الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
École Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière

Génie des procédés

Spécialité

Procédés Organiques

Thème :

Effet de la concentration sur les paramètres rhéologiques de la loi constitutive de la gomme de xanthane

Réalisé par
BEKKAR Jihane Kamelia

Les membres de jury :

DR. BOUDERDARA Nabila	ENSTA	**Président**
DR. GRAMEZ Abdelghani	ENSTA	**Examinateur**
DR. BERKACHE Kamel	ENSTA	**Encadrant**
DR. DEGHMOUM Mohamed	CRD-Sonatrach	**Co-Encadrant**

Alger le 26-06-2024

Année universitaire 2023-2024

Dédicaces

À mes très Chers Parents, Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de vos sacrifices, de l'amour et de l'affection dont vous n'avez jamais cessé de m'entourer tout au long de ces années d'études. J'espère que vous trouverez dans ce travail un vrai témoignage de mon profond amour et éternelle reconnaissance.

À mes Sœurs Chéries , Yanelle et Neila, pour leur affection, leur patience et leur complicité. Vous avez été une source de motivation et de réconfort inestimable.

À ma Binôme et chère amie, Pour son entente et sa sympathie et tous les moments de rires partagés.

À mon ami Célia, Pour son soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en moi.

À tous mes amis, Pour leurs soutiens, leurs compréhensions, leurs encouragements, et à qui je souhaite plus de succès.

À tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

À toute personne à qui je tiens.

BEKKAR KAMELIA JIHANE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire représente le fruit des efforts fournis et des sacrifices consentis par plusieurs personnes qu'on ne pourra oublier de remercier.

Nos remerciements s'adressent d'abord à Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de terminer la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant Mr. BERKACHE Kamel pour nous avoir encadré durant ce travail de la meilleure manière. Sans votre expertise et votre accompagnement, ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour.

Nous remercions profondément Mr. DEGHMOUM Mohamed pour nous avoir Co-encadré et pour ses précieux commentaires et ses suggestions qui ont contribué à l'amélioration de ce mémoire.

Nous remercions Mme. BOUDERDARA Nabila d'avoir acceptée de présider notre jury de soutenance. Aussi Mr. GRAMEZ Abdelghani pour le temps qu'il a consacré pour examiner notre mémoire. Leur expertise est un plus pour notre travail et qui va nous permettre de l'améliorer encore.

Un grand merci à tout le personnel du CRD SONATRACH, en particulier Mr . BELOUNIS Abderahim et Mr.LAOUZAI Abdelfetah pour leur aide pratique et leurs encouragements.

Nous tenons à remercier du fond du cœur nos parents pour leur soutien et leurs encouragements qui ont été refuge et motivation durant tout notre parcours académique.

En dernier nous remercions chaleureusement tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué pour la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures **III**
Liste des tableaux **IV**
Introduction Générale **1**
Chapitre I: Étude bibliographique **3**
I.1 Introduction 4
I.2 Définitions des gommes 4
I.3 Propriétés fonctionnelle des gommes 5
I.4 Classification des gommes 5
I.4.1 En fonction de la charge 5
I.4.2 En fonction de la source 5
I.5 Avantages et inconvénients des gommes 5
I.6 Origine de la gomme de xanthane 6
I.7 Gomme de xanthane 6
I.8 Structure chimique du xanthane 6
I.9 Les différentes utilisations de la gomme de xanthane 7
I.9.1 Domaine culinaire 7
I.9.2 Domaine agroalimentaire 7
I.9.3 Domaine pharmaceutique 8
I.10 Revue des études sur la gomme de xanthane 8
Chapitre II: Structure microscopique et propriétés physicochimique **10**
II.1 Introduction 11
II.2 Composition chimique de la gomme de xanthane 11
II.2.1 Structure moléculaire 11
Composition chimique et monomère constitutifs 11
II.3 Technique de caractérisation 13
II.3.1 Microscopie électronique à balayage (MEB) 13
II.4 Propriétés physicochimiques de la gomme de xanthane 13
II.4.1 Propriétés physiques 13
Viscosité 13
Pouvoir de suspension 14
Effet de la température et du pH 14
II.4.2 Propriétés chimiques 14
Solubilité et interaction avec l'eau 14
Résistance à la dégradation 14
Stabilité à l'acidité et à l'alcalinité 16

Stabilité de la réaction d'hydrolyse enzymatique 16
Influence de la concentration des polymères et des sels 16
II.5 Modifications de la Gomme de Xanthane 16
II.5.1 Modifications chimique 16
II.5.2 Modifications physique 18
Traitement thermique 18
Lyophilisation 18
Traitement par ultrasons 18
II.5.3 Impact des modifications sur les performances 18
Chapitre III: Caractérisation rhéologique **20**
III.1 Introduction 21
III.2 Courbe d'écoulement 21
III.3 Modélisation 23
III.4 Étude dynamique 25
III.5 Effet de la concentration sur les paramètres rhéologiques 27
Conclusion Générale **30**
Références Bibliographiques **32**
Résumés **37**

TABLE DES FIGURES

I.1 Structure chimique du xanthane 7

II.1 Image de microscopie électronique à balayage de la gomme de xanthane 13
II.2 Les étapes de solubilisation d'un polymère dans une solution aqueuse d'après Colin- Henrion (2008) 15

III.1 Courbe d'écoulement tracée avec trois échelles différentes : (a) L-L, (b) Log-L, (c) Log-Log 22
III.2 viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement 23
III.3 Courbe d'écoulement modélisée par quatre modèles différents pour deux concentrations de la gomme de xanthane 24
III.4 Courbes d'écoulement de trous concentrations différentes de la gomme de xanthane modélisées par le modèle de Souza-Mendes 25
III.5 Tests de balayages en déformation pour les module de conservation et de perte G' et G'' en (a) et le facteur d'amortissement en (b) 26
III.6 Tests de balayages en fréquence pour les module de conservation et de perte G' et G'' en (a) et le facteur d'amortissement en (b) 27
III.7 Évolution de la contrainte seuil τ_0 (a) et de la consistance k (b) en fonction de la concentration du polymère 28
III.8 Évolution de l'indice de structure n (a) et de la viscosité initiale η_0 (b) en fonction de la concentration du polymère 29

LISTE DES TABLEAUX

III.1 Modèles rhéologiques utilisés pour décrire le comportement la gomme de xanthane 23
III.2 Coefficient de Pearson pour les deux modèles ; Mitsoulis et Souza-Mendes . . . 24

Introduction Générale

La gomme de xanthane est un polysaccharide produit par la bactérie Xanthomonas campestris. Elle est largement utilisée dans les industries alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques pour ses propriétés épaississantes, stabilisantes et suspensives. Sa capacité à former des solutions viscoélastiques en fait un ingrédient précieux pour la modification de la texture et de la stabilité des produits [1]. Comprendre les propriétés rhéologiques de la gomme de xanthane, en particulier l'effet de la concentration sur ces propriétés, est essentiel pour son application efficace dans diverses formulations industrielles.

Les solutions de gomme de xanthane présentent un comportement rhéologique complexe, souvent décrit comme pseudoplastique, où la viscosité diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ce comportement non-newtonien peut être modélisé par différentes lois de comportement rhéologique. Les paramètres de ces modèles, comme la consistance et l'indice de structure, sont directement influencés par la concentration de la gomme dans la solution [2]. Une compréhension détaillée de cette relation permet d'optimiser l'utilisation de la gomme de xanthane pour des applications spécifiques, en ajustant sa concentration pour obtenir les propriétés désirées.

Les recherches antérieures ont largement exploré les effets de la concentration sur les propriétés rhéologiques de la gomme de xanthane. Par exemple, Lapasin et Pricl [3] ont montré que l'augmentation de la concentration de gomme de xanthane conduit à une augmentation significative de la viscosité à faible taux de cisaillement, tout en modifiant les paramètres d'écoulement selon les modèles de comportement rhéologique utilisés. Ces travaux soulignent l'importance d'une caractérisation précise et détaillée pour prédire et contrôler les performances de la gomme de xanthane dans des systèmes complexes.

L'étude de la rhéologie de la gomme de xanthane et de l'effet de la concentration sur ses paramètres rhéologiques est cruciale pour son application industrielle. En modélisant correctement son comportement, il est possible d'optimiser les formulations et d'améliorer la performance des produits finis. Cette compréhension approfondie de la rhéologie de la gomme de xanthane représente une avancée significative dans le domaine des sciences des matériaux et des technologies de transformation.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Les gommes sont des macromolécules de nature polysaccharidique solubles ou faciles à disperser dans l'eau et qui donnent des solutions de très haute viscosité et dans certains cas, des gels à faible concentration. On les appelle aussi parfois des colloïdes hydrophiles. Les gommes sont utilisées pour épaissir les solutions, pour stabiliser les suspensions et les émulsions, pour fixer l'eau et retarder la cristallisation et pour former des gels. Toutes ces utilisations dépendent étroitement des interactions qui se créent entre les macromolécules elles-mêmes et entre celles-ci et l'eau. Dans notre étude nous allons voir en particulier la gomme de xanthane qui est produite par la fermentation de sucres simples par la bactérie Xanthomonas campestris. Appréciée pour ses propriétés épaississantes, stabilisantes et émulsifiantes, elle joue un rôle crucial dans diverses industries, en particulier dans l'alimentation.

La gomme de xanthane, capable de créer des solutions visqueuses même à de faibles concentrations, est un excellent agent épaississant. Elle aide à stabiliser les émulsions et les suspensions, empêchant ainsi la séparation des phases. De plus, elle est stable dans une large gamme de températures et de pH, ce qui la rend très versatile. Une de ses propriétés remarquables est la pseudo-plasticité : les solutions contenant de la gomme de xanthane deviennent moins visqueuses lorsqu'elles sont agitées, mais retrouvent leur viscosité une fois au repos. Cette caractéristique est particulièrement utile pour des produits comme les sauces et les vinaigrettes. Dans l'industrie alimentaire, la gomme de xanthane améliore la texture et la stabilité d'une variété de produits tels que les sauces, les vinaigrettes, les produits laitiers, les produits de boulangerie et les boissons.

En dehors de l'alimentation, elle est également utilisée dans les produits pharmaceutiques comme agent épaississant et stabilisant, dans les cosmétiques pour améliorer la texture et la consistance des lotions, crèmes et gels. La gomme de xanthane est un ingrédient polyvalent et essentiel dans de nombreux secteurs grâce à ses propriétés uniques de modification de la texture et de stabilisation, témoignant de son efficacité et de sa sécurité dans de nombreuses formulations de produits modernes.

I.2 Définitions des gommes

Les gommes sont des macromolécules biologiques de nature glucidique solubles ou faciles à disperser dans l'eau et qui donnent des solutions de très haute viscosité et dans certains cas, des gels à faible concentration. On les appelle aussi parfois des colloïdes hydrophiles ou des mucilages [4].

