

Université Mustapha Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : D'agronomie

Laboratoire d'Étude des Structures et de Mécanique des Matériaux. Université

Mustapha Stambouli, Mascara.

THESE de DOCTORAT en Sciences

Filière :

Spécialité : Sciences de la Terre et de l'univers

Intitulée

**Effet des défloculants et des polymères sur les propriétés
rhéologiques et hydraulique des vases de barrage.**

Présentée par : M. LAKHACHE Brahim

Le.. / .. / 2025 à la bibliothèque de la faculté SNV

Devant le jury :

Président	MEDDAH Boumadienne	Pr	Université Mustapha Stambouli Mascara
Examineur	MERAD Laarej	Pr	Université Abou bekrBelkaid - Tlemcen
Examinatrice	BOUCHAOUR Mama	M.C. A	Université Abou bekrBelkaid - Tlemcen
Encadreur	HAMMADI Larbi	Pr	Université des Sciences et de la Technologie Oran Mohamed-Boudiaf
Co-encadreur	GAIDI Laouni	Pr	Université Mustapha Stambouli Mascara

Année Universitaire: 2024 - 2025

Remerciements

Je tiens, en tout premier lieu, à remercier Allah, le tout-puissant, de m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but. En deuxième lieu j'adresse tous mes remerciements à monsieur **HAMMADI Larbi** Professeur à l'université des sciences et de la technologie Mohammed Boudiaf d'Oran USTOMB, de m'avoir confié ce travail de recherche, aussi pour sa disponibilité, pour ses conseils judicieux, sa rigueur dans le travail et le partage de ses connaissances scientifiques. Ce fût un vrai plaisir de travailler avec lui. J'ai également apprécié la grande liberté qu'il m'avait accordée dans la gestion de ma thèse tout en étant très rigoureux sur le respect du programme et les délais de remise du travail. Merci pour m'avoir supporté tout ce temps et d'en avoir fait de cette période, une période très utile et agréable pour moi.

Mes remerciements vont à monsieur **GAIDI Laouni**, Professeure à Université Mustapha Stambouli de Mascara , d'avoir accepté le Co-Encadrement de cette thèse. Merci pour votre gentillesse, votre disponibilité, l'attention quotidienne que vous m'avez portée au cours de notre travail .

J'adresse tous mes remerciements à monsieur **MEDDAH Boumadienne**, Professeur à Université Mustapha Stambouli de Mascara , non seulement de faire partie de ce jury mais aussi de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie vivement monsieur **MERAD Laarej**, Professeur à l'université d'Abou Bekr Belkaid Tlemcen pour avoir accepté de faire partie du jury ainsi que pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail de recherche.

Tous mes remerciements vont à madame **BOUCHAOUR Mama**, Maître de conférences (A) à l'Université d'Abou Bekr Belkaid Tlemcen d'avoir acceptée de faire partie du jury et d'avoir acceptée d'examiner ce travail.

Je ne saurais oublier ma famille, et tout particulièrement mes parents, pour leur amour Inconditionnel, leurs prières, et leur encouragement constant.

À tous, je vous remercie du fond du cœur.

Dédicaces

À mes chers parents

À ma famille

A mes amis.

ملخص:

تُقدَّر كميات الطمي المتراكمة في السدود في الجزائر بآلاف الأطنان كل عام، مما يشكل مشكلة لتخزين المياه وتهديداً للبيئة (التخلص منها أثناء التفريغ أو التجريف). هذه الظاهرة، التي تتزايد سنة بعد سنة. و من أجل إطالة عمر هذا المشروع، أصبح تجريف الخزان حلاً لا غنى عنه على الرغم من الكميات الهائلة من الرواسب المستخرجة بواسطة بوابات قاع السد والتي لا تجد أي تطبيق، وتخزينها يشكل حالياً مشكلة تهدد البيئة. كان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير طبيعة وتركيز البوليمرات المختلفة والمشتتات على الخصائص الريولوجية والهيدروليكية لرواسب السد. علاوة على ذلك، تم اختبار تركيزات مختلفة من البوليمرات، لا سيما صمغ الزانثان (GX) وكاربوبول 940، وكذلك المواد المفلترية مثل ثلاثي فوسفات الصوديوم (STTP) وثنائي سيليكات الصوديوم (MSI) خلال هذا العمل. تُظهر نتائج هذه الدراسة أن طين جرجار (ولاية غليزان) هو تربة ناعمة ذات ليونة متوسطة بنسبة تقديرية من الرمل الناعم تبلغ 47%.

يكشف التحليل الكيميائي لهذا الطين عن تركيبة تهيمن عليها الأكاسيد السيليكاتية والكربونات ونسبة كبيرة من المادة العضوية. ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2)، بتركيز 45%، يشكل العنصر الرئيسي، مما يشير إلى أصل معدني سيليسي بشكل رئيسي. تشير الكمية الملحوظة من أكسيد الكالسيوم (CaO)، 25.17%، (إلى مساهمة كبيرة للمواد الجيرية، وغالباً ما تكون مرتبطة بعمليات ترسيب ذات أصل كربونات. تم تحليل قياسات التدفق الريولوجي في حالة مستقرة لأحواض السدود بشكل كلاسيكي باستخدام نموذج بينغهام. أظهرت الدراسة الريولوجية لبوليمر Carbopol 940 يوضح زيادة في عتبة التدفق، ومؤشر التناسق، وانخفاض مؤشر التدفق مع زيادة تركيز Carbopol 940. تم نمذجة سلوك تدفق الرواسب عند تركيزات مختلفة من ثلاثي فوسفات الصوديوم (STTP) و GX وفقاً لنموذج كروس المعدل. لقد أظهرنا بذلك إضافة 0.4% من سمحت بشكل خاص بتقليل معامل الاحتكاك بنسبة 96% و 25% على التوالي، لتركيزات الرواسب بنسبة 40% و 45% بالوزن.

الكلمات المفتاحية: تراكم الطمي، سد، تجريف، طين، الخصائص الريولوجية، الخصائص الهيدروليكية، معامل الاحتكاك، تقليل الاحتكاك، بوليمر.

Abstract:

The quantities of silt accumulated in dams in Algeria are estimated to be thousands of tons each year, which poses a problem for water storage and a threat to the environment (discharges during emptying or dredging). This phenomenon, which is growing year by year. In order to extend the lifespan of this structure, dredging the reservoir has become an indispensable solution despite the enormous quantities of silt extracted by the dam's bottom sluices, which have no application and whose storage currently poses an environmental threat. The objective of this study was to evaluate the impact of the nature and concentration of different polymers and deflocculants on the rheological and hydraulic properties of the reservoir sediments. Furthermore, different concentrations of polymers, namely xanthan gum (GX) and Carbopol 940, as well as deflocculants such as sodium tripolyphosphate (STTP) and disodium metasilicate (MSI) were experimented with during this work. The results of this study show that the Gargar clays (Relizane province) are fine soils with medium plasticity, with an estimated fine sand percentage of 47%.

The chemical analysis of this clay reveals a composition dominated by silicate and carbonate oxides, along with a significant proportion of organic matter. Silicon dioxide (SiO_2), with a content of 45%, constitutes the main element, indicating a predominantly siliceous mineral origin. The notable presence of calcium oxide (CaO , 25.17%) suggests a significant contribution of limestone materials, often associated with carbonate sedimentation processes. The steady-state flow rheological measurements of the dam slurries were classically analyzed using the Bingham model. The rheological study of Carbopol 940 polymer clearly demonstrated an increase in the yield stress, consistency index, and a decrease in the flow index with the increase in Carbopol 940 concentration. The flow behavior of the vessels at different concentrations of sodium tripolyphosphate (STTP) and GX was modeled according to the modified Cross model. We have thus shown The addition of 0.4% sodium tripolyphosphate notably reduced the friction factor by 96% and 25%, respectively, for sediment concentrations of 40% and 45% by mass.

Keywords: Siltation, dam, dredging, sludge, rheological properties, hydraulic properties, friction coefficient, friction reduction, polymer.

Resumé :

Les quantités de vases accumulées dans les barrages en Algérie sont estimées à des milliers de tonnes chaque année, ce qui pose un problème pour le stockage d'eau et une menace pour l'environnement (rejets lors des vidanges ou des dragages). Ce phénomène, qui prend de l'ampleur d'année en année. Afin de prolonger la durée de vie de cet ouvrage, le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable malgré les énormes quantités de vases extraites par les vannes de fond du barrage et qui ne trouvent aucune application et leur stockage pose actuellement un problème qui menace l'environnement. L'objectif de cette étude, a été d'évaluer l'impact de la nature et de la concentration de différents polymères et des défloculants sur les propriétés rhéologiques et hydrauliques des vases de barrage. Par ailleurs, différentes concentrations de polymères notamment, la gomme xanthane (GX) et Carbopol 940 , ainsi que des défloculants tels que le tripolyphosphate de sodium (STTP) et le métasilicate de disodium (MSI) ont été expérimentés lors de ce travail. Les résultats de cette étude montrent que les vases de Gargar (wilaya de Relizane) sols fins de plasticité moyenne avec un pourcentage de sable fin estimé à 47 %.

L'analyse chimique de cette vase révèle une composition dominée par les oxydes silicatés, carbonatés et une proportion importante de matière organique. Le dioxyde de silicium (SiO_2), avec une teneur de 45 %, constitue le principal élément, ce qui indique une origine majoritairement minérale siliceuse. La présence notable d'oxyde de calcium (CaO , 25.17 %) suggère une contribution importante de matériaux calcaires, souvent liés à des processus de sédimentation d'origine carbonatée. Les mesures rhéologiques d'écoulement en régime stationnaire des vases de barrage ont été analysées de façon classique par le modèle de Bingham. L'étude rhéologique de polymère Carbopol 940 a clairement mis en évidence une augmentation du seuil d'écoulement, de l'indice de consistance et diminution de l'indice d'écoulement avec l'augmentation de la concentration en Carbopol 940. Le comportement d'écoulement des vases à différentes concentrations de tripolyphosphate de sodium (STTP) et de GX a été modélisé selon le modèle de Cross modifié. Nous avons ainsi montré L'ajout de 0,4 % de tripolyphosphate de sodium a notamment permis de réduire le facteur de frottement de 96 % et 25 %, respectivement, pour des concentrations de sédiments de 40 % et 45 % en masse.

Mots- clé: Envasement, barrage, dragage, vase, propriétés rhéologique, propriétés hydraulique , coefficient de frottement, Réduction de frottement, polymère.

Sommaire

REMERCIEMENT

DEDICACES

Résumé.....	1
Sommaire.....	4
Liste des symboles	10
Introduction generale :	12

Chapitre 1 Problème d'envasement des barrages

1 Introduction	15
1.1 Envasement des barrages.....	15
1.1.1 Définition	15
1.1.2 Processus de l'envasement	15
1.2 Transport solide.....	18
1.2.1 Définition	18
1.2.2 Modes de transport solide	18
1.2.3 Conséquences du transport solide.....	19
1.2.4 Piégeage des sédiments dans la retenue	19
1.2.5 Causes de l'envasement des barrages	19
1.3 Moyens de lutte contre l'envasement	24
1.3.1 Constriction des murs.....	24
1.3.2 Moyens de lutte contre l'envasement utilisés en Algérie	25
1.3.3 Le dragage des barrages	27
1.3.4 Dragage hydraulique en Algérie.....	29

Chapitre 2 étude bibliographique de la rhéologie des fluides

2 Définition.....	30
2.1 Caractéristiques rhéologiques des liquides	32
2.1.1 Les lois de comportement	32
2.2 .Fluides à contrainte critique (seuil)	35
2.2.1 Courbe d'écoulement et modèles rhéologiques	35
2.3 Thixotropie.....	37
2.3.1 Définition	37
2.3.2 Protocoles de caractérisation de la thixotropie	39
2.4 Technique rhéomètres	39

2.4.1	Rhéomètre rotatif	39
2.5	Problèmes expérimentaux	40
2.5.1	Problème d'évaporation	40
2.5.2	Glissement aux parois	40
2.5.3	Inertie de l'outil rotatif	41
2.6	Comportement rhéologique des vases	41
2.6.1	Influence de granulométrie et nature minéralogique des sédiments	41
2.6.2	Influence de la salinité des eaux interstitielles	42
Chapitre 3 écoulement des fluides complexes dans les conduites		
3	Critères de similitude et nombres adimensionnels	44
3.1	Diamètre hydraulique	44
3.2	Nombre de Reynolds	44
3.3	Nombre de Déborah.....	44
3.4	Ecoulements non-newtoniens dans une conduite circulaire.....	45
3.4.1	Régime laminaire.....	45
3.4.2	Régime turbulent	48
3.5	Ecoulements non-newtoniens dans une conduite non-circulaire.....	49
3.5.1	Régime laminaire.....	49
3.5.2	Régime turbulent	51
3.6	Ecoulements d'un fluide non-newtonien dans une contraction brusque.....	51
3.6.1	Etudes numériques	51
3.7	Etudes expérimentales	53
Chapitre 4 Caractéristiques physico-chimiques de la vase du barrage Gargar		
4	Introduction	59
4.1	Caractéristiques physiques.....	61
4.1.1	Poids volumiques spécifique	61
4.1.2	Limites d'Atterberg	62
4.2	Calcul de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande.....	62
4.2.1	L'indice de plasticité.....	63
4.2.2	Analyse granulométrique	64
4.3	Les caractéristiques chimiques	66
4.3.1	Commentaires	67
4.4	Analyse thermogravimétrique (ATG) de la vase.....	67
Chapitre 5 comportement rhéologique de la vase de Gargar et Carbopol940		
5	Introduction	71

5.1 Moyens expérimentaux.....	71
5.2 Résultats et discussion	72
5.2.1 Effet de la concentration massique sur l'écoulement de la vase.....	72
5.2.2 Effet de la concentration massique sur l'écoulement de Carbopol 940	74
5.2.3 Influence de la concentration sur les paramètres rhéologique du Carbopol 940	76
5.2.4 Conclusion.....	79
Chapitre 6 Effet des additifs sur les propriétés rhéologiques et hydrauliques de la vase de barrage	
6.1 Introduction	81
6.2 Effet des additifs sur les propriétés rhéologiques de la vase	81
6.2.1 Effet de Tripolyphosphate de sodium.....	81
6.2.1.1 Effet de Tripoly phosphate de sodium (STTP) sur l'écoulement de la vase	88
6.2.2 Effet de méta-silicate de disodium (MSI) sur l'écoulement de la vase	91
6.2.3 Effet des polymères sur l'écoulement de la vase	92
6.3 Effet des additifs sur les propriétés hydraulique de la vase	99
6.3.1.1.Effet de STTP sur Nombre de Reynolds	99
6.3.2.2. Impact de GX sur le coefficient de frottement des sédiments des barrages.....	104
CONCLUSION général :	106

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1- 1: Processus de l'envasement des Barrages d'eau.....16

Figure 1- 2 : Processus de l'érosion hydrique(Cheggour ,2008).....17

Chapitre 2

Figure 2 - 1 : courbe d'écoulement dun fluide newtonien 32

Figure 2 -2: Comportement rhéofluidifiant d'un fluide..... 33

Figure 2 - 3: Comportement rhéofluidifiant avec deux régimes newtoniens 34

Figure 2 - 4 : Comportement rhéoépaississant (dilatant). 34

Figure 2 - 5 :Courbes d'écoulement de fluides avec contrainte seuil..... 35

Figure 2 - 6 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée..... 38

Figure 2 - 7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse imposée 38

Figure 2 - 8 : Rhéomètre plans à Translation 39

Figure 2 - 9 : : Schéma d'un rhéomètre coaxial cylindrique intérieur rotatif. 39

Figure 2 - 10 :: Schéma d'un rhéomètre rotatif à cône plateau. 40

Figure 2 - 11::Problèmes expérimentaux..... 41

Figure 2 - 12: Effets sur la courbe d'écoulement..... 41

Chapitre 3

figure 3. 1: distribution de la vitesse et de la contrainte de cisaillement 45

figure 3. 2: Ecoulement à travers une conduite circulaire 46

figure 3. 3: Profil de vitesse pour un écoulement laminaire d'un fluide non-newtonien 47

figure 3. 4: à faibles débits $Re < 0,1$: un seul petit vortex. 55

figure 3. 5: à forts débits $Re < 10$: un seul gros vortex. 56

figure 3. 6: à débits moyens $Re < 1$: deux vortex, un petit et un gros..... 56

Chapitre 4

Figure 4. 1 : Localisation de barrage de Gargar.....60

Figure 4. 2: Detemination de poids specifique 62

Figure 4. 3: limite de liquidité par l'appareil de casagrande..... 63

Figure 4. 4: Limite de plasticité par la méthode de rouleau..... 63

Figure 4. 5; Abaque de Casagrande pour la classification des sols fins 64

Figure 4. 6: Série des tamis normalisée..... 65

Figure 4. 7: processus de sedimentometrie 65

Figure 4. 8; courbe granulométrie de la vase du barrage Gargar 66

Figure 4. 9: Appareil d'analyse chimique X-SUPREMEHITACHI..... 66

Figure 4. 10: Appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG) 68

Figure 4. 11: analyse thermogravimétrique (ATG) de vase de barrage de GARGAR 68

Chapitre 5

Figure 5. 1: Rheometre hybride discovery HDR2..... 71

Figure 5. 2: Courbe d'écoulement de la vase de barrage de gargar pour différents concentrations massique. ... 72

Figure 5. 3: Variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique de la vase en fonction de la concentration massique. 73

Figure 5. 4: Module élastique et visqueux en fonction de la contrainte et fréquence 0.5 Hz pour différents concentrations massique en vase. 74

LISTE DES FIGURES

Figure 5. 5: Courbe d'écoulement du Carbopol 940 pour différents concentrations massique.	75
Figure 5. 6: Variation du seuil d'écoulement, d'indice de consistance et de l'indice d'écoulement en fonction de la concentration du Carbopol 940	77
Figure 5. 7: Variation du module élastique et visqueux en fonction de contrainte et fréquence 0.5 Hz pour différents concentrations massique en Carbopol 940.	78
Figure 5. 8: Variation du seuil d'écoulement calculé par essais en écoulement et en oscillation en fonction de la concentration de Carbopol 940	79

Chapitre 6

Figure 6. 1: Effet du tripolyphosphate de sodium sur l'écoulement de la vase barrage de gargar (40%)	82
Figure 6. 2: Effet du tripolyphosphate de sodium sur l'écoulement de la vase barrage de gargar (45%)	82
Figure 6. 3: Variation de seuil de l'écoulement de vase (40% et 45%) en fct de STPP.....	83
Figure 6 4: Variation de la viscosité au cisaillement nul et la viscosité d'équilibre de la vase (40% et 45%) en fonction de la dose de tripolyphosphate sodium.....	84
Figure 6.5: Variation du temps caractéristique et m exposant de la vase (40% et 45%) en fonction de la dose de tripolyphosphate de sodium.....	85
Figure 6.6 : Boucles d'hystérésis des mélanges vase tripolyphosphate de sodium : a) 40% Vase+ tripolyphosphate de sodium (0% ; 0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%) ; b) 45% Vase+ tripolyphosphate de sodium (0% ; 0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%).....	87
Figure 6.7 : Surface de thixotropie des mélanges vase (40% et 45%) - tripolyphosphate de sodium.....	88
Figure 6.8: Variation des modules élastiques et visqueux en fonction de la contrainte des mélanges 40% vase-STPP pour une fréquence de 0.5 Hz.....	89
Figure 6.9 : Variation de l'énergie cohésion de la vase de barrage Gargar (40% et 45%) en fonction de la dose de STPP.....	90
Figure 6.10 : Effet de méta silicate de disodium sur l'écoulement de la vase du barrage de Gargar (40% de vase).....	91
Figure 6.11 : Variation du seuil d'écoulement et de la viscosité plastique de la vase (40%) en fonction de la dose de méta silicate de disodium.....	92
Figure 6.12: Variation du seuil d'écoulement et des viscosités de la vase en fonction de la dose de gomme xanthane dans la suspension de vase (40%).....	94
Figure 6.13 : Comportement thixotropique de la vase de barrage pour différentes concentrations en Gomme xanthane.....	95
Figure 6.14 : Surface de thixotropie des mélanges vase (40%) - gomme xanthane.....	96
Figure 6.15: Variation des modules élastiques et visqueux en fonction de la contrainte des mélanges 40% vase-xanthane pour une fréquence de 0.5 Hz	97
Figure 6.16 : Effet de Carbopol 940 sur l'écoulement de la vase de barrage de Gargar (40% de vase).....	98
Figure 6.17 : Variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique de la vase en fonction de la dose de Carbopol 940 dans la suspension de vase (40%).....	99
Figure 6.18 : Variation du coefficient de frottement des sédiments des barrages en fonction des doses tripolyphosphate de sodium ajoutée.....	102
Figure 6.19 : Effet de tripolyphosphate de sodium sur la réduction de frottement.....	103
Figure 6.20 : Effet de gomme xanthane sur le coefficient de frottement de 40% des sédiments des barrages.....	105

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1- 1: Valeurs de K_{sog} pour différentes perméabilités (Ammari, 2012).....24

Tableau 1- 2: Classification des sols en vue des dragages (d'après l'AIPCN). 29

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Les principales lois rhéologiques d'écoulement utilisées pour décrire le comportement de tels fluides à contrainte de seuil.....36

Chapitre 3

Tableau 3- 1: Les constantes géométriques a et b pour les conduites rectangulaires. 50

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Caractéristiques du barrage Gargar- Bassin versant de l'oued Rhiou.....62

Tableau 4- 2:Classification d'un sol selon l'indice de plasticité IP selon CALLAUD M.,2004..... 63

Tableau 4- 3: limites d'Atterberg de la vase de barrage Gargar..... 64

Tableau 4- 4: Principaux éléments chimiques constituant la vase de Gargar 66

Tableau 4- 5:Désignation géotechnique en fonction de la teneur des carbonates 67

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Composition chimique de Carbopol 940.....75

Tableau 5.2 : Valeurs des constante A et B76

Chapitre 6

Tableau 6.1 : Composition chimique de Tripolyphosphate de sodium.....81

Tableau 6.2 : Composition chimique de méta silicate de di sodium (MSI).....90

Tableau 6.3 : Evolution de l'énergie cohésion et de la déformation critique en fonction de la concentration massique en gomme xanthane dans la vase de barrage.....98

Tableau 6.4 : Variation du de Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de Tripolyphosphate de sodium ajoutée au sédiments de barrage.....100

Tableau 6.5 : Variation du de Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de gomme xanthane ajoutée au sédiments de barrage.....104

LISTE DES SYMBOLES

Cm	Concentration massique	%
DH	Diamètre hydraulique	DH
EP	Erosion spécifique	T /Km ² /an
Ip	Intensité des précipitations	-
I	Pente du bassin versant	-
S	Susceptibilité des sols	-
K	Perméabilité	-
Ve	Végétation	-
Ps	Pertes annuelles de sol	t/ha/an
Es	Erodabilité du sol ou susceptibilité du sol à l'érosion	t.h/N.ha
Elp	Facteur de longueur de pente	-
Fp	Facteur de pente	-
Fam	Facteur d'aménagement	-
Fv	Facteur de conservation des sols pratiqué	-
Ass	Apport solide spécifique	t/Km ² /An
Pm	Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux	mm
Pan	Pluie moyenne annuelle	mm/an
h	Dénivelé moyen	m
S	Superficie du bassin	km ²
A	Apport solide spécifique	t/km ² /an
Ksog	Coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au tableau	-
R	Ecoulement annuel	mm
τ	contrainte de cisaillement	Pa
η	Viscosité	Pa.s-1
$\dot{\gamma}$	vitesse de cisaillement	s

Liste Des Symboles

K	indice de consistance	Pa.sn
n	indice d'écoulement	-
τ_0	contrainte critique	Pa.s
η_p	viscosité plastique	
DH	Diamètre des conduites	m
Re	nombre de Reynolds	-
ReC	nombre de reynolds critique	-
He	nombre d'hestrome	—
Poids spécifique		g/cm ²
P	Poids volumiques spécifique	g/cm ²
WL	limite de liquidité	-
Wp	Limite de plasticité	-
W	teneur en eau du mortier au moment de l'essai	-
N	nombre de coups correspondant à la fermeture du mortier sur 1 cm dans la coupelle	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Tous les pays du monde sont affectés par le phénomène d'envasement des barrages. Cependant, le taux d'envasement varie considérablement d'une région à l'autre [1]. Les pays du Maghreb sont particulièrement concernés par ce problème, avec le Maroc en première position, suivi par l'Algérie et la Tunisie [2, 3].

L'Algérie compte actuellement 98 barrages en exploitation, dont 43 ont une capacité supérieure à 10 millions de m³. L'ensemble de ces ouvrages représente une capacité totale de 4,5 milliards de m³ d'eau, permettant de réguler un volume annuel d'environ 2 milliards de m³. Cependant, en raison d'une forte érosion des bassins versants, ces barrages accumulent chaque année d'importantes quantités de sédiments, estimées à 20 millions de m³, ce qui entraîne une réduction progressive de leur capacité de stockage [4]. Cette perte de volume utile compromet la gestion durable des ressources en eau, élément vital pour le pays.

Bien que la prévention totale de l'envasement soit difficile, plusieurs solutions pratiques sont couramment utilisées ou envisagées. Parmi elles, on peut citer la protection des sols [5], l'extraction des sédiments par dragage [6, 7], ainsi que l'évacuation des eaux très turbides générées par les courants de densité [8]. Dans certains cas, la hauteur des barrages a également été augmentée afin de compenser la perte de volume due à l'envasement [9].

Différentes techniques de contrôle ont ainsi été testées en Algérie, permettant de prolonger la durée de vie utile de plusieurs barrages. Parmi ces techniques, le dragage hydraulique s'est récemment imposé comme une solution incontournable pour assurer le maintien en service des ouvrages hydrauliques sur le long terme. Toutefois, cette méthode présente certaines limites, notamment la perte de charge durant le transport des sédiments. Il devient donc essentiel de trouver des solutions efficaces pour réduire ces pertes.

À ce titre, plusieurs études ont montré que l'ajout de faibles quantités de polymères ou de tensioactifs dans un fluide peut entraîner une réduction significative de la friction pariétale en régime turbulent [10, 11]. La présente étude s'inscrit dans ce cadre, en s'intéressant à l'effet de l'ajout des polymères et de défloculants et sur la réduction du facteur de friction lors du transport des solides en conduite pendant les opérations de dragage.

L'originalité de ce travail réside dans l'utilisation de mesures rhéologiques pour évaluer les propriétés hydrauliques de l'écoulement d'un fluide complexe dans des conduites horizontales, appliquées spécifiquement à l'opération de dragage hydraulique des barrages.

Le but du présent travail est, d'une part, la caractérisation rhéologique de la vase du barrage de Gargar, et d'autre part, l'évaluation de l'effet de défloculants et de polymères comme moyens de réduction des pertes de charge pendant les opérations de dévasement.

Ce travail est divisé en six chapitres :

- Le **premier chapitre** introduit les notions fondamentales relatives à l'envasement et présente une synthèse des travaux antérieurs réalisés sur les barrages hydrauliques.
- Le **deuxième chapitre** traite de la rhéologie des fluides newtoniens et non newtoniens.
- Le **troisième chapitre** est consacré à une recherche bibliographique sur les écoulements de fluides complexes dans les conduites.
- Le **quatrième chapitre** présente les analyses physiques et chimiques de la vase utilisée dans cette étude, en vue de leur exploitation dans l'analyse rhéologique et hydraulique.
- Le **cinquième chapitre** porte sur l'étude rhéologique détaillée de la vase du barrage, ainsi que sur celle d'un polymère de type Carbopol 940.
- Enfin, le **sixième chapitre** traite de l'effet des additifs sur le comportement rhéologique et hydraulique de la vase du barrage de Gargar.

Ce travail se conclut par une synthèse des résultats principaux obtenus, suivie de quelques perspectives pour les recherches futures.

Chapitre 1

Problème d'envasement et la lutte contre
l'envasement des barrages.

1 Introduction

L'envasement des barrages est un phénomène naturel qui touche tous les barrages de l'Algérie, mais avec un taux qui varie d'un site à un autre. Ce phénomène d'envasement est la conséquence directe aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par les cours d'eaux puis transportées vers un lieu de dépôt dans la retenue. Selon une étude basée sur des séries statistiques comportant les données de 57 grands barrages, l'Algérie perd par envasement 45 à 50 millions de m³ chaque année [12].

Dans ce chapitre on s'intéressera au phénomène d'envasement dans le monde et en particulier en Algérie, ainsi à la lutte contre l'envasement.

1.1 Envasement des barrages

1.1.1 Définition

D'après [13] l'envasement est défini comme étant le dépôt de sédiments dans les retenues et barrages, réduisant ainsi leurs capacités de stockage. L'envasement des barrages causé essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eaux, elles se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes.

1.1.2 Processus de l'envasement

Le processus de sédimentation est une conséquence de deux phénomènes, l'érosion hydrique et le transport solide dans les cours d'eau. L'organigramme de la **figure 1.1** présente les étapes du processus de l'envasement des barrages.

1.1.2.1 . Erosion hydrique

1.1.2.1.1 Définition

L'érosion hydrique est composée d'un ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules du sol.

Elle se définit comme la perte de sol due à l'eau qui arrache et transporte la terre vers un lieu de dépôt [14].

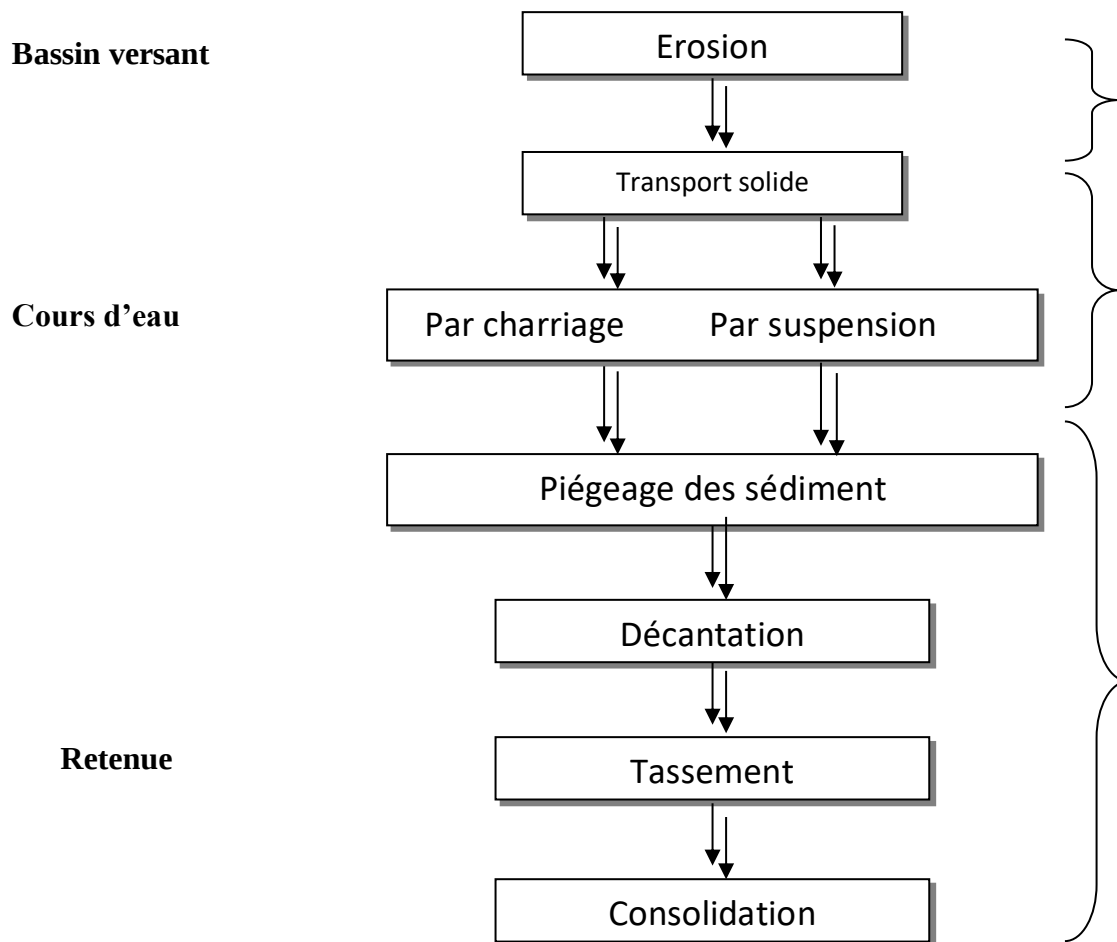


Figure 1.1 : Processus de l'envasement des Barrages d'eau.

