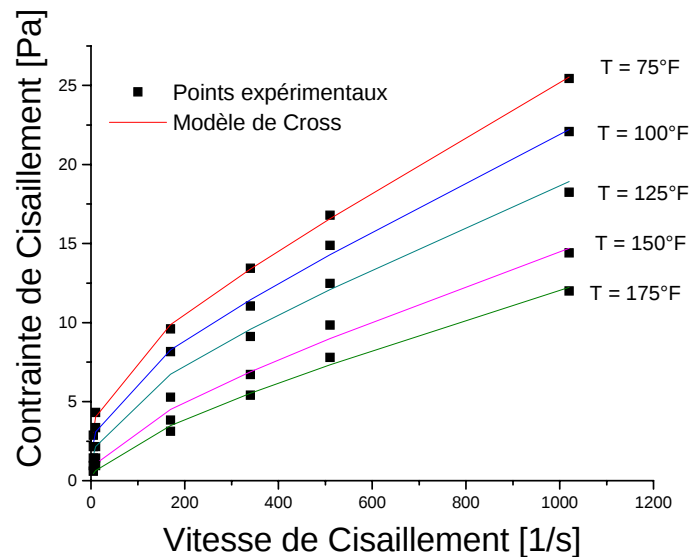


Fig V-6 : Modélisation du comportement rhéologique de la formulation utilisée pour la phase 8'' ½ à l'aide du modèle de Cross

Des résultats obtenus, nous remarquons que les valeurs de la VP sont élevées pour les phases 17'' $\frac{1}{2}$ et 12'' $\frac{1}{4}$, car elles génèrent de grande quantité de déblais de forage donc, il nécessite une boue avec une rhéologie moyenne pour les faire sortir.

En remarque une décroissance des paramètres rhéologiques (VP, VA et YP) en fonction de la température.

Les valeurs des paramètres du modèle de Cross : viscosité à cisaillement infini, à cisaillement nul et du paramètre « p » décroissent en fonction de la température.

Le paramètre « t » augmente en fonction de la température.

V.5) CONCLUSION :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les différentes formulations utilisées pour le forage de chaque phase d'un puits d'hydrocarbure dans la région de Ain Salah suivi d'une étude rhéologique.

On note que chaque phase nécessite une formulation bien précise pour assurer la traversée de la formation avec un minimum de problèmes d'où une étude géologique du terrain est primordiale.

Le début de forage se fait généralement avec des boues bentonitiques car ces dernières sont moins coûteuses et le forage de la première phase n'exige pas de formulation spéciale étant donnée que c'est au niveau de la surface où généralement il n'y a pas de grand risque à éviter.

Dés que l'on descend en profondeur, les terrains se changent, les formulations utilisées deviennent plus complexes, ce qui rend l'utilisation de divers composés chimiques indispensables, afin d'échapper aux problèmes qui peuvent se présenter lors du forage de ces phases.

Parmi les problèmes qui se posent lors du forage des phases les plus profond, on cite la dégradation thermique des additifs chimiques utilisés dans les fluides de forage. Dans l'intérêt de vérifier les performances rhéologiques de ces derniers, nous avons étudié l'évolution des paramètres rhéologiques des formulations utilisées pour les deux dernières phases.

Au cours de cette étude nous avons constaté une diminution de la valeur de la viscosité en fonction de la température ce qui peut être expliqué par une dilatation des liaisons inter particulaires. Par conséquent, les interactions entre particules deviennent plus faibles d'où la décroissance de la viscosité lorsque la température augmente.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le fluide de forage en circulation continue lors de l'opération de forage assure un rôle d'un intérêt majeur pour son succès.

Des polymères et des additifs chimiques de nature très différente (synthétiques, naturels) sont fréquemment employées dans les formulations de fluides de forage.

Ces polymères doivent posséder des propriétés rhéologiques adéquates aux diverses contraintes extérieures, tel que la température du puits, le cisaillement de l'outil, la salinité des formations traversées.

L'objectif principal du premier volet de ce travail était d'étudier l'influence de la température, la concentration et de la salinité sur le comportement rhéologique des deux polymères HE100, HE300. Ces polymères qui sont de composition et de poids moléculaires différents ont été développés pour leur utilisation dans des conditions de haute température et salinité.

Nous avons caractérisé le comportement rhéologique de deux types de polymères (HE100, HE300) de la famille «Vinyl Synthétique» en présence de deux milieux salés différents qui sont respectivement 320 g/l NaCl et 30 g/l de KCl.

Dans un premier temps, nous avons modélisé les courbes d'écoulement établies par des modèles classiques (Hershel Bulkley, Casson, Bingham, Ostwald et Casson Généralisé) et parmi ces modèles notre choix s'est porté sur le modèle de Casson Généralisé qui donne de bonne concordance par rapport aux points expérimentaux, et permet d'avoir plus d'information sur le comportement du fluide en raison de ces quatre paramètres, tout en notant que le modèle de Hershel Bulkley a donné des coefficients de dispersion proche de ceux de Casson Généralisé.

