الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
National Higher School of Advanced Technologies

Département Electrotechnique

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

Master 2

-Filière-

Génie des Procédés

-Spécialité -

Traitement des Eaux

- Thème -

De la Chitine au Chitosane : Transformation et Usages

Réalisé par

AIT TABET Riadh

Membres de Jury :

CHEIKH Assira	MCB ENSTA	Présidente
SMAIL Fatima	MAA ENSTA	Examinatrice
ZEMMOURI Hassiba	Prof ENSTA	Encadrante

Alger, le 26/06/2024

Année universitaire 2023–2024

Dédicaces

Je reconnais que mes mots ne sauraient suffire à récompenser vos faveurs, mais je dédie humblement ce travail

À ma mère, Ton amour m'a guidé à travers chaque défi, et ta présence a illuminé chaque pas de mon chemin, tes prières sont le secret de mon succès. Que tes prières soient exaucées et que Dieu te bénisse abondamment.

À mon père, Pour ton encouragement constant, tes sacrifices et tes sages conseils. Merci de croire en moi et de me pousser à atteindre mes objectifs. Que le Seigneur t'offre abondamment Sa bénédiction et Sa protection.

À mes deux frères Mohamed et Abderrahim, Dans chaque éclat de rire et dans chaque épreuve surmontée, je trouve la force de continuer grâce à vous. Puissiez-vous être comblés de joie et de succès dans toutes vos futures.

À mes oncles et tantes paternels, Votre soutien inébranlable a été un roc sur lequel je me suis appuyé. Puisse Dieu vous envelopper de sa protection et vous combler de ses bienfaits.

À mes oncles et tantes maternels, Vos prières ont été ma force et votre amour ma lumière dans les moments sombres. Que la grâce divine vous accompagne à chaque instant.

À mes grands-parents, Vos prières ont illuminé mon chemin et ont été le souffle de vie qui a guidé chacun de mes pas. Que Dieu vous accorde longévité, santé et paix intérieure, et que vos bénédictions continuent de nous envelopper de leur douceur bienveillante.

À mes amis Zakaria, Lakhdar et Amine, Vous avez été les compagnons de mes plus belles aventures et les gardiens de mes secrets les plus profonds. Que nos liens d'amitié continuent de grandir et de s'épanouir.

À tous ceux qui ont généreusement partagé leurs connaissances avec moi, je vous adresse ma profonde gratitude. Votre soutien et vos conseils ont été inestimables dans mon parcours.

À vous tous, ma reconnaissance éternelle.

AITTABET Riadh,

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce mémoire. C'est par Sa grâce que j'ai pu surmonter les défis et atteindre cet objectif.

Je voudrais ensuite adresser mes sincères remerciements à **Pr. Zemmouri H**, mon encadrante, pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et sa bienveillance tout au long de cette aventure académique. Son expertise et son dévouement ont été une source d'inspiration constante. Merci de m'avoir guidé avec tant de compétence et de générosité.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux membres du **jury**, **Dr. Cheikh A** et **Mme. Smail F** qui ont accepté d'examiner mon travail et de partager leurs précieuses observations et recommandations.

Je remercie **Mme. Nadi Souad**, ingénieur laboratoires de l'ENSTA, pour son appui et ses encouragements.

Enfin, à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce mémoire, je vous adresse mes plus sincères remerciements. Que Dieu vous bénisse tous pour votre générosité et votre soutien indéfectible.

Merci infiniment.

الملخص: يستكشف هذا العمل إمكانيات الشيتين والشيتوسان، وهما بوليمران حيويان مشتقان أساسًا من الهياكل الخارجية للقشريات، في تطبيقات متنوعة. يغطي الفصل الأول تاريخ ومصادر وطرق استخراج وتحويل الشيتين إلى شيتوسان. ثم يستعرض الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والخصائص المثبطة للبكتيريا والفطريات للشيتوسان. وأخيرًا، يتم مناقشة التطبيقات المتعددة للشيتوسان في مجالات مختلفة، بما في ذلك الزراعة والطب الحيوي ومستحضرات التجميل وصناعة الأغذية والصيدلة والبيئة. يتم التركيز بشكل خاص على استخدام الشيتوسان في معالجة المياه، مما يبرز فعاليته في إزالة الملوثات وتحسين جودة المياه.