1.1.2.1.2 Processus de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique des sols résultent de la conjugaison de trois mécanismes : le détachement des particules de sol, leur transport et leur dépôt (sédimentation) (**figure 1.2**), causés par l'action combinée de la pluie et du ruissellement, et dont l'expression varie en fonction de la résistance du milieu (sol, couvert végétal, techniques culturales...) et de la topographie [15], le processus de l'érosion hydrique passe par trois phases :

1.1.2.1.3 Formes de manifestation de l'érosion hydrique

D'après [16] et [17], il existe trois principales formes de l'érosion hydrique, à savoir :

- ❖ Erosion en nappe
- ❖ Erosion en masse
- ❖ Erosion linéaire

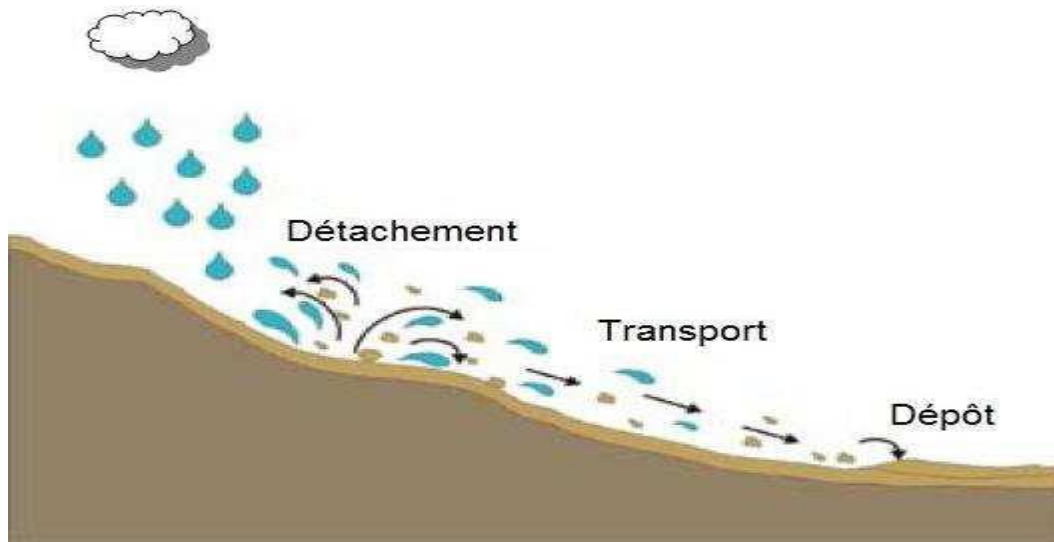


Figure 1. 2 : Processus de l'érosion hydrique [15],

1.1.2.1.4 Causes et facteurs de l'érosion

Selon **Ben Slimane [18]**, il existe deux principaux types de facteurs de l'érosion : les facteurs naturels regroupés sous quatre grandes familles, à savoir : le climat, la topographie, la lithologie et le couvert végétal ; et les facteurs anthropiques relatifs aux activités humaines tel que [19]:

- La déforestation et les incendies, favorisant l'écoulement de l'eau
- L'utilisation des serres
- La croissance démographique et l'urbanisation
- La mécanisation de l'agriculture et le compactage des sols
- L'exode rural de plusieurs agglomérations dû à l'insécurité;
- Le surpâturage
- Les colonisations, les guerres et les exploitations minières.

1.1.2.1.5 Conséquences de l'érosion hydrique

Les conséquences de l'érosion hydrique des sols sont nombreuses tant en zones érodées qu'en zones de dépôts :

1.1.2.1.6 Conséquences de l'érosion hydrique en zones érodées

L'érosion hydrique a des effets sur les zones érodées, parmi lesquels on cite :

- La diminution de la capacité du sol à retenir l'eau et de la mettre à la disposition des végétaux;
- La diminution du drainage profond induisant une moindre réalimentation des nappes;

- L'appauvrissement du sol : si la teneur en humus et en éléments nutritifs du sol décroît la stabilité structurale du sol décroît;
- Les déchaussements, les plantes emportées ou recouvrement de la culture;
- La baisse des rendements des cultures, une augmentation des coûts de production des aliments;
- La dégradation des terres agricoles et une désertification du milieu naturel.

1.1.2.1.7 Conséquences de l'érosion hydrique en zones de dépôts

Les conséquences sur les lieux de dépôt sont plus nombreuses, parmi eux en cite:

- Une sédimentation des sols érodés dans des endroits non désirables ;
- L'envasement accéléré des barrages, des retenues, des canaux d'irrigation et des réservoirs en aval ce qui affecte leur capacité à mobiliser les eaux de surface dans un but d'irrigation ou d'alimentation en eau potable par exemple;
- La destruction des infrastructures et le recouvrement des fossés, des routes, des chemins et des ponts;
- L'exhaussement des lits des rivières et risque d'inondation des terres voisines.

1.2 Transport solide

1.2.1 Définition

Le transport solide correspond à la phase du transfert de ces particules ou matériaux arrachés en phase 1, de leur emplacement originel vers une nouvelle situation sous l'effet des eaux courantes.

1.2.2 Modes de transport solide

Généralement deux modes de transport solide sont considérées : le transport solide par charriage et le transport solide en suspension. Les deux modes diffèrent par deux aspects essentiels : dans le premier cas, les particules se déplacent par roulement et glissent sur le fond et leurs vitesses est inférieure à celle de l'écoulement.

Dans le deuxième cas, les particules se déplacent au sein de l'écoulement avec une vitesse de même ordre de grandeur que celle du fluide. Il n'existe pas de délimitation nette entre ces deux modes de transport. **Probst et Bazerbach [20]** ont considéré un troisième mode de transport solide compris entre les deux premiers, la saltation, où les particules se déplacent par des bonds.

1.2.3 Conséquences du transport solide

Le transport solide dans les oueds à des conséquences néfastes sur le régime d'écoulement, nous citons parmi eux :

- Risques de débordements existants ou consécutifs à une remontée du lit;
- Impact de la suppression ou de la modification des débordements sur les débits maxima en aval;
- Abaissement des lignes d'eau sur les nappes et sur les zones humides;
- Abaissement des fonds sur la tenue des ouvrages, ponts, seuils, protections de berge;
- Risques d'érosion des infrastructures;
- Risques d'érosion et d'inondation des terres agricoles ;
- Dégradation des prises d'eau;
- Impact sur le paysage et la qualité générale de la rivière.

1.2.4 Piégeage des sédiments dans la retenue

Si les crues Arrivées dans la retenue, les particules solides sont piégées dans les eaux calmes de ces dernières, se déposent, se tassent et se consolident, diminuant ainsi progressivement leur capacité de stockage d'eau.

L'envasement des retenues est définit comme étant l'accumulation successive des sédiments transportés par les cours d'eau dans les retenues.

1.2.5 Causes de l'envasement des barrages

1.2.5.1 Taille du bassin versant

Il apparaît nettement que les plus petits bassins versants produisent proportionnellement le plus de dépôts.

Cela est tout à fait normal, si l'on considère que sur un bassin versant de taille réduite les matériaux érodés peuvent être entraînés et déposés dans la retenue au cours d'une même crue, les distances à parcourir étant faibles et engénéral la pente du lit de l'oued assez forte. Par contre dans un grand bassin versant, il peut exister des zones d'épandage intermédiaires, ou des tronçons de lit où l'oued divague et peut abandonner une partie de la charge solide transportée; les sédiments peuvent alors être repris plusieurs fois avant d'aboutir dans la retenue du barrage [21].

1.2.5.2 Conséquences de l'envasement des barrages

L'envasement des barrages engendre des conséquences néfastes (techniques, économiques et écologiques).

1.2.5.2.1 Réduction de la capacité de la retenue

L'accumulation des sédiments dans le fond des retenues des barrages provoque une réduction de sa capacité de régularisation et sa durée de vie.

1.2.5.2.2 Obturation des organes de vidange

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du dysfonctionnement des vannes de vidange de fond. L'accumulation des sédiments près de la digue due à la présence de courants de densité dans la retenue du barrage peut conduire à l'obturation des vannes de vidanges.

1.2.5.2.3 Sécurité de l'ouvrage

L'accumulation des sédiments qui progressent vers la digue grâce aux courants de densité générés au fond de la retenue exercent une forte pression sur la structure de la digue de l'ouvrage et augmentent la probabilité de fissuration de celle-ci. L'ouvrage devient particulièrement instable et fragile. Les inondations ou les séismes de faibles magnitudes peuvent engendrer le glissement ou la destruction de la digue [22]

1.2.5.2.4 Evasement des canaux d'irrigation

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau (des canaux) d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage et provoque une détérioration rapide du réseau d'irrigation. D'après **Remini et Bensafia [23]** ce type d'envasement oblige les agriculteurs à effectuer périodiquement des opérations de curage par des moyens mécaniques.

1.2.5.2.5 Dégradation de la qualité de l'eau et l'eutrophisation

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau.

1.2.5.3 Méthodes utilisées pour la quantification de l'envasement

Les diverses méthodes utilisées en vue de déterminer l'envasement des retenues sont regroupées en deux groupes, à savoir:

1.2.5.3.1 Méthodes directes

Le contrôle de l'envasement des retenues des barrages permet la surveillance des ouvrages et la détermination des mesures de protection à prendre. Parmi les méthodes directes utilisées pour déterminer la quantité des sédiments déposés dans les retenues des barrages en cite :

1.2.5.3.1.1 Méthode de la stéréophotogrammétrie

L'un des procédés actuels les plus précis pour établir les données de base est la stéréophotographie aérienne, complétée au sol par un travail de triangulation et de stéréopréparation topographique. L'erreur commise par ce procédé dans l'évaluation des coordonnées des points particuliers et de l'ordre de 0,10 m. Une telle précision permet d'utiliser cette technique pour déterminer et mesurer l'envasement des retenues par réitération des photographies semblables à des intervalles de temps suffisant, de l'ordre de cinq ans [24].

1.2.5.3.1.2 Méthode de vidange et remplissage

La vidange décennale des barrages, définissant le volume utile correspond à la côte normale dans une période donnée. Donc la quantité d'eau lâchée détermine le volume de vase déposé dans la retenue depuis sa mise en service. En général, cette méthode est utilisée pour les retenues ayant une faible capacité [24].

1.2.5.3.1.3 Méthode turbidimétrique

La mesure de turbidité ou la détermination du transport solide en suspension est faite selon la méthode classique qui consiste à filtrer sur papier-filtre les échantillons d'eau prélevés et à mesurer le poids de la boue par unité de volume (1 litre) après séchage à l'étuve et élimination des matières organiques par calcination à une température de 110°C. En multipliant cette concentration par le débit liquide instantané. Durant toute la crue, on trace le turbidigramme dont le planimétrage donne les masses solides transitées toute l'année, durant toutes les crues.

1.2.5.3.1.4 Méthode bathymétrique

La bathymétrie est la science qui permet de mesurer les profondeurs des océans, mais également des barrages, des lacs, des rivières, et de tout élément liquide pour déterminer la topographie du sol.

Aujourd'hui les mesures sont effectuées en exploitant la réflexion d'ondes acoustiques à l'aide des sondeurs bathymétriques. La profondeur est déduite donc de la mesure du temps du trajet d'un signal acoustique réfléchi par le fond.

L'échosondeur ou sondeur est un appareil électronique de détection subaquatique placé sous la coque des navires. Il mesure les fonds, mesure la profondeur et détecte la présence d'obstacles ou de poissons à la verticale du bateau.

Ces informations sont généralement transmises sous la forme d'une image défilant sur un écran.

Il existe deux types de sondeurs acoustiques : les sondeurs mono-faisceau et les sondeurs multifaisceaux.

Les épaisseurs des sédiments cumulés sont déterminées en comparaison entre les nouveaux profils de levé bathymétrique réalisé et les profils préalablement repérés [25].

1.2.5.3.1.5 Mesure à l'échosondeur

Cette méthode a pour principe le relevé des fonds de la retenue le long du profil en travers choisi préalablement, les profondeurs sont enregistrées par un échosondeur à ultrason composé lui-même d'un émetteur et d'un enregistreur sur papier, le tout transporté par un bateau.

Connaissant les profils en travers initiaux, et en utilisant les nouveaux profils envasés, on peut déduire le volume de la vase déposée au fond de la retenue. Cette méthode est utilisée dans les grandes profondeurs car la précision est de l'ordre de 20 cm [24]

1.2.5.4 Méthodes indirecte (Formules empiriques)

Parmi les formules empiriques les plus utilisées pour déterminer le taux d'envasement des retenues des barrages, nous retiendrons les formules suivantes:

1.2.5.4.1 Formule de Henin

Cette formule symbolise la relation existante entre l'érosion hydrique et les facteurs susceptibles de la favoriser ou de la limiter. La quantification de l'érosion spécifique " E_s " est donnée par la formule (1.1) [26].

$$E_s = \frac{I_p I S}{K V_e} \quad (1.1)$$

avec :

E_s : Erosion spécifique en(T /Km²/an);

I_p : Intensité des précipitations;

I : Pente du bassin versant; Les facteurs " I_p " et " I " favorisent l'érosion;

S :Susceptibilité des sols;

K : Perméabilité;

V_e : Végétation.

Les facteurs S , K et V_e limitent l'érosion et en plus les facteurs S et V_e semblent les plus difficiles à quantifier.

1.2.5.4.2 Formule de Wischmeier et Smith (Universal Soil Loss Equation - 1958)

Il s'agit d'un modèle d'érosion, permettant d'évaluer les zones à haut risque et de quantifier les pertes en sol moyennes annuelles. Le modèle permet l'estimation des quantités de sédiments qui seront transportées par un cours d'eau (formule 1.2).

$$P_s = E_p \cdot E_s \cdot E_{lp} \cdot F_p \cdot F_{am} \cdot F_v \quad (1.2)$$

avec :

P_s : Pertes annuelles de sol en (t/ha/an);

E_p : Erosivité des précipitations en (N/h);

E_s : Erodabilité du sol ou susceptibilité du sol à l'érosion en (t.h/N.ha);

E_{lp} : Facteur de longueur de pente (sans dimension);

F_p : Facteur de pente (sans dimension);

F_{am} : Facteur d'aménagement (sans dimension);

F_v : Facteur de conservation des sols pratiqué (sans dimension).

1.2.5.4.3 Formule de Fournier

Fournier (1960) a développé un modèle pour prédire les apports solides à l'exutoire d'un cours d'eau quel que soit son emplacement géographique en utilisant les données de 104 bassins versants provenant de différentes régions du globe (Equation 1.3).

$$A_{ss} = \frac{1}{36} (P_m^2 / P_{an})^{2,65} (h^2 / S)^{0,46} \quad (1.3)$$

avec :

A_{ss} : Apport solide spécifique en (t/km²/an);

P_m : Pluie mensuelle moyenne du mois le plus pluvieux en (mm);

P_{an} : Pluie moyenne annuelle en (mm);

h: Dénivelé moyen en (m);

S: Superficie du bassin en (km²).

1.2.5.4.4 Formule de Sogreah

Basé sur les données recueillies dans 30 bassins d'Algérie de superficie comprise entre 100 et 300 km², soumis à une pluviométrie annuelle comprise entre 300 et 1000 mm, dont 16 alimentant des barrages réservoirs, l'équation est la suivante [13] :

$$A = K_{sog} R^{0,15} \quad (I.4)$$

Avec :

A: Apport solide spécifique en (t/km²/an);

K_{sog}: Coefficient dépendant de la perméabilité du sol, donné au tableau (I.1) ci-dessous;

R: Ecoulement annuel en (mm).

Les valeurs du tableau (1.1) représentent les valeurs pondérées des paramètres ***K_{sog}*** en fonction de leur recouvrement respectif sur le bassin versant.

Tableau 1- 1: Valeurs de Ksog pour différentes perméabilités [13].

Perméabilité	K _{Sog}
Forte	8,5
Moyenne	75,0
Moyenne à faible	350,0
Perméabilité faible	1400,0
Imperméable	3200,0

1.3 Moyens de lutte contre l'envasement

1.3.1 Construction des murs

Au cours des années 1980, des murs de pierre et des terrasses ont été construits en Éthiopie pour lutter contre l'érosion des sols [27]. Dans les années 1970, le gouvernement chinois a

construit des barrages de retenue dans les ravines du plateau de Lœss afin de contrôler l'érosion des sols [28, 29].

1.3.2 Moyens de lutte contre l'envasement utilisés en Algérie

D'après Mekerta [30] l'envasement des barrages en Algérie a pris de telles proportions qu'il diminue la capacité des retenues de 50 à 80 % et l'espérance de vie des retenues de barrages est de l'ordre de 20 à 100 ans. Pour cela beaucoup d'efforts ont été déployés par les services de l'hydraulique dans la lutte contre l'envasement pour allonger la durée de vie des barrages en exploitation. Plusieurs solutions sont possibles pour la lutte contre l'envasement des barrages :

1.3.2.1 Réduction des apports solides à la retenue

Cette méthode consiste l'aménagement des bassins versants en vue de leur protection contre l'érosion à travers :

- Plantation de végétation à longues tiges dans les oueds;
- Réalisation des banquettes;
- Correction torrentielle;
- Réduction des apports solides par piégeage des sédiments dans des réservoirs de décantation à travers la réalisation des barrages de décantation, comme le cas du barrage de Boughezoul qui est exploité partiellement comme bassin de décantation du barrage de Ghrib. Ce barrage a permis de retenir depuis sa création environ 35 hm³ de vase. Il réduit l'envasement de Ghrib de près de 24 %.
- **La conservation des sols**

Il s'agit de l'aménagement des bassins versants par la réalisation de la correction torrentielle des thalwegs, et l'aménagement de cours d'eau : en créant des ouvrages de correction dans la gorge du torrent, ouvrages qui arrêteront les matériaux et diminueront la pente, qui sont des aménagements déterminants, réduisant l'érosion à sa source.

1.3.2.2 Le soutirage des courants de densité

C'est une méthode pratique qui consiste à évacuer les sédiments drainés par les courants de densité sur le fond de la retenue en utilisant des pertuis de vidange (vannettes de dévasement ou vanne de fond) du barrage. Les opérations de chasses et le soutirage des courants de densité doivent être maîtrisées afin d'arriver à évacuer le maximum de vase avec un minimum d'eau.

La technique du soutirage peut être un moyen efficace de lutte contre l'envasement des retenues de barrages en Algérie compte tenu de son faible coût et surtout de la présence des courants de densité dans l'ensemble des retenues [31]. Son rendement peut atteindre 70 % des apports solides totaux entrants dans la retenue, c'est à dire que la durée de vie de l'ouvrage sera augmentée d'un tiers. Cette technique est utilisée dans les barrages d'Ighil, d'Erraguene et Oued El-Fodda.

1.3.2.3 La surélévation des digues

La surélévation de la digue est une technique pour prolongé la durée de vie des barrages en Algérie. Cette technique consiste, lorsque le taux de comblement est avancé, à augmenter la hauteur de la digue d'une taille variable, permettant la constitution d'une réserve complémentaire pour compenser la perte du volume occupé par la vase.

1.3.2.4 Evacuation des sédiments au fur et à mesure de leur arrivée

◆ Chasses dites à l'Espagnole

Méthode utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance.

Cette méthode est efficace quand elle est possible. Elle consiste à vider complètement le barrage à la fin de la période estivale et le laissé vider, toutes vannes ouvertes, jusqu'aux premières pluies. La première crue enlève sans difficulté les vases de l'année non encore consolidées cette méthode comprends des inconvénients comme suit :

- Perte d'eau;
- Peu efficace pour les vases consolidées;
- Ne peut être appliquée que pour les barrages à régularisation annuelle.

◆ Chasse périodique à barrage plein

Appliquée sur le barrage de Beni Amrane (6 vannes de fond), a permis d'évacuer 3 hm³ de vase entre 1988 et 2000 soit 26 % des sédiments, parmi les inconvénients nous citons :

- Ne permet pas d'évacuer des volumes importants de vase;
- Se limite à la formation d'un entonnement autour des vannes.

◆ Soutirage des courants de densité

L'eau de crue chargée de sédiments pénètre dans le réservoir sans se mélanger à l'eau claire du réservoir. Elle forme un courant de densité qui plonge dans la retenue et s'écoule le

long du fond. L'idée est d'ouvrir au moment opportun les pertuis de vidange de fond, et capter et évacuer ces eaux chargées de sédiments.

1.3.3 Le dragage des barrages

Le dragage est défini comme étant des terrassements effectués sous l'eau avec des engins flottants au moyen de procédés mécaniques ou par aspiration. On distingue trois types de dragages qui diffèrent selon la nature des sédiments à draguer et le type de travail à réaliser :

- entretien : opérations répétitives, visant à extraire les sédiments déposés qui gênent la navigation ;
- aménagements : opérations pour aménager et créer des canaux, de bassins de plaisance et autres voies navigables ;
- l'approfondissement : sont commencés lorsqu'il devient nécessaire d'adapter le seuil de navigation et prolonger la durée de vie des barrages, les travaux nécessitent de déplacer d'importants volumes de sédiments et demandent des moyens de dragages importants.

La technique consiste à extraire les sédiments déposés par des moyens mécaniques. Cette technique utilisée en Algérie depuis plus de 50 ans permet l'extraction d'un maximum de sédiments pour des pertes en eau minimales.

Après désagrégation des sédiments consolidés au moyen d'une roue à augets, actionnée à partir de la plateforme de la drague, le mélange eau sédiment est aspiré et refoulé à l'extérieur du réservoir.

1.3.3.1 Les techniques de dragage

Il est défini d'une façon générale, comme l'ensemble des actions caractérisées par un prélèvement de matières par excavation sous l'eau et par un déversement de ces produits dans la veine d'eau ou sur le rivage, mais son prix de revient est très élevé.

On distingue deux types de dévasement, ces types sont classés suivant leur mode de fonctionnement:.

1.3.3.2 Dragage mécanique

Il est effectué à sec, après la vidange totale de la retenue. La vase est draguée au moyen d'engins mécaniques, comme des Bulldozers, puis transportée par des camions.

Les inconvénients de cette technique, sont:

- Perte en eau, pour la vidange de la retenue il faut du temps, donc, il est possible d'arrêter le fonctionnement d'un barrage dans un long temps ;
- La manœuvre des engins dragueurs et transporteurs devient difficiles si la vase n'est pas bien consolidée.

1.3.3.2.1 Dragage hydraulique

Il se fait au moyen d'une drague suceuse refouleuse flottante, où les sédiments non consolidés (un cutter, mécanisme rotatif, peut servir à désagréger les sédiments plus durs) sont aspirés par une pompe spéciale à déblais à travers une canalisation constituée d'une partie flottante et d'une partie fixe sur plusieurs centaines de mètres de longueur. Cette canalisation sert aussi au transport par refoulement des sédiments jusqu'à la zone de rejet située en aval du barrage.

Suivant l'importance de la retenue, on utilise une ou plusieurs dragues. Le dragage hydraulique est préféré au dragage mécanique, car la perte en eau est moins importante et que le coût est réduit par la réduction de la quantité d'énergie.

1.3.3.3 Les matériaux concernés par le dragage

Les matériaux transportées par les fleuves ou apportées par les courants de marée, des masses considérables de sédiments fins, d'origine fluviale ou maritime, viennent se déposer chaque année dans les retenues de barrage, les chenaux de navigation et les zones portuaires nécessitant de dragages d'entretien extrêmement importants.

Ces sédiments fins sont composés en grande partie de fines particules minérales avec quelques petits éléments de roches auxquels sont mélangés des débris d'origine végétale et animale. Les minéraux proviennent de l'érosion des roches ou des sols et de leur transport sous les effets hydrodynamiques. Des matériaux d'origine industrielle, domestique ou agricole se retrouvent également dans la matrice sédimentaire dans des quantités variables.

Les différents sédiments font l'objet de classifications granulométriques, c'est-à-dire de classification sur la taille des particules. Il existe plusieurs nomenclatures qui varient avec les auteurs et les pays, cf (tableau 1.2).

Tableau 1- 2: Classification des sols en vue des dragages (d'après l'AIPCN).

Dénomination		Identification par taille des grains	Commentaires
Blocs, Cailloux	Granuleux (sans cohésion)	>200 mm 60 à 200 mm	-
Graviers		Gros : 20 à 60 mm, Moyens : 6 à 20 mm Fins : 2 à 6 mm	-
Sables		Gros : 0,6 à 2 mm Moyens : 0,2 à 0,6 mm Fins : 0,06 à 0,2 mm	-
Limons	Doués de cohésion	Gros : 20 à 60 μm Moyens : 6 à 20 μm Fins : 2 à 6 μm	Les limons humides sont pétrissables, une simple pression des doigts pulvérise les mottes séchées
Argiles		< 2 μm	Présentent une cohésion et une plasticité importantes. Un échantillon humide colle aux doigts et paraît lisse et onctueux au toucher. Les fragments secs ne se réduisent pas en poudre. Au cours du séchage ils se contractent et se fissurent en acquérant une haute résistance au cisaillement.
Tourbes et terres organiques	Organiques	Non applicable	Sont identifiables par leur couleur noire ou brune et souvent par leur forte odeur et par la présence de matières fibreuses ou ligneuses.

1.3.4 Dragage hydraulique en Algérie

Selon [32] l'Algérie figure parmi les contrées les plus dangereusement menacées par l'érosion et l'envasement des retenues. Les retenues algériennes étant essentiellement destinées au stockage et à la régulation de la ressource eau, sont d'autant plus vulnérables qu'elles sont défavorisées sous le rapport du régime des rivières lié à une pluviosité sous forme d'averses de fortes intensités et de courtes durées.

Malgré l'insuffisance des études sur ce phénomène particulier aux régions de l'Afrique du nord, beaucoup d'efforts ont été déployés par les services de l'hydraulique dans la lutte contre l'envasement. Il faut remarquer que l'Algérie fait figure de pionnier en cette matière et son expérience singulière dans le monde fait qu'il n'est pas fait référence aux expériences d'autres pays.

Parmi les multiples procédés de lutte expérimentés sur les barrages algériens, à savoir : le reboisement des bassins versants, la surélévation des digues, la construction de barrages de décantation et l'utilisation du barrage à onde de chasse, il a été fait recours à des opérations de dragages. Noton que le premier barrage ayant subi des opérations de dragage en Algérie est celui de Fergoug durant la période 1986 à 1989 plus de 10 millions de m³ de vase ont été dragués

1.4 Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu traitant le phénomène d'envasement des barrages, ces causes, ces conséquences ainsi que les techniques modernes de lutte contre ce phénomène. Le problème d'envasement causé essentiellement aux forts taux d'érosion des bassins versants dont les particules solides sont drainées directement par des cours d'eau, elles se déposent au fond de la retenue. Les conséquences de cette forte sédimentation sont extrêmement gênantes. En Algérie, le taux d'érosion spécifique atteint les valeurs les plus élevées d'Afrique du Nord. L'envasement des barrages est devenu actuellement une réelle menace pour l'infrastructure hydraulique, il menace la capacité utile des barrages qu'à celui de la sécurité de l'ouvrage lui-même. D'après l'Agence Nationale des Barrages (A.N.B.T) la plupart des barrages en Algérie ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année à cause de phénomène de l'envasement, Ils sont dans une situation critique, leur exploitation reste en dessous de leur capacité réelle. Le dragage de la retenue est devenu une solution indispensable pour prolonger la durée de vie de cet ouvrage.

Chapitre 2

Etude bibliographique sur la rhéologie de fluide

2 Définition

La rhéologie désigne la science qui étudie les phénomènes de déformation de la matière sous l'effet de contraintes. Cette définition pose l'étendue qui occupe cette science. En effet, pour une échelle d'observation particulière, la matière est continuellement en mouvement. La définition la plus large pourrait être la suivante. Un fluide est un milieu parfaitement déformable. Cette appellation regroupe alors les gaz qui sont des fluides compressibles (de faible densité) et les liquides qui sont des fluides peu compressibles (de densité plus élevée).

2.1 Caractéristiques rhéologiques des liquides

2.1.1 Les lois de comportement

2.1.1.1 Le comportement newtonien

Dans le cas des fluides newtoniens la contrainte de cisaillement (τ) est une relation linéaire entre le taux ou la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ selon l'équation de newton :

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Ce comportement est plus simple dans ce cas la viscosité dynamique est indépendante de la vitesse de cisaillement.

La figure (2.1) représente la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement cette courbe s'appelle courbe d'écoulement ou Rhéogramme.

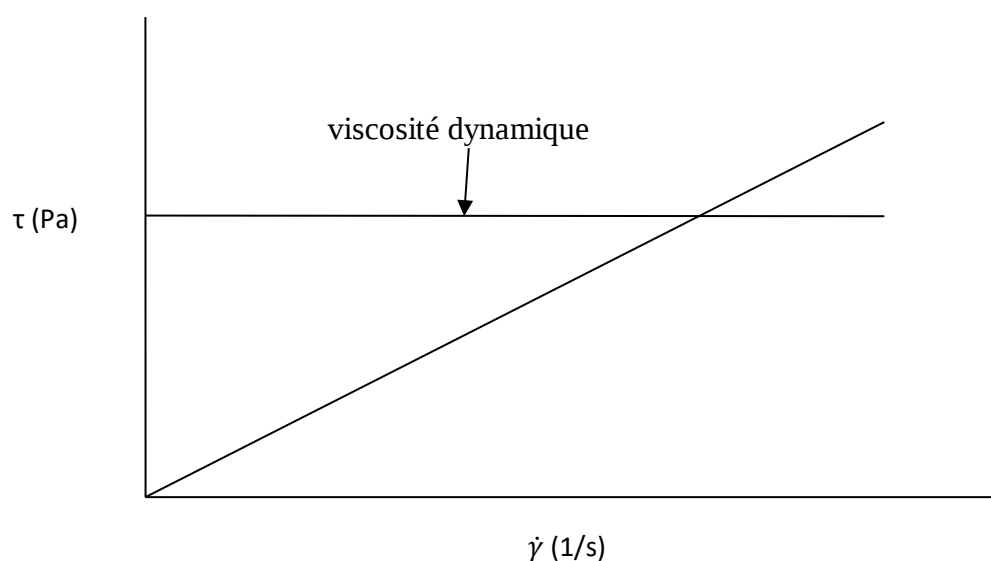


Figure 2.1 : courbe d'écoulement d'un fluide newtonien

2.1.1.2 Comportement non-newtonien indépendant du temps

2.1.1.2.1 Les rhéofluidifiants

Le comportement rhéofluidifiant est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le bas. Dans ce type d'écoulement la viscosité décroît lorsque le cisaillement augmente. (Figure 2.2).

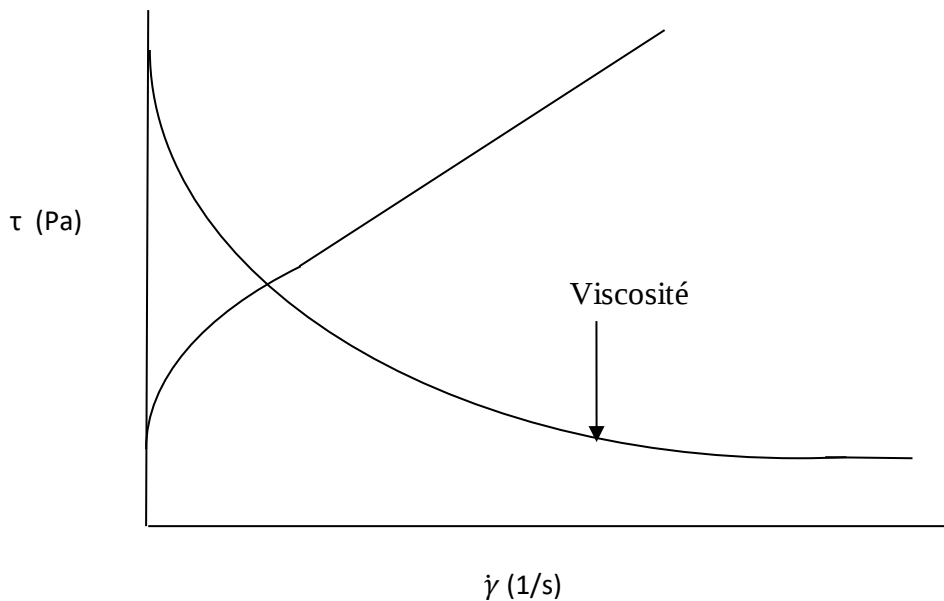


Figure 2.2 : Comportement rhéofluidifiant d'un fluide

Ces fluides sont représentés, en général, par une loi de puissance ou encore loi d'Ostwald waele.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

Avec $0 < n < 1$ indice d'écoulement (-)

K : Indice de consistance (Pa.s^{-1})

La loi de puissance permet de résoudre bon nombre de problème d'écoulement de fluides newtoniens mais elle décrit très mal le comportement à faible taux de cisaillement et la paramètres K et n n'ont pas d'interprétation claire en termes de paramètres microscopiques.

Les limites de ce type de loi interviennent lorsque le rhéogramme présente deux régions newtoniennes, l'une à faible vitesse de cisaillement et l'autre à forte vitesse de cisaillement. Ces comportements rhéologiques particuliers sont ajustés par des relations à trois ou quatre paramètres.

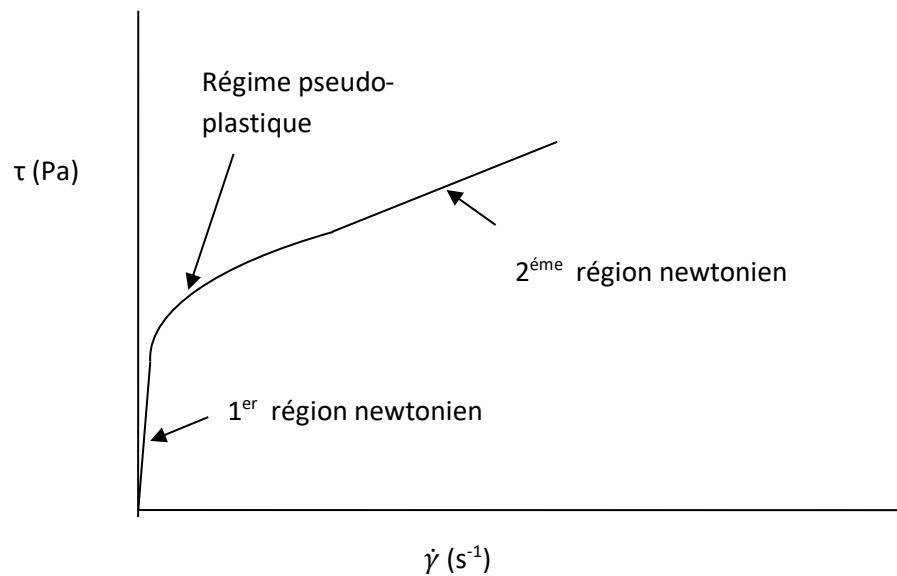


Figure 2.3 : Comportement rhéofluidifiant avec deux régimes newtoniens

2.1.1.2.2 Le comportement rhéoépaississant

Le comportement rhéoépaississant (encore appelé dilatant) est défini par un rhéogramme dont la concavité est tournée vers le haut : le liquide devient plus visqueux et donc plus « épais » lorsque le cisaillement croît (**Figure 2.4**). La loi de comportement est similaire à celle d'un fluide rhéofluidifiant représentée par la loi d'Ostwald de waele sauf que dans ce cas l'indice d'écoulement n est supérieur à 1.