I.3 Propriétés fonctionnelle des gommes

Les propriétés fonctionnelles sont un ensemble de propriétés physico-chimiques et organoleptiques, déterminant la structure, la qualité technologique, la qualité nutritionnelle et l'acceptabilité d'un produit. Ce sont principalement des polymères solubles dans l'eau provoquant une augmentation de la viscosité du milieu aqueux. Certaines gommes sont fortement utilisées comme additifs pour modifier les propriétés fonctionnelles des préparations alimentaires en contrôlant la texture. A cet égard, les gommes polysaccharidiques peuvent avoir des fonctions épaississantes, gélifiantes, stabilisantes, émulsifiantes et texturantes [5].

I.4 Classification des gommes

Les gommes sont présentes en grandes quantités dans une large variété de plantes, d'animaux, d'algues, de champignons et d'autres sources microbiennes, où elles remplissent un certain nombre de fonctions structurelles et métaboliques ; les sources végétales fournissent les plus grandes quantités. Les différentes gommes disponibles peuvent être classées comme suit [6] :

I.4.1 En fonction de la charge

On distingue plusieurs types de gommes :

— Gommes anioniques : Comme la Gomme Xanthane, la gomme Arabique, la Gomme Karaya, la gomme Tragacanthe (dragon).
— Gommes cationiques : telle que la gomme guar cationique.
— Gommes non-ioniques : comme la gomme guar.

I.4.2 En fonction de la source

— Les gommes d'origine marine : l'agar.
— Les gommes d'origine végétale : la gomme arabique, la gomme Ghatti, la gomme Karaya, la gomme Tragacanthe, la gomme Khaya et, la gomme d'Albizia, la gomme de guar, et la gomme de mélèze.
— Les gommes d'origine microbienne : la Xanthane

I.5 Avantages et inconvénients des gommes

Les gommes présentent plusieurs avantages comme :
- Biodégradabilité : Naturellement produites par des organismes vivants, elles représentent vraiment une source renouvelable et n'ont pratiquement aucun impact sur l'environnement.
- Biocompatibilité : Les gommes sont chimiquement des polysaccharides et ne présentent aucun effet négatif sur la santé.

- Disponibilité et abondance.
- Meilleure tolérance par les patients due à leurs faibles effets secondaires.
- Obtention à partir de sources comestibles.

Les gommes présentent aussi quelques inconvénients comme la contamination microbienne rapide et la variation des propriétés d'un lot à un autre en fonction de la source et du climat selon la localisation géographique [7].

I.6 Origine de la gomme de xanthane

La gomme de xanthane est un exopolysaccharide secrété lors de la fermentation des sucres par les bactéries du genre Xanthomonas comme X. *phaseoli*, X. *juglandis* et X. *campestris*.
La découverte de ce polysaccharide fut attribuée au département américain de l'agriculture (*North Regional Research Laboratory*) dans les années 1950 à la suite de recherches dans le cadre d'une maladie affectant particulièrement la famille des crucifères. En fait, des chercheurs parvinrent à isoler la bactérie pathogène qui excrétait une substance visqueuse obstruant les pores des feuilles de chou (*Brassica spp*). Le biofilm visqueux ainsi produit favorise l'adhésion de la bactérie à son support et facilite la capture des nutriments nécessaires à sa croissance.
Ce n'est que dans les années 1960 que la gomme de xanthane, appelée polysaccharide (B-)1459, fut commercialisée pour la première fois. L'espèce bactérienne la plus couramment utilisée pour sa production est X. *campestris*. Aujourd'hui, la gomme de xanthane est le polysaccharide bactérien le plus utilisé dans l'industrie alimentaire [8].

I.7 Gomme de xanthane

La gomme de xanthane est un hétéro-polysaccharide, construit à partir de glucose, de mannose,d'acide glucuronique et d'acide pyruvique,dont le poids moléculaire est compris entre 1 et 2 millions de grammes par mole [9], produit par une bactérie à Gram (-) *Xanthomonas Campestris* produite industriellement par fermentation à partir d'une source de carbone [10].
Ce biopolymère hydrosoluble possède des propriétés rhéologiques exceptionnelles et trouve des applications industrielles nombreuses et variées, principalement dans le secteur alimentaire mais aussi dans le secteur de pétrochimie, des cosmétique et des détergents [11].

I.8 Structure chimique du xanthane

La structure primaire de la gomme de xanthane, consiste en une chaine principale de cellulose, c'est-à-dire de monomères β-D-glucose liés entre eux par des liaisons O-glycosidique (1-4). Cette chaine porte un branchement latéral tri-osidique tous les deux glucoses. Ce branchement est constitué d'un α-D-mannose lié à la chaine principale par liaison osidique (1-3), d'un acide β-D-glucuronique lié au premier mannose par liaison osidique (1-2) et d'un β-D-mannose lié à l'acide glucuronique par liaison osidique (1-4) [11].

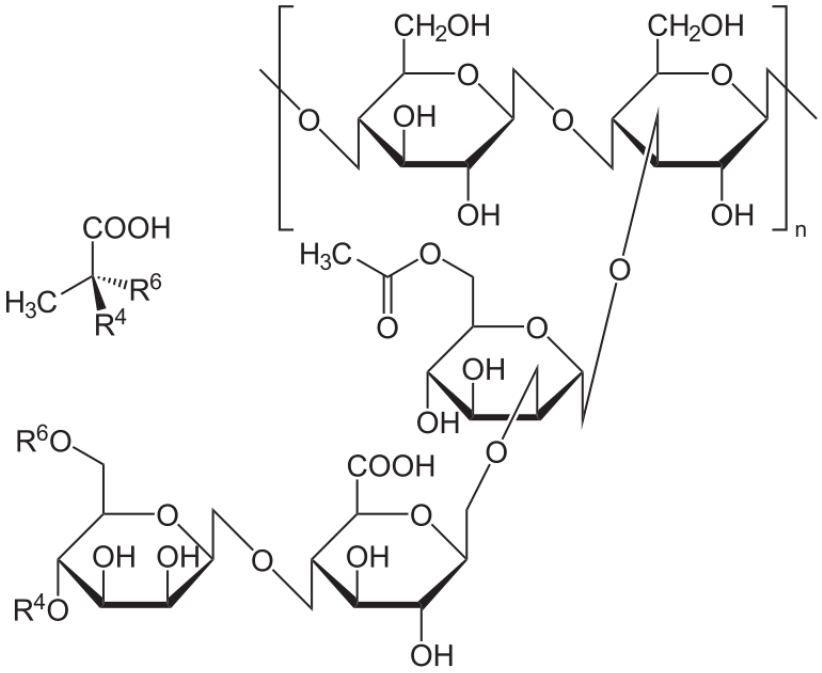


FIGURE I.1 – Structure chimique du xanthane

I.9 Les différentes utilisations de la gomme de xanthane

Le xanthane est un biopolymère utilisé dans de nombreuses applications couvrant un large éventail de domaines tels que l'alimentation (additif sous le code de E415), la pharmacie, la cosmétique, l'agriculture . . ., grâce à ses excellentes propriétés rhéologiques telles que la capacité de former des solutions très visqueuses à de faibles concentrations et sa pseudo-plasticité élevée. Les principaux utilisateurs sont les industries chimiques, pétrochimiques, alimentaires et pharmaceutiques [4].

I.9.1 Domaine culinaire

La gomme de xanthane est un additif alimentaire (E415) très utilisé pour ses propriétés gélifiantes,épaississante et liantes. Cet additif renforce la viscosité d'un liquide. Elle est présente dans des produits aussi bien cuits (pains, viennoiseries,..) que congelés (glaces, sorbets,..). En effet, elle est peu sensible a la température et elle conserve ses propriétés aussi bien à la chaleur qu'à basse températures. Elle est aussi très peu sensible au pH, elle peut dont être utiliser pour épaissir une vinaigrette par exemple et lui donner une texture onctueuse.

I.9.2 Domaine agroalimentaire

Dans le domaine agroalimentaire, la gomme xanthane assure essentiellement un rôle stabilisant ou dispersant, ou il est utilisé seul ou en mélange avec d'autres polymères tels que la gomme de guar ou les dérivés cellulosiques. La gomme de xanthane combinée avec de la méthylcellulose et de la carboxyméthylcellulose fonctionne bien dans les produits laitiers congelés

et en combinaison avec de la carboxyméthylcellulose pour yaourts préparés par acidification directe [11].

I.9.3 Domaine pharmaceutique

La gomme de xanthane est une gomme hydrophile qui peut être utilisée comme épaississant, agent de suspension, émulsifiant et stabilisant dans les formulations liquides et semi-solides. La viscosité élevée de la gomme de xanthane facilite l'application de la préparation externe et le médicament ne tombe pas facilement de la peau après l'évaporation de l'eau, ce qui améliore le confort du médicament. En prenant comme modèles la pommade au bifonazole, les effets de la gomme xanthane, de la gomme arabique et de la gomme de guar dans des préparations liquides et semi-solides hétérogènes ont été étudiés et comparés. Les résultats ont montré que les propriétés de suspension et d'épaississement thixotropes de la gomme de xanthane étaient supérieures à celles des deux autres gommes, et c'était un excellent agent de suspension et épaississant.

I.10 Revue des études sur la gomme de xanthane

Dans le domaine biomédical et biotechnologique, de nouvelles applications du xanthane apparaissent en continu. Par exemple, l'injection intra-articulaire de xanthane semble être une méthode de traitement alternative pour l'arthrose car il agit comme un amortisseur élastique lors des mouvements à faible impact de l'articulation et comme un lubrifiant visqueux lors des mouvements à fort impact [12], [13].

Dans le domaine pétrolier, en 2010 B. Safi [14] a fait l'analyse des propriétés rhéologiques des fluides de forage aqueux modifiés par un inhibiteur de gonflement qui est le biopolymere de Xanthane et le Polyanionique cellulose de poids moléculaires très élevé. Il a conclu que l'ajout de cet inhibiteur améliore significativement la stabilité et la performance des fluides de forage en réduisant le gonflement des argiles, augmentant ainsi l'efficacité et la sécurité des opérations de forage.

Dans l'objectif d'une application dans l'industrie alimentaire ou pharmaceutique, les propriétés toxicologiques et d'innocuités du xanthane ont fait l'objet de recherches approfondies. Ces dernières attestent de son caractère non toxique et n'altérant pas la croissance. Il est également non sensibilisant et ne provoque pas d' irritation de la peau ou des yeux [2].

En 2007, Lazaridou et al. [15], ont étudié l'effet des hydrocolloïdes sur les paramètres rhéologiques de la pâte et la qualité du pain. Ils ont prouvé que le xanthane n'a aucun effet sur le volume spécifique du pain mais il a eu l'effet le plus prononcé sur les propriétés viscoélastiques des pâtes en les rendant plus consistantes donnant lieu à des mies plus fermes.