Ensuite nous avons utilisé une approche microscopique pour modéliser les courbes d'écoulement. Nous avons déterminé les paramètres du modèle de Cross et de Williams Carreau. Les modèles structuraux sont les plus appropriés pour décrire le

comportement rhéologique des solutions polymériques en raison de leurs dépendance de la microstructure du fluide.

La détermination des paramètres caractéristiques de différents modèles a été effectuée en utilisant une méthode d'optimisation basée sur une régression non linéaire appelé Levenberg-Marquardt.

Cette étude a permis de montrer que :

- Les polymères de type HE présentent un comportement rhéofluidifiant ce qui est justifié à partir du modèle de Casson Généralisé qui donne un indice d'écoulement $0 < n < 1$, et aussi des valeurs de la viscosité qui décroissent en fonction de la vitesse de cisaillement.
- Un faible seuil d'écoulement qui décroît en fonction de la température et augmente en fonction de la concentration.
- Des propriétés rhéologiques acceptables en présence de milieux salés et une stabilité thermique, ceci est plus particulièrement remarqué pour le polymère HE100 en présence de 320 g/l de NaCl [64,65].

Le dernier volet de ce travail a été consacré à la présentation de différentes formulations de fluides de forage utilisées pour le forage d'un puits dans la région «Tinguentour» à Ain Salah suivi par une étude rhéologique.

Au regard des formulations utilisées pour chaque phase ainsi que les résultats obtenus par la caractérisation rhéologique de chaque formulation, on peut conclure que chaque formation traversée nécessite une formulation bien précise et ceci pour contrecarrer les problèmes qui peuvent se produire lors du forage de cette phase.

L'analyse des courbes d'écoulement permet de conclure que les fluides de forage présentent dans la majorité des cas un comportement rhéofluidifiant, et un seuil d'écoulement qui est influencé par la température.

L'utilisation des fluides de forage ayant des caractéristiques rhéologiques adéquates pour la deuxième et la troisième phase a pour but un meilleur transport de déblais, alors que la phase réservoir nécessite une boue à faible taux de solide dans

l'intérêt d'éviter les problèmes de colmatage de la roche réservoir productrice de gaz ou de l'huile.

En perspective et dans l'intérêt d'étudier la dépendance du comportement rhéologique des solutions polymériques en fonction du temps, il serait intéressant de mener une étude en régime dynamique pour analyser les propriétés thixotropiques des solutions polymériques, tout en tenant compte de la concentration et de la température.

Références Bibliographiques

- [1] HERZHAFT B., «*Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels* », 36ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR 2001), Marne-la-Vallée France, 10-12 octobre 2001.
- [2] Forage Rotary, « *La boue de Forage* », Edition Technip 1972.
- [3] NGUYEN J., P., «*fluide de forage* », Technique d'exploitation pétrolière, le Forage Technip, 1993.
- [4] GARCIA C., PARIGO P., « *Boues de Forage* », Institut Français du Pétrole (I.F.P), société des éditions Technip, 1968.
- [5] DE LAMBALLERIE G., «*Boue à base d'huile* », Collection Colloques et Séminaires I.F.P, Edition Technip, 1969.
- [6] STRICKLAND S. D., « *Polymer Drilling Fluid in the 1990's : Will they replace oil-based mud ?* » SPE 29211, 691-692, 1994.
- [7] DUBOIS I., Thèse, «*Relation structure propriétés d'amidons modifiés : Application à la formulation de fluides de forage non polluants* », Université de Rouen, 1999.
- [8] Manuel Pratique des fluides de forage, Edition technip, 1969.
- [9] ABID D., «*Etude de synthèse sur les fluides de forage* », Rapport N° 419/94, Boumerdès, 1994.
- [10] MORSLI H., « *Air Drilling* », Eighth Arab Petroleum Congres, Alger, 1972.
- [11] MULLER G., «*Polymères hydrosolubles d'origine naturelle et synthétique* », Revue de l'Institut Français du pétrole, Vol 45, N°6, pp : 703-717, 1990
- [12] CARREGA et COLL, «*Matériaux industriels, Matériaux polymères*», Dunod, 2000.
- [13] WWW.cpchem.com/drillingspecialties/products.
- [14] BLAIR G. W. S, « *elementary rheology* », Academic Press, London and New.York, 1969.
- [15] RANALD V, GILES, «*Mécanique des fluides et hydraulique* », Serie Schaum 1992.
- [16] MIDOUX N., «*Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique* », Lavoisier, 3rd Ed., 1993.
- [17] EIRICH F. R., « *Rheology : Theory and applications* », Vol. 2., Academic Press Inc., New York, 1958.
- [18] OSTWALD, W., « *About a rate function of viscosity dispersed system* », Kolloid-Z. 36, 99-117, 1925.
- [19] DE WAELE A., « *Oil and color* », Chem. Assoc. J., 6, 33, 1923.
- [20] BINGHAM E. C., «*Fluidity and Plasticity* », Ed. Mc Graw-Hill, 1922.
- [21] CASSON N. «*Rheology of disperse systems* », Ed. Pergamon, 1929.
- [22] HERSCHEL, W.H., BULKLEY, « *R. Model for time dependent behavior of Fluids* », Proc. American Society of Testing Materials, 26, 621, 1926.