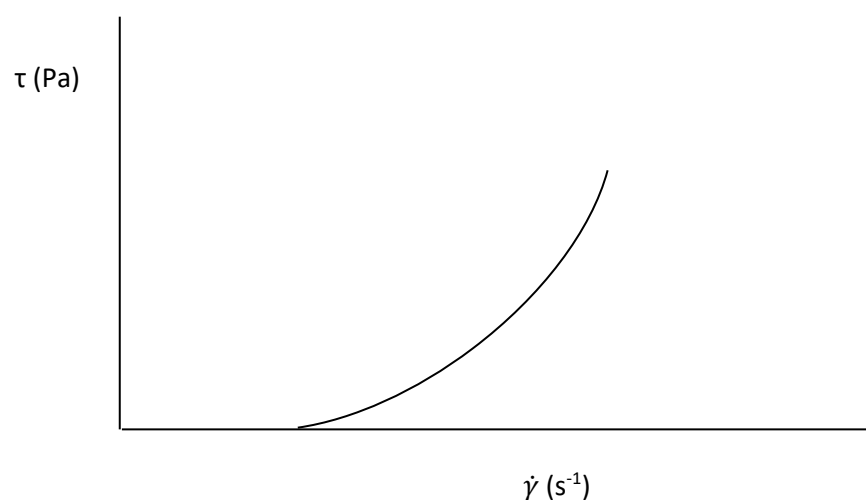


Figure 2.4 : Comportement rhéoépaississant (dilatant).

2.2 .Fluides à contrainte critique (seuil)

2.2.1 Courbe d'écoulement et modèles rhéologiques

Cette catégorie des fluides aussi communément désignée par les fluides plastique, la **(figure 2.5)** donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Un exemple courant de liquide avec contrainte critique est la pâte à dentifrice : elle ne peut pas sortir du tube sous l'effet de son propre poids, il faut lui appliquer une contrainte nettement supérieure à sa contrainte seuil pour qu'elle s'écoule.

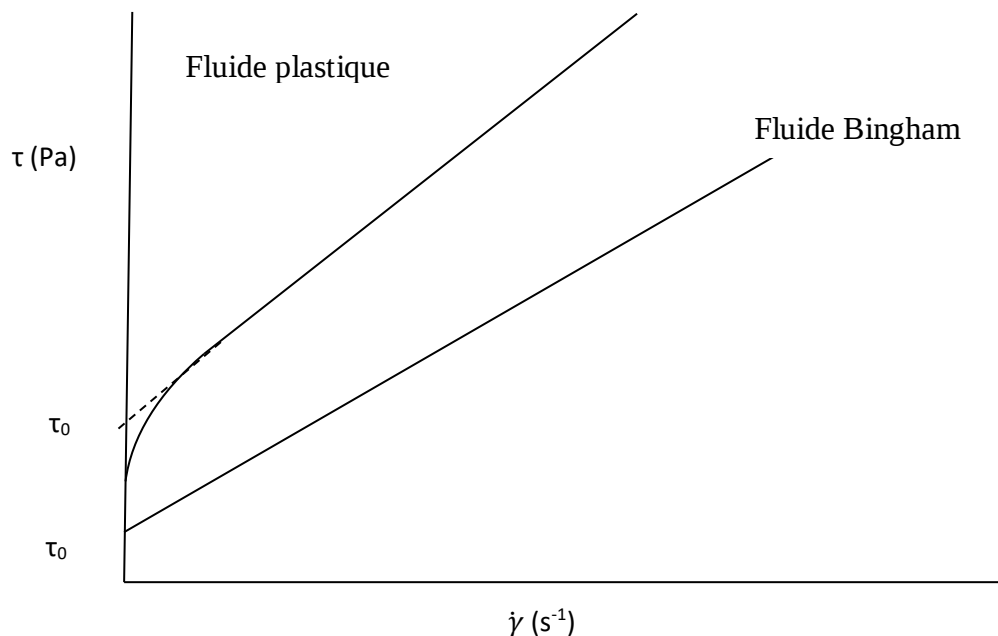


Figure 2.5: Courbes d'écoulement de fluides avec contrainte seuil.

Le tableau 2.1 présente les principales lois rhéologiques d'écoulement utilisées pour décrire le comportement de tels fluides à contrainte de seuil.

Le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques, la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée.

Le modèle de Bingham est le plus simple de ces modèles, le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_0 est dépassé. Ce modèle permet de décrire le comportement rhéologique de nombreux matériaux (boues de forage, boues activées, peintures à l'huile, certaines graisses...).

Tableau 2.1 : Les principales lois rhéologiques d'écoulement utilisées pour décrire le comportement de tels fluides à contrainte de seuil [33-35]

Modèle	Loi rhéologique	Paramètres
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma}$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_B : Viscosité plastique (Bingham) (Pa.s)
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) K : Indice de consistance (Pa.s ⁿ) n : Indice d'écoulement (-)
Casson générale	$\tau^n = \tau_0^n + (\eta_C \dot{\gamma})^n$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_C : Viscosité plastique (Pa.s) n : Indice d'écoulement (-)
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta_C \dot{\gamma})^{1/2}$	τ_0 : Contrainte seuil (Pa) η_C : Viscosité plastique (Pa.s) n : Indice d'écoulement (-)

2.3 Thixotropie

2.3.1 Définition

Lorsque l'on applique une vitesse de cisaillement constant (ou une contrainte de cisaillement) constante à un fluide, il peut arriver que sa viscosité ne soit pas constante au cours du temps. Si la viscosité diminue au cours du temps à vitesse de cisaillement

(contrainte) constante, on dit que le fluide est thixotrope ; si elle augmente, le fluide est anti-thixotrope [36, 37].

On trouve également des définitions de la thixotropie fondées sur ses aspects microscopiques : par exemple **Mujumdar et al** [38] décrivent la thixotropie comme une déstructuration réversible de la structure particulaire sous cisaillement, la structure formée au repos étant souvent (mais non nécessairement) associée à un seuil d'écoulement. Cette description est celle du Groupe Français de Rhéologie [39] qui définit la thixotropie comme suit :

Après un long repos, la vitesse de cisaillement (ou contrainte) étant brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente est fonction décroissante de la durée d'écoulement. Le corps retrouve son état initial après un repos assez long.

2.3.2 Protocoles de caractérisation de la thixotropie

Il n'existe pas une méthode standard de caractérisation de la thixotropie. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été utilisées. Pour les systèmes non évolutifs les expériences charge et décharge (monte-descente) ou boucle d'hystérésis permettent d'étudier de la thixotropie d'un tel matériau. Ces expériences se déroulent en trois étapes (Figure. 2.6 et 7) :

- Monte en vitesse de cisaillement ou contrainte de $\dot{\gamma}_{min}$ (τ_{min}) à $\dot{\gamma}_{max}$ (τ_{max}) pendant une durée t_1
- Application de la vitesse (contrainte) $\dot{\gamma}_{max}$ (τ_{max}) pendant une durée t_2 pour déstructuration le matériau
- Descente de $\dot{\gamma}_{max}$ (τ_{max}) à $\dot{\gamma}_{min}$ (τ_{min}) pendant une durée t_3

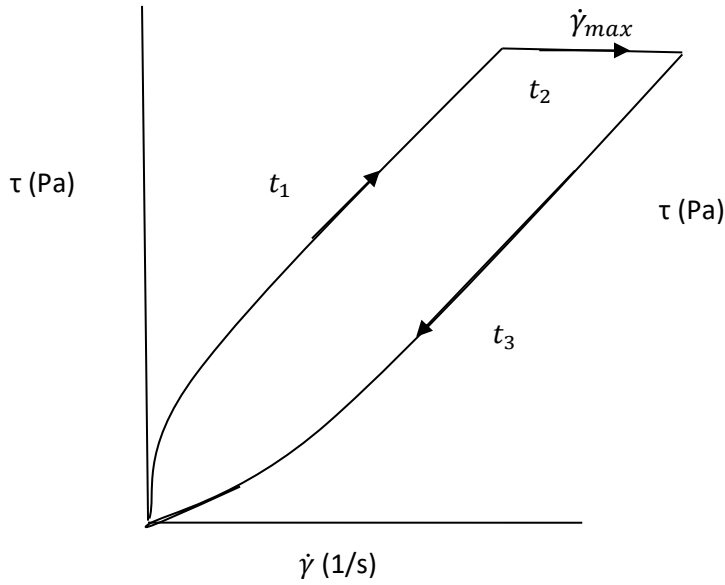


Figure 2.6 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée

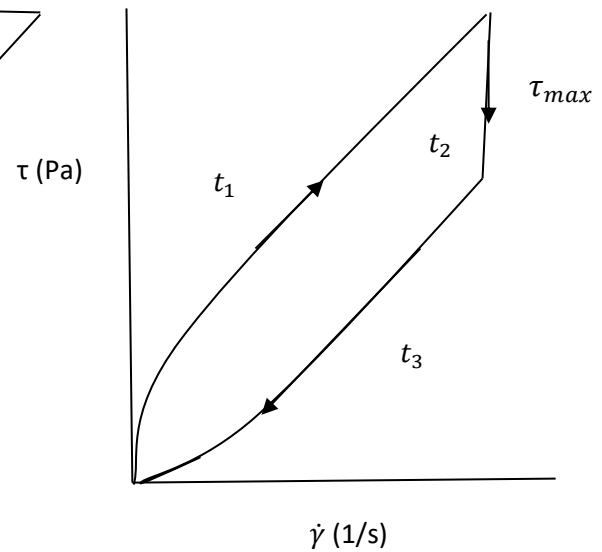


Figure 2.7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse imposée

Soit M : la surface montée+palier et D : Surface descente, on définit la surface de la thixotropie par la différence entre la surface montée+palier et surface descente $T=M-D$

Une alternative serait de calculer le pourcentage de la surface de la thixotropie, ce pourcentage appelé indice de la thixotropie [40] .

$$I = 100 \cdot \frac{M-D}{M} \quad (2.3)$$

Lorsque I tend vers 0, la courbe descente coïncide avec la courbe montée le fluide, est donc anti-thixotrope. Par contre, l'augmentation de I traduit l'éloignement de la courbe de descente par rapport à la courbe de montée, le fluide est donc de plus en plus thixotrope.

2.4 Technique rhéomètres

Les rhéomètres sont des appareils où lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces (coaxiales, plan/plan ou cône /plan) solides l'une au repos et l'autre mobile. La substance à étudier est placée entre deux plans solides « P 1 » et « P 2 » parallèles et de même surface, une force (F) appliquée à l'un des plans lui communique un mouvement de translation de vitesse « v », un mouvement laminaire de cisaillement est engendré, en supposant que la distance « e » entre les deux plans est faible devant les dimensions des plans, la répartition de la vitesse est linéaire et le matériau se décompose en plans parallèles aux surfaces « P 1 » et « P 2 ».

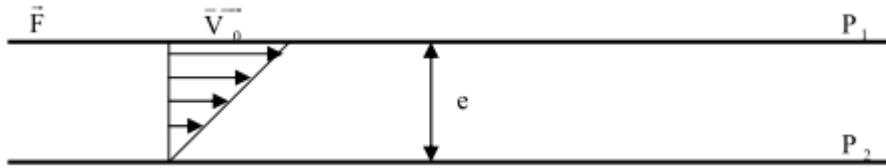


Figure 2.8 : Rhéomètre plans à Translation

2.4.1 Rhéomètre rotatif

Un rhéomètre rotatif est constitué d'un axe de rotation lié à un moteur, qui peut être à vitesse ou à un couple imposé, et d'une cellule de mesure. La cellule de mesure est composée d'une partie mobile liée à l'axe de rotation (le rotor) et d'une partie fixe (le stator), le fluide complexe est confiné dans l'espace compris entre le rotor et le stator (entrefer).

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement rotatif uniforme de vitesse angulaire « ω », l'autre cylindre étant fixe.

La substance est placée entre deux cylindres coaxiaux de rayons R_1 et R_2 , qui se décompose en couches cylindriques coaxiales de vitesses angulaires différentes, variant de « $\omega \approx 0$ » au niveau du godet à « ω » au niveau du cylindre mobile.

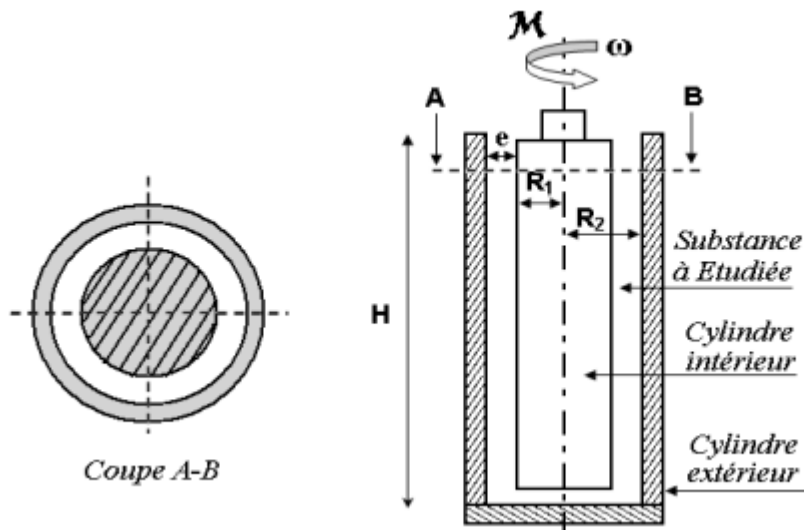


Figure 2.9: Schéma d'un rhéomètre coaxial cylindrique intérieur rotatif.

Deux grandeurs sont directement mesurables qui sont le couple moteur « M » (mesurée ou imposée) qui entraîne le rotor, il est relié à la contrainte τ et la vitesse angulaire « ω » (mesurée ou imposée), elle est liée à la vitesse de cisaillement. Nous obtenons des relations qui relient les paramètres rhéologiques en fonction du couple via des paramètres géométriques de l'appareil. Rhéomètres rotatifs à cône – plateau, il représente une bonne

précision, la substance à étudier est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution de rayon « R » dont l'axe est perpendiculaire au plateau, l'angle comprise entre la génératrice du cône et le plateau est inférieure 5° et peut descendre jusqu'à $0,3^\circ$.

La vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement s'exprime par

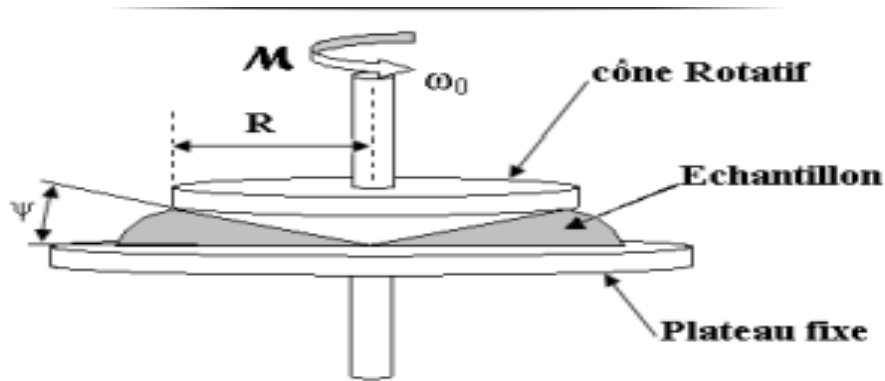


Figure 2. 10 : Schéma d'un rhéomètre rotatif à cône plateau.

2.5 Problèmes expérimentaux

Il est connu que la fiabilité des résultats expérimentaux est liée directement à la maîtrise de l'effet de tous les paramètres influençant la mesure, parmi les phénomènes indésirables pouvant intervenir au cours des essais rhéologiques. On note le problème d'évaporation de l'échantillon, les glissements aux niveaux des parois de la géométrie de mesure et le problème d'inertie de l'outil rotatif lors des accélérations ou décélérations rapides, ces trois phénomènes sont explicités ci-dessous afin d'en tenir compte et limiter leurs effets sur les essais.

2.5.1 Problème d'évaporation

Il intervient surtout dans les suspensions lors d'essais comportant une surface libre, ce phénomène conduit à une diminution du volume étudié (creusement), ceci pourrait se traduire par une diminution de la viscosité apparente mesurée. D'un autre côté, une augmentation de la concentration de la suspension apparaît, qui se traduit par une augmentation de la viscosité apparente. Les techniques pratiques, utilisées pour minimiser les perturbations, consistent à travailler sous atmosphère saturée par le fluide interstitiel ou à placer un film liquide sur les surfaces libres [43].

2.5.2 Glissement aux parois

C'est le phénomène le plus couramment rencontré lors de l'étude rhéologique des fluides, il peut se produire dans toutes les géométries d'écoulement, ce phénomène

conduit à des erreurs sur les mesures. En particulier pour les mesures de contraintes seuil avec un rhéomètre à contrainte imposée [41, 42], dans le cas des suspensions, le glissement peut être favorisé par la migration des particules des régions pariétales (décroissance de la concentration solide près de la paroi lisse). Effet connu sous la dénomination d'effet sigma [44-46], Et pour éviter ce problème, il faut utiliser soit des corps rayés pour la mesure, soit des papiers rugueux en verre en les collant sur la surface plane ou conique, ou utiliser des modèles correctifs spécifiques pour le glissement. [42, 47, 48].

2.5.3 Inertie de l'outil rotatif

Il a été montré que l'utilisation de rhéomètre à contrainte imposée pouvait conduire à des erreurs de mesure, ces erreurs sont dues à un retard dans la réponse de l'outil aux sollicitations lors de la montée ou de la descente en contrainte. Pour remédier à ce phénomène il y a une méthode de calcul pour étudié et éliminer ce type d'erreurs rugueuses pour augmenter les frottements [49, 50].

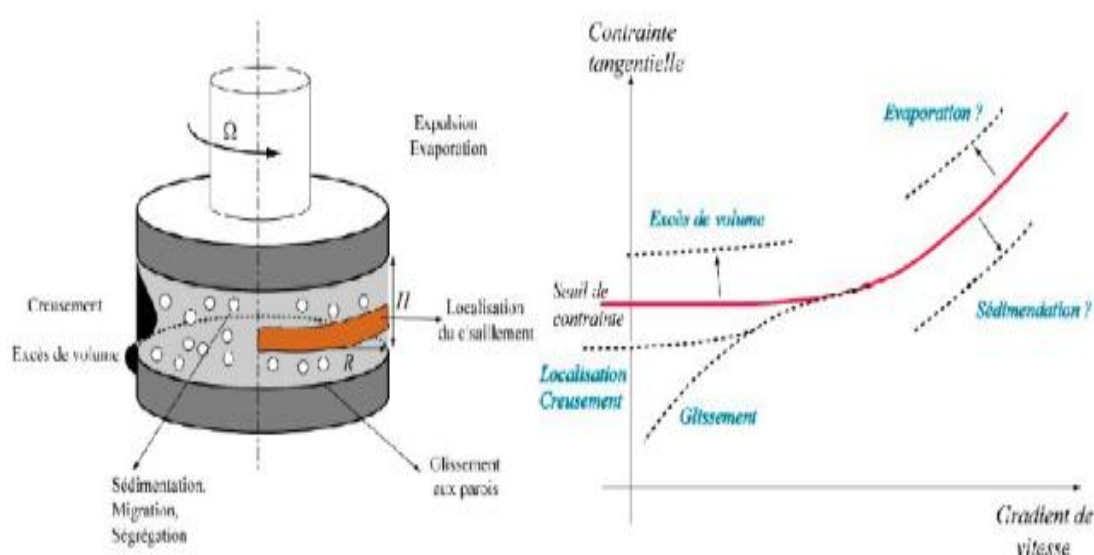


Figure 2. 11: Problèmes expérimentaux Figure 2. 12: Effets sur la courbe d'écoulement.

2.6 Comportement rhéologique des vases

2.6.1 Influence de granulométrie et nature minéralogique des sédiments

D'après Migniot [51] le comportement rhéologique d'une mixture de sédiments fins à très fins dépend de très nombreux paramètres, comme le tassement, granulométrie et nature minéralogique des sédiments, pourcentages de silts et de sables mélangés aux vases, nature des eaux interstitielles, matières organiques, température, actions mécaniques sont à prendre en considération pour définir la rigidité initiale et la viscosité.

2.6.2 Influence de la salinité des eaux interstitielles

Migniot [52] a montré que l'effet de la salinité des eaux sur la rigidité initiale de la vase n'est pas très important et dépend en grande partie de la nature minéralogique des argiles contenues dans la vase. Selon la salinité n'est pas d'influence sur le comportement rhéologique des vases mais elle l'influe la vitesse de chute.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les généralités et une certaine terminologie en rhéologie, en plus de discuter de certains modèles de cette science . Nous avons également mis en évidence les problèmes qui peuvent survenir lors des mesures rhéologiques et qui affectent négativement les résultats, et des précautions doivent être prises dans ce sens pour les éviter et confirmer l'exactitude des résultats.

Chapitre 3

Écoulement des fluides complexes dans les conduites

3 Critères de similitude et nombres adimensionnels

L'étude de l'écoulement d'un fluide quelconque dans une conduite avec ou sans singularités (contractions, élargissements) nécessite toujours l'introduction d'une longueur caractéristique à la géométrie de l'écoulement et des nombres adimensionnels pour les besoins de corrélation et de comparaison des résultats obtenus.

3.1 Diamètre hydraulique

Le diamètre hydraulique **DH** est définie dans le cas général par :

$$D_H = \frac{\text{Surfacemouillé(section de passage)}}{\text{Périmètre mouillé}} \quad (3.1)$$

3.2 Nombre de Reynolds

Pour les fluides newtoniens, la définition du nombre de Reynolds ne pose pas de difficultés et on le définit par :

$$Re_{(D_{H_{um}})} = \frac{\rho U_m D_H}{\mu} \quad (3.2)$$

Dans le cas des fluides non newtoniens, la dépendance de la viscosité du fluide avec la vitesse de cisaillement nécessite une généralisation de ce nombre adimensionnel (cela sera détaillé par la suite).

3.3 Nombre de Déborah

Le nombre de Déborah est défini comme étant le rapport du temps caractéristique du fluide (souvent λ) à un temps caractéristique de l'écoulement (λ_r). On utilise généralement pour le temps caractéristique de l'écoulement λ_r l'inverse d'une vitesse de cisaillement caractéristique γ :

$$De = \frac{\text{Temps caractéristique du fluide}}{\text{Temps caractéristique de l'écoulement}} = \frac{\lambda}{1/\gamma} = \lambda \cdot \gamma \quad (3.3)$$

Le temps caractéristique de l'écoulement est souvent pris comme étant la durée d'observation de l'écoulement.

- Pour **De** << 1, le matériau se comporte comme un liquide ; pour **De** >> 1, le matériau se comporte comme un solide.
- Pour de l'eau, le temps de relaxation est de l'ordre de **10⁻¹²s**.
- Pour de l'huile lubrifiante, ce temps est de l'ordre de **10⁻⁶s**,
- Pour certains polymères ce temps peut atteindre plusieurs secondes.

3.4 Écoulements non-newtoniens dans une conduite circulaire

3.4.1 Régime laminaire

Pour un écoulement laminaire entièrement développé d'un fluide non newtonien dans une conduite à section circulaire (Figure 3.1), l'équation de quantité de mouvement peut être écrite sous la forme :

$$-\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} * \frac{d}{dr} (r\sigma_{rz}) = 0 \quad (3.4)$$

Si le modèle de la loi de puissance (La loi d'Ostwald-de Waele) est supposé décrire la viscosité du fluide, la contrainte de cisaillement est liée au gradient de la vitesse d'après Coulson et Richardson (1999) :

$$\sigma_{rz} = k \left(-\frac{du_z}{dr} \right)^n \quad (3.5)$$

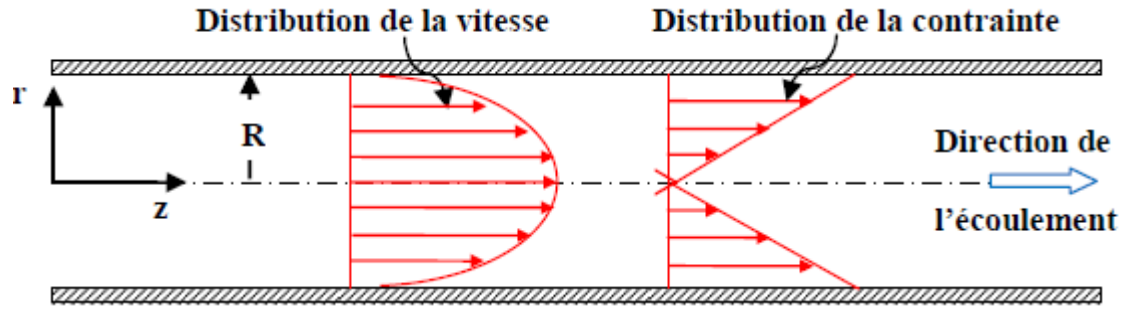


Figure 3.1: distribution de la vitesse et de la contrainte de cisaillement

Pour un écoulement laminaire dans une conduite à section circulaire.

Les forces appliquées sur un élément de fluide situé à une distance r (figure 3.2), peuvent être exprimées par :

$$P(\pi r^2) - (p - \Delta p)\pi r^2 = \sigma_{rz} * 2\pi rL \quad (3.6)$$

Alors,

$$\sigma_{rz} = -\frac{\Delta p}{L} * \frac{R}{2} \quad (3.7)$$

Ceci montre la distribution linéaire familière de la contrainte de cisaillement à travers la section de la conduite, la contrainte de cisaillement étant zéro à l'axe de la conduite, comme représenté sur la figure 3.1.

Noter que l'équation (3.7) est applicable à l'écoulement laminaire et turbulent de n'importe quel fluide puisqu'elle est basée sur un équilibre simple de force et aucune hypothèse a été faite jusqu'ici au sujet du type de l'écoulement ou de comportement de fluide.

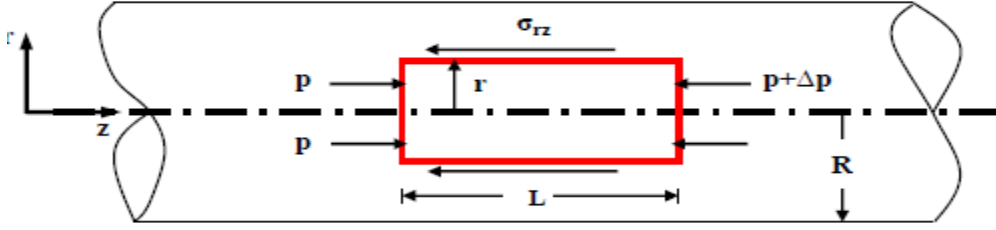


Figure 3.2: Ecoulement à travers une conduite circulaire

En utilisant les équations (3.5) et (3.7) suivi de l'intégration rapporte l'expression suivante pour la distribution de la vitesse :

$$u_z = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(-\frac{\Delta p R}{KL2} \right)^{1/n} R \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right\} \quad (3.8)$$

Le profil de vitesse peut être exprimé en termes de vitesse moyenne u_m , qui est donnée par :

$$u_m = \frac{Q_v}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi r u_z dr \quad (3.9)$$

Où Q_v est le débit volumétrique du fluide. Avec la substitution de u_z de l'équation (3.8) et après l'intégration, on obtient :

$$u_m = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \left(-\frac{\Delta p R}{KL2} \right)^{1/n} \quad (3.10)$$

$$R = \frac{nR}{3n+1} \left(\frac{\tau_p}{K} \right)^{1/n} \quad (3.11)$$

L'équation (3.8) peut maintenant être réécrite comme :

$$u_z(r) = u_m \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right\} \quad (3.12)$$

Les profils de vitesse calculés à partir de l'équation (3.12) sont montrés dans la **figure 3.3**, pour différentes valeurs de n . Comparé à la distribution parabolique pour un fluide newtonien ($n=1$), le profil est plus plat pour un fluide pseudo plastique (rhéofluidifiant) et plus pointu pour un fluide dilatant (rhéoépaississant).

La vitesse atteint sa valeur maximale quand $r=0$, c.-à-d. à l'axe de la conduite. Ainsi la vitesse maximale $u_{z, \max}$, à l'axe de la conduite, est donnée par l'équation (3.12) quand $r=0$ et :

$$u_{z, \max} = u_m \left(\frac{3n+1}{n+1} \right) \quad (3.13)$$

Réécrire de l'équation (3.9) en termes de débit volumétrique et gradient de pression :

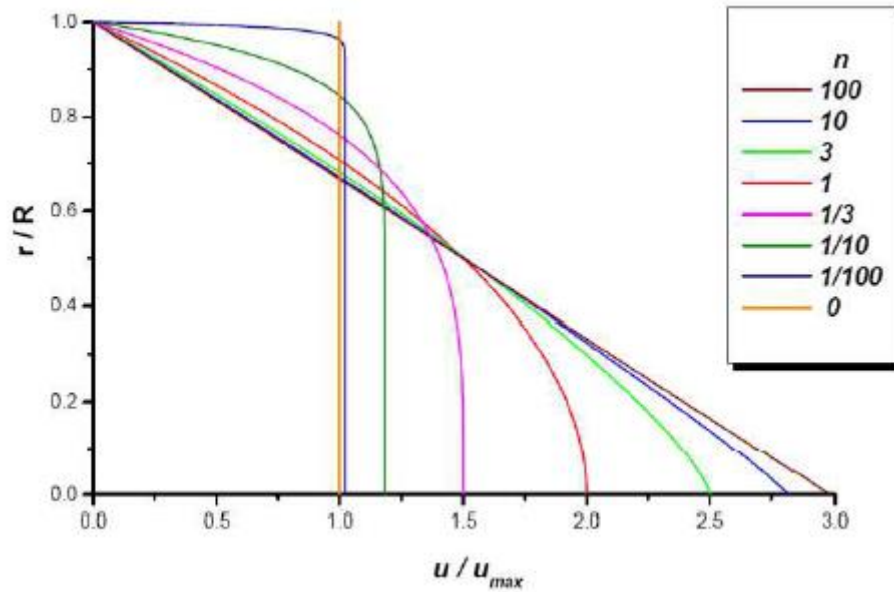


Figure 3. 3: Profil de vitesse pour un écoulement laminaire d'un fluide non-nwetonien

Il est utile de réécriture l'équation (3.13) en forme adimensionnelles en introduisant un facteur de frottement défini comme étant $f = \tau_p / (1/2) \rho u_m^2$ ou $\tau_p = (-\Delta p/L)(D/4)$ et en définissant un nombre de Reynolds approprié qui rapportera le même rapport que celui pour les fluides newtoniens, c-a- d $f = (16/Re_e)$. Ainsi la substitution de f en termes de gradient de pression $(-\Delta P/L)$ dans l'équation (3.13) donne :

$$f = \frac{16}{Re_n} \quad (3.14)$$

Où Re_n est défini par :

$$Re_n = \frac{\rho u_m^{2-n} D^n}{8^{n-1} K \left(\frac{3+1n}{4n} \right)^n} \quad (3.15)$$

3.4.2 Régime turbulent

La majorité des études effectuées concerne le régime laminaire parce que c'est le régime le plus couramment rencontré dans les écoulements des fluides non newtoniens à cause de leurs grandes viscosités. Les quelques tentatives relatives au régime transitoire ou turbulent donnent des corrélations très empiriques et qui diffèrent fortement selon les auteurs.

A proximité de la paroi existe une très mince couche visqueuse de nature laminaire. Loin de la paroi le régime est turbulent et différentes corrélations ont été proposées sous forme logarithmiques mais très complexes telles que celles de **Clapp** [54] et de **Dodge et Metzner** [53] pour les fluides pseudo-plastiques.

Pour tous les fluides, la nature de l'écoulement est régie par l'importance relative des

forces visqueuses et les forces d'inertie. Pour les fluides newtoniens, l'équilibre entre ces forces est caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds. La valeur généralement admise du nombre de Reynolds au-dessus duquel l'écoulement laminaire stable ne se produit plus est 2100 pour les fluides newtoniens. Pour les fluides non newtoniens purement visqueux, la valeur critique du nombre de Reynolds dépend du type et du degré de comportement non-Newtonien. Pour des fluides régis par la loi de puissance, le critère de **Ryan et Johnson** [55] peut être utilisé

$$Re_{RM} = 5 \frac{6464n}{(3n+1)^2} (2+n)^{(2+n)/(1+n)} \quad (3.16)$$

Les valeurs limites correspondantes augmentent avec des valeurs décroissantes de l'index de la loi de puissance (**n**), atteint un maximum environ de **2400** à **n=0.4** et diminue à **1600** pour **n=0.1**.

Le dernier comportement n'est pas en conformité avec les résultats expérimentaux de **Dodge et de Metzner** [53] qui ont observé les conditions de l'écoulement laminaire jusqu'aux **Re_{MR}=3100** pour un fluide avec **n=0.38**.

En dépit de la dépendance complexe du nombre de Reynolds critique sur l'index de comportement d'écoulement incorporé dans l'équation (3.16) et l'évidence expérimentale contradictoire, c'est probablement une approximation acceptable pour supposer que les conditions d'écoulement laminaire cessent de régner aux nombres de Reynolds au-dessus du **2000-2500** et, pour les buts des calculs de processus, la valeur largement admise de **2100** peuvent être utilisée pour les fluides non newtoniens caractérisés en termes de **n**. Une contribution importante à l'étude des fluides non newtoniens purement visqueux dans la région d'écoulement turbulent a été apportée par **Dodge et Metzner** [53], qui ont proposé la corrélation d'écoulement turbulent dans les conduites pour prévoir le facteur de frottement :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log(Re_n f^{1-n/2}) - \frac{0.4}{n^{1.2}} \quad (3.17)$$

Plus tard, **Yoo** [56] a proposé une équation explicite donnant une bonne concordance avec l'équation (3.17) :

$$f = 0.079n^{0.675}(Re_n)^{-0.25} \quad (3.18)$$

La longueur hydrodynamique d'entrée pour les fluides purement visqueux dans l'écoulement turbulent de conduite est approximativement la même que pour les fluides newtoniens, étant de l'ordre de 10 à 15 du diamètre de la conduite.

3.5 Ecoulements non-newtoniens dans une conduite non-circulaire

3.5.1 Régime laminaire

Des nombreux travaux ont obtenu des solutions numériques approximatives pour l'écoulement dans des géométries spécifiques comprenant les conduites rectangulaires et triangulaires. D'autre part, des tentatives semi-empiriques ont été également faites afin de développer des méthodes pour prédire les pertes de pression pour les fluides non newtoniens purement visqueux dans les conduits de section non-circulaire. Peut-être l'analyse du facteur de frottement le plus systématique et le plus réussi est qui a fourni par [57, 58].