D'après Shittu et al. en 2009 [16], l'addition du xanthane a des effets significatifs sur la ténacité et l'extensibilité de la pâte et sur l'acceptabilité sensorielle du pain frais. Guerairia en 2011 [17] a trouvé que l'incorporation de 0.19% de Xanthane à une formule sans gluten à base de la farine du riz et de féverole permet d'avoir des pains sans gluten avec des volumes spécifique optimums.

Également, des études faites par Peressini et Sensidoni, 2009 [18] ; Crockett et al., 2011 [19] ; Sabanis et Tzia, 2011 [20], ont montré que seulement les faibles taux en xanthane (< 0.5)%) permettent d'améliorer le volume spécifique des pains sans gluten. Par contre, des niveaux élevés contribueraient à une forte consistance et résistance de la pâte, avec une expansion limitée des cellules gazeuses provoquant ainsi une diminution du volume des pains.

CHAPITRE II

STRUCTURE MICROSCOPIQUE ET PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUE

II.1 Introduction

La gomme de xanthane, un polysaccharide produit par la fermentation de la bactérie *Xanthomonas campestris*, occupe une place importante dans diverses industries en raison de ses propriétés multiples. Pour exploiter pleinement son potentiel et optimiser ses applications, une compréhension approfondie de sa structure microscopique et de ses propriétés physicochimiques est essentielle. Ce chapitre se propose d'explorer en détail ces aspects fondamentaux de la gomme de xanthane.

Sur le plan microscopique, la gomme de xanthane présente une structure hélicoïdale unique qui contribue à ses caractéristiques fonctionnelles distinctives. Cette structure, souvent étudiée par des techniques avancées telles que la microscopie électronique et la résonance magnétique nucléaire, est responsable de sa capacité à former des solutions viscoélastiques robustes même à faible concentration. La configuration hélicoïdale stabilisée par des liaisons hydrogène intramoléculaires et des interactions ioniques joue un rôle dans la stabilité et la performance de la gomme de xanthane dans divers environnements.

D'un point de vue physicochimique, la gomme de xanthane est caractérisée par sa solubilité, sa viscosité, sa stabilité thermique, et sa résistance chimique. La solubilité de la gomme de xanthane dans l'eau et sa capacité à former des gels sont influencées par la concentration, la température et le pH de la solution. Sa viscosité, qui varie avec la concentration et les conditions de cisaillement, est une propriété clé qui détermine son efficacité comme agent épaississant et stabilisant. De plus, la gomme de xanthane est stable dans une large gamme de conditions thermiques et de pH, ce qui en fait un additif fiable pour des produits soumis à des variations extrêmes de température et d'acidité.

II.2 Composition chimique de la gomme de xanthane

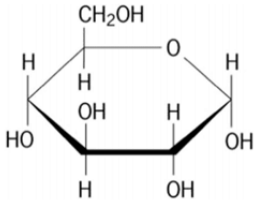
II.2.1 Structure moléculaire

La structure primaire de la gomme de xanthane, consiste en une chaine principale de cellulose, c'est-à-dire de monomères β-D-glucose liés entre eux par des liaisons O-glycosidique (1-4). Cette chaine porte un branchement latéral tri-osidique tous les deux glucoses. Ce branchement est constitué d'un α-D-mannose lié à la chaine principale par liaison osidique (1-3), d'un acide β-D-glucuronique lié au premier mannose par liaison osidique (1-2) et d'un β-D-mannose lié à l'acide glucuronique par liaison osidique (1-4) [11].

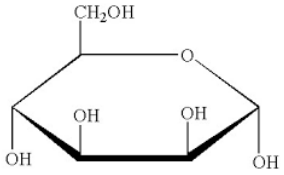
Composition chimique et monomère constitutifs

Sa structure chimique se compose de répétitions d'unités de pentasaccharides, formées par cinq monomères principaux :

— **Glucose** : La gomme de xanthane contient deux unités de glucose dans chaque unité répétitive.

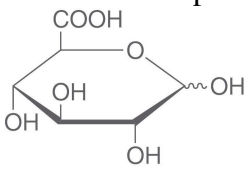


— **Mannose :** Chaque unité répétitive contient deux unités de mannose.

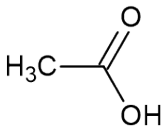


Mannose

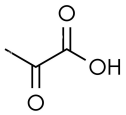
— **Acide glucuronique** : Une unité de cet acide est présente dans chaque unité répétitive.



— **Groupes d'acétate :** Des groupes d'acétate peuvent être attachés aux résidus de mannose.



— **Groupes de pyruvate :** Des groupes de pyruvate peuvent également être liés à certains résidus de mannose.



II.3 Technique de caractérisation

II.3.1 Microscopie électronique à balayage (MEB)

Sur la base des images MEB de la figure II.1, nous avons pu montrer la microstructure de la gomme de xanthane qui présente des particules de taille variable entre 30 et 300 μm. Ces particules gonflent après dissolution de la poudre dans l'eau et occupent donc une fraction volumique plus importante, ce qui augmente les effets d'interférence et confère au fluide obtenu le caractère visqueux.

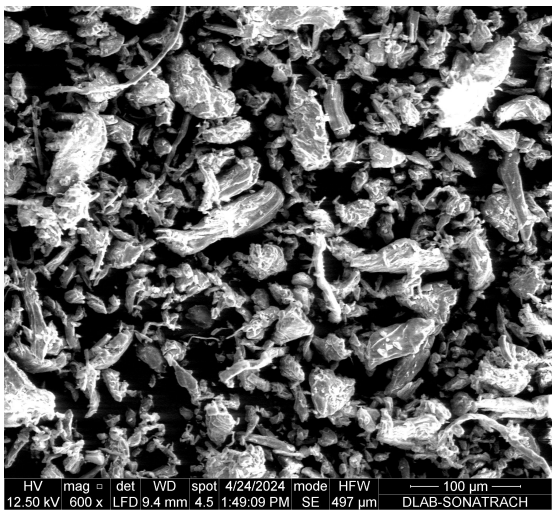


FIGURE II.1 – Image de microscopie électronique à balayage de la gomme de xanthane

II.4 Propriétés physicochimiques de la gomme de xanthane

La rigidité structurelle moléculaire de ce caoutchouc lui confère des propriétés inhabituelles telles que la stabilité à la chaleur, la tolérance aux solutions neutre, acides et basiques. Présente une viscosité stable dans de larges plages de température et résistance à l dégradation enzymatique [25].

II.4.1 Propriétés physiques

Viscosité

Les solutions aqueuses de gomme de xanthane sont très visqueux. Cette viscosité n'est pas affectée par la température ni dans le point de congélation ni dans le point d'ébullition. C'est pourquoi il est choisi par l'industrie alimentaire car les propriétés des produits finaux dans lesquels ils sont utilisés restent indistinctement, qu'ils soient réfrigérés, à température ambiante ou même dans des zones chaudes [26].

Pouvoir de suspension

La propriété fondamentale du xanthane en solution, c'est son aptitude de dominer les propriétés rhéologiques des systèmes aqueux d'une part, et son effet stabilisant des systèmes multiphasiques d'autre part (émulsion, suspensions, mousses). Le xanthane s'oppose à la sédimentation des dispersions, en raison de son seuil d'écoulement très élevé, le comportement rhéologique du xanthane, a pour caractéristique une pseudo plasticité élevée, un comportement visqueux réversible aux cisaillements, il est par ailleurs non thixotrope [27].

Effet de la température et du pH

La gomme xanthane est un matériau stable. Les solutions aqueuses sont stables sur une large gamme de pH (pH 3-12), bien qu'elles démontrent une stabilité maximale à pH 4-10 et

à des températures de $10 - 60°C$. Les solutions de gomme de xanthane dont la concentration en poids/volume est inférieure à 1% peuvent être affectées par des températures supérieures à la température ambiante : par exemple, la viscosité est réduite. La gomme de xanthane offre les mêmes propriétés d'épaississement, de stabilisation et de suspension pendant le stockage à long terme à des températures élevées que dans les conditions ambiantes [28].

II.4.2 Propriétés chimiques

Solubilité et interaction avec l'eau

La gomme de xanthane est soluble dans l'eau à froid (des 10 à $20°C$). La solubilisation se fait en deux étapes. La première étape est la dispersion des grains constituant la poudre, c'est-à-dire l'individualisation des particules. La dispersion sera d'autant plus rapide que la taille des grains est élevée. La deuxième étape est l'hydratation. Les molécules d'eau se fixent progressivement sur les macromolécules et réduisent de ce fait les interactions soluté-soluté, jusqu'à l'individualisation des macromolécules. La gomme présente des groupements hydroxyles et des charges négatives qui facilitent l'interaction soluté-eau. De plus, les ramifications écartent les chaînes principales, ce qui facilite l'hydratation. On considère celle-ci achevée lorsque l'on a atteint un palier de viscosité. Différents facteurs conditionnent la vitesse d'hydratation. L'agitation, la température et la finesse des grains ont un impact positif. La présence d'électrolytes, compétiteurs vis-à-vis du polysaccharide pour l'eau, a un effet négatif [29].

Résistance à la dégradation

La gomme de xanthane est réputée pour sa résistance exceptionnelle à la dégradation, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications industrielles. Sa stabilité thermique est remarquable, avec des études montrant que ses propriétés viscoélastiques restent relativement constantes jusqu'à environ $90°C$, ce qui la rend idéale pour des usages nécessitant une exposition à des températures élevées . En outre, elle présente une excellente résistance à la dégradation enzymatique et microbienne grâce à sa structure chimique complexe qui défie la décomposition par de nombreux enzymes et micro-organismes. Cette caractéristique est particulièrement bénéfique dans des environnements biologiques complexes où la stabilité des agents épaississants et stabilisants est importante.

Par exemple, des recherches ont démontré que la gomme de xanthane conserve sa viscosité et sa structure même dans des solutions à pH varié, illustrant sa robustesse chimique . En termes de durabilité mécanique, la gomme de xanthane résiste bien aux forces de cisaillement élevées, ce qui est essentiel pour des applications où le fluide doit passer par des pompes ou des conduits étroits sans perdre ses propriétés épaississantes ou stabilisantes. Des études ont montré qu'elle peut supporter des forces de cisaillement importantes sans dégradation significative de sa structure, ce qui est significatif pour maintenir l'efficacité des formulations industrielles [1], [2].