الكلمات المفتاحية:الشيتين، الشيتوسان، البوليمرات الحيوية، الاستخراج، الخصائص، التطبيقات، معالجة المياه

Résumé : Ce travail explore le potentiel de la chitine et du chitosane, deux biopolymères dérivés principalement des exosquelettes de crustacés, dans diverses applications. Le premier chapitre couvre l'histoire, les sources, et les méthodes d'extraction et de transformation de la chitine en chitosane. Il examine ensuite les propriétés physico-chimiques, biologiques, bactériostatiques et fongistatiques du chitosane. Enfin, les multiples applications du chitosane dans divers domaines, notamment l'agriculture, le biomédical, la cosmétique, l'industrie alimentaire, la pharmaceutique et l'environnement, sont discutées. Une attention particulière est accordée à l'utilisation du chitosane dans le traitement des eaux, mettant en évidence son efficacité pour éliminer les polluants et améliorer la qualité de l'eau.

Mots clés : Chitine, Chitosane, Biopolymères, Extraction, Propriétés, Applications, Traitement des eaux

Abstract: This work explores the potential of chitin and chitosan, two biopolymers primarily derived from crustacean exoskeletons, in various applications. The first chapter covers the history, sources, and methods of extraction and transformation of chitin into chitosan. It then examines the physicochemical, biological, bacteriostatic, and fungistatic properties of chitosan. Finally, the multiple applications of chitosan in various fields, including agriculture, biomedical, cosmetics, food industry, pharmaceuticals, and environment, are discussed. Special attention is given to the use of chitosan in water treatment, highlighting its effectiveness in removing pollutants and improving water quality.

Key words: Chitin, Chitosan, Biopolymers, Extraction, Properties, Applications, Water treatment

TABLES DE MATIERES

Liste des figures i

Liste des tableaux ii

Liste des abréviations iii

Introduction Général 1

CHAPITRE I Chitine et Chitosane *2*

I.1 Introduction 3

I.2 Historique 3

I.3 La chitine et le chitosane 4

I.3.1 La chitine 4

I.3.2 Source de la chitine 4

I.3.3 Le chitosane 5

I.3.4 Source de chitosane 5

I.4 Extraction de la chitine et sa transformation en chitosane 6

I.4.1 Déminéralisation 6

I.4.2 Déprotéinisation 7

I.4.3 Blanchiment 7

I.5 Préparation du chitosane à partir de la chitine (Processus de désacétylation) 8

I.6 Préparation de chitosane à partir de la chitine avec un traitement biologique 9

I.7 Solubilité de la chitine 10

I.8 Solubilité du chitosane 10

I.9 Propriétés du chitosane 10

I.9.1 Propriétés physico-chimiques 10

I.9.2 Propriétés biologiques 13

I.9.3 Propriétés bactériostatiques et fongistatiques 15

I.10 Applications du chitosane 16

I.10.1 Agriculture 16

I.10.2 Biomédical 16

I.10.3 Cosmétique 16

I.10.4 Industrie alimentaire 17

I.10.5 Pharmaceutique 17

I.10.6 Environnementale 17

I.11 Applications du chitosane dans le traitement des eaux 18

Conclusion 19

Références Bibliographie 20

Liste des figures

FIGURE I-1 : STRUCTURE CHIMIQUE DE LA CHITINE _____ 4

FIGURE I-2 : STRUCTURE CHIMIQUE DU CHITOSANE _____ 5

FIGURE I-3 : PRINCIPALES ETAPES DE L'EXTRACTION DE LA CHITINE A SA TRANSFORMATION EN CHITOSANE __ 6

FIGURE I-4 : REACTION CHIMIQUE DE DESACETYLATION DE LA CHITINE (DA EST LE DEGRE D'ACETYLATION) __ 8

FIGURE I-5 : CONVERSION DE LA CHITINE EN CHITOSANE PAR DESACETYLATION _____ 11

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 : SOURCES POTENTIELLES DE CHITINE _____ 4