En notant la similitude entre l'écoulement des fluides non newtoniens purement visqueux dans des conduites circulaires et ce entre deux plans parallèles, ils ont proposé qu'il pourrait être prolongé aux conduites ayant une section constante de forme arbitraire comme suit :

$$\left(-\frac{du_z}{dr}\right) = f(\tau_{p,m}) = a\tau_{p,m} \frac{d(8\frac{u_m}{D_H})}{d\tau_{p,m}} + b(8\frac{u_m}{D_H}) \quad (3.19)$$

Où a et b sont deux paramètres géométriques caractérisant la section de la conduite, D_H est le diamètre hydraulique, et $\tau_{p,m}$ est la valeur moyenne de la contrainte de cisaillement à la paroi, et est liés au gradient de pression par :

$$\tau_{p,m} = \frac{D_H}{4} \left(-\frac{\Delta p}{L}\right) \quad (3.20)$$

Pour des valeurs constantes de a et b, l'équation (3.19) peut être intégrée pour obtenir :

$$\left(8\frac{u_m}{D_H}\right) = \frac{1}{a} (\tau_{p,m})^{-b/a} \int_0^{\tau_{p,m}} \tau^{(b/a)-1} f(\tau) d\tau \quad (3.21)$$

Pour l'écoulement d'un fluide non newtonien régit par la loi de puissance, $f(\tau) = (\tau/k)^{1/n}$ et l'intégration de (3.21) donne :

$$\tau_{p,m} = K \left(8\frac{u_m}{D_H} b + \frac{a}{n}\right)^n \quad (3.22)$$

Ce qui peut être récrit en termes de facteur de frottement, $f = 2 \tau_{p,m} / \rho u^2$ comme :

$$f = \frac{16}{Re_g} \quad (3.23)$$

Où le nombre de Reynolds généralisé,

$$Re_g = \frac{\rho u_m^{2-n} D_H^n}{8^{n-1} K (b + a/n)^n} \quad (3.24)$$

Les valeurs de a et de b dépendent de la géométrie de la conduite. Le Tableau 3.1 représente des valeurs pour les conduites circulaires en fonction du rapport d'aspect AR.

Il est d'intérêt de noter que **a** et **b** sont 0.25 et 0.75 pour la conduite de section circulaire, et que le nombre de Reynolds généralisé devient identique à celui utilisé pour les conduites circulaires. (3.15).

La validité de l'équation (3.23) a été confirmée par les expériences de **Wheeler et Wissler [59]**, **Hartnett et Kostic [60]**, **Hartnett et al [61]**, pour l'écoulement laminaire entièrement développé des solutions aqueuses de polymère dans des conduites circulaires.

Tableau 3. 1: Les constantes géométriques a et b pour les conduites rectangulaires.

AR	A	B	AR	A	B
1.00	0.2121	0.6771	0.45	0.2538	0.7414
0.95	0.2123	0.6774	0.40	0.2659	0.7571
0.90	0.2129	0.6785	0.35	0.2809	0.7750
0.85	0.2139	0.6803	0.30	0.2991	0.7954
0.80	0.2155	0.6831	0.25	0.3212	0.8183
0.75	0.2178	0.6870	0.20	0.3475	0.8444
0.70	0.2208	0.6921	0.15	0.3781	0.8745
0.65	0.2248	0.6985	0.10	0.4132	0.9098
0.60	0.2297	0.7065	0.05	0.4535	0.9513
0.55	0.2360	0.7163	0.00	0.5000	1.000066
0.50	0.2438	0.7278			

Wheeler et Wissler [59] ont proposé une équation approximative pour le facteur de frottement de l'écoulement laminaire entièrement développé d'un fluide régit par la loi de puissance dans une conduite à section carrée :

$$f \cdot Re^+ = 1.874 \left(\frac{1.7330}{n} + 5.8606 \right)^n \quad (3.25)$$

Ici : $Re^+ = \rho \cdot U_m^{2-n} \cdot D_H^n / K$ et $0.4 < n < 1.0$.

En l'absence d'information définie, **Kozicki et Tiu [62]** ont proposé que le critère de **Dodge et Metzner**, $Re_g < 2100$, puisse être utilisé pour prévoir la limite de l'écoulement laminaire dans les conduites non-circulaires.

Les résultats analytiques et expérimentaux limités suggèrent que la viscoélasticité dans un fluide puisse induire l'écoulement secondaire dans des conduites non-circulaires, de même sous conditions de régime laminares. Cependant, les mesures rapportées jusqu'ici indiquent que le facteur de frottement - le nombre de Reynolds sont peu influencé par de tels écoulements secondaires.

3.5.2 Régime turbulent

Le coefficient de frottement pour l'écoulement turbulent entièrement établi des fluides non newtoniens purement visqueux dans des conduites rectangulaires peut être déterminé par l'équation modifiée de **Dodge et de Metzner [53]**:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log(Re_g f^{1-(\frac{n}{2})}) - \frac{0.4}{n^{1.2}} \quad (3.26)$$

Alternativement, la formulation plus simple proposée par **Yoo** peut être utilisée :

$$f = 0.079 n^{0.675} (Re_g)^{-0.25} \quad (3.27)$$

Pour : $5000 < Re_g < 50000$ et $0.4 < n < 1.0$.

3.6 Ecoulements d'un fluide non-newtonien dans une contraction brusque

3.6.1 Etudes numériques

Les applications industrielles, telles que les procédés de fabrication de polymères où figurent convergent et/ou divergentes, revêtent une grande importance et la configuration de la contraction est intéressante à plus d'un titre. D'une part, la forte composante élongation elle de l'écoulement à proximité de la contraction (singularité) constitue un réel intérêt pour les fluides non newtoniens. D'autre part, la complexité des nombreuses lois de comportement des fluides non newtoniens posent toujours des problèmes d'ordre technique surtout en simulation numérique.

La prise en compte des différents régimes inertiels permet de mieux comprendre les caractéristiques très particulières de ce type d'écoulement.

L'écoulement des fluides non newtoniens à travers une contraction brusque présente plusieurs aspects fondamentaux. Le caractère élongation et de l'écoulement au voisinage de la contraction engendre d'énormes différences de comportement selon la nature du fluide. Par exemple, la taille et l'intensité de la zone de recirculation en amont de la contraction brusque varient en fonction des spécificités de chacune des lois adaptées lors d'une étude par simulation numérique. Malgré la multiplicité des études numériques, il subsiste encore des incertitudes telles que l'influence de l'inertie du mouvement.

De plus en simulation numérique, le problème fondamental est le choix de la loi de comportement. Ce choix engage la faisabilité de l'étude, la qualité des résultats, l'aptitude à décrire les comportements réels et son caractère objectif. Le caractère objectif de la loi de comportement est essentiel puisqu'il assure l'indépendance des résultats vis à vis du repère de calcul. Le choix d'une dérivation a des répercussions directes sur les propriétés physiques du fluide modélisé.

L'effet Weissenberg (existence de contraintes normales) peut être simulé avec la loi de **Maxwell** sur-convectée ou avec la loi **d'Oldroyd B** (dérivée sur-convectée), mais pas avec leurs homologues Maxwell sous-convectée et Oldroyd A (dérivée sous-convectée). Même les modèles de **Maxwell** sur-convecté et **Oldroyd B** très utilisés en simulation numérique ne sont pas exempts de défauts. Le principal défaut de ces deux modèles est l'obtention de contraintes infinies pour une vitesse d'élongation finie en écoulement élongationnel pur. Ce défaut est généralement résolu en utilisant le modèle de **Bird-Peterlin**. Ce modèle permet surtout d'atteindre des nombres de Deborah D'assez élevés comparativement au modèle d'Oldroyd B et améliore beaucoup la rapidité de convergence.

Nous proposons de présenter quelques études parmi tant d'autres études faites en simulation numérique et qui concernent les fluides purement visqueux fluidifiants et les fluides viscoélastiques.

Crochet et al [63] et **Kim et al [64]** ont utilisé la méthode des éléments finis pour modélisé l'écoulement d'un fluide d'Ostwald-de Waele. Ils ont montré que les lignes de courant diffèrent peu d'un fluide newtonien et que la zone de recirculation ou la zone morte dans le coin en amont de la contraction tend à disparaître lorsque le nombre de Reynolds augmente. L'intensification de l'effet inertiel tend à pousser le vortex contre la paroi jusqu'à sa disparition. Ils ont montré que la vitesse axiale maximale était atteinte dans le plan de

contraction. Ils ont observé que lorsque **Re** augmente cette vitesse optimum se déplace en aval du rétrécissement.

L'autre observation est que le régime établi est très vite atteint dans la partie aval et que l'augmentation du nombre de Reynolds provoque une baisse du coefficient de perte de charge. **Yoo et al. (1991) [65]** observent l'apparition d'un second vortex à proximité du coin à partir de **We=0,51** et ce vortex persiste jusqu'à **We=0,958**. **Marchal et al [66]** constatent le même phénomène même à **We=2,53** et notent que cette zone de recirculation disparaît à fortes valeurs de **We**. **Choi et al (1986) [67]** observent que la zone de recirculation grossit uniformément avec le nombre de Weissenberg **We** alors que **Song et al. (1987) [68]** montrent que l'intensité des tourbillons d'un fluide de Maxwell ne croît pas systématiquement avec **We** et qu'il existe une limite définie par **We_{lim}=1**.

L'étude numérique de **Meylheuc (1996)** a montré que le caractère élastique modifie très peu la dynamique de l'écoulement dans la région centrale. Les vitesses maximales sont situées en aval du plan de contraction et présentent un pic d'autant plus marqué que le nombre est important.

L'observation du profil de vitesse sur l'axe de symétrie mais également de la pression et des contraintes montre que le régime est établi avec un retard lorsque le taux d'élasticité croît c'est à dire **We** croît. Les gradients au milieu du coin rentrant sont très importants et atteignent des valeurs maximales qui pénalisent la convergence numérique et qui reflètent la nature élongation elle de l'écoulement.

La majorité des études effectuées avec des fluides viscoélastiques ont montré que l'augmentation des forces d'inertie atténue les recirculations dans les coins rentrants de l'écoulement. Il se produit donc une stabilité de comportement lorsque les nombres **Re** et **We** augmentent. A **Re=10** l'écoulement à l'aval est perturbé et le régime tourbillonnaire a quasiment disparu.

Dans la partie aval, le retour aux conditions de Poiseuille et d'autant plus tardif que le nombre **We** est élevé. L'observation des lignes de courant et des vitesses, montre que l'ensemble des perturbations dues à la contraction se décale vers l'aval lorsque **We** augmente.

3.7 Etudes expérimentales

Le choix de la contraction brusque, dans les études expérimentales, relève de raisons purement physiques dans la mesure où elle est extrêmement répandue et où elle donne lieu à des manifestations viscoélastiques importantes.

La contraction brusque est aussi devenue la géométrie la plus largement étudiée en viscoélasticité pour plusieurs raisons, les plus importantes sont :

- La simplicité de réalisation associée à sa capacité de développer des effets spécifiquement viscoélastiques.
- Son omniprésence dans l'industrie impose une forte demande pour la compréhension et la modélisation des phénomènes induits par la géométrie.

Il est quasiment établi que la caractérisation des comportements des fluides viscoélastiques ne peut pas se faire uniquement par des écoulements en cisaillement pur.

La caractérisation des propriétés élastiques nécessite des écoulements élongationnels durant un laps de temps suffisamment long vis à vis de la mémoire du fluide.

La composante (propriété) élongationnelle est plus facile à atteindre avec des écoulements mixtes, parmi lesquels figure l'écoulement dans la contraction brusque.

Le convergent et en particulier la contraction brusque à forte composante élongationnelle, ont fait l'objet de nombreuses études aussi bien expérimentales qu'en simulation numérique.

La plupart des fluides viscoélastiques étudiés sont des solutions de polymères car elles offrent une large gamme de comportement et sont fortement viscoélastiques. Ces fluides peuvent être préparés à plusieurs reprises avec une très bonne reproductibilité.

Dans les travaux sur les fluides viscoélastiques les résultats sont souvent incomplets : concentration en polymères, nombres de Reynolds manquants, caractérisation rhéologique du fluide incomplète. A cela s'ajoutent d'autres problèmes d'ordre technique tels que :

- Masse moléculaire du polymère.
- L'importance du couple solvant/soluté qui peut soit minimiser soit maximiser l'effet viscoélastique de l'ensemble.
- La structure du polymère qui peut être linéaire ou présentant des ramifications.

Les travaux expérimentaux portent essentiellement sur les pertes de charge, des mesures locales des composantes du champ de vitesses séparément mais malheureusement les deux techniques de mesures ne sont pas employées conjointement.

D'autres travaux expérimentaux ont été effectués et portent sur des visualisations des lignes de courant.

Des travaux sur les mesures des pertes de charge des solutions viscoélastiques dans une contraction brusque et dans les tubes capillaires [69] et **Chauveteau et al [70]**, ont mis

en évidence un certain comportement globalement rhé épaisissant au-delà d'un certain seuil de vitesse de cisaillement γ , en écoulement de cisaillement pur.

Ils attribuent ce changement de comportement à l'étirement des macromolécules qui, une fois étirées, sont soumises à des vitesses différentes entre leurs extrémités entraînant une augmentation des pertes de charge par dissipation visqueuse.

Ce gradient de vitesse longitudinale n'existe pas en écoulement de Poiseuille des fluides newtoniens ou du moins il est négligeable. Il s'agit d'un phénomène caractéristique des écoulements de fluides viscoélastiques à forte composante élongation elle (exemple : écoulement au voisinage de l'axe de symétrie dans le plan de contraction).

Le même phénomène a été observé dans les travaux **d'Ouibrahim et al [71]** concernant un orifice et un tube de Pitot.

Ce couplage entre viscoélasticité et propriété rhéoépaississante a été mis en évidence par d'autres études d'écoulements de solutions de polymères [72]. Ce phénomène d'augmentation de dissipation visqueuse du à l'étirement des macromolécules a été confirmé par les travaux théoriques faits sur des modèles moléculaires construits à partir d'une analyse micro-structurale du comportement de **DeGennes [73]**.

Tous les travaux de visualisation en convergent ont montré l'existence de zones de recirculation beaucoup plus importantes pour les fluides viscoélastiques que pour les fluides newtoniens tant que les valeurs de **Re** sont modérées. **Walters et al [74]** observent par contre que si le fluide n'est pas rhéofluidifiant les zones de recirculation sont inexistantes. Toutes les études très fines sur la formation de ces vortex sont concordantes et en particulier mettent en évidence les trois régimes distincts suivants :

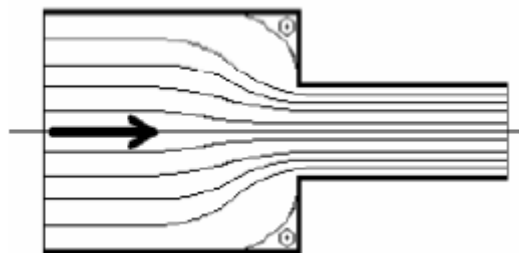


Figure 3. 4: à faibles débits $Re < 0,1$: un seul petit vortex.

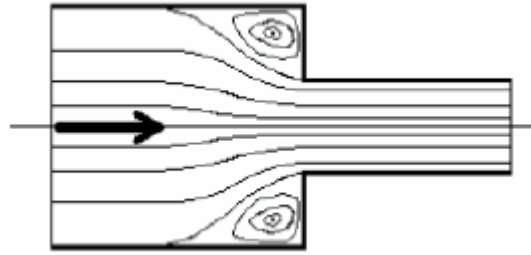


Figure 3. 5: à forts débits $Re < 10$: un seul gros vortex.

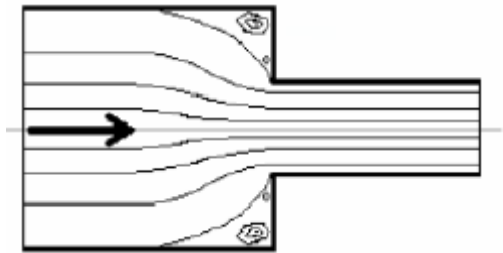


figure 3. 6: à débits moyens $Re < 1$: deux vortex, un petit et un gros

L'observation d'un second vortex au voisinage du point singulier n'est pas systématique dans l'étude expérimentale d'**Evans et al [75, 77]** d'une solution aqueuse de polyacrylamide à différentes concentrations en masse (de 0,2% à 1%). Ils montrent que la forme et la taille de la zone de recirculation varient avec le débit. Ces auteurs constatent aussi qu'une seule zone de recirculation, occupant toute la hauteur de la contraction, subsiste pour certaines concentrations de solutions aqueuses de polyacrylamide.

La phase d'existence des deux vortex est très courte et parfois difficile à mettre en évidence. **Chiba et al [76]** et **Evans et al [77]** ont observé que les zones de recirculation s'effacent totalement pour des nombres de Reynolds supérieurs à 20 ou 30.

Dans une étude utilisant le modèle proposé par **Bird et al [78]**, qui modélisent les solutions polymériques par des haltères élastiques en suspension dans un fluide newtonien, **Purnode et al [79]**, comparent leurs résultats obtenus numériquement avec ceux obtenus expérimentalement par Evans et col. Ils constatent une certaine concordance sur la taille et la forme des zones de recirculation et proposent même une estimation sur la longueur de détachement du vortex à l'amont de la contraction.

Des mesures de la composante longitudinale de vitesse par anémomètre laser faites par **[80] et [81]** dans des écoulements de solutions diluées de polymères ont montré que le seuil de comportement rhéopaississant se traduit par un rééquilibrage des profils de vitesses à l'amont de la contraction et les profils deviennent plus plats et corrélativement les gradients

transversaux plus faibles. On peut citer les travaux de **Wunderlich et al [82]** sur les profils de vitesses pour un fluide newtonien et un fluide viscoélastique pour des nombres de Reynolds compris entre 200 et 400.

Des mesures récentes par utilisation de la biréfringence de l'écoulement inspirée de la mécanique des solides et basée sur l'anisotropie ont permis de faire des cartes de champ de contraintes de cisaillement **[83-85]**. Couplée à des méthodes de calcul numérique, cette nouvelle technique expérimentale permet de valider ou d'affiner les modèles de loi de comportement proposés. Cette dernière technique de mesures a l'inconvénient de ne pas permettre les mesures à faibles débits car les déformations qui en résultent donnent des signaux tellement faibles qu'ils deviennent difficiles à mesurer.

Chapitre 4

Caractéristiques physico-chimiques de la vase du barrage Gargar

4. Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques physiques de vase du barrage de Gargar. L'étude des propriétés physiques et chimiques est dans le but de mieux connaître la nature de la vase étudiée. Afin d'effectuer des formulations pour une éventuelle opération de dragage et l'étude de possibilités de valorisation. La distribution granulométrique a une influence sur le comportement rhéologique des matériaux et d'autre part sur l'écoulement dans les conduites [86, 87]. D'où l'intérêt d'analyse granulométrie des sédiments en vue de mieux appréhender leur propriétés de l'écoulement.

- **Localisation du barrage de Gargar :**

Le barrage de gargar appartient au bassin hydrographique de Chlef Zahraz, extrêmement vulnérable à l'envasement. Situé au nord-ouest de l'Algérie, ce barrage se trouve à 350 km d'Alger. Il est considéré comme le troisième plus grand barrage d'Algérie en termes de capacité de stockage d'eau, avec une capacité de 450 millions m³, après le barrage de Béni Haroun d'une capacité de 998 millions de m³ et le barrage de Kudiat-Aqrdun d'une capacité de 650 millions de m³.

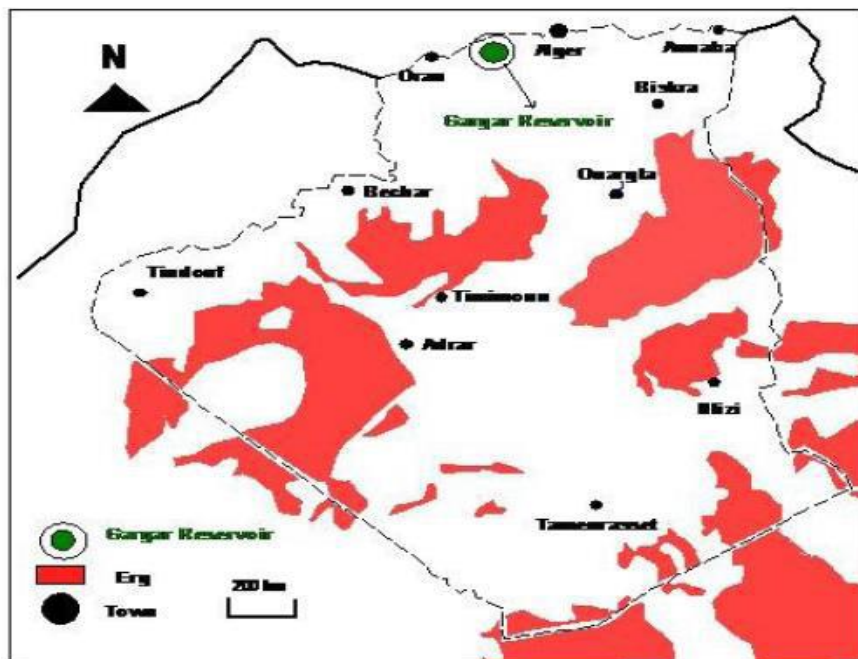




Figure 4.1 : Localisation du barrage de Gargar (Remini B, Benfetta, 2015) [101]



Photo 4.7 : Barrage Gargar (Mai, 2024) Original.

Tableau 4.1 : Caractéristiques du barrage Gargar- Bassin versant de l'oued Rhiou

Date de mise en service	1988
Superficie du bassin versant étudiée	663 km ²
Apport moyen interannuel du bassin versant	185 Hm ³
Capacité initiale du barrage	450 Hm ³
Capacité estimée (2003) du barrage	437.1 Hm ³
Volume régularisé	120,00 Hm ³ /an
Apport réel du barrage	60.90 Hm ³ (période 1990-2001)
Taux d'envasement	0.86 Hm ³ /an

➤ Description

Le barrage de Gargar est construit par une entreprise japonaise entre 1984 et 1988. Il est de type remblai, de 90 m de hauteur, 400 m de longueur de crête et retient un volume de 450 millions m³ d'eau.

4.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques ont été effectuées au laboratoire des travaux public de l'ouest (LTPO).

4.1.1 Poids volumiques spécifiques :

La masse volumique des particules solides (masse volumique absolue) a été déterminé à l'aide d'un pycnomètre. En connaissant la masse de l'échantillon, la masse volumique absolue est déterminée par le rapport entre la masse des grains solides et leur volume [88], [89], il est déterminé par l'essai au pycnomètre qui se calcule par la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 + m_2} \quad (4.1)$$

m_1 : Poids du pycnomètre vide (g) ;

m_2 : Poids du pycnomètre et échantillon (g) ;

m_3 : Poids du pycnomètre et échantillon + eau (g) ;

m_4 : Poids du pycnomètre + eau (g) ;

ρ : Poids volumiques spécifique de la vase a une valeur de 2.7 (g/cm³).

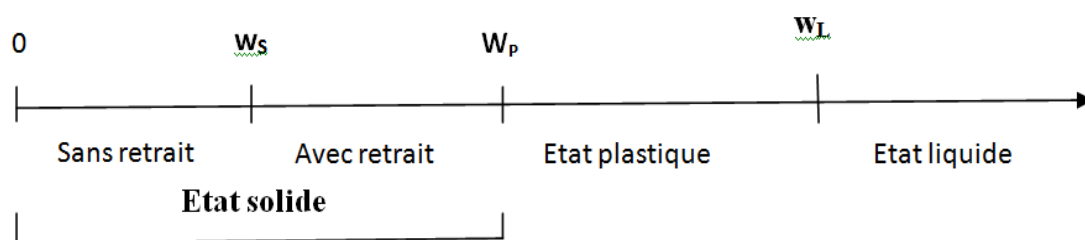


Figure 4.2:Détermination de poids spécifique

4.1.2 limites d'Atterberg :

Ce sont des constantes physiques conventionnelles qui indiquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité W_L).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité W_P).



4.2 Calcul de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande :

On impose à la coupelle des chocs semblable en comptant le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur 1 cm et on mesure la teneur en eau de la pâte.



Figure 4.3: limite de liquidité à l'aide de Casagrande.

***Recherche de la limite de plasticité (W_p) :** c'est la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3.0 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$.



Figure 4.4 : Limite de plasticité par la méthode de rouleau.

4.2.1 L'indice de plasticité

L'indice de plasticité I_p , est le paramètre le plus couramment utilisé pour définir le degré de plasticité des sols. Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_p = W_L - W_p \quad (4.2)$$

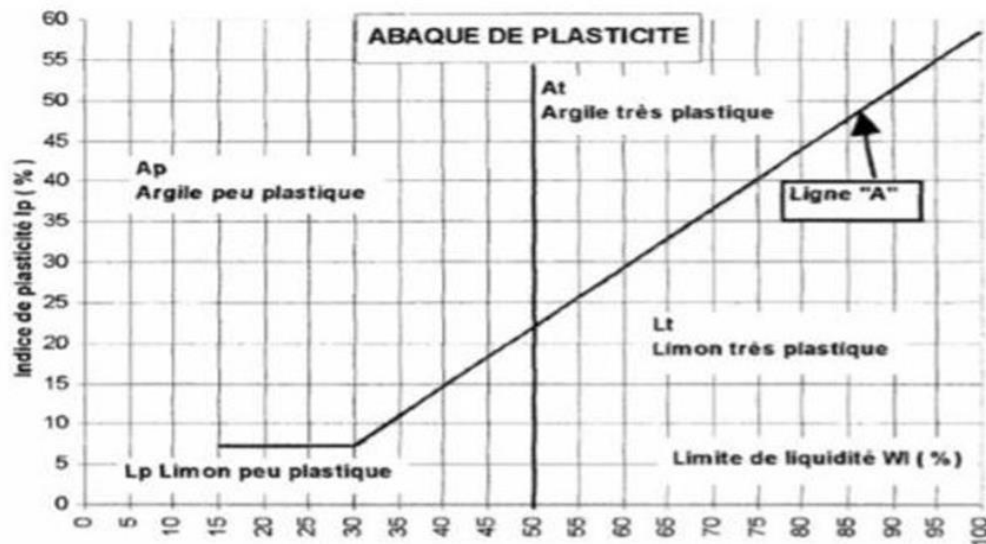
Tableau 4.2 : Classification d'un sol selon l'indice de plasticité I_p

Indice de plasticité	Classification du sol
0-5	Sol non plastique
5-15	Sol peu plastique
15-40	Sol plastique
>40	Sol très plastique

Tableau 4.3 : limites d'Atterberg de la vase de barrage Gargar

Limite de liquidité (W_L) %	Limite de plasticité (W_p) %	Indice de plasticité (I_p) %
29	16	13

Selon l'abaque de Casagrande de classification des sols fins, et les limites d'Atterberg l'échantillon étudié est un sol argileux avec une plasticité moyenne.

**Figure 4.5 :** Abaque de Casagrande pour la classification des sols fins

4.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0.063 et 125 mm. Elle s'effectue par :

a- Tamisage

Le tamisage est une opération qui permet de faire passer le matériau à travers une série normalisée d'où sont séparés les grains en fonction de leur dimension. Dans le cas des sols argileux tel que les vases, le tamisage se fait sous l'eau pour faciliter la séparation entre les grains de différentes tailles. Cette opération se fait pour les grains dont le diamètre est supérieur à 80 μm .



Figure 4.6 : Série des tamis normalisée

b. Sédimentométrie

Cette technique est employée pour définir la répartition des grains dont le diamètre est inférieur à $80\ \mu\text{m}$, elle complète donc la granulométrie par tamisage. Le principe est de mesurer au bout de certains intervalles de temps, la densité de la solution à une profondeur donnée. Et on déduit le diamètre équivalent des plus gros grains encore présents à cette profondeur, ainsi que la proportion des grains dont le diamètre équivalent est inférieur à celui qui vient d'être calculé.



Figure 4.7 : Processus de sédimentométrie

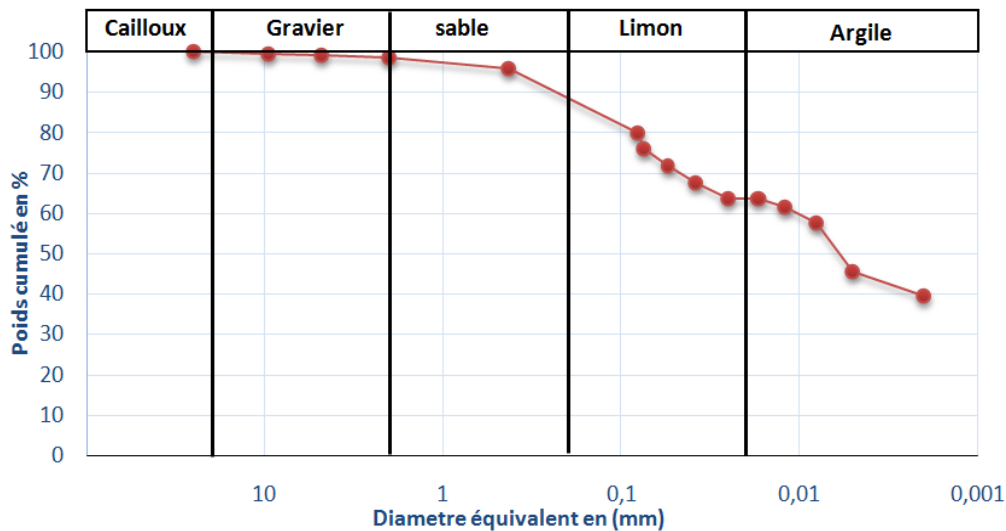


Figure 4.8 : Courbe de granulométrie de vase de barrage de Gargar.

4.3 Les caractéristiques chimiques

L'analyse chimique permet de déterminer la composition quantitative en éléments. La reconnaissance des compositions chimiques ont été réalisées au laboratoire de rhéologie transport et traitement des fluides complexes au département d'hydraulique USTOMB, à l'aide d'un appareil d'analyse chimique X Suprmehtachi.



Figure 4.9 : Appareil d'analyse chimique X Suprmehtachi.

Les éléments principaux constituant l'échantillon de vases ont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.4 : Principaux éléments chimiques constituant la vase de Gargar.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
45	7.9	11	25.17	0.06	1.27	1.05	0	4.08

La teneur en CaCO_3 d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau.

La teneur en calcaire totale de l'échantillon est calculée par la formule suivante :

$$\text{CaCO}_3 = \frac{V \times 100}{107} \quad (4.3)$$

V : le volume prélevé, $\text{CaCO}_3 = 23.36\%$

Tableau 4.5 : Désignation géotechnique en fonction de la teneur des carbonates.

Teneur en CaCO_3 (%)	Désignation géotechnique
0-10 10-30 30-70	Sols { Argile Argile marneuse Marne
70-90 90-100	Roches { <u>Calcaire marneux</u> Calcaire

4.3.1 Commentaires

On remarque d'après les résultats des analyses chimiques l'existence d'un taux important de silice SiO_2 allant jusqu'à atteindre la valeur de 45%, suivi de CaO et Fe_2O_3 , ils ont été considérés comme principaux éléments de la vase.

Le pourcentage du CaO et le MgO nous donnent une idée sur la présence des carbonates tels que la calcite CaCO_3 .

4.4 Analyse thermogravimétrique (ATG) de la vase.

Les analyses ont été réalisées sur un appareil SDT650 au laboratoire de rhéologie transport et traitement des fluides complexes au département d'hydraulique USTOMB, la vitesse de montée en température était de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.



Figure 4.10 : appareil d'analyse thermogravimétrique (ATG).

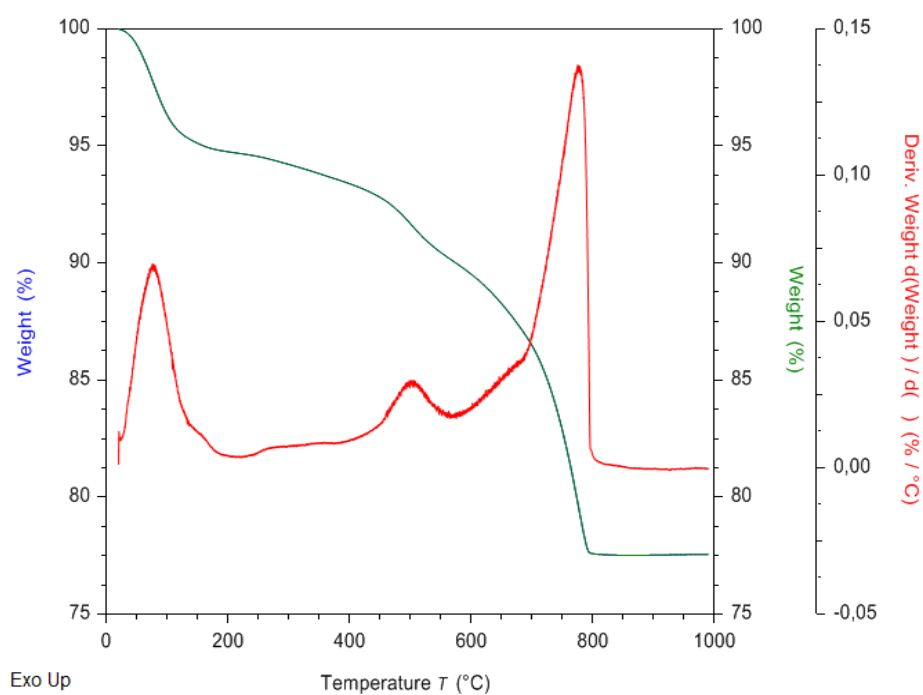


Figure 4.11 : Analyse thermogravimétrique (ATG) de vase de barrage Gargar.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons déterminé les paramètres physico-chimiques de la vase de Gargar. La densité des grains solides de la vase a une valeur de 2.7g/cm^3 et dont la répartition granulométrique est représentée comme suite : 33 % sable, 41 % limon et 26 % argile donc il s'agit d'un sol fin avec une plasticité moyenne confirmée par les limites d'Atterberg.