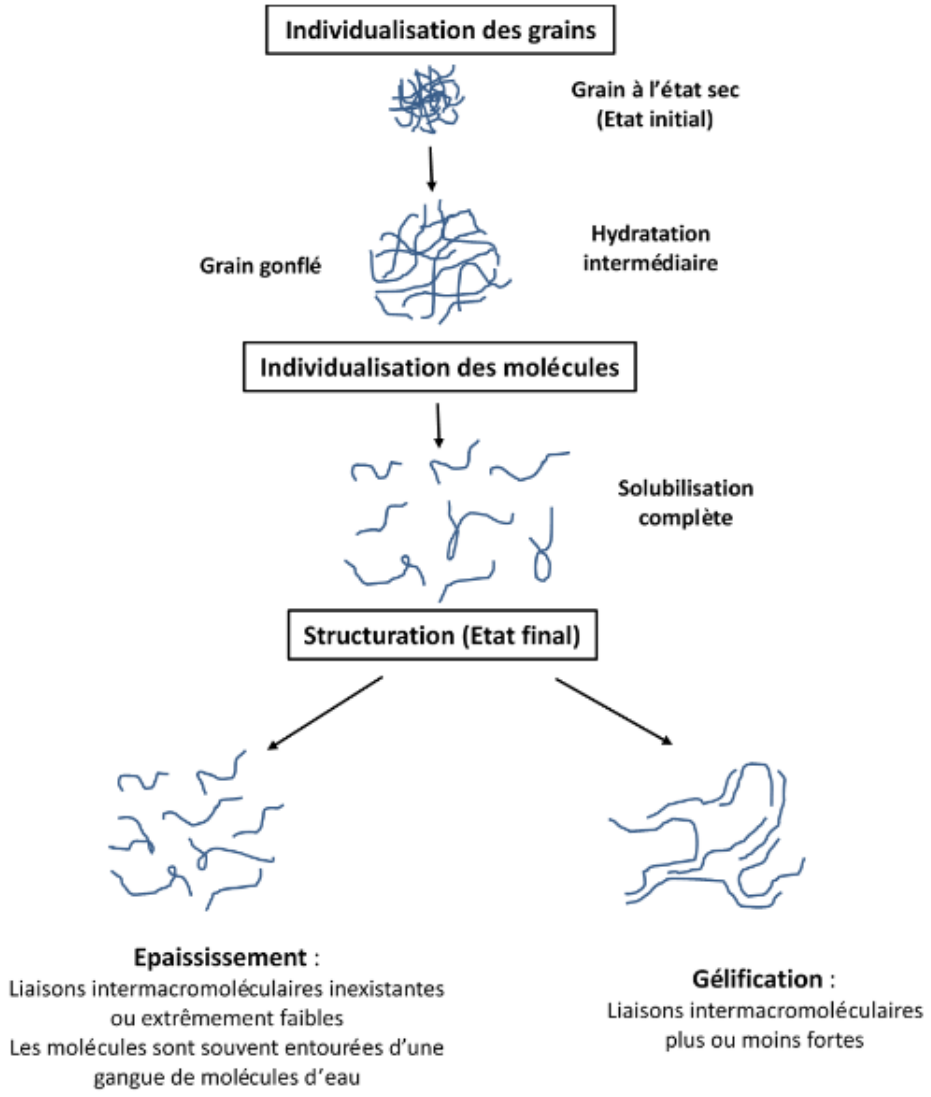


FIGURE II.2 – Les étapes de solubilisation d'un polymère dans une solution aqueuse d'après Colin- Henrion (2008)

Stabilité à l'acidité et à l'alcalinité

La solution de gomme de xanthane est très stable aux acides et aux bases, et sa viscosité ne sera pas affectée lorsque le pH est dans la plage 5-10. La viscosité changera légèrement lorsque le pH est inférieur à 4 et supérieur à 11. Dans la plage de pH 3-11, la viscosité maximale se situe à moins de 10% de la valeur minimale. La gomme de xanthane peut être dissoute dans une variété de solutions acides, telles que 5% d'acide sulfurique, 5% d'acide nitrique, 5% d'acide acétique, 10% d'acide chlorhydrique et 25% d'acide phosphorique, et ces solutions d'acide de gomme de xanthane sont assez stables à la température de pièce, et la qualité des pièces ne changera pas avant plusieurs mois. La gomme de xanthane est également soluble dans une solution d'hydroxyde de sodium et possède une propriété épaississante. La solution formée est très stable à température ambiante. La gomme de xanthane peut être dégradée par des oxydants puissants tels que l'acide perchlorique et l'acide persulfurique, et la dégradation s'accélérera avec l'augmentation de la température [30].

Stabilité de la réaction d'hydrolyse enzymatique

La double hélice stable de la gomme de xanthane lui confère de fortes capacités antioxydantes et anti-enzymolyse. De nombreuses enzymes, telles que la protéase, l'amylase, la cellulase et l'hémicellulase, ne peuvent pas dégrader la gomme de xanthane [30].

Influence de la concentration des polymères et des sels

La viscosité des solutions de xanthane augmente fortement avec la concentration croissante du polymère . Ce comportement est attribué à l'interaction ou à l'enchevêtrement intermoléculaire, ce qui augmente les dimensions et le poids moléculaire de la macromolécule efficace. La présence de sels en solution influence la viscosité des xanthanes. À faible concentration de polymère, la viscosité diminue légèrement lorsqu'une petite quantité de sel est ajoutée à la solution. Cet effet a été attribué à la réduction des dimensions moléculaires résultant de la diminution des forces électrostatiques inter-moléculaires [32]. La viscosité augmente à une concentration plus élevée de xanthane ou lorsqu'une grande quantité de sel est ajoutée. Cet effet est probablement dû à une interaction accrue entre les molécules de polymère [32]. La viscosité d'une solution de xanthane est indépendante de la concentration en sel lorsque la teneur en sel dépasse 0.1 % p/v [31].

II.5 Modifications de la Gomme de Xanthane

II.5.1 Modifications chimique

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons au cas du xanthane. Ainsi, cette sous partie présente quelques exemples de modifications chimique du xanthane. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la modification chimique du xanthane dans l'objectif de pouvoir améliorer ses propriétés en solution ou de lui en conférer de nouvelles, permettant ainsi d'élargir la gamme de ses applications.

Afin de modifier chimiquement le xanthane, différentes voies sont envisageables et peuvent consister à faire varier les taux en acétate et pyruvate, supprimer une partie de la chaine latérale ou greffer d'autres composés sur les fonctions hydroxyle ou acide carboxylique afin de moduler ses propriétés, principalement rhéologiques. Par exemple, Su et al. [34] ont fait réagir le xanthane avec du formaldéhyde afin de réduire les interactions intermoléculaires et ainsi améliorer le temps de dissolution en solution aqueuse.

Ici, nous nous intéressons à la modification du xanthane par greffage de nouvelles fonctions qui, de par leur nature particulière, permettent d'apporter directement de nouvelles propriétés. La majorité des publications sur la modification chimique du xanthane ciblent comme site de greffage les fonctions hydroxyle du polymère, notamment pour réticuler le polymère et créer

des hydrogels .

Peu de travaux concernent la modification chimique du xanthane au niveau de ses fonctions acide carboxylique. Étant moins nombreuses que les fonctions hydroxyle, ces fonctions permettent un meilleur contrôle de la regioselectivité de la réaction. De plus, selon la fonction résultante de la modification, le nombre de liaisons hydrogènes potentielles n'est pas affecté permettant ainsi de maintenir la capacité du xanthane à s'ordonner.

Dans la littérature, quelques auteurs se sont intéressés à ces sites de greffage. Tout d'abord, Bejenariu et al. [35] ont modifié le xanthane par couplage peptidique dans des conditions de synthèse telles que le polymère soit sous sa forme ordonnée pour obtenir un hydrogel qui pourrait avoir des applications thérapeutiques. Puis, Arimura et al. [36] ont décrit une synthèse chimio-enzymatique du xanthane permettant de greffer de l'amylose. Le polymère ainsi obtenu présente la capacité de former un gel physique dans un liquide ionique et dans l'eau avec une amélioration du caractère élastique. Mendes et al. [42] se sont aussi assurés du maintien de la conformation hélicoïdale du xanthane, par dichroïsme circulaire, avant et après modification. Ils ont obtenu un polymère amphiphile par couplage peptidique, capable de s'auto-assembler en conditions aqueuses douces.

Plus récemment, Roy et al. [37] ont développé un protocole permettant de greffer l'octylamine sur les fonctions acide carboxylique du xanthane sous forme ordonnée via une réaction de couplage peptique. L'agent de couplage utilisé est un carbodiimide, le 1-éthyl-3-(3-diméthylaminopropyl) carbodiimide (EDAC) couplé d'un co-agent de couplage, le N-Hydroxysuccinimide (NHS). La conformation de ces dérivés, stabilisée par liaisons hydrogène, s'avère renforcée par la modification chimique et de plus, la dynamique de relaxation est fortement ralentie par la présence des chaînons hydrophobes. Contrairement aux polysaccharides amphiphiles flexibles, la rigidité de la chaine empêche son repliement sur elle-même pour former des microdomaines hydrophobes. Par cette méthode de modification, les xanthanes amphiphiles obtenus ne présentent pas de caractère associatif .Par une réaction de couplage peptique utilisant les même agents de couplage. Laffleur et al. [38] ont greffé la L-cysteine via la formation d'une liaison amide. Les dérivés obtenus sont non toxiques et attestent de propriétés intéressantes pour des applications pharmaceutiques.

II.5.2 Modifications physique

La modification physique de la gomme de xanthane consiste à altérer ses propriétés sans changer sa structure chimique fondamentale. Ces modifications visent à améliorer ou adapter les caractéristiques de la gomme de xanthane pour des applications spécifiques. Voici quelques méthodes courantes de modification physique :

Traitement thermique

Le traitement thermique de la gomme de xanthane peut entraîner des changements dans ses propriétés rhéologiques. En exposant la gomme à des températures élevées, on peut moduler sa viscosité et son comportement viscoélastique. Cela permet de l'adapter pour des applications où une certaine stabilité thermique est requise [39].

Lyophilisation

La lyophilisation, ou séchage par congélation, consiste à congeler la gomme de xanthane et à éliminer l'eau par sublimation sous vide. Ce procédé permet d'obtenir une gomme sous forme de poudre fine, facilitant son incorporation dans diverses formulations et augmentant sa durée de conservation [40].

Traitement par ultrasons

L'application d'ultrasons à haute fréquence peut décomposer les agrégats de xanthane en solutions, réduisant ainsi la viscosité et modifiant les propriétés de gélification. Ce traitement est utile pour obtenir des solutions plus homogènes et pour contrôler la texture des produits finis [41].

II.5.3 Impact des modifications sur les performances

— Amélioration de la viscosité : Certaines modifications, comme l'homogénéisation à haute pression ou l'ajout d'autres polymères, peuvent augmenter la viscosité de la gomme de xanthane. Cela est particulièrement utile dans les applications où une viscosité élevée est nécessaire, comme dans les sauces et les condiments alimentaires, les produits cosmétiques et les fluides de forage dans l'industrie pétrolière.

— Optimisation de la solubilité : Les techniques comme la lyophilisation et le séchage par pulvérisation peuvent améliorer la solubilité de la gomme, facilitant ainsi son incorporation dans des formulations aqueuses. Une meilleure solubilité permet une dispersion plus homogène de la gomme, améliorant ainsi la texture et la stabilité des produits alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques.