- [23] BENHADID S., Thèse, « *Rhéologie des écoulements sanguins : Modélisation, approches numérique et expérimentale* », Institut National Polytechnique de Lorraine, (1987).
- [24] BENHADID S., MAURICE S., DEVIENNE G., LEBUCHE M. et LUCIUS M., « *Caractéristiques rhéologiques, coefficients de frottement et écoulement en situation réelle de fluide à seuil* », *Rhéologica Acta*, Vol 27, 628- 633, 1988.
- [25] BIRD R.B, DAI G. C., and YARUSSO B. J., « *The rheology and flow of viscoplastic materials* » *Reviews in Chemicals Engineering*, Vol. 1(1), 1-70, 1982.
- [26] Dictionnaire de rhéologie, Groupe Français de Rhéologie, 1988.
- [27] CHENG D.C.H., « *Thixotropy* », *International Journal of Cosmetic Science*, 9, 151-191, 1987.
- [28] DOLZ-PLANAS M., ROLDAN-GARCIA C., HERRAEZ-DOMINGUEZ J.V. et BELDA Maximino R., « *thixotropy of different concentrations of microcrystalline cellulose : sodium carboxymethylcellulose gels* », *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 80, pp 75-79, 1991.
- [29] MARTINEZ Padila L. P., Thèse, « *Etude de la thixotropie de sauces amylacées : Application à la modélisation de leur écoulement en régime non stationnaire* », Institut National Polytechnique de Lorraine, 1988.
- [30] DOUBLIER J. L., CASTELAIN C., LEFEBRE J., FLAUD P., et QUEMADA D., « *Système caroube-Xanthane à faible teneur en Xanthane : viscoélasticité, écoulement et thixotropie* », *Acte du 3^{ème} Colloque T.I.F.A.N.*, pp 1-12, 1990.
- [31] EINSTEIN A., « *A New method of determining molecular dimensions* », *Ann phys. Leipzig* 19, pp 289-306, 1906.
- [32] EINSTEIN A., « *A new determination of molecular dimensions* », *Ann. Phys. Leipzig* 34, pp 591-592, 1911.
- [33] BERTHIER P., Thèse, « *Modélisation rhéologique de fluide de forage* », Université Paris VII, 1992.
- [34] VAND. V., « *Viscosity of Solutions and Suspensions. I Theory*, » *J. Phys. Colloid Chem.*, 52, 277–313 (1948).
- [35] MOONEY M., « *The viscosity of concentrated suspension of spherical particles* », *J. Colloid Sci.* 6, pp 162-170, 1951.
- [36] ROSCOE R., ROSCOE, R., « *The viscosity of suspensions of rigid spheres* » *Brit. J. App. Phys.*, 3, 267, 1952.
- [37] KRIEGHER I. M, DAUGHERTY T.J., « *A Mechanism of non-newtonien flow in suspensions of rigid spheres* », *Trans., Soc., Rheol.*, III, 137-152, 1959.
- [38] CROSS M. M., « *Rhéology of non- newtonian fluids : a new flow equation for pseudo-plastic systems* », *J. Colloid Sc.*, 20, pp 417-437, 1965.
- [39] WILLIAMS, M.C, « *Stresses in Concentrated Polymer Solutions: Part I. Shear Dependence of Viscosity* », *AIChE Journal*, 12, 1064, 1966.
- [40] BATCHELOR G. K., GREEN J. T., « *The determination of the bulk stress in a suspension of spherical particles to order c^2* ». *J. Fluid Mech.*, 56, 401,427, 1972.