La limite de plasticité et de liquidité ont une importance en géotechnique pour indiquer la sensibilité d'un sol aux modifications de sa teneur en eau.

Les analyses chimiques montrent qu'une vase est composée de plusieurs oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , K_2O , ...), de l'eau, des sels soluble et des matières organiques.

Les sédiments du barrage contiennent de dioxyde de silicium SiO_2 , ce composé caractérise la fraction sableuse et limoneuse. D'autres part notre échantillon du barrage est composé de 25.17% d'oxydes métalliques (Oxyde de calcium CaO , Oxyde de Magnésium MgO , Alumine Al_2O_3 , Oxyde ferrique Fe_2O_3 , et Oxyde de Potassium K_2O), ces oxydes marquent la présence la d'argile dans les sédiments.

Chapitre 5

Comportement rhéologique de la vase de gargar et carbopol 940

5. Introduction

Les propriétés rhéologiques des vases des barrages et des polymères dépendent de la teneur en matière solide, de la valeur du pH, de la composition chimique, de la granulométrie des particules et aussi de la température. Dans ce chapitre, on s'intéresse au comportement rhéologique des vases de barrage de **Gargar** (ouest algérien) et d'un polymère type Carbopol 940.

5.1. Moyens expérimentaux

Les caractéristique rhéologiques ont été effectuées avec un rhéomètre à couple de rotation imposé (type hybride discovery HDR2 de la société TA instrument) au laboratoire de rhéologie transport et traitement des fluides complexes (Université USTO) équipé d'une géométrie cylindrique à allaite (géométrie de type vanne ou Couette) d'entrefer 31,36 mm) voir **figure 5.1** La température est contrôlée par l'effet Peltier permet la régulation de la température de -40 à 150°C.



Figure 5. 1: Rhéomètre hybride discovery HDR2

5.2. Résultats et discussion

5.2.1. Effet de la concentration massique sur l'écoulement de la vase

Pour tester l'effet de la concentration massique sur l'écoulement de la vase de barrage de Gargar, cinq concentrations massiques ont été préparé (25%, 30%, 35%, 40% et 45%). Les mesures en écoulement sont effectuées à la vitesse de rotation de balayage de 0 à 50 rad/s pour une durée de 180 s

La **figure 5.2** présent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différentes concentrations en vase de barrage de Gargar. Le modèle de Bingham (Equation 5.1) reproduit correctement le comportement rhéologique des suspensions de la vase.

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} \quad (5.1)$$

Avec: τ_0 seuil d'écoulement en Pa et η_B viscosité plastique Pa.s

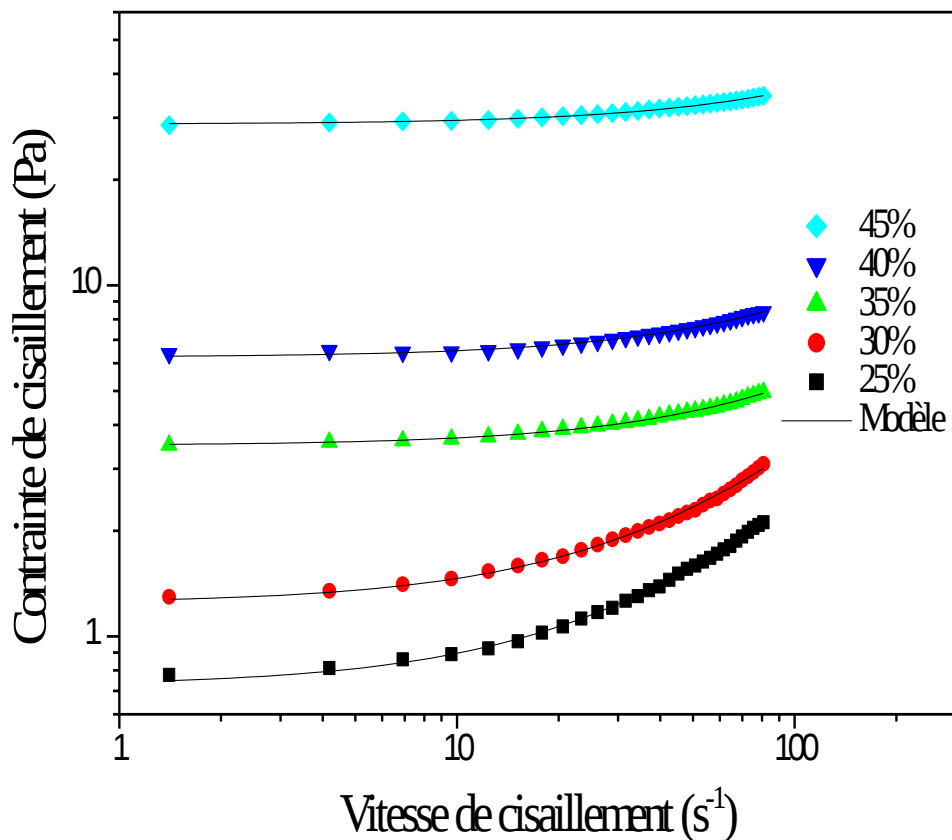


Figure 5. 2: Courbe d'écoulement de la vase de barrage de gargar pour différents concentrations massique.

5.2.1.1. Influence de la concentration sur les paramètres rhéologiques de la vase

La figure 5.3 montre l'évolution du seuil d'écoulement et de la viscosité plastique en fonction de la concentration massique en vase. Nous constatons que le seuil d'écoulement et la viscosité plastique augmente très rapidement avec la concentration. D'après **Laribi et al [91]**, l'augmentation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique de la vase peut être lié aux interactions entre forces van der Waals et la formation des agrégats. Selon **Hammadi et Ponton [92]**, l'augmentation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique peut être lié aux interactions hydrodynamiques qui sont causées par le déplacement de la suspension lorsqu'elle est soumise à un cisaillement. Cela peut provoquer des modifications dans la disposition des particules, éloigner ou rapprocher les particules les unes des autres et provoquer des collisions entre particules. D'après **Coussot et Ancey [93]**, la taille et la forme des particules ont une influence importante sur le seuil d'écoulement et la viscosité de la vase. L'augmentation du seuil d'écoulement est liée à l'organisation des particules au sein du fluide et dépend de la compétition entre les interactions particule – particule [94, 95].

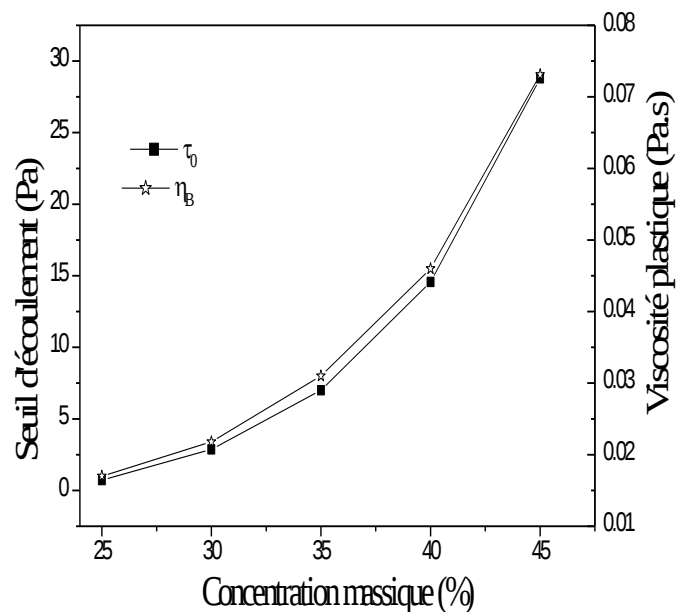


Figure 5. 3: Variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique de la vase en fonction de la concentration massique.

5.2.1.2. Essais dynamique

Afin de mieux comprendre la structure interne de la vase, des mesures rhéologiques en régime dynamique ont été effectuées. Les essais dynamiques sont réalisés pour une amplitude de contrainte de 0,001 à 30 Pa et une fréquence constante de 0,5 Hz. La figure

montre l'évolution du module élastique G' et visqueux G'' en fonction de la contrainte pour différentes concentrations en vase.

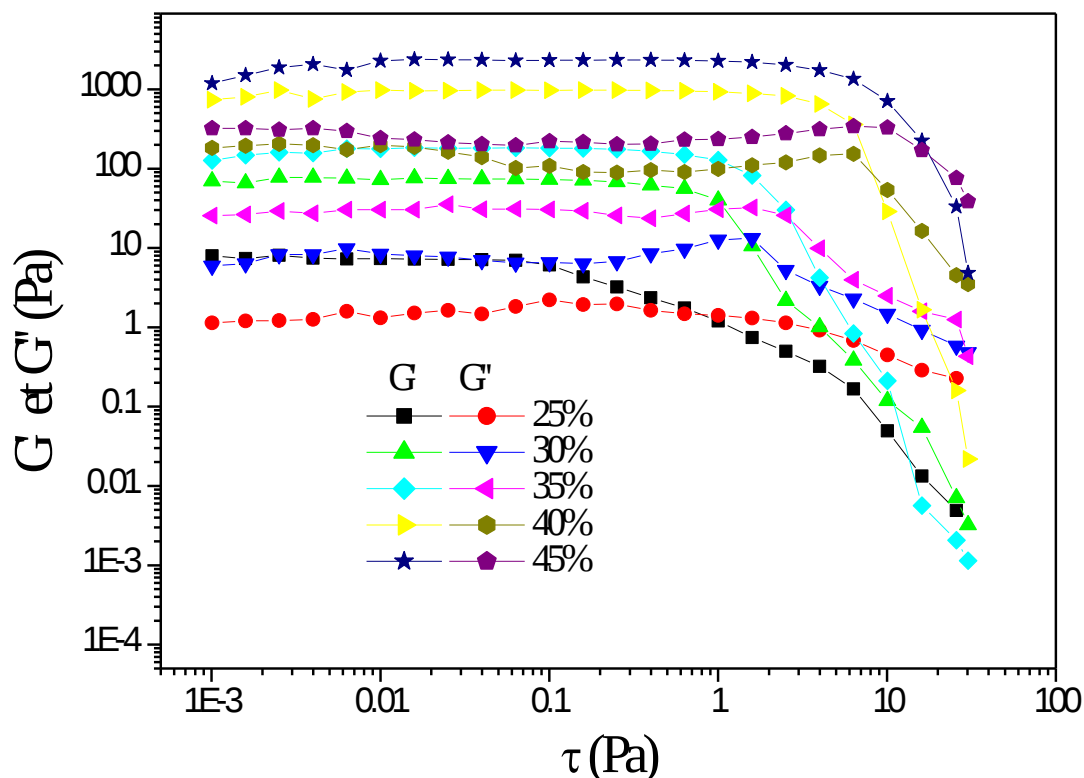


Figure 5. 4 : Module élastique et visqueux en fonction de la contrainte et fréquence 0.5 Hz pour différents concentrations massique en vase.

On observe sur la figure 5.4 pour des contraintes inférieure à une contrainte critique le module élastique G' reste constant (domaine viscoélastique linéaire) puis le module élastique G' est fortement dépendant de la contrainte. Ceci signifie que la suspension de vase est en état déstructurée. Dans ce cas, pour des contraintes inférieures à une contrainte critique qui dépendante de la concentration massique en vase le module élastique G' est supérieur au module visqueux G'' , lorsque la contrainte critique est dépassée le module visqueux G'' devient supérieur au module élastique G' et la suspension de vase se présent dans un état visqueux.

5.2.2. Effet de la concentration massique sur l'écoulement de Carbopol 940

Le Carbopol 940 utilise est une poudre blanche, hygroscopique, avec un poids moléculaire de $4 \times 10^6 \text{ g.mol}^{-1}$. Le tableau 5.1 montre la composition chimique de Carbopol 940

Tableau 5.1 : Composition chimique de Carbopol 940

Composition	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Ci	K_2O	CaO	Fe_2O_3
Pourcentage (%)	0	0	2.19	59.8	10.2	25.2	1.58	0.67	0.68	0.14

Les mesures en écoulement sont effectuées à la vitesse de balayage en gradient de vitesse de cisaillement varie de 0.01 à 500 s^{-1} pour une durée de 180 s.

La figure 5.5 présent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement pour différentes concentrations en carbopol 940. Le modèle de Herschel-Bulkley (Equation 5.2) reproduit correctement le comportement rhéologique des solutions aqueuses de Carbopol 940.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (5.2)$$

Avec: τ_0 seuil d'écoulement en Pa, K indice de consistance $Pa.s^n$ et n indice d'écoulement (-)

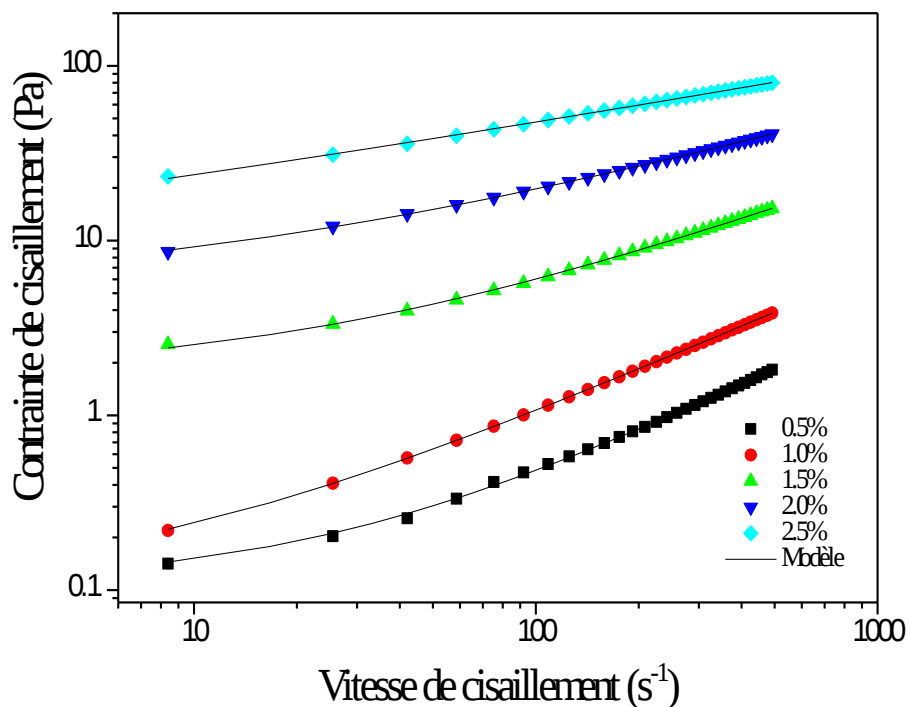


Figure 5. 5 : Courbe d'écoulement du Carbopol 940 pour différents concentrations massique.

5.2.3. Influence de la concentration sur les paramètres rhéologiques du Carbopol 940

Nous représentons sur la figure 5.6 la variation du seuil d'écoulement, d'indice de consistance de l'indice d'écoulement en fonction de la concentration en Carbopol 940 . On remarque une diminution de l'indice d'écoulement et augmentation du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance en fonction de la concentration en Carbopol 940. D'après Benchabane and Bekkour [96], l'augmentation de la concentration en polymère renforce l'enchevêtrement des chaînes et gêne d'avantage l'écoulement du fluide. Cette difficulté de mouvement des chaînes polymériques assure une restructuration de Carbopol 940 caractérisé par une croissance du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance en fonction de la concentration en carbopol 940 .La variation du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance avec la concentration en polymère (Carbopol 940) a été décrite par un modèle de type puissance (Equation 5.3) :

$$\gamma = AC^B \quad (5.3)$$

Avec A et B sont des constantes et C la concentration de Carbopol 940. Le tableau 5.2 donne les valeurs des constante A et B.

Tableau 5.2 : Valeurs des constante A et B.

	A	B
τ_0	0.885	2.169
K	0.003	8.580

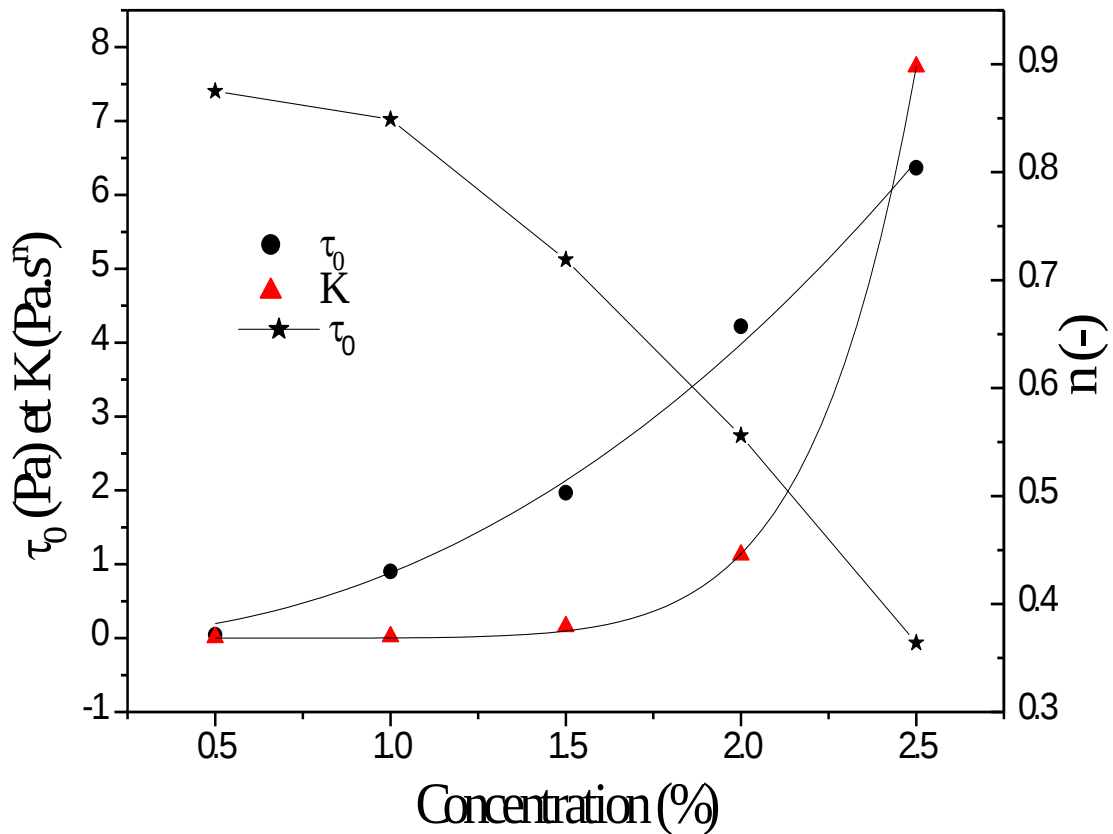


Figure 5. 6 : Variation du seuil d'écoulement, d'indice de consistance et de l'indice d'écoulement en fonction de la concentration du Carbopol 940.

5.2.3.1.Effet de la concentration sur le comportement viscoélastique de Carbopol 940

La viscoélasticité est un comportement intermédiaire entre le comportement d'un solide élastique et celui d'un fluide visqueux. La figure 5.7 représente l'évolution des modules élastiques et visqueux G' et G'' en fonction de la contrainte pour différentes concentrations de Carboplo 940. Dans le domaine linéaire, le de Carboplo940 a un comportement élastique et les valeurs de G' sont supérieures aux valeurs de G'' .

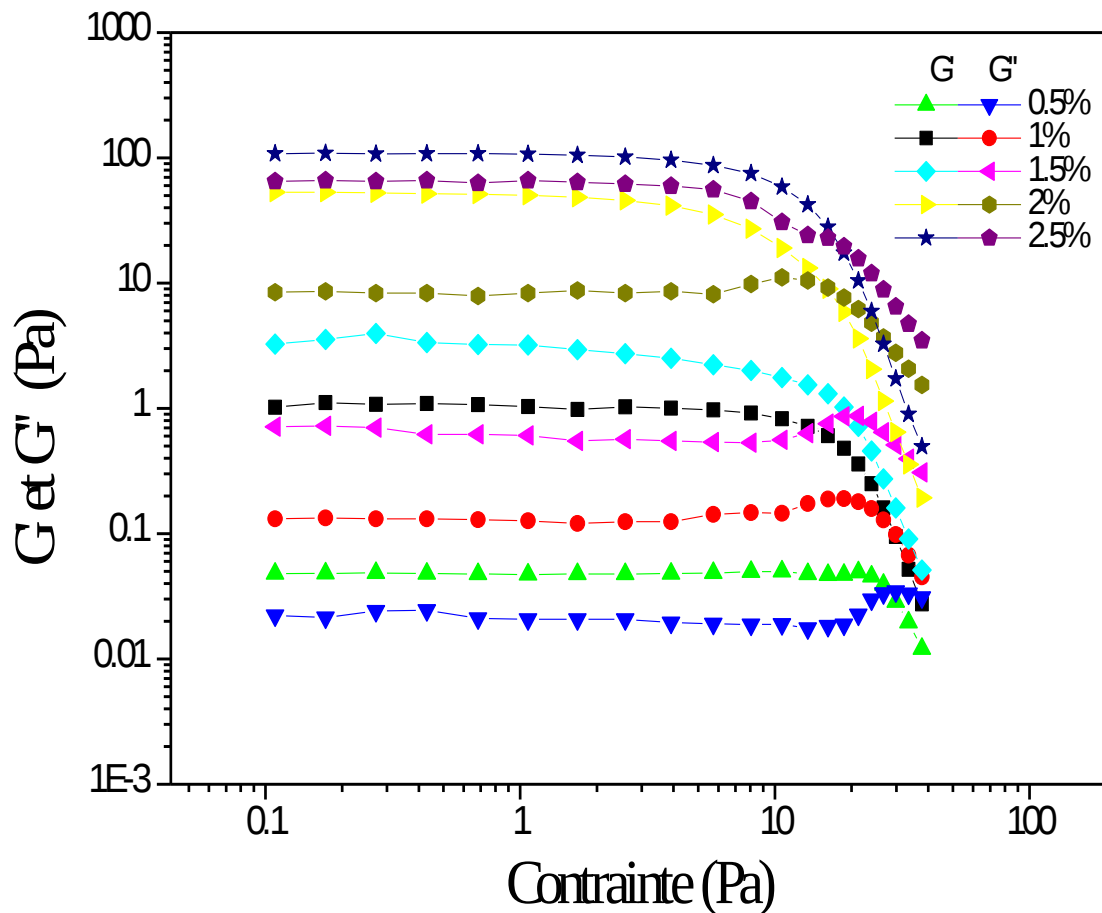


Figure 5. 7 : Variation du module élastique et visqueux en fonction de contrainte et fréquence 0.5 Hz pour différents concentrations massique en Carbopol 940.

Le régime linéaire s'étend jusqu'à la contrainte critique pour laquelle les modules élastiques et visqueux sont égaux. La figure 5.8 montre une augmentation de la contrainte critique avec l'augmentation de la concentration en Carbopol 940. Le produit de cette contrainte critique par la valeur de G' ou G'' correspondante fournit une estimation de la contrainte seuil du fluide. On observe sur la figure une bonne concordance entre le seuil calculé par les essais dynamiques et en écoulement. Nous observons aussi que la contrainte critique augmente très rapidement avec la concentration en Carbopol 940

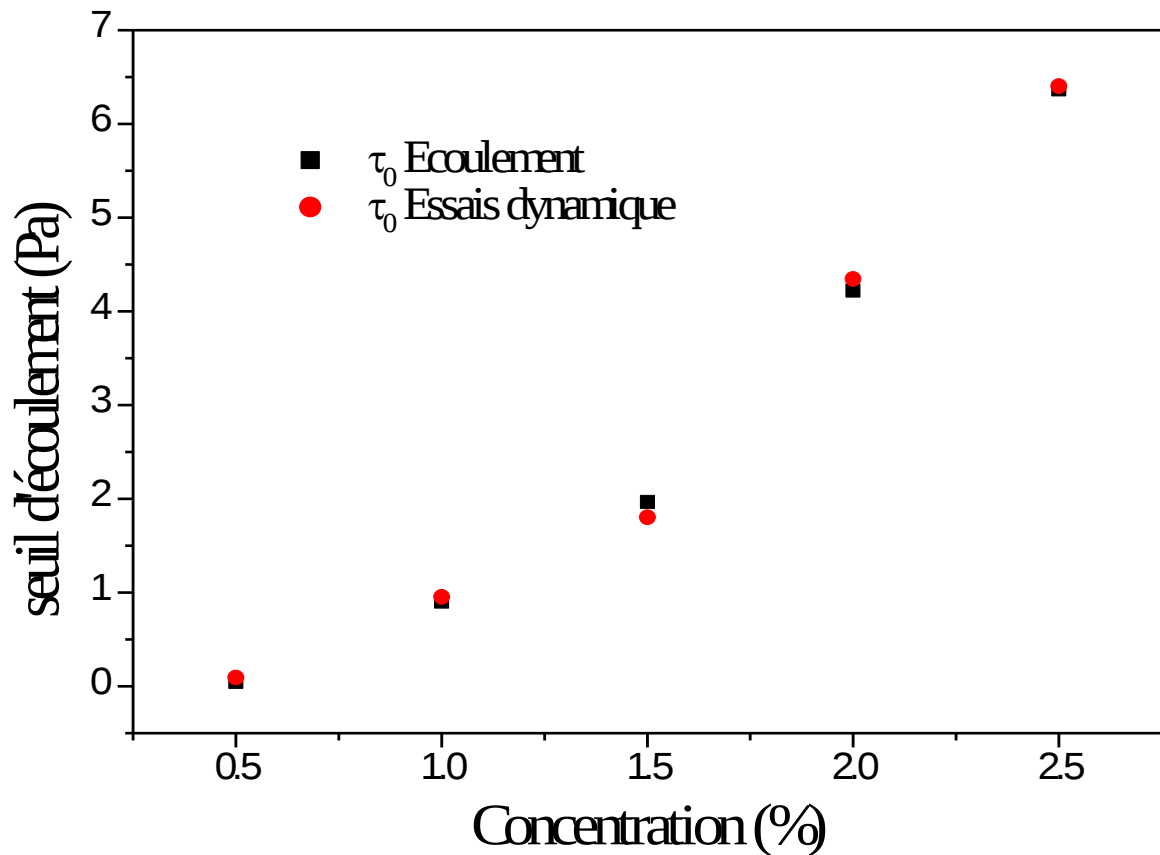


Figure 5. 8 : Variation du seuil d'écoulement calculé par essais en écoulement et en oscillation en fonction de la concentration de Carbopol 940

5.2.4. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre le comportement rhéologique de la vase de barrage Gargar et de carbopol 940, l'étude montre une augmentations du seuil d'écoulement et de l'indice de consistance et une diminution de l'indice d'écoulement en fonction de la concentration des deux matériaux. L'étude montre aussi le domaine élastique de la vase et de polymère type Carbopol 940 dépende de la concentration massique des deux matériaux.

Chapitre 6

Effet des additifs sur les propriétés
rhéologique et hydraulique de la vase de
barrage Gargar.

6.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons des résultats sur l'effet des additifs (Tripolyphosphate de sodium, métaphosphate de sodium, Xanthane et carbopol 940) sur les propriétés rhéologiques et hydrauliques de la vase de barrage de Gargar.

6.2 Effet des additifs sur les propriétés rhéologiques de la vase

6.2.1 Effet de Tripolyphosphate de sodium

Pour étudier l'effet de tripolyphosphate de sodium sur le comportement rhéologique du système vases des barrages-eau une suspension de vase (sans aditifs) et des mélanges vase-tripolyphosphate de sodium à différentes concentrations ont été préparés. Le tableau 6.1 montre la composition chimique de Tripolyphosphate de sodium utilisé dans cette étude.

Tableau 6.1 : Composition chimique de Tripolyphosphate de sodium

Composition	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	Fe_2O_3
Pourcentage (%)	5.84	0	0.66	12.23	73.76	6.27	0.56	0.104	0.42	0.12

La préparation des mélanges vase-tripolyphosphate de sodium consiste à ajouter le tripolyphosphate de sodium à la concentration voulue. Le mélange est agité par la suite en continu pendant 24 heures à l'aide d'un agitateur magnétique.

Les mesures en écoulement sont effectuées à la vitesse de rotation de balayage de 0 à 50 rad/s pour une durée de 180 s.

6.2.1.1 Effet de Tripolyphosphate de sodium sur l'écoulement de la vase

Les figures 6.1 et 6.2 montrent les courbes d'écoulement des mélanges vase-tripolyphosphate (40% et 45% de vase). Il est clairement existe deux comportements séparés par un taux de cisaillement critique : un comportement non newtonien après une limite d'élasticité, suivi d'un comportement plastique (Figures 6.1 et 6.2). Il est important de noter que les données expérimentales ont été ajustées à un modèle de Cross modifié (Eq.6.1).

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\infty} \dot{\gamma} + \frac{(\eta_0 - \eta_{\infty}) \dot{\gamma}}{1 + (\lambda_c \dot{\gamma})^m} \quad (6.1)$$

Avec

τ_0 le seuil d'écoulement, η_0 la viscosité au taux cisaillement nul (Plateau newtonien inférieur), η_{∞} la viscosité taux cisaillement infinie, λ_c le temps caractéristique et m exposant sans diminutions.

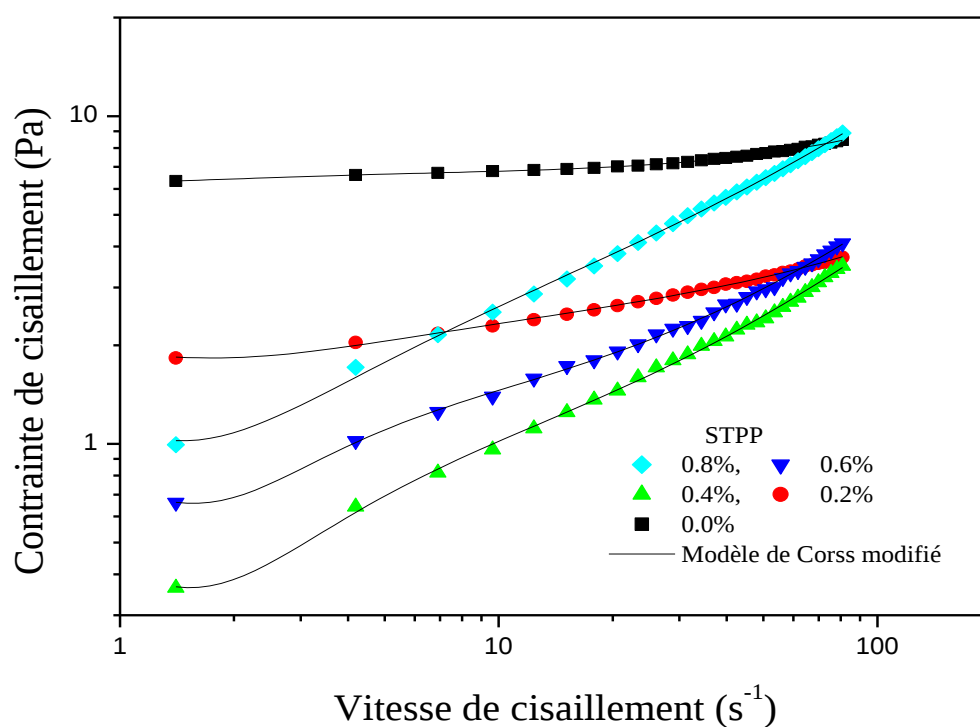


Figure 6.1 : Effet du tripolyphosphate de sodium sur l'écoulement de la vase du barrage de Gargar (40% de vase).

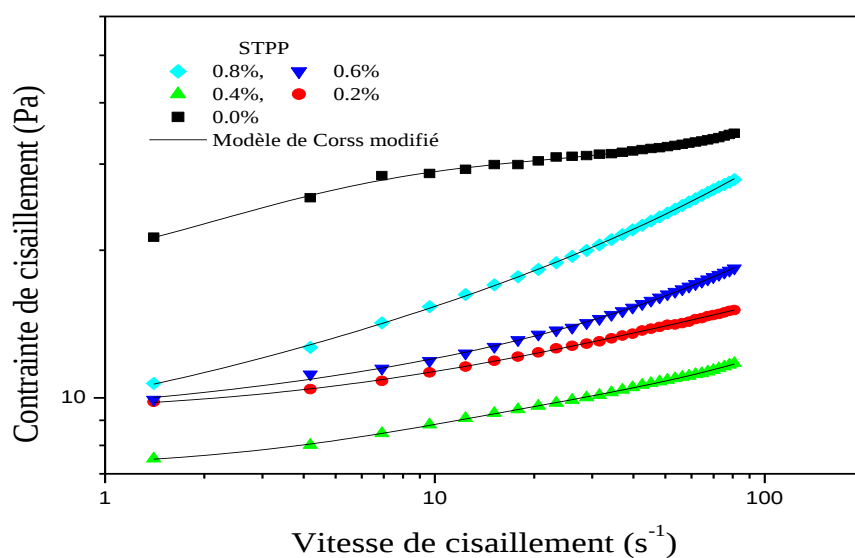


Figure 6.2 : Effet du tripolyphosphate de sodium sur l'écoulement de la vase barrage de gargar (45 % de vase).

Les figures 6.3, 6.4 et 6.5 montrent la variation des paramètres rhéologiques de modèle de Cross modifié en fonction de la dose de tripolyphosphate de sodium dans la vase (40% et 45%).