— Stabilité thermique et chimique : La résistance aux variations de température et de pH, obtenue par des traitements thermiques, permet à la gomme de maintenir ses propriétés fonctionnelles dans des conditions extrêmes. Cela est important pour les applications industrielles nécessitant une performance fiable dans des environnements variés, comme les produits alimentaires pasteurisés, les cosmétiques soumis à des variations de température, et les formulations pharmaceutiques.

— Modification des propriétés de gélification : La capacité de la gomme de xanthane à former des gels peut être modifiée par des traitements physiques, influençant ainsi la texture et la consistance des produits finis. Par exemple, une meilleure gélification peut améliorer la stabilité des suspensions et des émulsions, rendant la gomme de xanthane plus efficace dans les applications alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques.

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION RHÉOLOGIQUE

III.1 Introduction

La caractérisation rhéologique de la gomme de xanthane est essentielle pour comprendre son comportement sous différentes conditions de traitement et d'utilisation. Les études rhéologiques permettent de déterminer comment la gomme réagit aux forces appliquées, en particulier son comportement viscoélastique et sa réponse aux variations de taux de cisaillement. La gomme de xanthane présente une viscosité élevée et un comportement pseudo-plastique, ce qui signifie que sa viscosité diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, rendant son écoulement plus facile sous agitation ou stress.

Ces propriétés rhéologiques sont influencées par divers facteurs tels que la concentration, la température, et le pH. En solution aqueuse, la gomme de xanthane forme un gel stable sur une large gamme de conditions, ce qui en fait un additif polyvalent et précieux. La compréhension détaillée de ses caractéristiques rhéologiques permet d'optimiser son utilisation dans des applications spécifiques, assurant la qualité et l'efficacité des produits finaux.

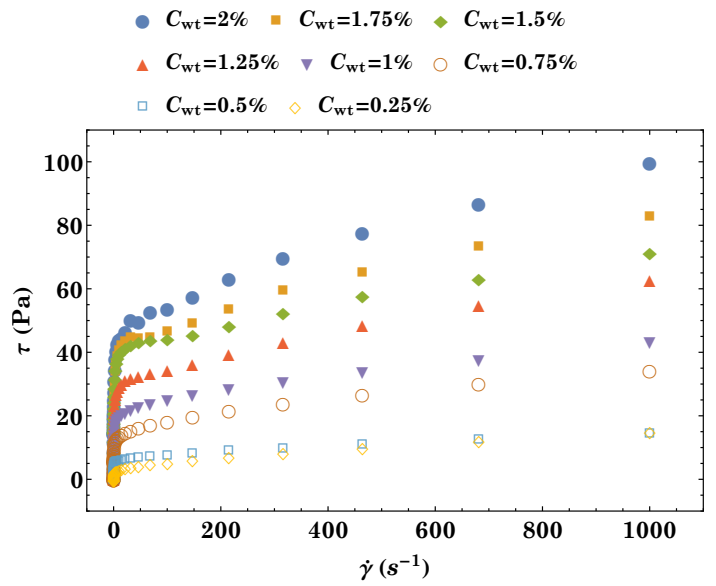
III.2 Courbe d'écoulement

La courbe d'écoulement est un outil essentiel pour caractériser les propriétés rhéologiques d'un matériau comme la gomme de xanthane. Elle représente la relation entre le taux de cisaillement (souvent noté $\dot{\gamma}$) et la contrainte de cisaillement (τ), fournissant des informations cruciales sur le comportement du fluide sous des conditions de déformation différentes.

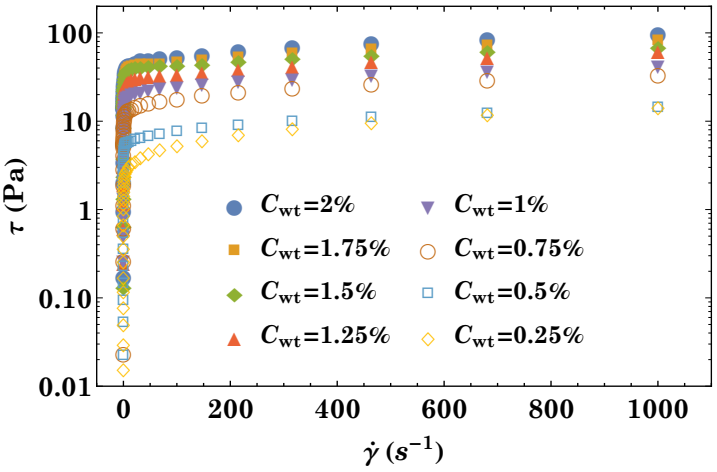
L'échelle utilisé pour tracer le courbe d'écoulement est déterminante dans la détection des détails et l'identification du comportement rhéologique du fluide test. C'est pour cela, nous avons tracé la courbe d'écoulement en utilisant trois échelles différentes ; linéaire-linéaire (L-L), logarithmique-linéaire (Log-L), logarithmique-logarithmique (Log-Log).

L'utilisation de l'échelle linéaire-linéaire ne permet pas de voir les détails de la courbe d'écoulement pour les faibles valeurs du taux de cisaillement comme montré sur la figure III.1(a). Cette échelle est efficace pour des valeurs plus grandes que 50 s^{-1}, et on peut l'utiliser pour visualiser les courbes d'écoulement pour des fluides dont on s'intéresse dans le domaine industriel correspondant à des valeurs de $\dot{\gamma}$ plus grande que 100 s^{-1}.

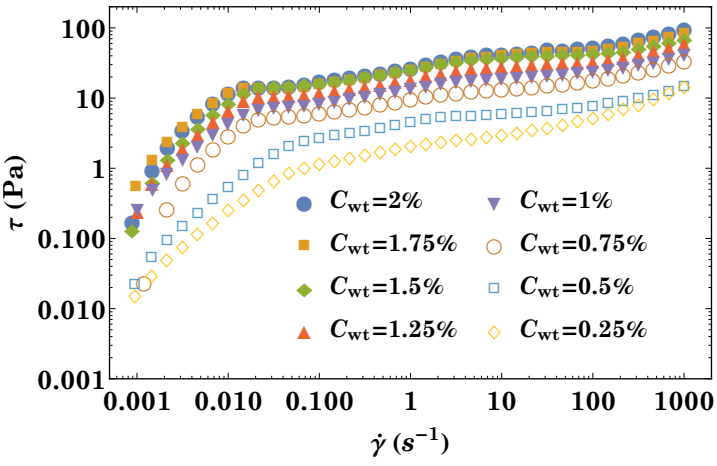
La figure III.1(b) montre la courbe d'écoulement tracé en échelle logarithmique-linéaire. sur cette figure on remarque on peut voir les valeurs des contraintes seuil en faisant des extrapolation de la partie linéaire mais le détail et l'étendue de cette zone n'est pas déterminée puisque l'axe horizontal est linéaire. En revanche, sur la figure III.1(c) on utilise l'échelle logarithmique sur les deux axes, chose qui nous permet de visualiser ce qui ce passe dans la zone des faibles valeurs du taux de cisaillement. On peut aussi quantifier l'étendue de la zone de déformation élastique. Donc il est primordial d'utiliser l'échelle Log-Log pour tracer les courbes d'écoulement.



(a)



(b)



(c)

FIGURE III.1 – Courbe d'écoulement tracée avec trois échelles différentes : (a) L-L, (b) Log-L, (c) Log-Log

Sur la figure III.2, on trace l'évolution de la viscosité apparente en fonction de la vitesse de cisaillement. Cette courbe est essentiel pour savoir comment la viscosité varie en augmentant le

taux de cisaillement. Dans notre cas et pour toutes les concentration de la gomme de xanthane le caractère rhéofluidifiant de la gomme est observé. Comme le montre la figure, la viscosité diminue si le taux de cisaillement augmente.

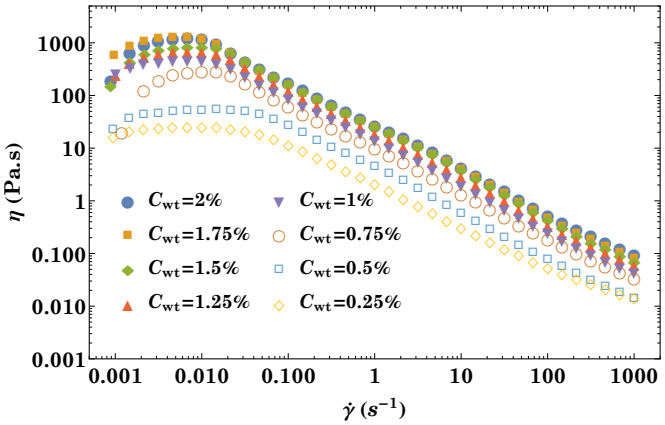


FIGURE III.2 – viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement

III.3 Modélisation

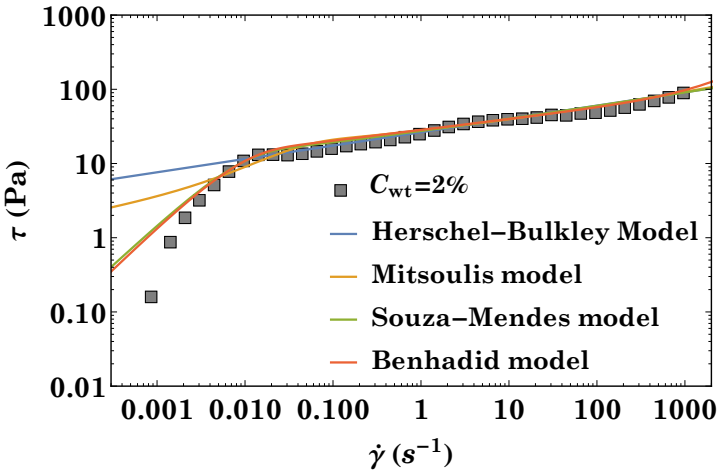
Afin de déterminer le modèle le plus approprié qui décrit le comportement rhéologique de la gomme de xanthane, nous avons utilisé quatre modèles rhéologiques largement utilisés dans la littérature pour décrire le comportement des fluides viscoplastiques. Ces modèles sont présentés dans le tableau III.1.