- [41] BATCHELOR, G. K., « *The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles* », J.Fluid. Mech., 83, 97–117, 1977.
- [42] QUEMADA. D., « *Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle. I: Viscosity-Concentration Relation* ». Rheol. Acta, 16, 82-94, 1977.
- [43] QUEMADA. D., « *Rheology of Concentrated Disperse Systems and Minimum Energy Dissipation Principle. II: A Model for Shear Viscosity in Steady flows* ». Rheol. Acta, 17, 632-642, 1978.
- [44] QUEMADA D., « *Rheology of concentrated disperse systems*», Rheol. Acta 17, 643–653, 1978.
- [45] VINCENT A. Hackley, CHIARA F. Ferraris, « *Guide to Rheological Nomenclature : Measurement in Ceramic Particulate Systems* », NIST, Special Publication 946, January 2001.
- [46] GIBOREAU A., CUVELIER G., LAUNAY B., « *Rheological behavior of three polymer/ water systems with emphasis on yield stress and viscoelastic properties* », J. of Texture Studies, 25, 119-117, 1994.
- [47] JOULIE R., « *Mécanique des fluides appliquée* », édition marketing S.A., France, 1998.
- [48] KHERFELLAH N., BEKKOUR K., BENHADID S., « *Rheological characterization of water-based drilling muds* », International Conference on Engineering Rheology ICER'99, Applied Mechanics an Engineering 'Poceedings of the International Conference on Engineering Rheology ICER'99, Vol. 4, pp.339-344, , Juin 1999, (Zielona Gora) Pologne.
- [49] KHERFELLAH N., BEKKOUR K., BENHADID S., « *Caractérisation et modélisation rhéologique des fluides de forage à base de polymères* », 35ème Colloque du Groupe Francais de Rhéologie, Les Cahiers de Rhéologie :Rhéologie et innovation, Vol.XVII, Numéro1, pp. 307-317, 23-25 Oct. 2000, Grenoble (FRANCE).
- [50] DAIMALLAH A., KHEMMOUDJ A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Caractérisation rhéologique d'un fluide de forage* », 37^{ème} Colloque Annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR2002), Saint-Etienne, France 9-11octobre 2002.
- [51] BOUMAH RAT M., GOURDIN A., « *Méthodes numériques appliquées* », OPU 1993.
- [52] SINGIRESU S. RAO, « *Engineering Optimization* », Third Edition, Wiley-Interscience Publication, INDIANA, 1996.
- [53] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Influence de la température sur le comportement rhéologique de polymères utilisés dans les opérations de complétion* », 1^{er} Congrès International de Mécanique Constantine (CIMC'02), Constantine, Algérie 14-16 décembre 2002.

- [54] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Elaboration d'une méthode d'optimisation basée sur une régression non linéaire pour la détermination des paramètres rhéologiques de différents modèles : Application à un matériau thixotrope* », Troisième Colloque Franco-Libanais sur la science des Matériaux (CSM3), Beyrouth-Liban 16-18 mai 2002.
- [55] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Caractérisation rhéologique de polymères utilisés dans les opérations de complétion et de workover* », Sixièmes Journées Scientifique et Pédagogique de la Physique (JSP6), USTHB, Algérie 22-24 avril 2002.
- [56] KHERFELLAH N., BEKKOUR K., BENHADID S., « *Analyse spectrale et corrélation des fonctions viscoélastiques en régime transitoire et dynamique* », revue semestrielle publiée par le CRD- Sonatrach, Vol 02, N°1, pp 19-23 Janvier-Juin 2000.
- [57] LECOURTIER J., DEGOUY D., « *Relation between structure and efficiency of polymeric additives for drilling fluids* », revue de l'Institut Français du pétrole, Vol 49, N°2, pp : 177-186, 1994.
- [58] BEKKOUR K., ERN H. et LOUNIS M., « *Caractérisation rhéologique d'émulsions H/E et de suspensions de bentonite* », XVème Congrès Français de Mécanique, 3-7 septembre 2001, Nancy, France.
- [59] COURRAZE G., GROSSIORD J.L., « *Initiation à la rhéologie* », 2ème édition, Technip et documentation, Lavoisier, 1991.
- [60] Chauveteau G., « *Fundamental criteria in polymer flow through porous media in water-soluble polymers* », Glass, J.E, Ed., Adv. In chem. Ser., 213, 1986.
- [61] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Paramètres caractéristiques d'un fluide de forage* », Septièmes Journées Scientifique et Pédagogique de la Physique (JSP7), USTHB ALGERIE 16-18 mars 2003.
- [62] KEBIR et BENHAMDINE, « *Programme de forage Tiguentour-8* », Sonatrach, Hydra-Algérie, 1992.
- [63] Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, « *Manuel de rhéologie des fluides de forage et laitiers de ciments* », Edition technip, 1979.
- [64] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Rheological behavior of polymers used in drilling fluids formulations* », Second International Conference on Engineering Rheology (ICER 2003), Zielona Gora, Poland 24-27 august 2003.
- [65] DAIMALLAH A., KHERFELLAH N., BENHADID S., « *Etude de performances rhéologiques de polymère utilisé dans les formulations de fluides de forage* », Colloque International de Rhéologie, 18-20 Décembre 2003, Taghit, Algérie (Communication acceptée).