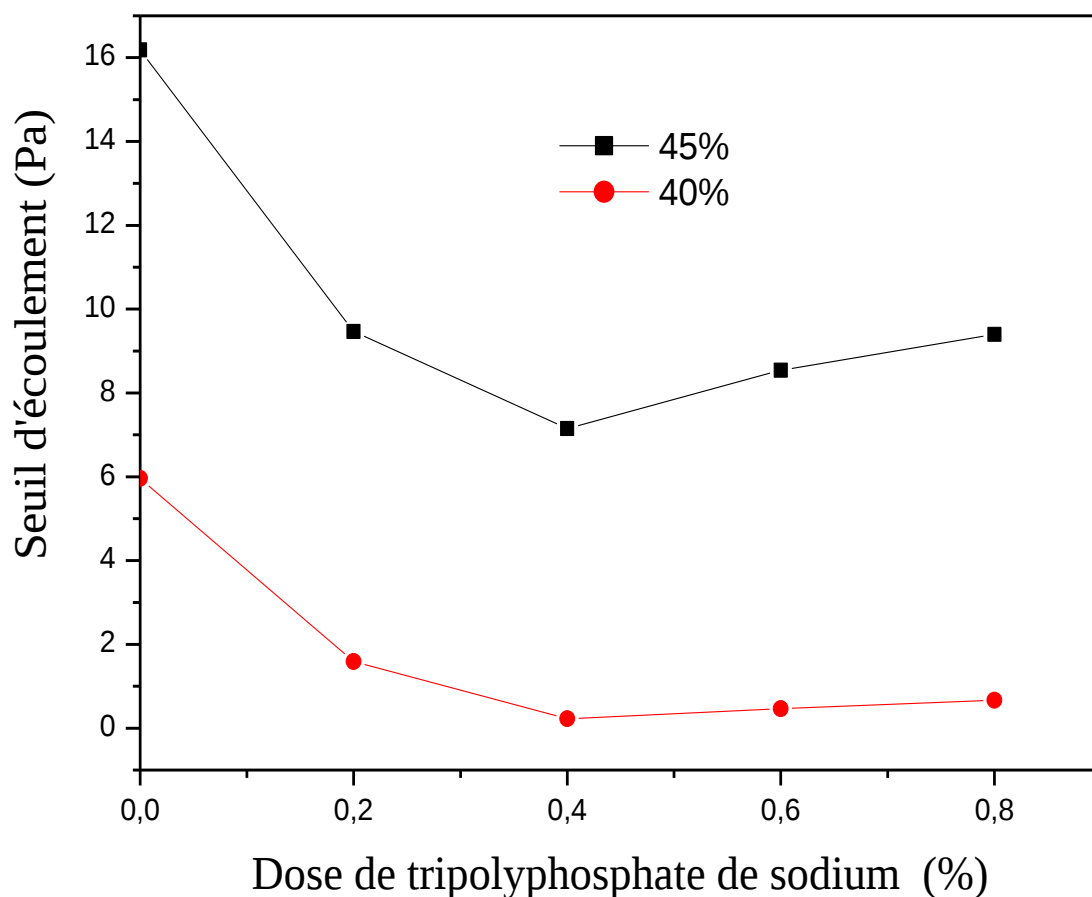


Figure 6.3 : Variation de seuil d'écoulement de la vase (40% et 45%) en fonction de la dose de tripolyphosphate de sodium

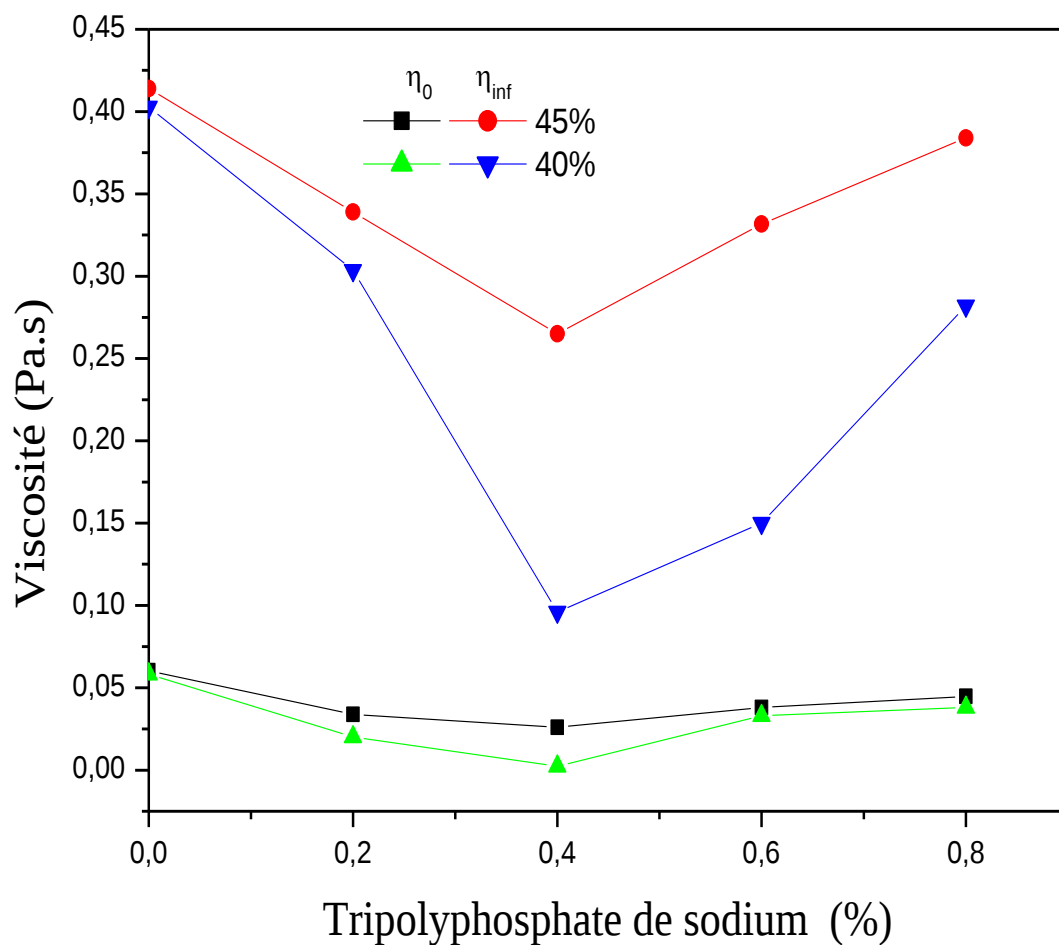


Figure 6.4 : Variation de la viscosité au taux cisaillement nul et la viscosité d'équilibre de la vase (40% et 45%) en fonction de la dose de tripolyphosphate de sodium

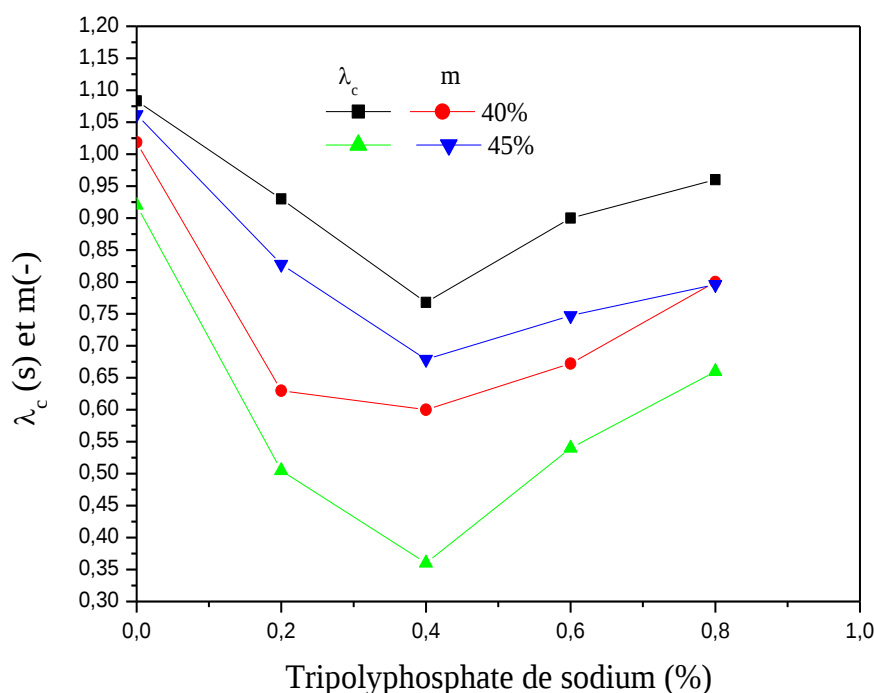


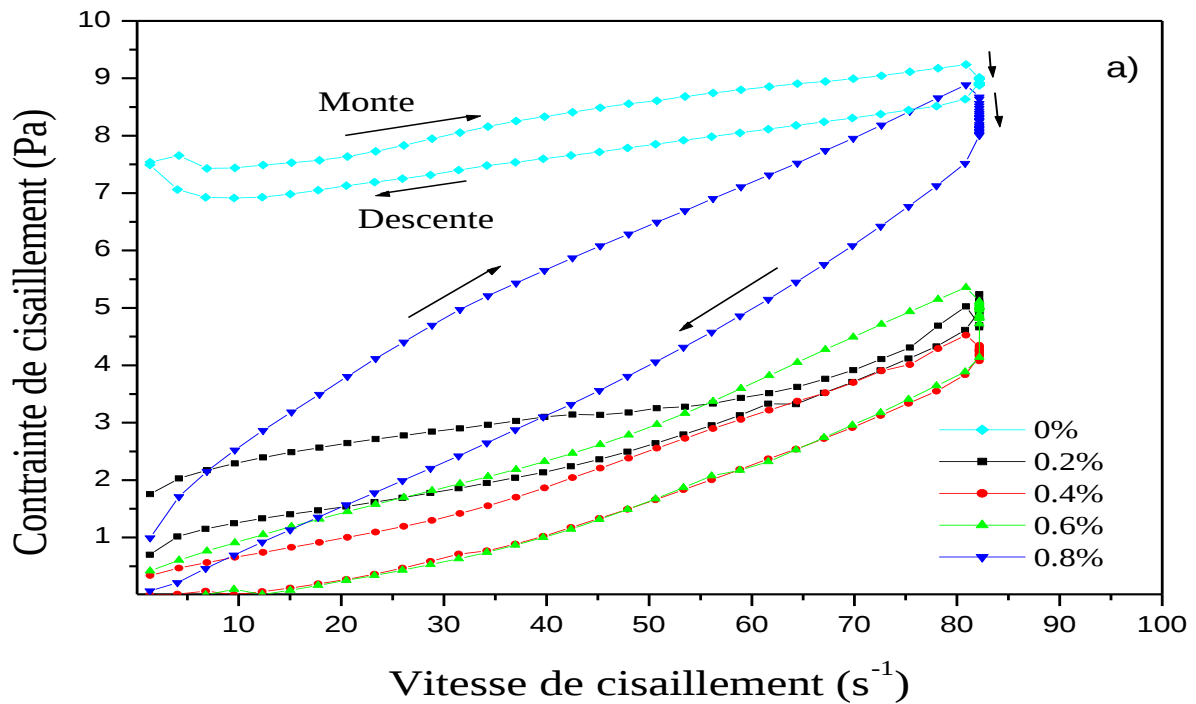
Figure 6.5: Variation du temps caractéristique et m exposant de la vase (40% et 45%) en fonction de la dose de tripolyphosphate de sodium

On observe sur les figures 6.3, 6.4 et 6.5 une diminution des paramètres rhéologiques modèle de Cross modifié avec l'augmentation de la dose jusqu'à une valeur optimale de tripolyphosphate de sodium (0.4 g), au-delà de la dose optimale on remarque une augmentation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross modifié. D'après Piani and Papo [97], pour des doses inférieures à la dose optimale la diminution des paramètres rhéologiques du modèle de Cross modifié dû à la l'adoration des surfaces de la vase par les ions de tripolyphosphate de sodium qui sont chargés négativement qui provoque une diminution de la viscosité des mélanges. D'après Evcin [98], l'augmentation des paramètres rhéologiques du modèle de Cross modifié au au-delà de la dose optimale peut expliquer par l'excès de $[[Na]]^{+}$ dans les mélanges qui réduisent l'épaisseur la couche de diffusion de l'effondre.

6.2.1.2 Effet de Tripolyphosphate de sodium sur le comportement thixotropique de la vase

Pour tester l'effet de tripolyphosphate de sodium sur le comportement thixotropique de la vase une succession de vitesse est imposée à l'échantillon selon une rampe montante de 180 s (courbes montantes d'écoulement), un palier de vitesse maximale durant 60 s et une

rampe descendante de 180 s. La figure 6.6 représente les rhéogrammes obtenus pour les suspensions de vases étudiées (40% et 45%) à différents dose de tripolyphosphate de sodium (0% ; 0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%) Les courbes correspondant aux rampes montantes et descendantes ne se superposent pas et montrent une dépendance au temps de cisaillement. A vitesse égale, les gradients de cisaillement de la rampe montante étant inférieurs à ceux de la rampe descendante, le comportement rhéologique des mélanges est donc de caractère thixotrope.



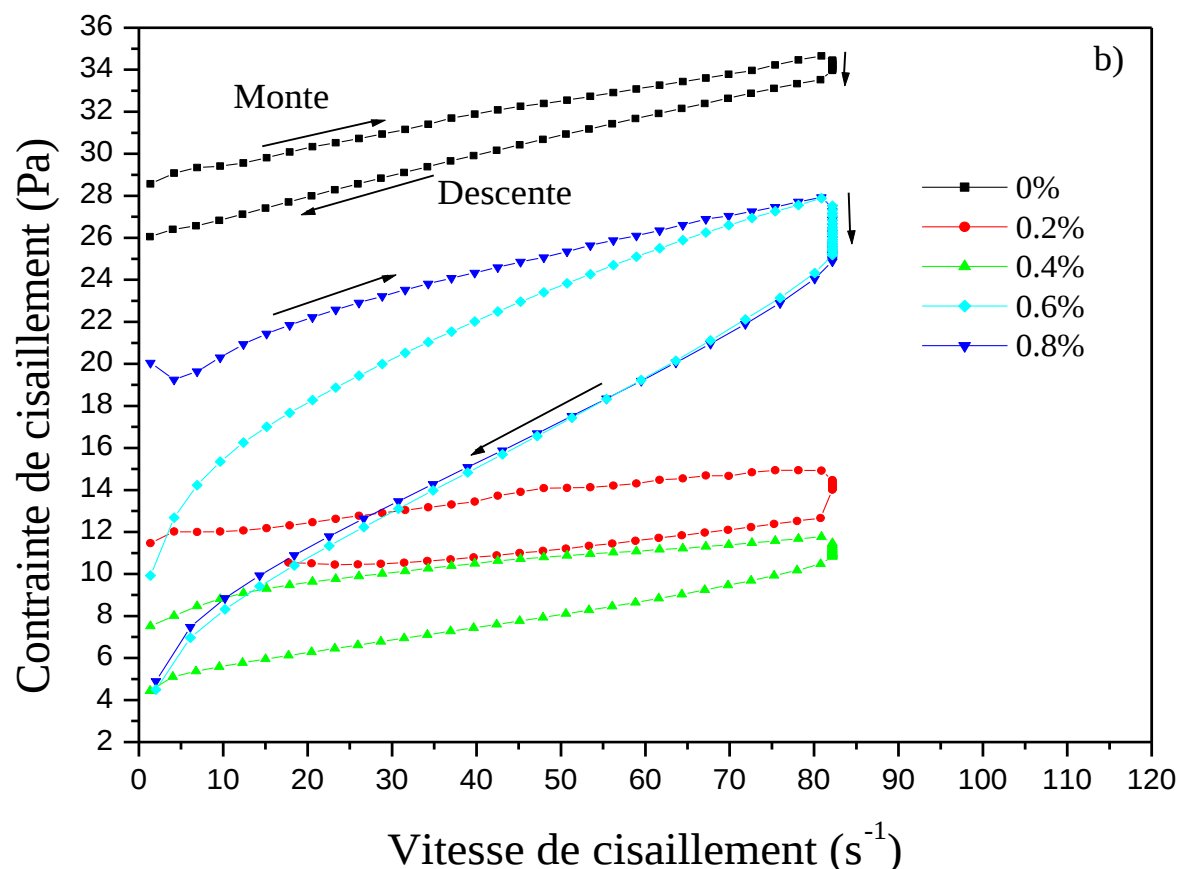


Figure 6.6 : Boucles d'hystérésis des mélanges vase + tripolyphosphate de sodium : a) 40% Vase+ tripolyphosphate de sodium (0% ; 0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%) ; b) 45% Vase+ tripolyphosphate de sodium (0% ; 0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%).

Du point de vue pratique, nous avons déterminé la surface de thixotropie pour différentes concentrations de tripolyphosphate de sodium ajouté à la vase. Il s'agit de calculer d'abord l'aire de la surface qui se trouve sous la courbe de montée, du palier et de la descente en utilisant logiciel Trios V4.2.1. 36612 of TA instrument. La figure 6.7 montre la variation de la surface de thixotropie des mélanges vase- tripolyphosphate de sodium. On remarque une augmentation du degré de la thixotropie avec l'augmentation de la dose de tripolyphosphate de sodium dans les vases de barrage, ce comportement peut être expliqué par l'augmentation du degré de défloculation causée par le tripolyphosphate de sodium.

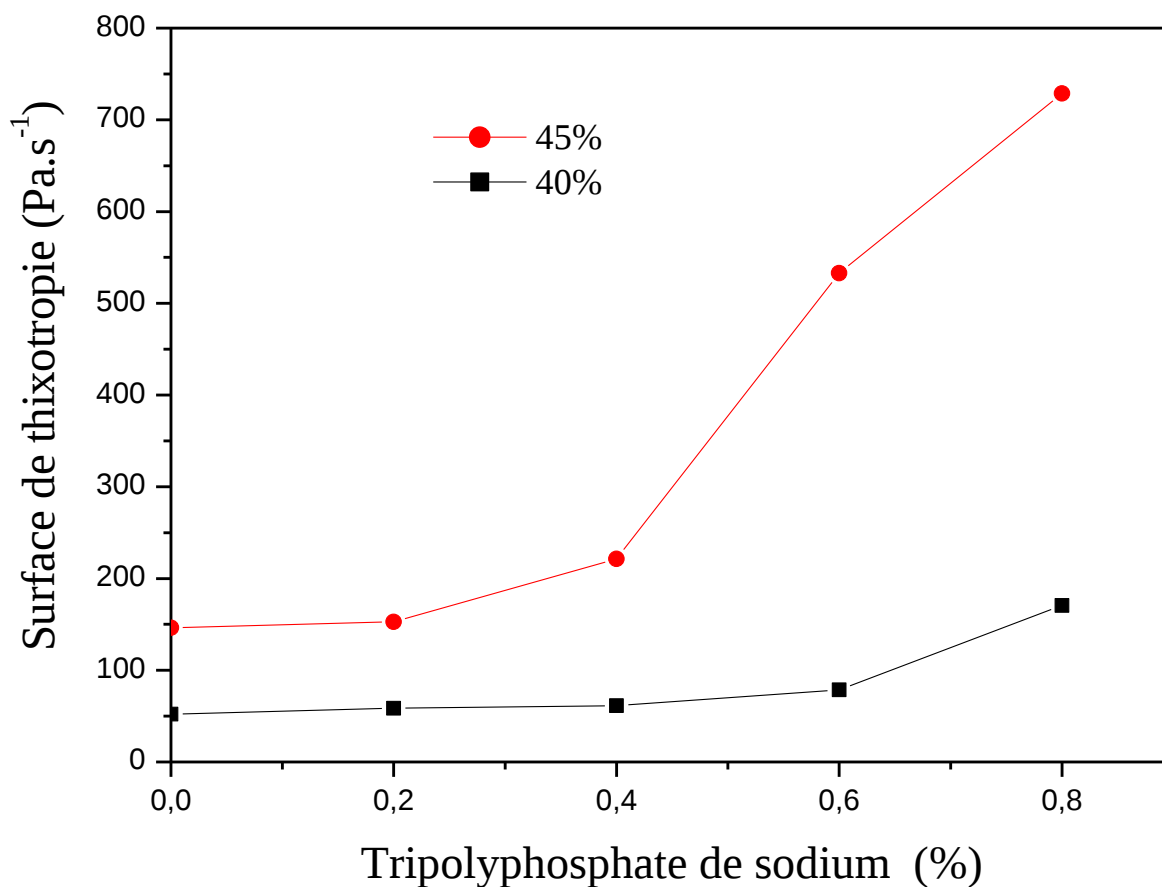


Figure 6.7 : Surface de thixotropie des mélanges vase (40% et 45%)- tripolyphosphate de sodium.

6.2.1.3 Effet de Tripolyphosphate de sodium (STTP) sur viscoélasticité de la vase

La figure 6.8 représente l'évolution des modules élastiques et visqueux G' et G'' en fonction de la contrainte de des mélanges 40% Vase- différentes doses de STPP. Dans le domaine linéaire, le mélanges a un comportement élastique et les valeurs de G' sont supérieures aux valeurs de G'' .

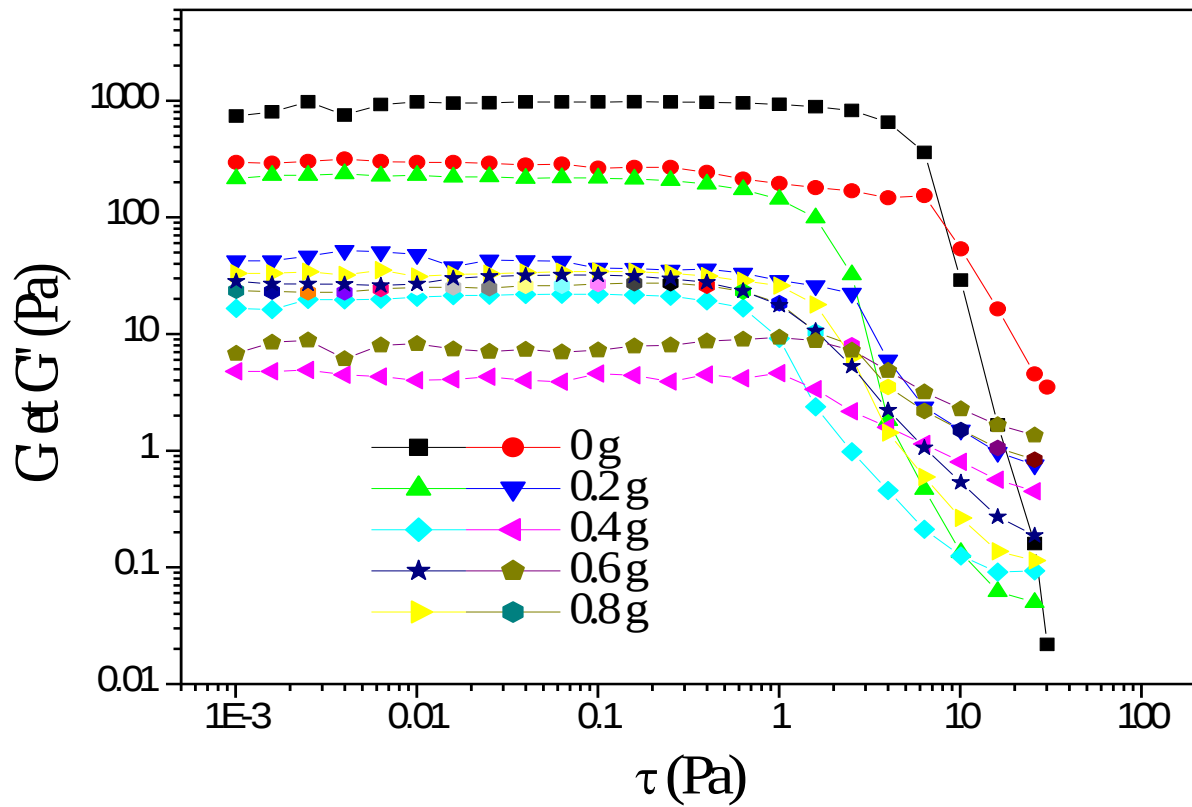


Figure 6.8: Variation des modules élastiques et visqueux en fonction de la contrainte des mélanges 40% vase-STPP pour une fréquence de 0.5 Hz

L'énergie de cohésion E_C dans la structure floculée est donnée par la relation (6.2). Cette énergie peut être utilisée de manière quantitative tant que mesure de l'interaction de la structure floculée et avec celui-ci peut aussi être considérée comme une mesure du degré defloculation de la vase.

$$E_C = \frac{1}{2} \tau_{odyn} \gamma_C^2 \quad (6.2)$$

Avec : τ_{odyn} le seuil d'écoulement dynamique en (Pa) et γ_C la déformation critique correspondant au seuil d'écoulement dynamique en (%). La figure 6.9 présente l'évolution de l'énergie cohésion en fonction de la dose de STPP dans vase. On observe sur la figure pour des doses de STPP inférieure à la dose optimale (0.4 g) une diminution de l'énergie cohésion avec l'augmentation de la dose de STPP dans la vase et pour des doses supérieures à la dose optimale une augmentation de cette énergie de cohésion. Solen Chougnnet et al [99] , la diminution d'énergie de cohésion du mélange est attribuée au fait que les interactions entre particules de vase sont plus faibles.

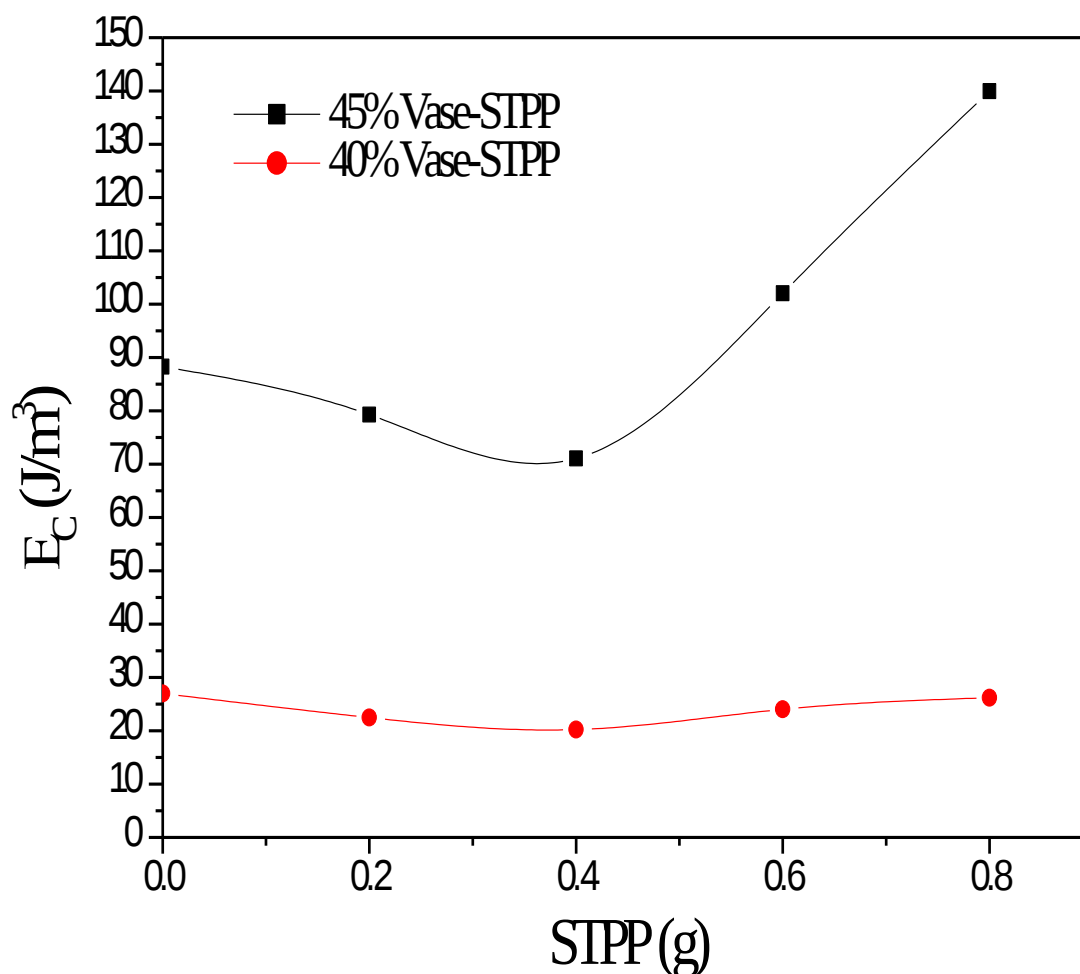


Figure 6.9 : Variation de l'énergie de cohésion de la vase de barrage Gargar (40% et 45%) en fonction de la dose de STPP

6.2.2 Effet de métasilicate de disodium (MSI)

Le métasilicate de disodium peut se présenter sous la forme anhydre (Na_2SiO_3) ou sous la forme hydratée ($Na_2SiO_3 \cdot nH_2O$) ; les formes anhydre (numéro CAS = 6834-92-0), pentahydratée (numéro CAS = 10213-79-3) et nonahydratée (numéro CAS = 13517-24-3) sont les plus couramment commercialisées. Le métasilicate de disodium largement utilisé pour défloculer des suspensions d'argile et d'autres minéraux. Le tableau V. 2 montre la composition chimique de métasilicate de disodium (MSI) utilisé dans cette étude.

Tableau 6.2 : Composition chimique de méta silicate de di sodium (MSI).

Composition	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	Cl	K_2O	CaO	Fe_2O_3
Pourcentage (%)	9.6	0	1.48	63.96	8.95	13.46	1.275	0.58	0.75	0.154

6.2.2.1. Effet de métasilicate de sodium (MSI) sur l'écoulement de la vase

La figure 6.10 montre les courbes d'écoulement des mélanges vase-méta silicate de di sodium (40% de vase). Le modèle de Bingham reproduit correctement le comportement rhéologique des mélanges (équation 5.1).

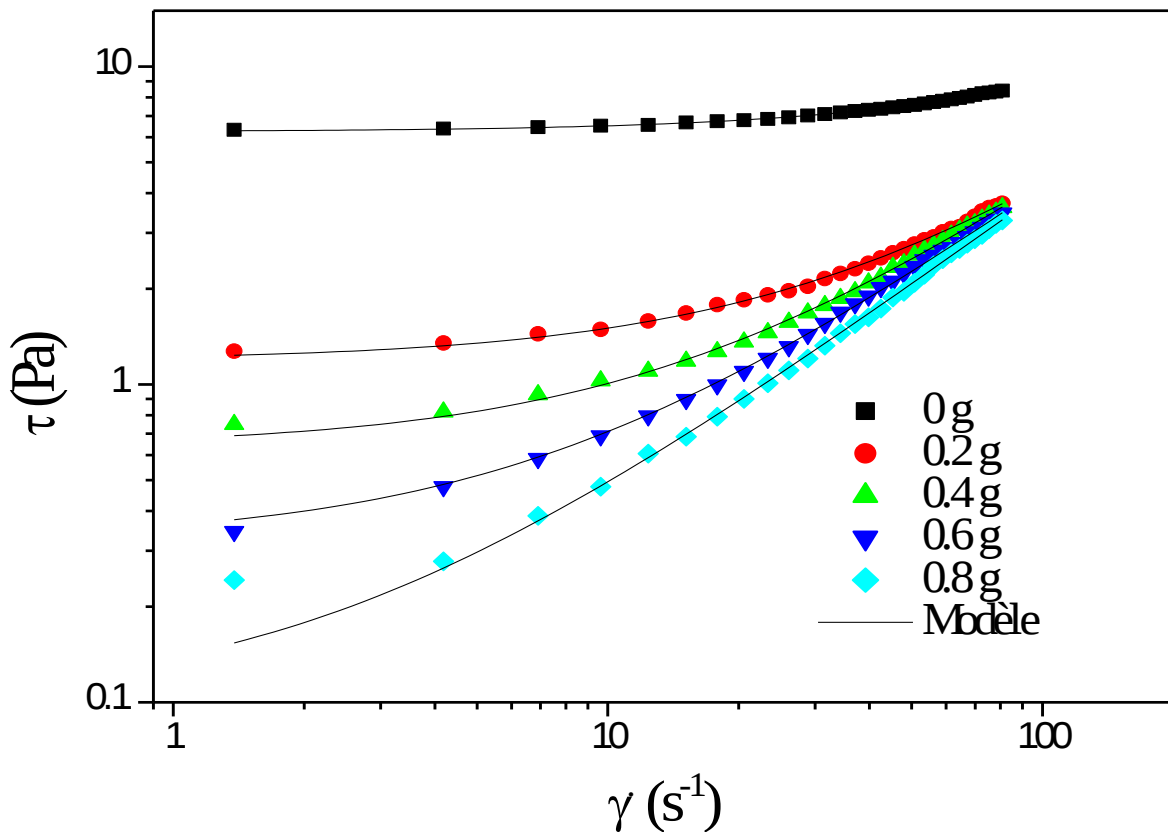


Figure 6.10 : Effet de méta silicate de disodium sur l'écoulement de la vase du barrage de Gargar (40% de vase).

La figure 6.11 montre la variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique on remarque une diminution du seuil d'écoulement et la viscosité plastique avec l'augmentation de la dose de MSI dans la vase. Cette diminution des paramètres rhéologique de la vase dû aux défécations des particules des vases cause par le métasilicate de disodium.