Hershel-Bulkley [21]	$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$	τ_0, k, n
Souza-Mendes [23]	$\tau = \left[(\tau_0 + k\dot{\gamma}^n)\left(\frac{1-e^{-\frac{\mu_0}{\tau_0}\dot{\gamma}}}{\dot{\gamma}}\right)\right]\dot{\gamma}$	τ_0, k, n, η_0
Mitsoulis [22]	$\tau = \tau_0\left(1 - e^{-m\dot{\gamma}}\right) + k\dot{\gamma}^n$	τ_0, k, n, m
Benhadid [24]	$\tau = \left(\eta_\infty + (\tau_0 + k\dot{\gamma}^n)\left(\frac{1-e^{-\frac{\eta_0}{\tau_0}\cdot\dot{\gamma}}}{\dot{\gamma}}\right)\right)\dot{\gamma}$	$\tau_0, k, n, \eta_0, \eta_\infty$

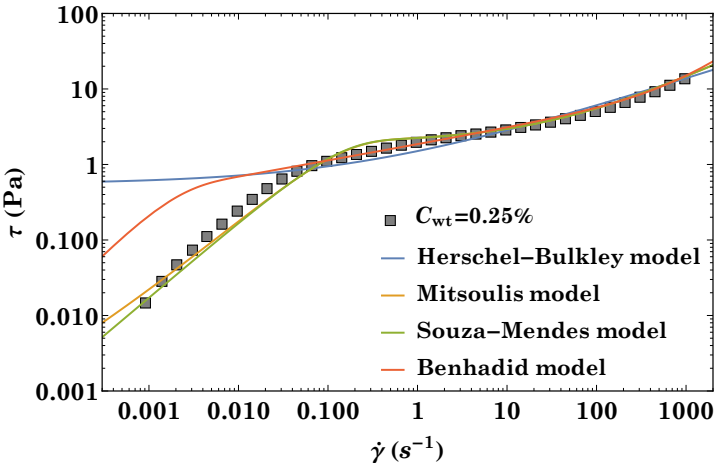
TABLE III.1 – Modèles rhéologiques utilisés pour décrire le comportement la gomme de xanthane

Sur la figure III.5, nous présentons deux courbes d'écoulement pour deux concentrations différentes de la gomme de xanthane (faible concentration 0.25% et forte concentration 2%) et nous avons tracé quatre modèles rhéologiques pour voir quel est le plus approprié pour décrire le comportement rhéologique des deux échantillons. La représentation graphique montre que les modèles de Mitsoulis et de Souza-Mendes sont les appropriés en première étape.

Maintenant il reste de choisir entre ces deux modèles pour savoir qui est le plus adapté à l'évolution de la contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement. Pour ce faire, nous avons utilisé un paramètre statistique pour trancher dans cette histoire. Le coefficient de Pearson est



(a)



(b)

FIGURE III.3 – Courbe d'écoulement modélisée par quatre modèles différents pour deux concentrations de la gomme de xanthane

le paramètre utilisé pour choisir entre Le modèle de Mitsoulis et Souza Mendes, ils est défini comme suit :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\tau_{\text{i-pre}}\tau_{\text{i-me}}) - \sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{i-pre}}\sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{i-me}}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{i-me}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{i-me}}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{pre}}^2 - \left(\sum_{i=1}^{N}\tau_{\text{pre}}\right)^2\right]}} \tag{III.1}$$

Le calcul du coefficient de Pearson a donné les résultats présenté dans le tableau III.2

	Modèle de Mitsoulis	Modèle de Souza-Mendes
R	0.990697561	0.991689482

TABLE III.2 – Coefficient de Pearson pour les deux modèles ; Mitsoulis et Souza-Mendes

Ce tableau montre que le modèle de Souza-Mendes est légermenet meilleur que le modèle de Mitsoulis. Nous avons opté pour ce modèle pour décrire le comportement rhéologique de

la gomme de xanthane pour toutes les concentrations utilisées comprises entre 0.25% et 2%. La figure III.6 présente trois courbes d'écoulement pour trois concentrations différentes de la gomme de xanthane. Ces courbes sont modélisées par la loi constitutive de Souza-Mendes. Nous observons une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et le modèle de Souza-Mendes sur toute la plage des taux de cisaillement. Ce modèle prédit la contrainte seuil du fluide bien évidemment en plus de la viscosité initiale, la consistance et l'indice de structure. Son point fort est sont utilisation dans des schémas numériques utilisés pour simuler l'es écoulements des fluides complexes dans des géométries complexes puisque il régularise le modèle de Herschel-Bulkley pour contourner le problème de singularité à cause de la contrainte seuil qui est explicite dans le modèle.

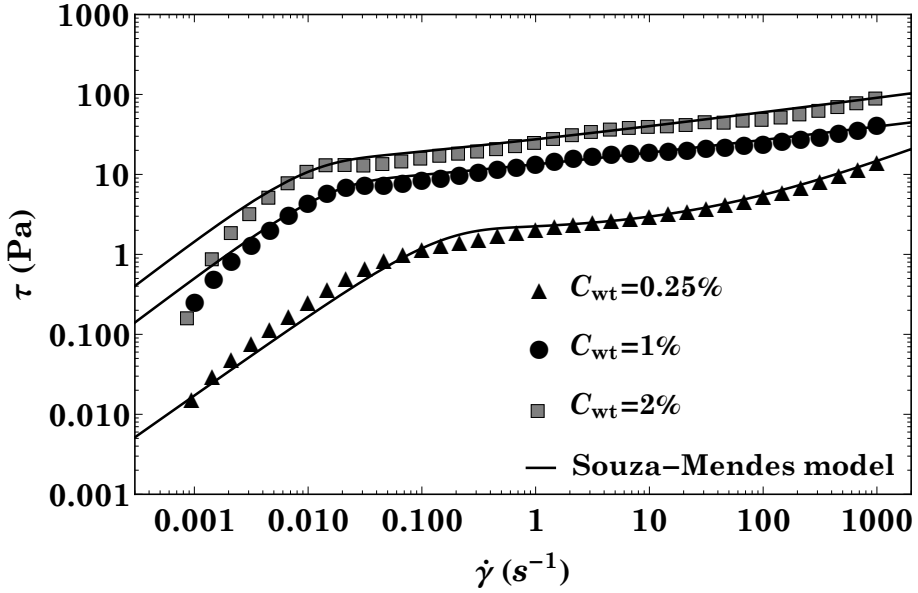
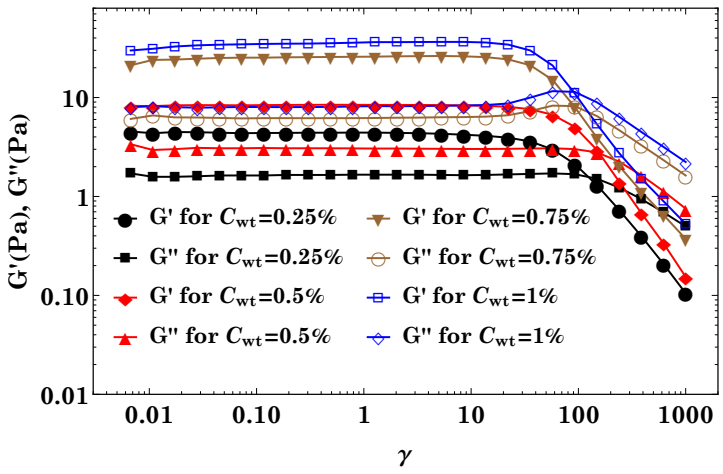


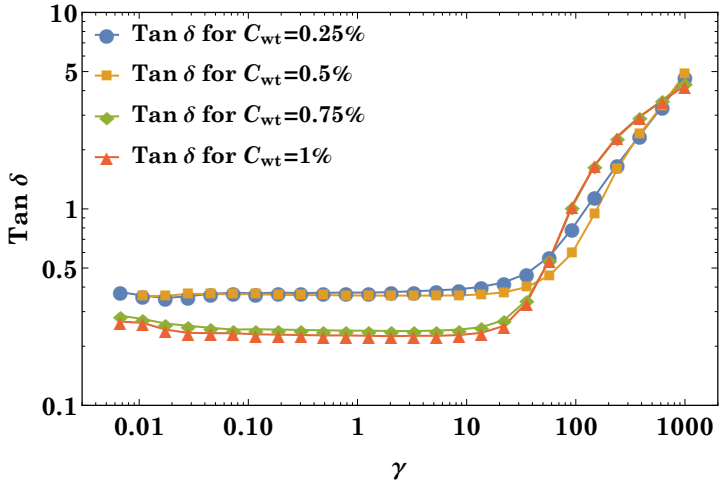
FIGURE III.4 – Courbes d'écoulement de trous concentrations différentes de la gomme de xanthane modélisées par le modèle de Souza-Mendes

III.4 Étude dynamique

L'étude dynamique de la gomme de xanthane porte d'abord sur les tests de balayages en déformation des modules de conservation et de perte (Figure III.5). Ces tests vont nous permettre d'identifier les plages de viscoélasticité linéaire. Aussi, la détermination du point de gel dont sa valeur représente une mesure de la contrainte seuil. La plage de viscoélasticité linéaire est bien déterminée et on observe une dominance du comportement élastique dans cette plage et pour toutes les concentrations. Aussi on peut remarquer que la contrainte seuil augmente avec la concentration comme montré sur la figure III.5(a). La figure III.5(b) représente l'évolution du facteur d'amortissement en fonction de la déformation. Elle permet aussi de déterminer la plage de viscoélasticité linéaire qui correspond à un plateau pour des valeurs pratiquement constante du facteur d'amortissement.



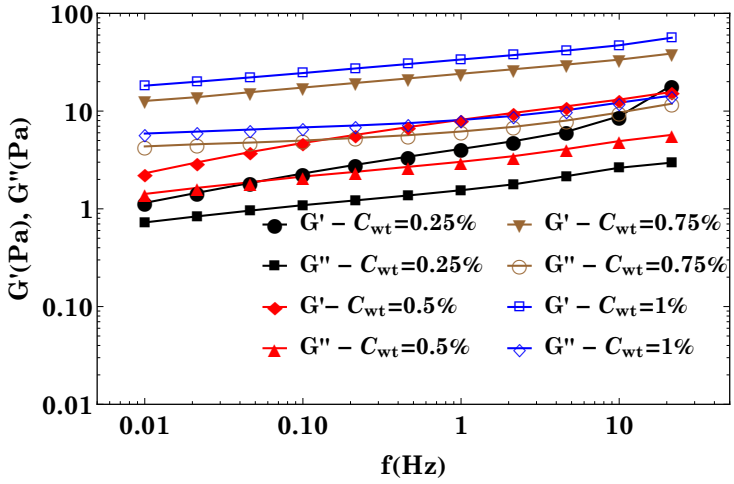
(a)



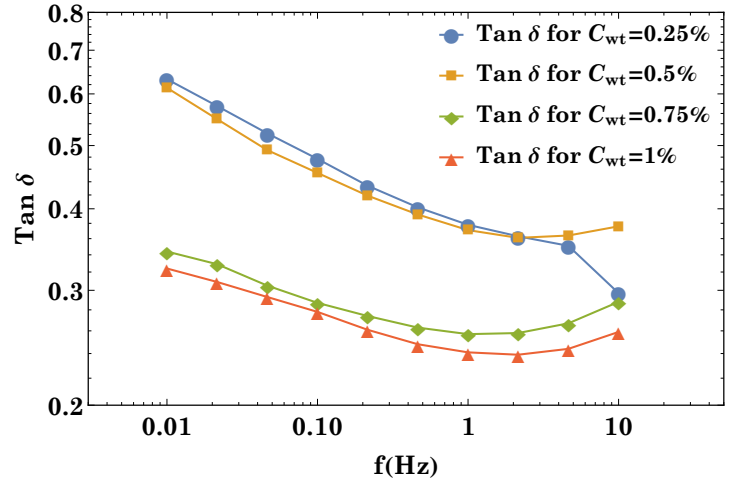
(b)

FIGURE III.5 – Tests de balayages en déformation pour les module de conservation et de perte G' et G'' en (a) et le facteur d'amortissement en (b)

Le test dynamique consiste à l'étude fréquentielle des modules de conservation et de perte G', G'' et aussi du facteur d'amortissement. La figure III.6(a) montre un dominance élastique ($G' > G''$) sur toute la plage des fréquences et même pour toutes les concentration. On peut dire que la gomme de xanthane est considérée comme un fluide viscoélastoplastique car les trois propriétés sont présentes dans les solutions. Le facteur d'amortissement présenté sur la figure III.6(b) confirme ces conclusions car ses valeurs sont inférieures à 1 chose qui montre que le comportement élastique est dominant dans l'échantillon étudié.