TABLEAU I-2 : COMPARAISON ENTRE L'EXTRACTION CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE DE LA CHITINE ET DU CHITOSANE _____ 9

TABLEAU I-3 : RELATION ENTRE LES PARAMETRES STRUCTURAUX ET LES PROPRIETES DU CHITOSANE(HIJAZI, 2014)_____ 15

Liste des abréviations

DD : Degré déacétylation

DMAc : diméthylacétam

MW : poids moléculaires

N : Azote

Introduction Général

L'environnement représente le véritable défi du 21ème siècle, dans un contexte où la qualité totale et le développement durable sont des priorités. Ce défi implique la prévention de la pollution et la réduction des risques environnementaux dans une optique de développement durable. La dépollution des eaux et la minimisation des impacts environnementaux sont des objectifs cruciaux, tant pour les pays industrialisés que pour les pays en développement. Pour atteindre ces objectifs, les biopolymères jouent un rôle clé dans de nombreuses applications et secteurs, permettant de respecter les normes de qualité imposées par les réglementations.

Les biopolymères issus des produits marins présentent une grande diversité. Parmi eux, on trouve des polysaccharides comme l'alginate de sodium et le chitosane. Ces biopolymères offrent une alternative intéressante aux polymères dérivés de la pétrochimie grâce à leurs propriétés physico-chimiques et biologiques remarquables. Ces caractéristiques permettent des applications ciblées dans divers domaines, notamment l'agriculture, la pharmacie, biomédical et le traitement des eaux. Actuellement, ces polymères sont principalement extraits des crevettes et des crabes(Ben Seghir, 2019).

La chitine est un poly(N-acétyle-glucosamine), faisant partie de la famille des polysaccharides. C'est le deuxième polymère naturel le plus abondant après la cellulose, avec laquelle elle partage des similitudes structurelles(DAVID, 2018). On la trouve dans l'exosquelette des crustacés et des arthropodes marins, ainsi que dans la paroi cellulaire de nombreuses espèces de champignons et de levures. La chitine est biodégradable, biocompatible et non toxique, mais elle est insoluble dans l'eau et dans beaucoup de solvants organiques, ce qui limite son utilisation.

Le chitosane, dérivé de la chitine par un traitement chimique ou biologique appelé déacétylation, comporte des groupements amines (-NH2) chargés positivement, ce qui lui confère une nature cationique particulièrement utile en milieu acide. Le chitosane possède plus de centres réactifs grâce à ses fonctions alcool et amine. Ces caractéristiques en font un matériau de choix pour des applications en médecine, pharmacologie, biotechnologie, et bien d'autres domaines(Nguyen, Le, Nguyen, Le, & Pham, 2023).

Dans cette optique, notre travail consiste à présenter des généralités sur les biopolymères. Il comporte par une étude bibliographique sur la chitine et le chitosane en détaillant leurs structures chimiques, leurs propriétés physico-chimiques, leurs procédés d’extraction ainsi que leurs applications.

CHAPITRE I Chitine et Chitosane

CHAPITRE I Chitine et Chitosane

I.1 Introduction

Le terme "biopolymères" désigne généralement les polymères produits par des organismes vivants. Ces matériaux proviennent de sources naturelles comme l'amidon, la cellulose et les alginates. On les considère comme renouvelables sur le plan biologique, car ils sont fabriqués à partir de ressources naturelles qui peuvent se régénérer(Huseyn et al., 2024).

La chitine et son dérivé, le chitosane, sont des biopolymères naturels dont l'importance ne cesse de croître. Ils trouvent des applications variées, allant de l'agriculture au domaine biomédical. Beaucoup de ces utilisations nécessitent un contrôle précis de la masse moléculaire et de la polymolécularité.