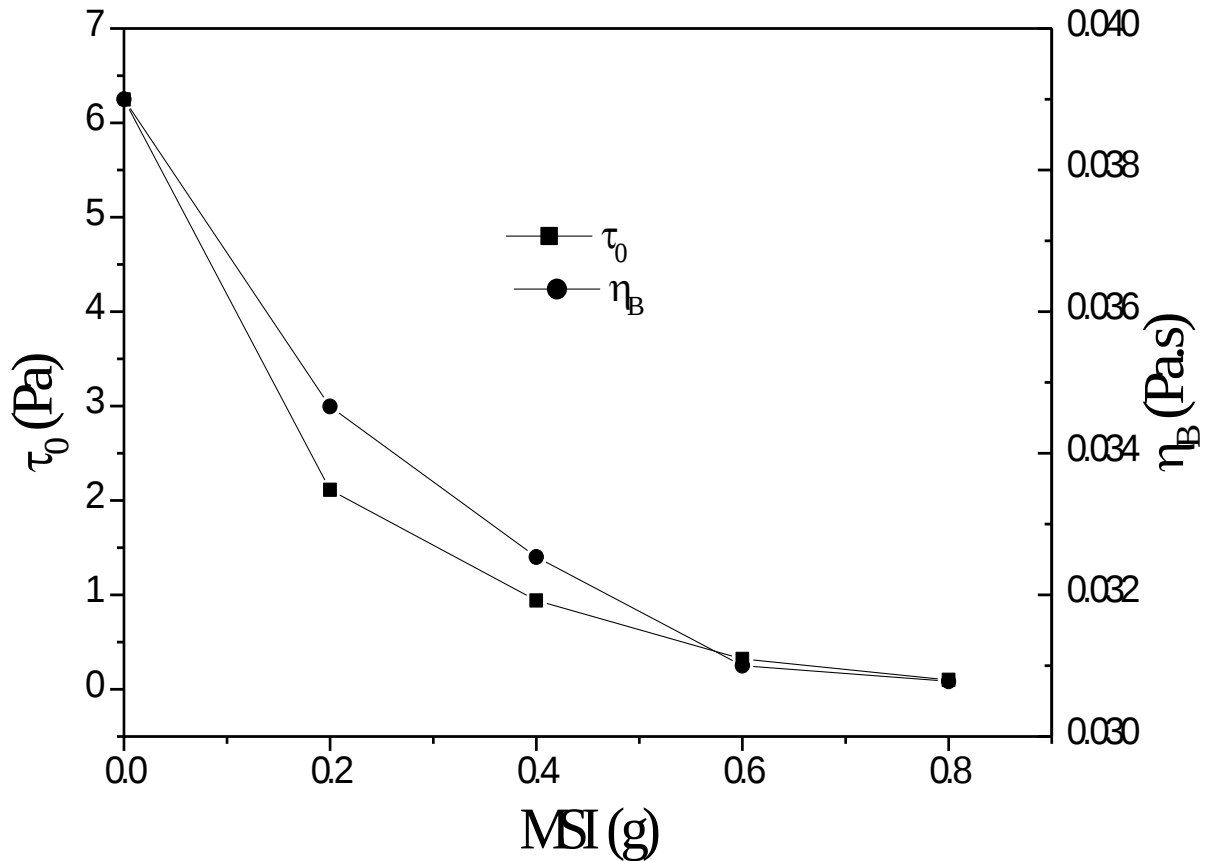


Figure 6.11 : Variation du seuil d'écoulement et de la viscosité plastique de la vase (40%) en fonction de la dose de méta silicate de disodium

6.2.3. Effet des polymères sur l'écoulement de la vase

6.2.3.1. Effet de Gomme xanthane sur l'écoulement de la vase

La figure 6.11 montre la variation de la contrainte de cisaillement des vases de barrage (40%) en fonction de la vitesse de cisaillement à différentes concentrations en gomme xanthane. Il a été constaté que le comportement rhéologique des vases de barrage est non-Newtonien après la contrainte seuil. Les données expérimentales ont été mieux adaptées au modèle de Cross modifié (Équation 6.1)

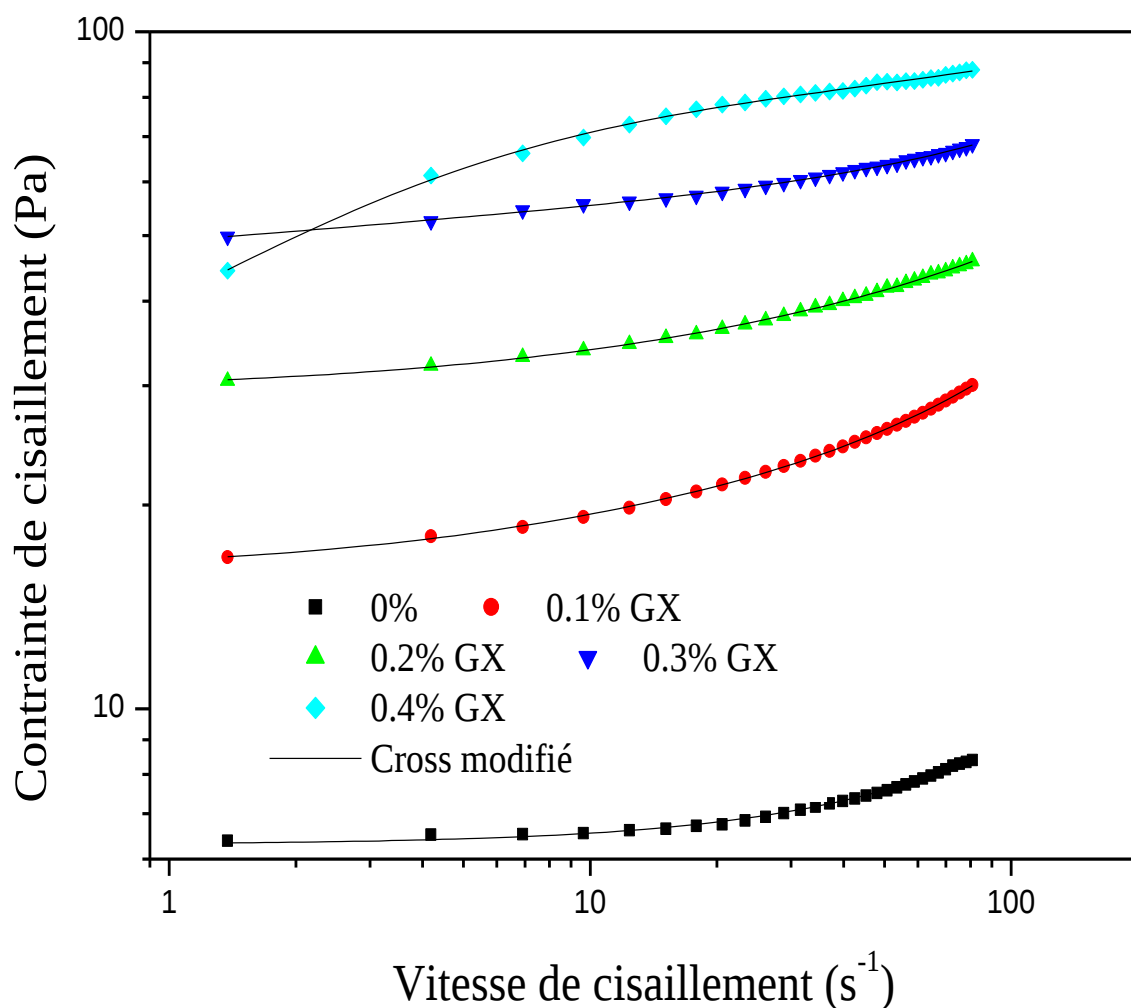


Figure 6.11 : Effet de gomme xanthane sur l'écoulement de la vase de barrage de Gargar (40% de vase).

La figure 6.12 présente l'évolution du seuil d'écoulement et des viscosités de 40% vase en fonction de la dose de gomme xanthane dans la vase. On observe sur la figure une augmentation du seuil d'écoulement et des viscosités avec l'augmentation de la dose de gom, xanthane dans la suspension de vase. D'après M'bodjet al [100], l'augmentation du seuil d'écoulement est des viscosités est due à la création d'un réseau tridimensionnel d'interactions bords à bord et face à face via une répulsion à double couche entre les particules de la vase et le polymère.

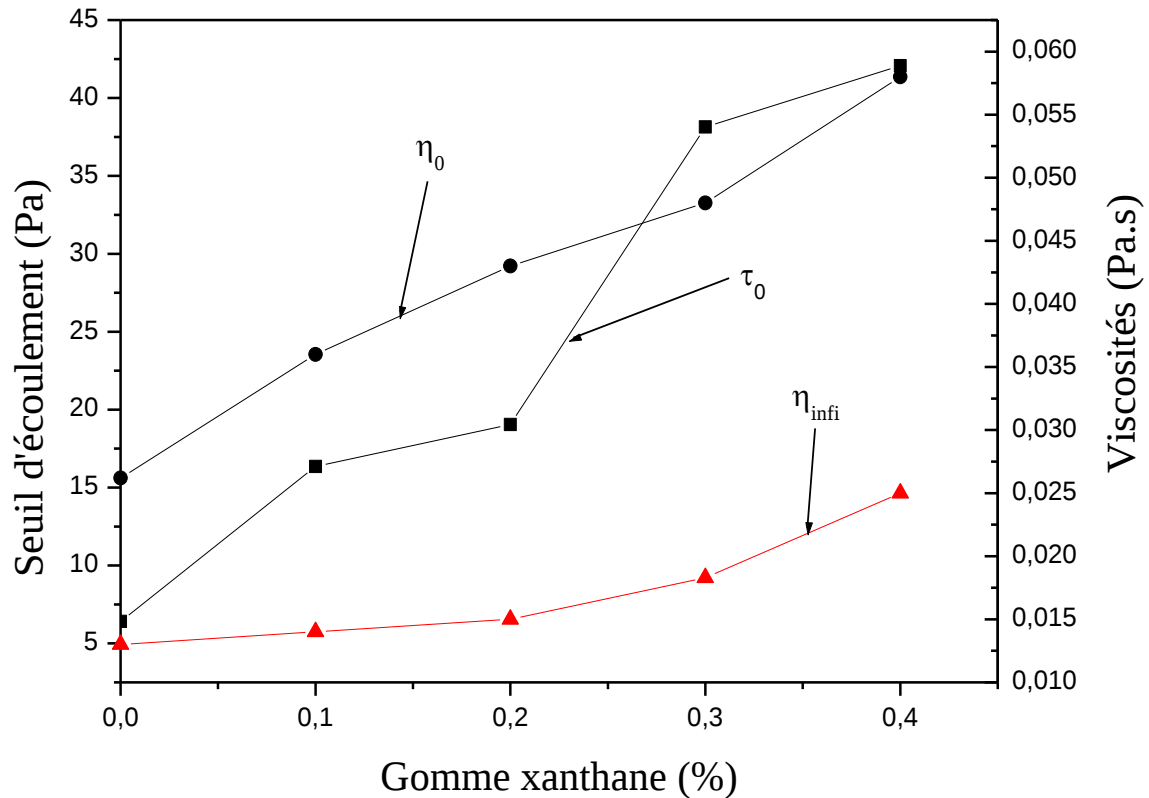


Figure 6.12: Variation du seuil d'écoulement et des viscosités de la vase en fonction de la dose de gomme xanthane dans la suspension de vase (40%).

6.2.3.2. Effet de gomme xanthane sur la thixotropie de la vase

Les boucles thixotropiques de la vase de barrage en fonction de Gomme xanthane sont représentées sur la figure 6.13. Il est clair que les courbes descendantes se trouvent sous les courbes ascendantes, ce qui indique une thixotropie positive.

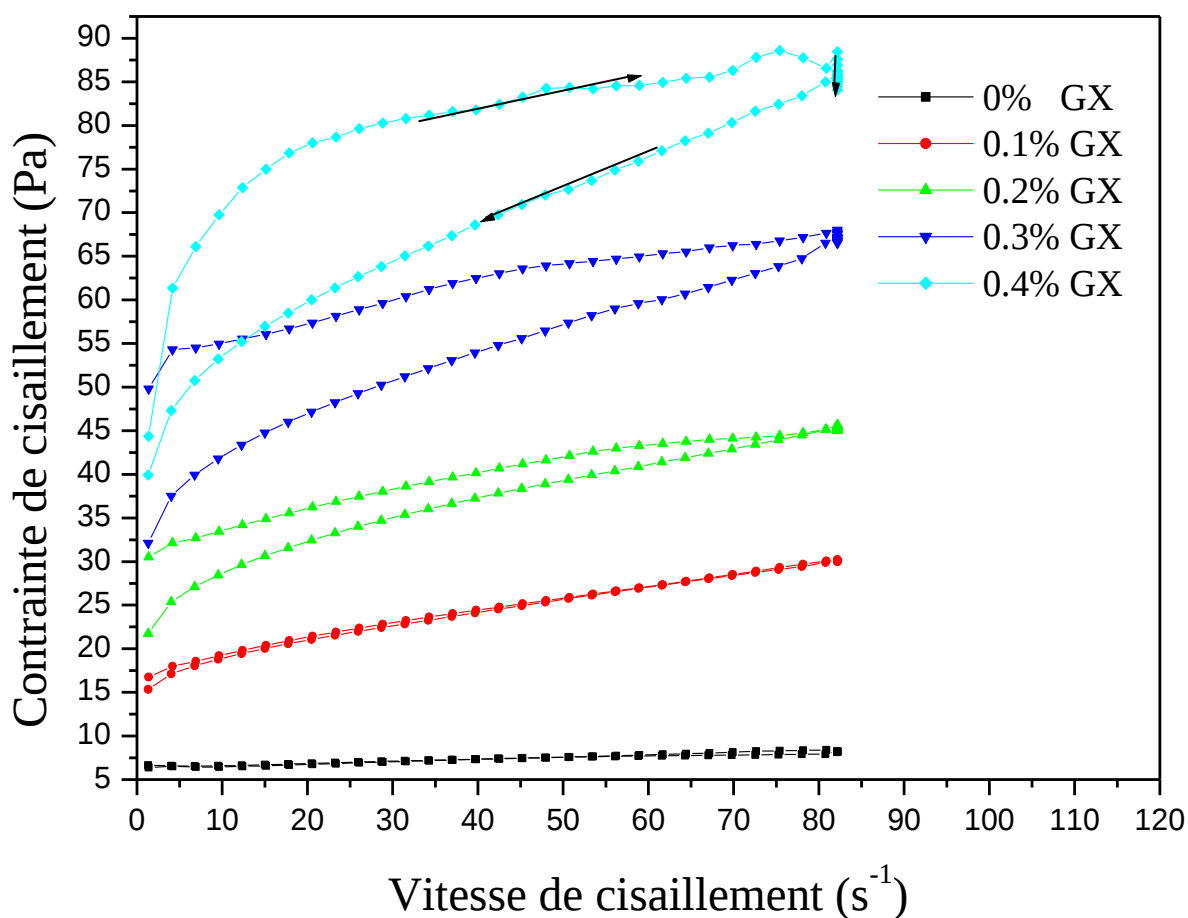


Figure 6.13 : Comportement thixotrope de la vase de barrage pour différentes concentrations en Gomme xanthane

La figure 6.14 présente la surface des boucles d'hystérésis de la vase de barrage en fonction de la concentration de gomme xanthane. L'augmentation des doses de gomme xanthane dans la vase permet de construire un solide réseau de gel et améliore la propriété de thixotropie de la suspension [101]. Ce comportement pourrait être expliqué par l'augmentation des forces de cohésion et d'interactions des particules de vase renforçant la structure tridimensionnelle par la formation de floccs ou d'agrégats de particules [102]. En grande quantité de gomme xanthane, le mouvement brownien est important et les forces d'attraction de van der Waals peuvent engendrer l'augmentation de l'attraction des gouttelettes d'eau, ce qui entraîne une augmentation des propriétés thixotropiques de la vase de barrage [103, 104].

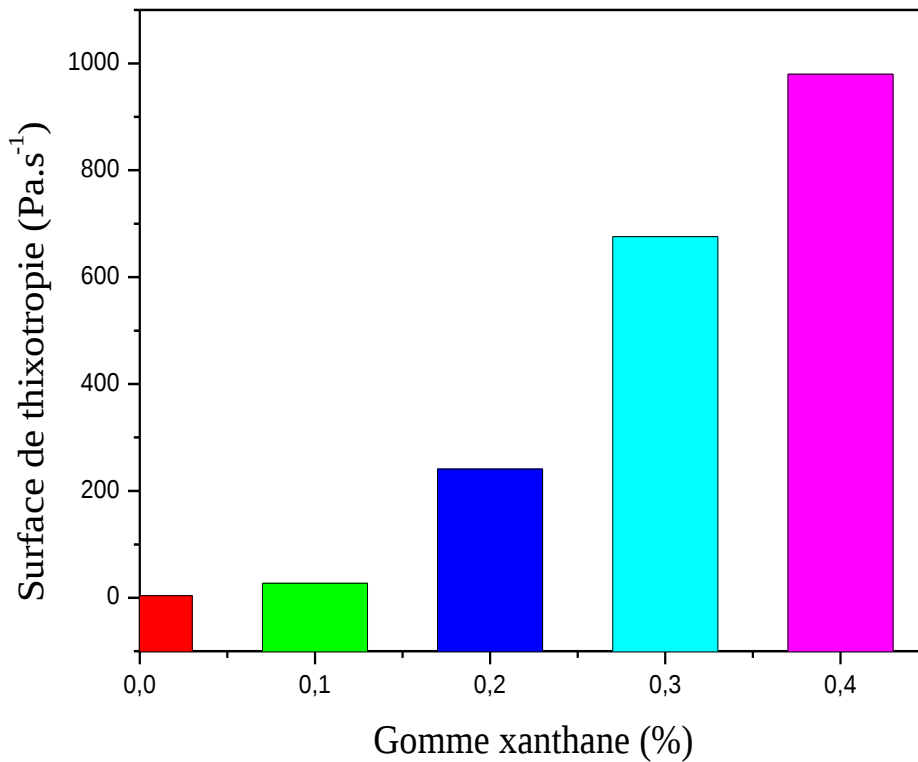


Figure 6.14 : Surface de thixotropie des mélanges vase (40%) - gomme xanthane

6.2.3.3.Effet de l'xanthane sur viscoélasticité de la vase

Afin de mieux comprendre la structure interne des mélanges vase- xanthane, des mesures rhéologiques un régime dynamique ont été effectuées. Les essais dynamiques sont réalisés pour une amplitude de contrainte de 0,01 à 50 Pa et une fréquence constante de 0.5 Hz. La figure 6.15 montre la variation des modules élastiques G' et visqueux G'' mesurés en fonction de la contrainte de cisaillement pour différentes concentrations en gomme xanthane. À partir de la figure 6.15, nous pouvons noter que les deux modules (G' et G'') dépendent de la rampe de contrainte imposée pour toutes les concentrations en gomme xanthane dans la vase. Pour des contraintes d'amplitudes inférieures à la contrainte critique (τ_c), le module élastique G' reste constant (domaine viscoélastique linéaire) et il est nettement supérieur à celui du visqueux G'' , ce qui indique une prépondérance du caractère élastique sur le caractère visqueux dans la vase de barrage. Pour des contraintes d'amplitudes supérieures à la contrainte critique (), le module visqueux G'' devient supérieur au module élastique G' , ce qui indique une prépondérance de la nature visqueuse dans la vase de barrage. Le passage d'une réponse élastique à une réponse visqueuse passant par un point d'intersection $G'=G''$,

appelé contrainte critique démontre que les vases étudiées sont transitoires plutôt que permanentes.

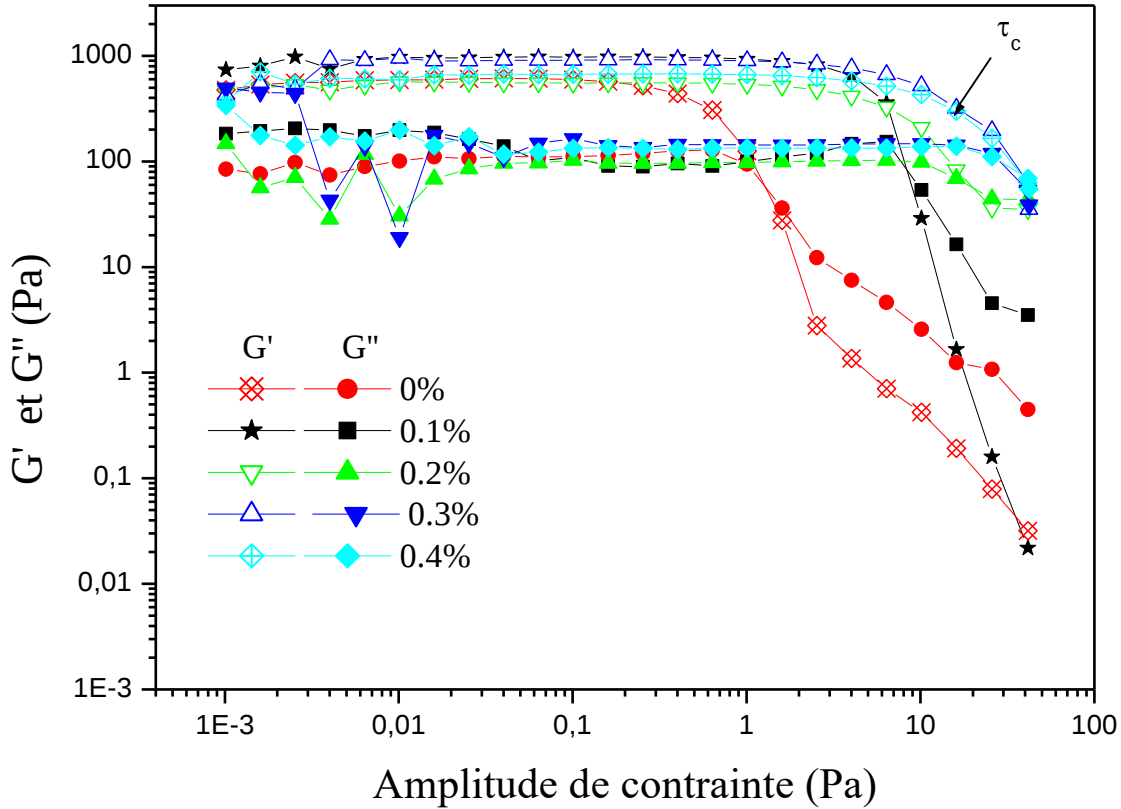


Figure 6.15: Variation des modules élastiques et visqueux en fonction de la contrainte des mélanges 40% vase- xanthane pour une fréquence de 0.5 Hz.

Le tableau 6.3 montre l'évolution de la déformation critique et de l'énergie de cohésion en fonction de la quantité de gomme xanthane ajoutée dans les vases. Il est clair que l'augmentation de la concentration en gomme xanthane engendre l'augmentation de l'interaction de floculation de gomme xanthane dans la vase et donc l'énergie de cohésion devient importante. L'augmentation de la contrainte de cisaillement critique avec la dose gomme xanthane est due à la réaction d'hydratation continue.

Tableau 6.3 : Evolution de l'énergie cohésion et de la déformation critique en fonction de la concentration massique en gomme xanthane dans la vase de barrage.

Gomme xanthane (%)	E_c (J/m ³)	γ_c (%)	τ_c (Pa)
0	27,04065	6,37	8,49
0,1	96,0894	15,18	12,66
0,2	218,11175	23,39	18,65
0,3	664,6185	35,1	37,87
0,4	1482,5976	69,41	42,72

6.2.3.4.Effet de Carbopol 940 sur l'écoulement de la vase

La figure 6.16 montre les courbes d'écoulement des mélanges vase- carbopol 940 (40% de vase).Le modèle qui décrit, le comportement rhéologique de ces mélanges, est le modèle de Bingham (équation 5.1). La figure 6.17 montre la variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique en remarque une diminution du seuil d'écoulement et la viscosité plastique avec l'augmentation de la dose de Carbopol 940 dans le vase. Cette diminution des paramètres rhéologique de la vase dû aux interactions des particules des vases cause par le Carbopol 940 .

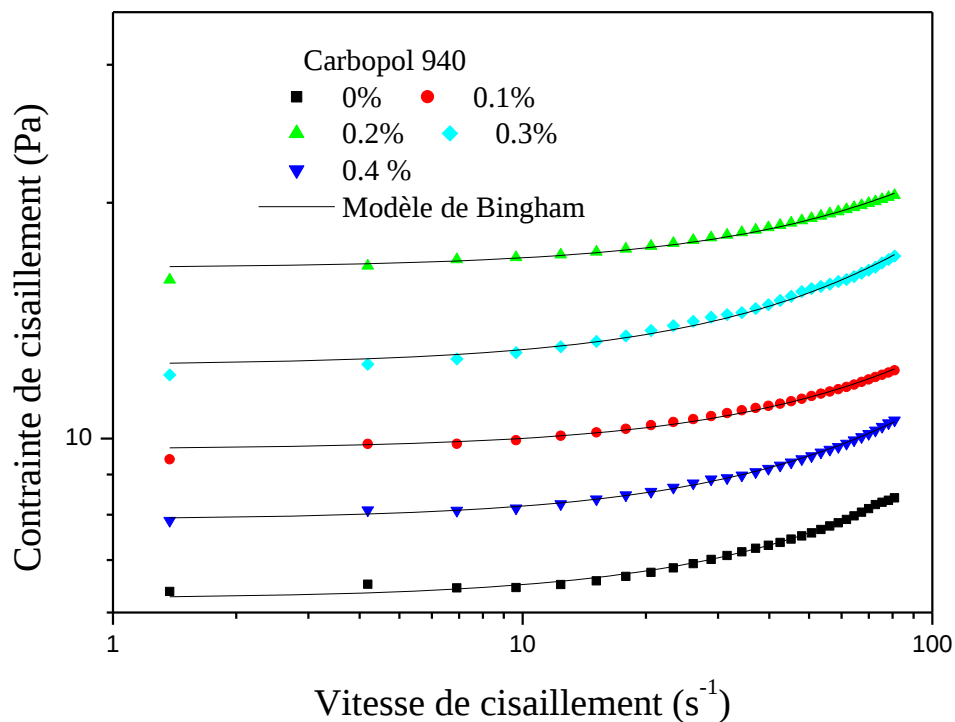


Figure 6 .16 : Effet de Carbopol 940 sur l'écoulement de la vase de barrage de Gargar(40% de vase).

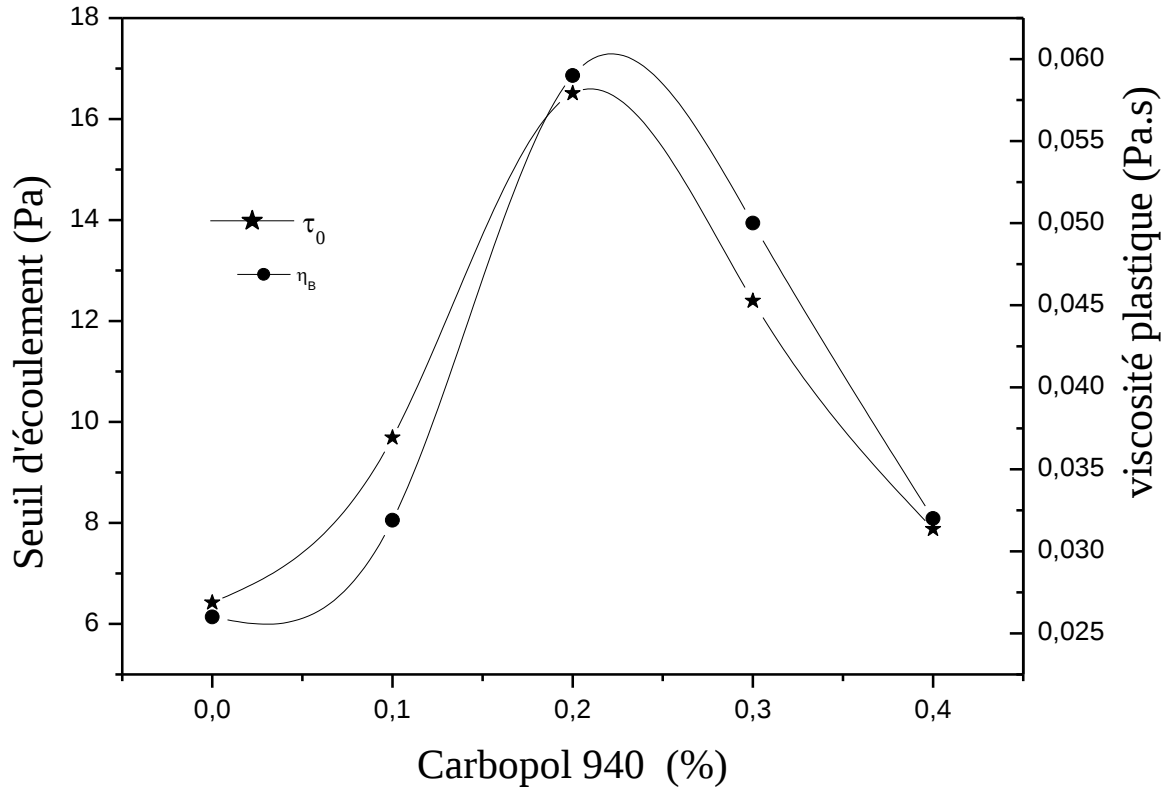


Figure 6.17 : Variation du seuil d'écoulement et la viscosité plastique de la vase en fonction de la dose de Carbopol 940 dans la suspension de vase (40%).

6.3. Impact des additifs sur les propriétés hydraulique des sédiments des barrages

6.3.1 Impact de Tripolyphosphate de sodium sur les propriétés hydrauliques des sédiments des barrages

6.3.1.1 Impact de Tripolyphosphate de sodium sur le nombre de Reynolds des sédiments des barrages

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux. Il définit la nature laminaire, transitoire ou turbulente d'un écoulement. Un écoulement laminaire est caractérisé par de faibles nombres de Reynolds, c'est-à-dire par des effets d'inertie faibles par rapport aux effets visqueux. Un écoulement turbulent est caractérisé par des effets visqueux négligeables par rapport aux effets d'inertie. Le nombre de Reynolds généralisé est défini par l'équation :

$$R_e = \frac{\rho U^{2-n} D^n}{K} \quad (6.3)$$

Avec

ρ : Masse volumique, U : Vitesse d'écoulement, D : Diamètre hydraulique, K : Indice de consistance et n : Indice d'écoulement

Remarque

Pour le modèle de Cross modifié $K = \eta_{\infty}$

Le nombre de Reynolds critique est donné par les quartions suivantes [105,106] :

$$\text{Si } 1 \leq H_e \leq 10^8 \quad R_{ec} = 2100 \left(1 + \frac{H_e}{3600}\right)^{0.35} \quad (6.4)$$

$$\text{Si } 10^8 \leq H_e \leq 10^{12} \quad R_{ec} = 161 H_e^{0.334} \quad (6.5)$$

Avec

le nombre de Hedström est donnée par la relation suivante : $H_e = \frac{\rho D^2 \tau_0}{\eta_{\infty}^2}$ (6.5a)

Données $D = \text{entrefer} = 0.003169 \text{ m}$, $\rho = 2770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ et $U = 0.126 \text{ m/s}$

Le tableau 6.4 montre la variation du de Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de Tripolyphosphate de sodium ajoutée au sédiments de barrage. Il est clairement observé que pour une dose de tripolyphosphate de sodium inférieure à une dose critique (0,4 %), le nombre de Reynolds augmente, tandis qu'au-dessus de la dose critique, le nombre de Reynolds diminue avec une augmentation de la dose de tripolyphosphate de sodium dans la vase. La diminution du nombre de Reynolds est probablement due aux forces d'interaction attractive plus fortes entre les particules causées par le tripolyphosphate de sodium [106].

Tableau 6.4 : Variation du de Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de Tripolyphosphate de sodium ajoutée au sédiments de barrage

40%			
STP (%)	H_e	R_e	R_{ec}
0	48.85	18.98	2109.93
0.2	108.54	54.81	2121.95
0.4	1198.95	480.89	2322.28
0.6	11.85	33.51	2102.41
0.8	12.83	29.10	2102.62
45%			
STP (%)	H_e	R_e	R_{ec}
0	123.38	18.31	2124.91
0.2	229.36	32.64	2145.89
0.4	294.35	42.54	2158.56
0.6	163.98	29.06	2132.99
0.8	129.99	24.67	2126.23

6.3.1.2 Impact du tripolyphosphate de sodium sur la réduction du coefficient de frottement des sédiments des barrages

Le coefficient de frottement pour l'écoulement laminaire des fluides plastiques dans les conduites est donné par l'équation de Buckingham–Reiner [106-108] :

$$f = \frac{64}{Re} \left[1 + \frac{He}{6Re} - \frac{64}{3} \frac{He^4}{f^3 Re^7} \right] \quad (6.6)$$

Pour l'écoulement turbulent des fluides plastiques

$$\frac{1}{f} = 4 \log(Re \sqrt{f}) - 0.4 \quad (6.7)$$

Comme le montre le tableau 6.4, à la fois les concentrations de sédiments et toutes les doses de tripolyphosphate de sodium ajoutées au sédiments de barrage le nombre de Reynolds est inférieure au nombre de Reynolds critique donc le régime d'écoulement est laminaire, et afin de calculer le coefficient de frottement dans ce cas, nous avons utilisé l'équation 6.6 cette équation est non linéaire et la résolution de cette équation est déterminée par la méthode de Newton-Raphson.

La figure 6.18 montre la variation du coefficient de frottement des sédiments des barrages en fonction des doses de tripolyphosphate de sodium ajoutée. On remarque pour toutes les doses de tripolyphosphate de sodium ajoutées aux sédiments, on observe que pour la dose de tripolyphosphate de sodium inférieure à une dose critique (0.4%), il y a eu une diminution du coefficient de frottement, suivie d'une augmentation du coefficient de frottement à partir de la dose critique de tripolyphosphate de sodium . Dans le cas contraire, pour des doses de tripolyphosphate de sodium supérieure à une dose critique, les sédiments avec de l'eau et diminuer l'eau libre, cela se traduit par la formation d'un réseau dense entre les particules de sédiments ont provoqué l'augmentation de coefficient de frottement [109].