(a)

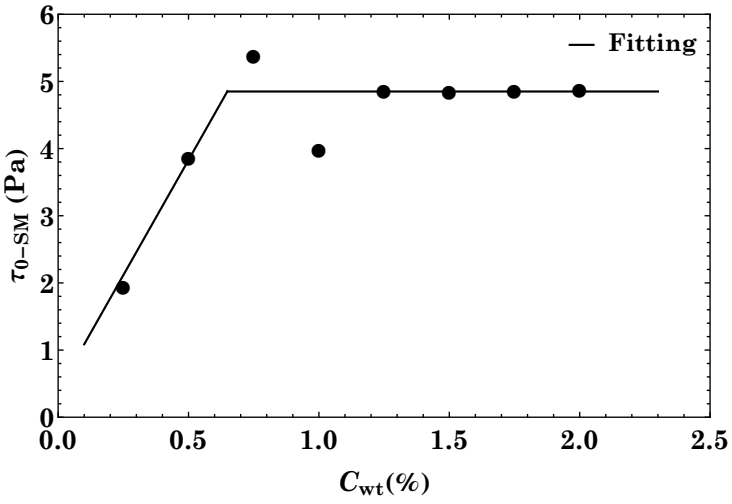


(b)

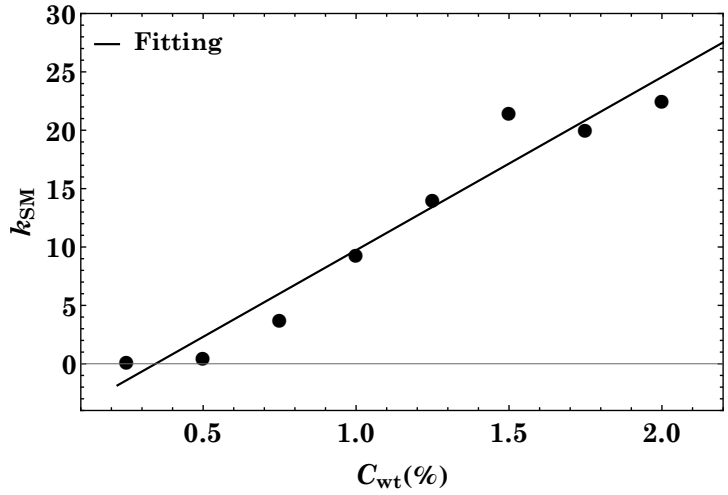
FIGURE III.6 – Tests de balayages en fréquence pour les module de conservation et de perte G' et G'' en (a) et le facteur d'amortissement en (b)

III.5 Effet de la concentration sur les paramètres rhéologiques

La partie centrale de ce travail consiste à étudier l'effet de la concentration du polymère sur les paramètres rhéologique intervenant dans la loi constitutive de Souza-Mendes. La figure III.7 montre la variation de la contrainte seuil τ_0 et de la consistance k en fonction de la concentration de la gomme de xanthane. La contrainte seuil présente deux évolutions. Dans l'intervalle $C_{wt} \in [0.25 - 1\%]$, la contrainte seuil augmente linéairement, en suite elle garde une valeur constante autour de $\tau_0 = 4.85\ Pa$ dans l'intervalle $C_{wt} \in [1 - 2\%]$. La consistance du fluide présenter un comportement différent, elle augmente linéairement sur toute la plage de concentrations et cela s'explique par la densité qui augmente en augmentant la concentration, et par conséquent les frottements au sein de l'échantillon vont augmenter ce qui augmente la consistance du fluide.



(a)

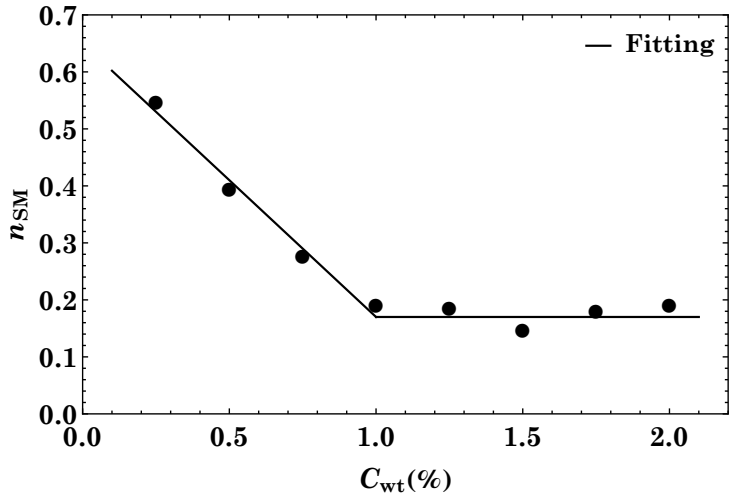


(b)

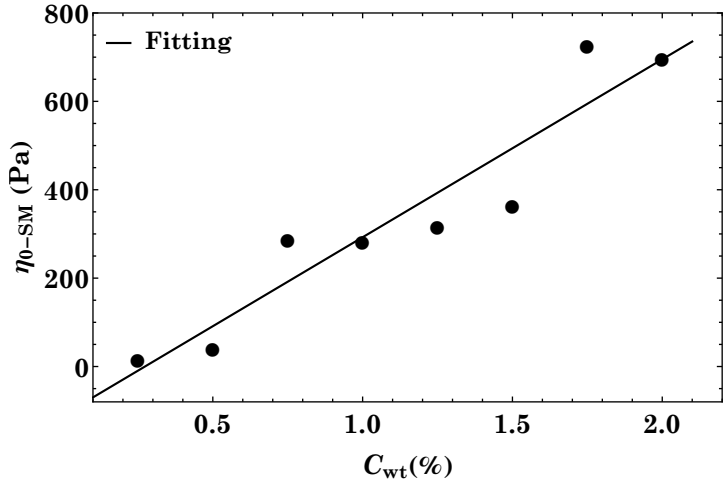
FIGURE III.7 – Évolution de la contrainte seuil τ_0 (a) et de la consistance k (b) en fonction de la concentration du polymère

L'évolution de l'indice de structure et la viscosité initiale du fluide en fonction de la concentration est présentée sur la figure III.8. L'indice de structure diminue linéairement dans l'intervalle $C_{wt} \in [0.25 - 1\%]$ ensuite elle garde une valeur constante autour de $n = 0.17$ dans l'intervalle $C_{wt} \in [1 - 2\%]$. La viscosité initiale η_0 augmente, de façon monotone sur toute la plage des concentrations, linéairement et on peut dire que ce résultat à un sens physique comme celui de la consistance.

Nous pouvons conclure que la concentration influence directement les paramètres rhéologiques de la loi de comportement de Souza-Mendes. D'autres grandeurs physiques font l'objet d'étudier leurs influences sur les paramètres rhéologiques comme le pH et la température et qu'on met dans nos futurs perspectives.



(a)



(b)

FIGURE III.8 – Évolution de l'indice de structure n (a) et de la viscosité initiale η_0 (b) en fonction de la concentration du polymère

Conclusion Générale

La gomme de xanthane, en tant que polysaccharide aux propriétés rhéologiques exceptionnelles, joue un rôle crucial dans diverses applications industrielles grâce à ses capacités épaississantes et stabilisantes. Ce mémoire a exploré en profondeur la relation entre la concentration de gomme de xanthane et ses paramètres rhéologiques, mettant en évidence l'importance de cette relation pour optimiser les formulations industrielles.

L'étude bibliographique a permis de rassembler des connaissances essentielles sur la production, la structure et les propriétés physicochimiques de la gomme de xanthane, fournissant un cadre théorique robuste pour les analyses rhéologiques. Les travaux antérieurs ont démontré que la gomme de xanthane présente un comportement pseudoplastique, où la viscosité diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement, et que ce comportement peut être modélisé par des lois de comportement telles que le modèle de Herschel-Bulkley. Dans notre étude noua avons démontré que le modèle de Souza-Mendes qui est une régularisation du modèle d eHerschel-Bulkley est le plus approprié pour décrire le comportement rhéologique de la gomme de xanthane.

Les investigations sur la structure microscopique et les propriétés physicochimiques de la gomme de xanthane ont révélé l'influence significative de la concentration sur ces propriétés. En augmentant la concentration, la viscosité à faible taux de cisaillement augmente considérablement, modifiant ainsi les paramètres d'écoulement et affectant directement les performances des produits finis. Ces résultats soulignent l'importance d'une caractérisation précise et détaillée pour prédire et contrôler les performances de la gomme de xanthane dans des systèmes complexes.

Enfin, la caractérisation rhéologique détaillée de la gomme de xanthane a permis de mieux comprendre comment ajuster les formulations pour obtenir les propriétés souhaitées. En modélisant correctement le comportement rhéologique en fonction de la concentration, les industries peuvent améliorer la texture, la stabilité et la performance de leurs produits.

Ce mémoire a mis en lumière l'importance de la concentration de gomme de xanthane sur ses propriétés rhéologiques, offrant des perspectives précieuses pour son utilisation optimale dans diverses applications industrielles. Les connaissances acquises ici ouvrent la voie à des innovations futures dans la formulation de produits contenant de la gomme de xanthane, contribuant ainsi au développement de solutions plus efficaces et performantes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

[1] G. Sworn, "Handbook of hydrocolloids," *Williams Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, p. 186-203, 2000.

[2] F Garcia-Ochoa, V. Santos, J. Casas et E Gómez, "Xanthan gum : production, recovery, and properties," *Biotechnology advances*, t. 18, n° 7, p. 549-579, 2000.