L'intérêt pour la chitine et le chitosane s'est accru en raison de leurs propriétés écologiques : ils sont biodégradables et biorésorbables, ce qui les rend particulièrement intéressants dans une démarche de protection de l'environnement.

I.2 Historique

Le développement de la chitine se divise en cinq périodes distinctes : de sa découverte en 1799 jusqu'en 1894, suivie d'une période de confusion et de controverses de 1894 à 1930. Ensuite, entre 1930 et 1950, la chitine a été largement explorée. De 1950 à 1970, elle a traversé une phase de doute. Enfin, depuis 1970, la chitine connaît une période d'application active(Crini, 2019).

En 1799, Hatchett a décalcifié les carapaces de crevettes, de crabes, de homards et de langoustines avec des acides minéraux. Il a observé qu'elles produisaient une effervescence modérée et devenaient rapidement souples et plastiques, prenant une couleur jaunâtre et une texture cartilagineuse tout en conservant leur forme originale. Bien que cette expérience soit la première mention de la chitine calcifiée chez les invertébrés.

La découverte de la chitine est généralement attribuée à Henri Braconnot, directeur du jardin botanique de Nancy (France), en 1811. Braconnot a découvert la chitine dans les champignons et l'a appelée "fungine". Il a noté que cette substance n'était pas soluble dans les solutions aqueuses d'acides.

Une décennie plus tard, en 1823, la même substance a été découverte chez certains insectes (coléoptères) et a été nommée "chitine" par Auguste Odier, dérivé du mot grec "kitos" signifiant "enveloppe"(No & Meyers, 1995).

L'histoire du chitosane, le principal dérivé de la chitine, commence en 1859 avec les travaux de Rouget. Cependant, le terme "chitosane" a été introduit en 1894 par Hoppe-Seyler(Jaouen, 1994).

Entre 1930 et 1940, ces biopolymères ont suscité beaucoup d'intérêt en Orient, principalement pour des applications médicales et la purification de l'eau (Kumar, 2000). Aujourd'hui, nous savons que la chitine et le chitosane sont abondamment présents dans la nature et constituent des ressources renouvelables(Muzzarelli, 1983).

La production annuelle de chitine dans la nature est estimée à 10^9 tonnes. Actuellement, la chitine n'est pas encore largement exploitée et commercialisée comparativement à la cellulose(Peter, 2005).

I.3 La chitine et le chitosane

I.3.1 La chitine

La chitine est le polysaccharide naturel le plus abondant dans la nature après la cellulose. La chitine est un polysaccharide azoté, issue de la polymérisation de N-acétylglucosamine, liée par une liaison osidique du type β-1,4, qui appartient à la famille des glucides(Moussian, 2019).

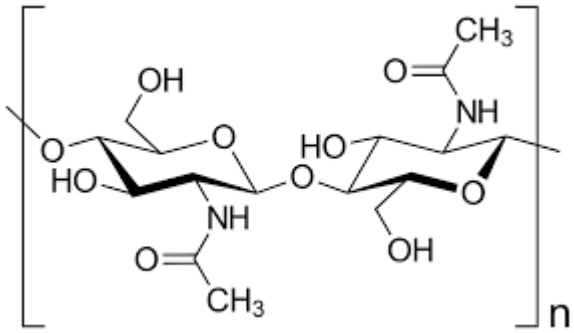


Figure I-1 : Structure chimique de la Chitine

I.3.2 Source de la chitine

La chitine est Abondante chez les mollusques, les insectes et les crustacés, ainsi que présente dans les champignons et certaines algues, la chitine joue un rôle crucial dans la structure des coquilles et des carapaces, ainsi que dans la rigidité cellulaire et le contrôle osmotique. Les déchets de l'industrie des fruits de mer, comme les coquilles de crevettes et de crabes, constituent des sources précieuses de chitine. Le tableau (I.1) illustre les différentes sources potentielles de la chitine(Younes & Rinaudo, 2015).