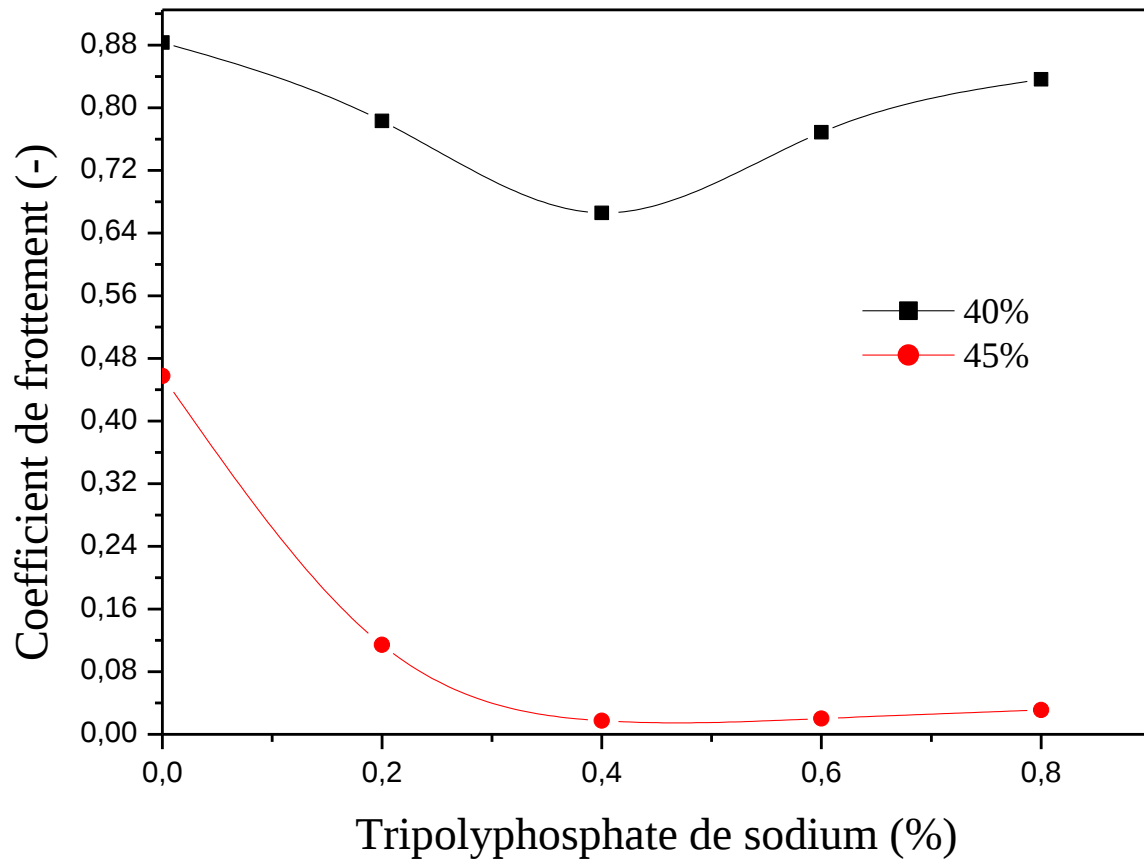


Figure 6.18 : Variation du coefficient de frottement des sédiments des barrages en fonction des doses tripolyphosphate de sodium ajoutée

La réduction de frottement c'est la différence relative entre le frottement de la vase et le frottement du mixture (vase avec additifs) comme suit [110] :

$$RF = \frac{F_{vase} - F_{mixture}}{F_{vase}} 100 \quad (6.8)$$

La figure 6.19 montre l'impact du tripolyphosphate de sodium sur la réduction du facteur de friction des sédiments du barrage. Il est clairement visible que la dose de tripolyphosphate de sodium égale à 0,4 % ajoutée aux sédiments du barrage a causé une réduction de la friction allant jusqu'à 96 % pour une concentration de sédiment de 40 % en poids et jusqu'à 25 % pour une concentration de sédiment de 45 % en poids. Ainsi, l'ajout de tripolyphosphate de sodium pendant l'opération de dragage des barrages facilite le transport des sédiments du barrage.

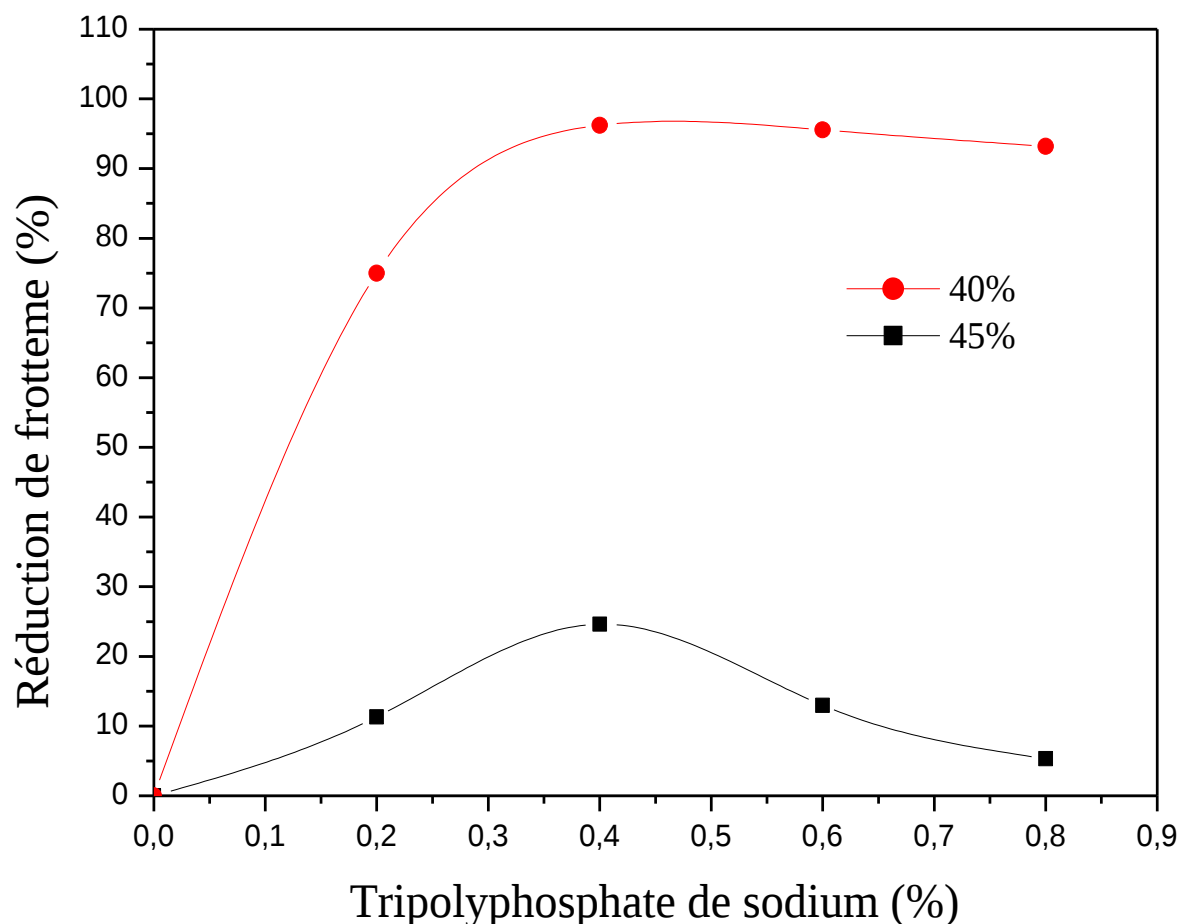


Figure 6.19 : Effet de tripolyphosphate de sodium sur la réduction de frottement

6.3.2 Impact de gomme xanthine sur les propriétés hydraulique des sédiments des barrages

6.3.2.1 Impact de gomme xanthane sur le nombre de Reynolds des sédiments des barrages

Le tableau 6.5 montre la variation de nombre du Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de gomme xanthane ajoutée aux sédiments de barrage. Il est clairement observé une diminution nombre de Reynolds avec l'augmentation de la dose de gomme xanthane dans les sédiments. La diminution du nombre de Reynolds est probablement due aux forces d'interaction attractive plus fortes entre les particules causées par le polymère gomme xanthane [106].

Tableau 6.5 : Variation du de Reynolds et le nombre de Hedström en fonction de la dose de gomme xanthane ajoutée au sédiments de barrage.

40%			
GX (%)	H_e	R_e	R_{ec}
0	1055,10474	85,08034	2297,67569
0.1	2321,80065	79,00317	2499,60994
0.2	2355,24836	73,73629	2504,54233
0.3	3167,96214	60,43958	2619,23033
0.4	1872,47808	44,24178	2431,51991

6.3.2.2. Impact de gomme xanthane sur le coefficient de frottement des sédiments des barrages

D'après le tableau 6.5 on remarque que le nombre Reynolds est inférieur au nombre Reynolds critique donc le régime d'écoulement est laminaire donc pour calculer le coefficient de frottement en utilisant l'équation (6.2), cette équation est non linéaire sera résoudre par la méthode de Newton-Raphson. La figure 6.20 montre l'impact sur le coefficient de frottement des sédiments des barrages (40%). On remarque une diminution du coefficient de frottement des sédiments des barrages avec l'augmentation de la dose de gomme xanthane. D'après [111] les particules de la vase chargées négativement attirent le polymère (gomme xanthane) chargé positivement grâce à des forces électrostatiques, formant un réseau de ponts inter-particulaires engendre une diminution remarquable du coefficient de frottement. On observe que pour une dose de gomme xanthane égale à 0,4 % ajoutée aux sédiments du barrage a causé une réduction de la friction allant jusqu'à 80% pour une concentration de sédiment de 40 % .

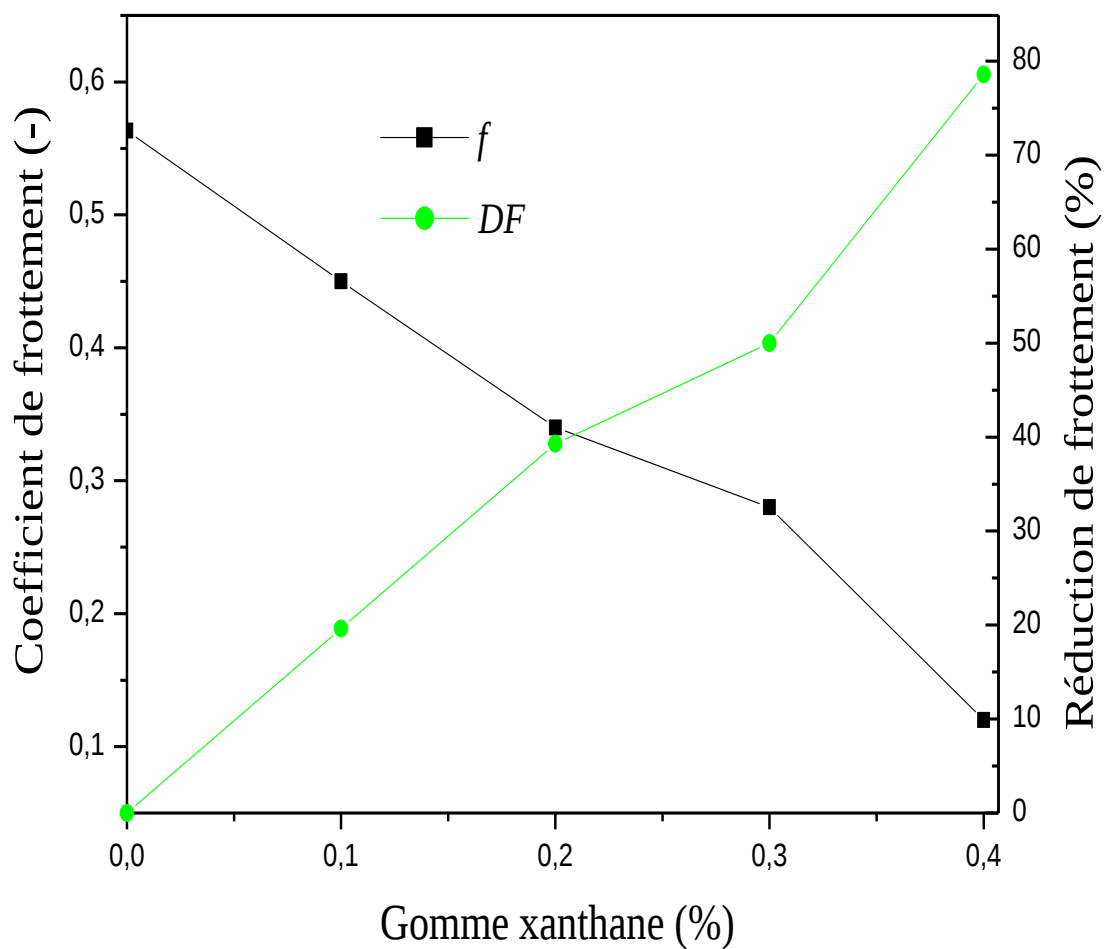


Figure 6.20 : Effet de gomme xanthane sur le coefficient de frottement de 40% des sédiments des barrages.

Conclusion générale

L'envasement des barrages constitue un problème majeur en Algérie, où plus de 13 % des retenues sont déjà affectées. Actuellement, les sédiments de certains barrages sont évacués en aval des digues à l'aide de techniques de dévasement hydraulique. Cette accumulation excessive de vase entraîne une réduction significative de la capacité de stockage, la dégradation des écosystèmes aquatiques et des risques accrus pour les populations locales.

L'objectif de ce travail était d'étudier l'impact des polymères et des défloculants sur comportement rhéologique et hydraulique des vases issues du dévasement hydraulique, en vue de réduire les pertes de charge lors de leur transport dans des conduites horizontales.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les propriétés physiques et chimiques des sédiments prélevés au niveau du barrage de Gargar : limites de liquidité et de plasticité, analyse granulométrique ainsi qu'une analyse chimique des boues. Les résultats indiquent une plasticité moyenne et une composition riche en silice avec un taux modéré de chaux.

Dans un second temps, l'étude s'est portée sur les propriétés rhéologiques des vases du barrage de Gargar et celles d'un polymère de type Carbopol 940. Le modèle de modèle de Herschel-Bulkley a été utilisé pour représenter la relation entre la contrainte de cisaillement et la vitesse de déformation. Pour le Carbopol 940, la contrainte de cisaillement a été ajustée en fonction de la concentration, tandis que le modèle de Bingham a été retenu pour décrire le comportement de la vase. Il en ressort que le seuil d'écoulement et la viscosité plastique augmentent avec la concentration en sédiments.

L'analyse rhéologique du Carbopol 940 montre une extension du domaine viscoélastique avec l'augmentation de la concentration massique. Par ailleurs, l'effet de l'ajout de métasilicate de disodium a également été mis en évidence. Le comportement d'écoulement des vases à différentes concentrations de tripolyphosphate de sodium (STTP) et de GX a été modélisé selon le modèle de Cross modifié.

Enfin, cette étude a démontré que l'ajout de tripolyphosphate de sodium, à des concentrations comprises entre 0,2 % et 0,8 % en masse, dans des mélanges contenant 40 % à 45 % de vase, permet d'améliorer le comportement thixotropique des sédiments. L'ajout de 0,4 % de tripolyphosphate de sodium a notamment permis de réduire le facteur de frottement de 96 % et 25 %, respectivement, pour des concentrations de sédiments de 40 % et 45 % en masse.

Conclusion générale

L'étude montre aussi que L'ajout de 0,4 % de gomme xanthane permis de réduire le facteur de frottement de 80%, pour une concentration de sédiment de 40 %.

L'ensemble des résultats de ce travail concerne impact des polymères et des polymères et des défloculants sur les propriétés rhéologique et hydraulique des vases de barrage . Ils pourraient être complétés par des essais hydraulique dans les canalisations pour différents barrages afin d'approfondir la relation du comportement rhéologique avec le comportement hydraulique.

Références bibliographies

- [1] Gourfi, A., Daoudi, L., Shi, Z. (2018). The assessment of soil erosion risk, sediment yield and their controlling factors on a large scale: Example of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 147, 281-299.
- [2] Benabdelkader, A., Taleb, A., Probst, J. L., Belaidi, N., Probst, A. (2019). Origin, distribution, and behaviour of rare earth elements in river bed sediments from a carbonate semi-arid basin (Tafna River, Algeria). *Applied Geochemistry*, 106, 96-111.
- [3] Hadour, A., Mahé, G., & Meddi, M. (2021). Climatic and anthropogenic impacts on the decrease of sediment discharge to the Mediterranean coast from the largest river of Maghreb. *International Journal of Sediment Research*, 36(2), 268-278.
- [4] Hammadi, L., Ponton, A. (2017). Rheological investigation of vase of dam: Effects of aging time, shear rate, and temperature. *Applied Rheology*, 27(1), 21-29.
- [5] Zhao, T. L., Chen, S. S., Fu, C. J., & Zhong, Q. M. (2019). Centrifugal model tests and numerical simulations for barrier dam break due to overtopping. *Journal of Mountain Science*, 16(3), 630-640..
- [6] Riza, M., Ehsan, M. N., Pervez, M. N., Khyum, M. M. O., Cai, Y., & Naddeo, V. (2023). Control of eutrophication in aquatic ecosystems by sustainable dredging: Effectiveness, environmental impacts, and implications. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 7, 100297.
- [7] Manap, N., & Voulvoulis, N. (2015). Environmental management for dredging sediments—The requirement of developing nations. *Journal of environmental management*, 147, 338-348.
- [8] Caballero, I., Stumpf, R. P., & Meredith, A. (2019). Preliminary assessment of turbidity and chlorophyll impact on bathymetry derived from Sentinel-2A and Sentinel-3A satellites in South Florida. *Remote Sensing*, 11(6), 645.
- [9] de Trinchieria, J., & Otterpohl, R. (2018). Towards a universal optimization of the performance of sand storage dams in arid and semi-arid areas by systematically minimizing vulnerability to siltation: A case study in Makueni, Kenya. *International journal of sediment research*, 33(3), 221-233.
- [10] Zhang, X., Duan, X., & Muzychka, Y. (2019). Degradation of flow drag reduction with polymer additives—A new molecular view. *Journal of Molecular Liquids*, 292, 111360.
- [11] Kulmatova, D., Hadri, F., Guillou, S., & Bonn, D. (2018). Turbulent viscosity profile of drag reducing rod-like polymers. *The European Physical Journal E*, 41(12), 146.

- [12] Abdelli M., Zeggane M (2007). Le phénomène de l'envasement des barrages, de par la situation géographique du pays (zone semi-aride), constitue un enjeu d'envergure nationale. Le Journal de l'Expression. 5 décembre 2007.
- [13] Ammari, A. (2012). Vulnérabilité à l'Envasement des Barrages (cas du bassin Hydrographique des Côtiers Algérois) (Doctoral dissertation).
- [14] Tebbi, F. Z., Dridi, H., & Morris, G. L. (2012). Optimization of cumulative trapped sediment curve for an arid zone reservoir: Foum El Kherza (Biskra, Algeria). *Hydrological Sciences Journal*, 57(7), 1368-1377.
- [15] Cheggour, A. (2008). Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des SIG: Application au bassin versant de la Rhéraya, Haut Atlas, Maroc. Haut Atlas, Maroc, Cady Ayyad, Marrakesh.
- [16] Roose, E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES) (Vol. 70). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- [17] Xiao, H., Liu, D., Gao, F., Xiang, R., Zhang, W., Liu, Z., ... & Xia, Z. (2024). Evaluating the influence of *Cynodon dactylon* on the wave force and wave erosion in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Area. *Ecological Engineering*, 202, 107233.
- [18] Ben Slimane, A. (2013). Rôle de l'érosion ravinatoire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bonthèse effectuée en co-tutelle avec l'INAT.
- [19] García-Ruiz, J. M., Lasanta, T., Ruiz-Flano, P., Ortigosa, L., White, S., González, C., & Martí, C. (1996). Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, 11(5), 267-277.
- [20] Probst, J. L., Bazerbachi, A. (1986). Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. Solute and particulate transports by the upstream part of the Garonne river. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 39(1), 79-98.
- [21] Claude, J., & Chartier, R. (1977). Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol*, 14(1), 3-35.
- [22] Remini, W., Remini, B. (2003). La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord. *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (2).
- [23] Remini, B., & Bensafia, D. (2016). Envasement des barrages dans les régions arides exemples algériens. *Larhyss journal*, 13(3), 63-90.
- [24] Ouadja, A. (2012). Perte de capacité dans les barrages Algériens cas d'études (Barrages de: Gargar-Bouhanifia-Ouizert-Foum El Gherza). *Mémoire du magister* université de mascara

- [25] Benfetta, H., Ouadja, A., Achour, B., & Remini, B. (2016). Perte de capacité dans les barrages situés dans les zones arides et semi arides. Cas des barrages de Gargar, Bouhanifia, Ouizert et Fom El Gherza. *Larhyss Journal*, 13(1), 183-201.
- [26] Fournier, F., & Henin, S. (1962). Étude de la forme de la relation existant entre l'écoulement mensuel et le débit solide mensuel. *Pub. AIHS*, (59), 353-358.
- [27] Abegaz, A., Tamene, L., Abera, W., Yaekob, T., Hailu, H., Nyawira, S. S., ... & Sommer, R. (2020). Soil organic carbon dynamics along chrono-sequence land-use systems in the highlands of Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, 106997.
- [28] Liu, X., Zhang, Y., Li, P., & Xiao, L. (2024). Siltation of check dams alters microbial communities and thus limits organic carbon mineralization. *Soil and Tillage Research*, 236, 105949.
- [29] Abbasi, N. A., Xu, X., Lucas-Borja, M. E., Dang, W., & Liu, B. (2019). The use of check dams in watershed management projects: Examples from around the world. *Science of the total environment*, 676, 683-691.
- [30] Mekerta, B. (1995). Étude des propriétés géomécaniques des sédiments d'envasement de la retenue du barrage de Génissiat. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [31] Remini, B. (2010). La problématique de l'eau en Algérie du nord. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, (8).
- [32] Remini, B. (2014). Evolution de la sédimentation dans les retenues de barrage et le soutirage des particules fines. *Courrier du Savoir scientifique et technique*, 2(2), 29-34.
- [33] Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1926). Konsistenzmessungen von gummi benzollösungen. *Kolloid-Zeitschrift*, 39(4), 291-300.
- [34] Bingham, E. C. (2002). Plasticity. *The Journal of Physical Chemistry*, 29(10), 1201-1204.
- [35] Benchabane, A. (2006). Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères: Effets de l'ajout de polymères (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008)).
- [36] Mewis, J. (1979). Thixotropy-a general review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 6(1), 1-20.
- [37] Cheng, D. C. (1987). Thixotropy. *International journal of cosmetic science*, 9(4), 151-191.
- [38] Mujumdar, A., Beris, A. N., & Metzner, A. B. (2002). Transient phenomena in thixotropic systems. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 102(2), 157-178.

- [39] Payet, L., Ponton, A., Agnely, F., Colinart, P., & Grossiord, J. L. (2002). Caractérisation rhéologique de la gélification d'alginate et de chitosane: effet de la température. *Rhéologie*, 2, 46-51..
- [40] Phan, T. H. (2006). Comportement thixotropique des pâtes de bétons auto-plaçants. XXIV èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil.
- [41] Barnes, H. A. (1995). A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 56(3), 221-251.
- [42] Bonifas, J. L. (1998). Contribution a l'etude de la viscosite des suspensions de bentonites (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008)).
- [43] Leyama, M. (2001). Etude de l'écoulement des suspensions de bentonite (Doctoral dissertation, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008)).
- [44] Quemada, D. (1977). Rheology of concentrated disperse systems and minimum energy dissipation principle: I. Viscosity-concentration relationship. *Rheologica Acta*, 16(1), 82-94..
- [45] Quemada D. (1978). Rheology of concentrated disperse systems II. A model for non-newtonian shear viscosity in steady flows. *Rheologica. Acta* 17, 632-642.
- [46] Quemada D. (1978). Rheology of concentrated disperse systems, III. General features of the proposed non newtonian model. Comparison with experimental data *Rheologica. Acta* 17, 643-653.
- [47] Van Olphen, H. (1964). An introduction to clay colloid chemistry. *Soil Science*, 97(4), 290.
- [48] Mooney, M. (1931). Explicit formulas for slip and fluidity. *Journal of rheology*, 2(2), 210-222.
- [49] Baravian, C., Quemada, D. (1998). Correction of instrumental inertia effects in controlled stress rheometry. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 2(2), 189-195.
- [50] Krieger, I. M. (1990). Bingham Award Lecture—1989: The role of instrument inertia in controlled-stress rheometers. *Journal of Rheology*, 34(4), 471-483.
- [51] Migniot.C (1989) Tassement et rheologie des vases-Premiere partie. *La Houille Blanche*, 1, 11-29
- [52] Migniot, C. (1968). Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *La houille blanche*, (7), 591-620.
- [53] Dodge, D. W., Metzner, A. B. (1959). Turbulent flow of non-Newtonian systems. *AIChE journal*, 5(2), 189-204.

- [54] Mohr, W. D., Clapp, J. B., Starr, F. C. (1961). Flow patterns in a non-Newtonian fluid in a single-screw extruder. *Polymer Engineering & Science*, 1(3), 113-120.
- [55] Sharp, K. V., & Adrian, R. J. (2004). Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes. *Experiments in fluids*, 36(5), 741-747.
- [56] Yoo, S. S. (1974). Heat transfer and friction factors for non-newtonian fluids in turbulent pipe flow. University of Illinois at Chicago.
- [57] Kozicki, W., Chou, C. H., & Tiu, C. (1966). Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape. *Chemical Engineering Science*, 21(8), 665-679.
- [58] Kozicki, W., & Tiu, C. (1971). Improved parametric characterization of flow geometries. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 49(5), 562-569.
- [59] Wheeler, J. A., & Wissler, E. H. (1965). The friction factor–Reynolds number relation for the steady flow of pseudoplastic fluids through rectangular ducts. Part I. Theory. *AIChE Journal*, 11(2), 207-212.
- [60] Kostic, M., & Hartnett, J. P. (1984). Predicting turbulent friction factors of non-Newtonian fluids in noncircular ducts. *International communications in heat and mass transfer*, 11(4), 345-352.
- [61] Hartnett, J. P., Kwack, E. Y., & Rao, B. K. (1986). Hydrodynamic behavior of non-Newtonian fluids in a square duct. *Journal of Rheology*, 30(4), S45-S59.
- [62] Kozicki, W., & Tiu, C. (1988). A unified model for non-Newtonian flow in packed beds and porous media. *Rheologica Acta*, 27(1), 31-38.
- [63] Crochet, M. J., Davies, A. R., & Walters, K. (2012). Numerical simulation of non-Newtonian flow (Vol. 1). Elsevier.
- [64] Kim-e, M. E., Brown, R. A., & Armstrong, R. C. (1983). The roles of inertia and shear-thinning in flow of an inelastic liquid through an axisymmetric sudden contraction. *Journal of non-Newtonian fluid mechanics*, 13(3), 341-363.
- [65] Yoo, J. Y., & Na, Y. (1991). A numerical study of the planar contraction flow of a viscoelastic fluid using the SIMPLER algorithm. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 39(1), 89-106.
- [66] Marchal, J. M., & Crochet, M. Y. (1987). A new mixed finite element for calculating viscoelastic flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 26(1), 77-114.
- [67] Choi, K. H., Kim, J. W., & Lee, W. K. (1986). Bubble properties and mixing characteristics in an airlift bubble column with redistributor. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 3(2), 127-134.

- [68] Song, J. H., & Yoo, J. Y. (1987). Numerical simulation of viscoelastic flow through a sudden contraction using a type dependent difference method. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 24(2), 221-243.
- [69] Moan, M., Chauveteau, G., & Ghoniem, S. (1979). Entrance effect in capillary flow of dilute and semi-dilute polymer solutions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 5, 463-474.
- [70] Chauveteau, G. (1982). Rodlike polymer solution flow through fine pores: influence of pore size on rheological behavior. *Journal of Rheology*, 26(2), 111-142.
- [71] Ouibrahim, A., & Fruman, D. H. (1980). Characteristics of HPAM dilute polymer solutions in three elongational flow situations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 7(4), 315-331.
- [72] Cartalos, U., & Piau, J. M. (1992). Pressure drop scaling laws and structural stress contributions for complex flows of flexible polymer solutions in thick solvents. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 44, 55-83.
- [73] De Gennes, P. G. (1974). Coil-stretch transition of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients. *The Journal of Chemical Physics*, 60(12), 5030-5042.
- [74] Walters, K., & Webster, M. F. (1982). On dominating elastico-viscous response in some complex flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 308(1502), 199-218.
- [75] Evans, R. E., & Walters, K. (1986). Flow characteristics associated with abrupt changes in geometry in the case of highly elastic liquids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 20, 11-29.
- [76] Chiba, K., Tanaka, S., & Nakamura, K. (1992). The structure of anomalous entry flow patterns through a planar contraction. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 42(3), 315-322.
- [77] Evans, R. E., & Walters, K. (1989). Further remarks on the lip-vortex mechanism of vortex enhancement in planar-contraction flows. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 32(1), 95-105.
- [78] Bird, R. B., Dotson, P. J., & Johnson, N. L. (1980). Polymer solution rheology based on a finitely extensible bead—spring chain model. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 7(2-3), 213-235.

- [79] Purnode, B., & Crochet, M. J. (1996). Flows of polymer solutions through contractions Part 1: flows of polyacrylamide solutions through planar contractions. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 65(2-3), 269-289.
- [80] Hoa, N. T., Gaudu, R., Fanjeau, Y., & Anne-Archard, D. (1982, September). Comparison of the conditions for the appearance of shear-thickening of a dilute solution of flexible polymer in bi-and tridimensional models of an abrupt contraction. Int. In *Proc. ACS Symposium Kansas City, USA, Septembre*.
- [81] Ouerdane, F. Z., Mahfoud, M., & Benhadid, S. (2007, August). Structure d'écoulement et pertes de charge d'un fluide viscoélastique. In *CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- [82] Wunderlich, A. M., Brunn, P. O., & Durst, F. (1988). Flow of dilute polyacrylamide solutions through a sudden planar contraction. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 28(3), 267-285.
- [83] Fuller, G. G., & Leal, L. G. (1981). The effects of conformation-dependent friction and internal viscosity on the dynamics of the nonlinear dumbbell model for a dilute polymer solution. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 8(3-4), 271-310.
- [84] Maders, H., Vergnes, B., Demay, Y., & Agassant, J. F. (1992). Steady flow of a White-Metzner fluid in a 2-D abrupt contraction: computation and experiments. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 45(1), 63-80.
- [85] Quinzani, L. M., Armstrong, R. C., & Brown, R. A. (1994). Birefringence and laser-Doppler velocimetry (LDV) studies of viscoelastic flow through a planar contraction. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 52(1), 1-36.
- [86] Schatzmann, M., Fischer, P., & Bezzola, G. R. (2003). Rheological behavior of fine and large particle suspensions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 796-803.
- [87] Ward, H. T., & Kammermeyer, K. (1940). Sedimentation in the laboratory design data from laboratory experimentation. *Industrial & Engineering Chemistry*, 32(5), 622-626.
- [88] Caquot, A. I., & Kerisel, J. (1956). *Traité de mécanique des sols. (No Title)*.
- [89] Verdeyen, J., Roisin, V., & Nuyens, J. (1968). *La mécanique des sols.), Presses universitaires de Bruxelles, Dunod, (1968)*.
- [90] F. Sclosser, «Éléments de mécanique des sols, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, ». Paris, (2003)

- [91] Laribi, S., Fleureau, J. M., Grossiord, J. L., & Kbir-Arighib, N. (2005). Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays. *Rheologica acta*, 44(3), 262-269.
- [92] Hammadi, L., Ponton, A. (2017). Rheological investigation of vase of dam: Effects of aging time, shear rate, and temperature. *Applied Rheology*, 27(1), 21-29.
- [93] Coussot, P., & Ancey, C. (1999). Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes. *Physical Review E*, 59(4), 4445.
- [94] Ovarlez, G., Rodts, S., Chateau, X., & Coussot, P. (2009). Phenomenology and physical origin of shear localization and shear banding in complex fluids. *Rheologica acta*, 48(8), 831-844.
- [95] Bonn, D., & Denn, M. M. (2009). Yield stress fluids slowly yield to analysis. *Science*, 324(5933), 1401-1402.
- [96] Benchabane, A., & Bekkour, K. (2008). Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid and Polymer Science*, 286(10), 1173-1180.
- [97] Piani, L., Papo, A. (2013). Sodium tripolyphosphate and polyphosphate as dispersing agents for alumina suspensions: Rheological characterization. *Journal of Engineering*, 2013(1), 930832.
- [98] Evcin, A. (2011). Investigation of the effects of different deflocculants on the viscosity of slips. *Scientific research and essays*, 6(11), 2302-2305.
- [99] Chougnet, A., Palermo, T., Audibert, A., Moan, M. (2008). Rheological behaviour of cement and silica suspensions: Particle aggregation modelling. *Cement and concrete research*, 38(11), 1297-1301
- [100] M'bodj, O., Arighib, N. K., Ayadi, M. T., & Magnin, A. (2004). Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay–water–electrolyte–xanthan. *Journal of Colloid and Interface Science*, 273(2), 675-684.
- [101] Msadok I, Hamdi N, Rodríguez MA, Ferrari B, Srasra E (2020) Synthesis and characterization of Tunisian organoclay: Application as viscosifier in oil drilling fluid. *Chemical Engineering Research and Design* 153:427-434
- [102] Hammadi, L., Boudjenane, N., Belhadri, M. (2014). Effect of polyethylene oxide (PEO) and shear rate on rheological properties of bentonite clay. *Applied Clay Science*, 99, 306-311.
- [103] Le Pluart L, Duchet J, Sautereau H, Halley P, Gerard JF (2004) Rheological properties of organoclay suspensions in epoxy network precursors. *Applied clay science* 25(3-4):207-219

- [104] Huang X, Jiang G, He Y, An Y, Zhang S (2016) Improvement of rheological properties of invert drilling fluids by enhancing interactions of water droplets using hydrogen bonding linker. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 506:467-475
- [105] Chen, M., Liu, B., Li, L., Cao, L., Huang, Y., Wang, S., ... & Cheng, X. (2020). Rheological parameters, thixotropy and creep of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites modified by bentonite. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107821.
- [106] Danish, M., Kumar, S., & Kumar, S. (2011). Approximate explicit analytical expressions of friction factor for flow of Bingham fluids in smooth pipes using Adomian decomposition method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16(1), 239-251.
- [107] Swamee, P. K., & Aggarwal, N. (2011). Explicit equations for laminar flow of Bingham plastic fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 76(3-4), 178-184.
- [108] Vatankhah, A. R. (2011). Analytical solutions for Bingham plastic fluids in laminar regime. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 78(3-4), 596-600.
- [109] Nash, S., & Rees, D. A. S. (2017). The effect of microstructure on models for the flow of a Bingham fluid in porous media: one-dimensional flows. *Transport in Porous Media*, 116(3), 1073-1092.
- [110] Moudjeb, M., Hammadi, L., Nemdili, A. (2024). Experimental Study of Friction Factor Reduction by Adding Aloe Vera Gel in Pipes Transporting Dams Sediments. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 68, 117-127.
- [111] Barry, M. M., Jung, Y., Lee, J. K., Phuoc, T. X., & Chyu, M. K. (2015). Fluid filtration and rheological properties of nanoparticle additive and intercalated clay hybrid bentonite drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127, 338-346.