[3] R. Lapasin, S. Pricl et al., *Rheology of Industrial Polysaccharides : Theory and Applications*, 1995.

[4] G. Kaouther, B. M. N. Elhoda et Y. Madiha, "Développement d'un systéme pharmaceutique à base de biopolymères," mém. de mast., Université Yahia Fares - Médéa, 2022.

[5] C. Saidou, "Propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des gommes hydrocolloïdes des écorces de Triumfetta cordifolia et Bridelia thermifolia," thèse de doct., Grenoble, 2012.

[6] T. R. Bhardwaj, M. Kanwar, R. Lal et A. Gupta, "Natural gums and modified natural gums as sustained-release carriers," *Drug development and industrial pharmacy*, t. 26, n° 10, p. 1025-1038, 2000.

[7] A. Alam et E. Parrott, "Effect of aging on some physical properties of hydrochlorothiazide tablets," *Journal of pharmaceutical sciences*, t. 60, n° 2, p. 263-266, 1971.

[8] E. Paquet, "Etude de la stabilité des fibres alimentaires seules et en mélange dans un breuvage à base de jus de fruits et compréhension de leur effet sur les réponses glycémique et insulinémique," 2010.

[9] F Aguilar, R Crebelli, A Di Domenico et al., "Re-evaluation of xanthan gum (E 415) as a food additive.," *EFS2*, t. 15, e04909, 2017.

[10] S. M. Amine, B. Rahil et Y. M. Melha, "Formulation Et Caracterisation D'un Systeme A Liberation Modifiee A Base De Bioplymeres," mém. de mast., Université Yahia Fares - Médéa, 2021.

[11] A. Randa, S. Saloua et Z. Y, "Synthèse Et Caractérisation Des Dérivés Amphiphiles À Base De Biopolymères," mém. de mast., Université Yahia Fares - Médéa, 2021.

[12] D. F. Petri, "Xanthan gum : A versatile biopolymer for biomedical and technological applications," *Journal of Applied Polymer Science*, t. 132, n° 23, 2015.

[13] T. K Giri, A. Thakur et D. K Tripathi, "Biodegradable hydrogel bead of casein and modified xanthan gum for controlled delivery of theophylline," *Current Drug Therapy*, t. 11, n° 2, p. 150-162, 2016.

[14] S. Brahim, B. A., G. Abderazak et S. M. Faouzi, "Caractérisation rhéologique des fluides de forage à base d'eau, En Présence d'un inhibiteur de gonflement," mém. de mast., Université M'hamed Bougara - Boumerdes, 2010.

[15] A. Lazaridou et C. Biliaderis, "Molecular aspects of cereal β-glucan functionality : Physical properties, technological applications and physiological effects," *Journal of cereal science*, t. 46, n° 2, p. 101-118, 2007.

[16] T. A. Shittu, R. A. Aminu et E. O. Abulude, "Functional effects of xanthan gum on composite cassava-wheat dough and bread," *Food hydrocolloids*, t. 23, n° 8, p. 2254-2260, 2009.

[17] G. Nesrine et Z. M. Nasreddine, "Aptitude Technologique D'une Formule Riz-féverole.," mém. de mast., Université Frères Mentouri - Constantine 1, 2011.

[18] D. Peressini et A. Sensidoni, "Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs," *Journal of cereal Science*, t. 49, n° 2, p. 190-201, 2009.

[19] R. Crockett, P. Ie et Y. Vodovotz, "Effects of soy protein isolate and egg white solids on the physicochemical properties of gluten-free bread," *Food chemistry*, t. 129, n° 1, p. 84-91, 2011.

[20] D. Sabanis et C. Tzia, "Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread," *Food science and technology international*, t. 17, n° 4, p. 279-291, 2011.

[21] W. H. Herschel et R. Bulkley, "Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen," *Kolloid-Zeitschrift*, t. 39, p. 291-300, 1926.

[22] E Mitsoulis, S. Abdali et N. Markatos, "Flow simulation of herschel-bulkley fluids through extrusion dies," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, t. 71, n° 1, p. 147-160, 1993.

[23] P. R. Souza Mendes et E. S. Dutra, "Viscosity function for yield-stress liquids," *Applied Rheology*, t. 14, n° 6, p. 296-302, 2004.

[24] M. Khelfallah, "Caractérisation de l'écoulement d'un fluide Binghamien dans une conduite cylindrique," thèse de doct., Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2007.

[25] E. Bouyer, G. Mekhloufi, N. Huang, V. Rosilio et F. Agnely, "β-Lactoglobulin, gum arabic, and xanthan gum for emulsifying sweet almond oil : formulation and stabilization mechanisms of pharmaceutical emulsions," *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, t. 433, p. 77-87, 2013.

[26] B. Chahira, B. Naima, Z. Yamina et Y. E. Khadidja, "Etude de L'elaboration et la caracterisation physicochimique des hydrogels à base de biopolymeres," mém. de mast., Université Yahia Fares - Médéa, 2022.

[27] B. Nabila, M. Hanaa et Z. Yamina, "Elaboration Et Caracterisation Physicochimique Et Rheologique Des Hydrogels," mém. de mast., Université Yahia Fares - Médéa, 2022.

[28] *GOMME XANTHANE - Ataman Kimya*. adresse : `https://www.atamanchemicals.com/xanthan-gum_u24901/?lang=FR`.

[29] *Propriétés physico-chimiques*. adresse : `https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/fabrication-des-grands-produits-industriels-en-chimie-et-petrochimie-42319210/gomme-xanthane-j6670/proprietes-physico-chimiques-j6670niv10003.html`.

[30] O. G. Limited, "Stabilité de la gomme xanthane à l'acidité et à l'alcalinité - Actualités," avr. 2023. adresse : `http://fr.oceanchemgroup.com/news/xanthan-gum-s-stability-to-acidity-and-alkalin-66970361.html`.

[31] K. Kang et D. Pettit, "Industrial gums," *Polysaccharides and their Derivatives*, t. 341, 1993.

[32] I. H. Smith et G. W. Pace, "Recovery of microbial polysaccharides," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, t. 32, n° 1, p. 119-129, 1982.

[33] E. Wist, "Effect of the radioprotector WR 2721 on the response of metastatic Lewis lung carcinoma colonies to alkylating agents," *Acta Radiologica : Oncology*, t. 24, n° 3, p. 259-262, 1985.

[34] M. Zheng, H. Su, R. Xiao et al., "Effects of Polygonatum cyrtonema extracts on the antioxidant ability, physical and structure properties of carboxymethyl cellulose-xanthan gum-flaxseed gum active packaging films," *Food chemistry*, t. 403, p. 134 320, 2023.

[35] A. Bejenariu, M. Popa, L. Picton et D Le Cerf, "Effect of concentration, pH and temperature on xanthan conformation : A preliminary study before crosslinking," *Revue Roumaine de Chimie*, t. 55, n° 2, p. 147-152, 2010.

[36] J.-i. Kadokawa, T. Arimura, Y. Takemoto et K. Yamamoto, "Self-assembly of amylose-grafted carboxymethyl cellulose," *Carbohydrate polymers*, t. 90, n° 3, p. 1371-1377, 2012.

[37] A. N. Roy, L. Benyahia, M. Grisel et F. Renou, "Shear interfacial viscoelasticity of native and hydrophobically modified xanthan at oil/water interface," *Food hydrocolloids*, t. 61, p. 887-894, 2016.

[38] F. Laffleur et M. Michalek, "Modified xanthan gum for buccal delivery—a promising approach in treating sialorrhea," *International journal of biological macromolecules*, t. 102, p. 1250-1256, 2017.

[39] Z.-X. Li, H.-Q. Deng, J. Jiang et al., "Effect of hydrothermal treatment on the rheological properties of xanthan gum," *International Journal of Biological Macromolecules*, t. 270, p. 132 229, 2024.

[40] L. Wang, D. Xiang, C. Li, W. Zhang et X. Bai, "Effects of lyophilization and low-temperature treatment on the properties and conformation of xanthan gum," *Food Hydrocolloids*, t. 112, p. 106 352, 2021.

[41] F. Salehi et M. Inanloodoghouz, "Effects of ultrasonic intensity and time on rheological properties of different concentrations of xanthan gum solution," *International Journal of Biological Macromolecules*, p. 130 456, 2024.

[42] A. Faralli, E. Shekarforoush, F. Ajalloueian, A. C. Mendes et I. S. Chronakis, "In vitro permeability enhancement of curcumin across Caco-2 cells monolayers using electrospun xanthan-chitosan nanofibers," *Carbohydrate polymers*, t. 206, p. 38-47, 2019.

Résumés

ملخص

تمت كتابة رسالة الماستر هذه بهدف التوصيف الريولوجي لصمغ الزانثان، الموجود في العديد من المجالات مثل الأدوية ومستحضرات التجميل وحتى المنتجات الصناعية. تم إجراء مراجعة للأدبيات للإشارة إلى العمل الذي تم إنجازه بالفعل بشأن التوصيف الريولوجي لصمغ الزانثان، متبوعًا بفصل مخصص لوصف التركيب المجهري وكذلك التركيب الكيميائي لهذا السكاريد. ويهدف الجزء الأخير من العمل إلى تحديد القانون التأسيسي الذي يصف السلوك الريولوجي لصمغ الزانثان وتأثير التركيز، عند درجة حرارة ثابتة ودرجة الحموضة، على المعلمات الريولوجية للقانون التأسيسي.

الكلمات المفتاحية ـ صمغ الزانثان، التوصيف الريولوجي، البوليمر الحيوي، اللزوجة المرنة.

Abstract

This master's thesis is written with the aim of rheological characterization of xanthan gum, which is found in several fields such as pharmaceuticals, cosmetics, and even industrial products. A literature review was conducted to cite the work already done on the rheological characterization of xanthan gum, followed by a chapter dedicated to the description of the microscopic structure and also the chemical composition of this polysaccharide. The last part of the work aims to identify the constitutive law that describes the rheological behavior of xanthan gum and the effect of concentration, at constant temperature and pH, on the rheological parameters of the constitutive law.

Keywords : xanthan gum, rheological characterization, biopolymer, viscoelasticity

Résumé

Ce mémoire de master est rédigé dans une optique de caractérisation rhéologique de la gomme de xanthane qu'on trouve dans plusieurs domaines tels que : les produits pharmaceutiques, cosmétiques et même industriels. Une étude bibliographique a été effectuée pour citer les travaux déjà réalisés sur la caractérisation rhéologique de la gomme de xanthane suivie d'un chapitre consacré à la description de la structure microscopique et aussi la composition chimique de ce polysaccharides. La dernière partie du travail vise à identifier la loi constitutive qui décrit le comportement rhéologique de la gomme de xanthane et l'effet de la concentration, à une température et un pH constants, sur les paramètres rhéologiques de la loi constitutive.

Mots Clés : gomme de xanthane, Caractérisation rhéologique, biopolymère, viscoélésticité