Tableau I-1 : Sources potentielles de chitine

Source	Chitine (%)
Cuticule de crevette	30-40
Cuticule de bouquet	20-30
Cuticule de crabe	15-30

Plume de calmar	20-40
Coquille d'huitre/palourde	3-6
Cuticule d'insecte	5-25
Paroi de cellule fongique	10-25

I.3.3 Le chitosane

Le chitosane est un copolymère linéaire flexible de 2-acétamido-2-déoxy-β-D glucopyranose et 2-amino-2-déoxy-β-D-glucopyranose liés en β (1-4)(Morin-Crini et al., 2019).

Le chitosane est un polysaccharide obtenu par désacétylation (partielle ou totale) de la chitine, l'un des polymères naturels les plus abondants dans la nature aux côtés de la cellulose. Ce processus se réalise à partir des carapaces de crustacés, comme les crabes et les crevettes, en utilisant des méthodes chimiques ou microbiologiques(Gades & Stern, 2003).

La Figure (I.2) présente le motif du chitosane. La structure de chitine et du chitosane diffèrent uniquement au niveau des groupements en position C2 : acétamide pour la chitine et amine pour le chitosane(DAVID, 2018).

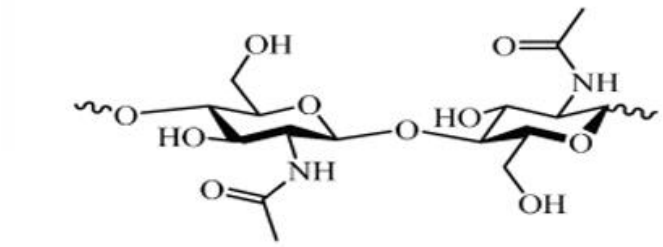


Figure I-2 : structure chimique du chitosane

I.3.4 Source de chitosane

Le chitosane est très rare à l'état naturel et se trouve principalement dans certains micro-organismes fongiques et les exosquelettes d'insectes. Pour l'extraire chimiquement à partir de la chitine, il faut passer par des étapes de déminéralisation, de déprotéinisation et de désacétylation. Toutefois, sa production commerciale repose principalement sur la désacétylation de la chitine, qui provient surtout des déchets de pêche(El-Araby, Janati, Ullah, Ercisli, & Errachidi, 2024).

I.4 Extraction de la chitine et sa transformation en chitosane

La totalité du processus permettant de passer de l'extraction de la chitine à l'obtention de chitosan est schématisée sur la figure (I.3)

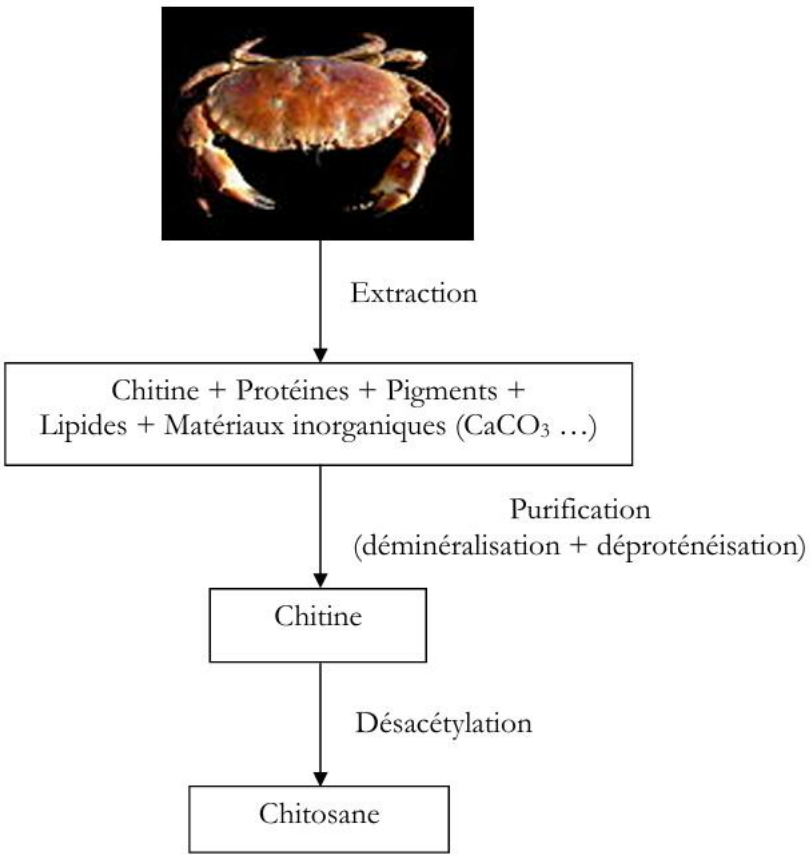


Figure I-3 : Principales étapes de l'extraction de la chitine à sa transformation en chitosane

De nombreuses méthodes ont été développées pour préparer la chitine à partir des exosquelettes. En général, ces méthodes consistent à éliminer les éléments minéraux (déminéralisation), les protéines (déprotéinisation) et la couleur (blanchiment).

I.4.1 Déminéralisation

La déminéralisation est généralement réalisée par un traitement acide utilisant des réactifs tels que HCl, HNO3, H2SO4, CH3COOH et HCOOH. Cependant, le HCl est le réactif préféré(Younes & Rinaudo, 2015), car il permet de transformer les minéraux insolubles de la carapace en sels solubles. Le carbonate de calcium, principal composé minéral de la carapace, réagit avec le HCl pour former du chlorure de calcium, de l'eau et du dioxyde de carbone, comme illustré par la réaction suivante :

$$[CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + CO_2 (\uparrow) + H_2O]$$

La plupart des autres minéraux présents réagissent de manière similaire et forment des sels solubles en présence d'acide. Ces sels peuvent être séparés de la chitine par simple filtration suivie d'un lavage. Une grande quantité de mousse est produite durant la déminéralisation en raison du dégagement de dioxyde de carbone. La vitesse d'expansion de cette mousse dépend de la vitesse de la réaction de déminéralisation et peut entraîner le débordement du milieu réactionnel. L'ajout d'un agent anti-moussant permet une libération plus constante du gaz, réduisant ainsi le risque de débordement de la solution(Al Shaqsi, Al Hoqani, Hossain, Al Sibani, & Reports, 2020).

I.4.2 Déprotéinisation

Dans cette étape, les protéines liées à la chitine (chitinoprotéines) sont éliminées par hydrolyse basique en utilisant divers agents tels que Na2CO3, NaHCO3, KOH, K2CO3, Ca(OH)2, Na2SO3, NaHSO3, Na3PO4 et Na2S (Badaoui, 2012). Une solution aqueuse diluée de NaOH à une température élevée (entre 65°C et 100°C) peut être utilisée pour éliminer les protéines(Younes & Rinaudo, 2015).

La déprotéinisation de la chitine peut être réalisée avec une solution de NaOH 1M, en utilisant un rapport solide/liquide de (1:20 g/ml) à 70°C pendant une nuit(Lv et al., 2023). De plus, une étude montre que la déprotéinisation peut être effectuée avec une solution d'hydroxyde de sodium à 10% à une température de 80°C pendant 2 heures, avec un rapport solide/liquide de 1:10 g/ml, pour éliminer les protéines(Abubakar, Jimoh, Yahya, & Auta, 2017).

I.4.3 Blanchiment

Le pigment présent dans les carapaces de crustacés forme un complexe avec la chitine. Pour les applications industrielles, il est nécessaire de décolorer la chitine. Le blanchiment est un processus souhaitable, souvent réalisé à l'aide d'agents oxydants tels que KMnO4, NaOCl, SO2, NaHSO3, Na2S2O4 ou H2O2.

Ce traitement permet d'éliminer les traces résiduelles de pigments, comme les caroténoïdes, sans altérer les propriétés physico-chimiques de la chitine et du chitosane. Pour obtenir un produit commercialement acceptable, le blanchiment doit durer plus d'une heure afin d'aboutir à une chitine blanche. L'utilisation de l'acétone peut également produire une chitine presque blanche(Olafadehan, Ajayi, & Amoo, 2020).

I.5 Préparation du chitosane à partir de la chitine (Processus de désacétylation)

L'extraction de la chitine est aujourd'hui relativement facile à réaliser. Cependant, l'étape la plus délicate reste la désacétylation. Ce processus nécessite la substitution des groupements acétyles pour obtenir du chitosane, ce qui peut réduire la longueur de la chaîne du polymère. En ajustant la durée du traitement alcalin et la température, il est possible de produire différents types de chitosane à partir d'une même chitine(Novikov, Konovalova, Dolgopyatova, & Microbiology, 2022).

La désacétylation est généralement effectuée par un traitement basique utilisant de l'hydroxyde de sodium ou de potassium concentré (40-50%) à une température égale ou supérieure à 100°C, pendant au moins 30 minutes, afin d'éliminer certains ou tous les groupements acétyle de la chitine(Zargar, Asghari, & Dashti, 2015).

La réaction industrielle de désacétylation de la chitine est rarement complète. Dans des conditions acides ou basiques, la majorité des groupements amide sont théoriquement hydrolysables. Cependant, en raison de la fragilité des liaisons glycosidiques de la chaîne de chitine, l'hydrolyse acide est à éviter dans ce type de réaction. De plus, l'arrangement trans des substituants en C-2 et C-3 augmente la résistance du groupement acétamide en position C-2 à l'hydrolyse alcaline.

Ainsi, il est crucial de bien choisir le traitement pour désacétyler le polymère d'origine (la chitine), afin de minimiser la dégradation de la chaîne du polysaccharide tout en obtenant une désacétylation uniforme le long des chaînes polymères(Novikov et al., 2022). La figure (I.4) présente la réaction industrielle de désacétylation de la chitine.

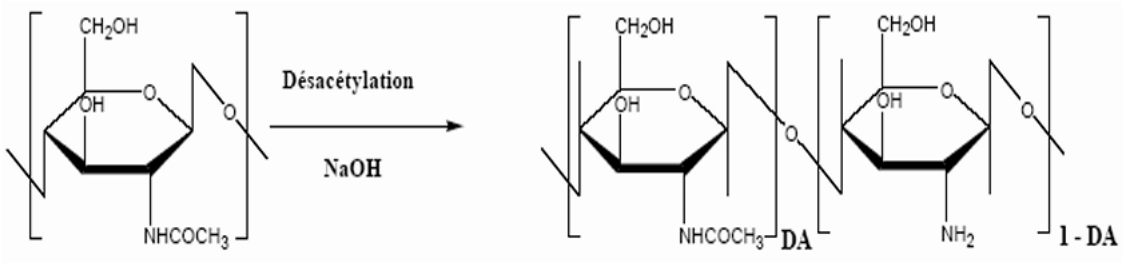


Figure I-4 : Réaction chimique de désacétylation de la chitine (DA est le degré d'acétylation)

I.6 Préparation de chitosane à partir de la chitine avec un traitement biologique

La chitine et le chitosane peuvent être obtenus par procédé d'extraction biologiques. Les méthodes biologiques d'extraction réussissent à maitriser les conditions spécifiques qui peuvent être contrôlées(Sobczak-Kupiec et al., 2021).

(Sedaghat, Yousefzadi, Toiserkani, & Najafipour, 2017) Il a souligné que la fermentation microbienne peut être une méthode avantageuse pour préparer la chitine. Cependant, il y a plusieurs facteurs qui influencent son efficacité. Notamment, les concentrations en glucose et en carbone, le pH initial et celui pendant la culture, la taille de l'inoculum, ainsi que la durée et la température de fermentation. Tous ces paramètres rendent cette méthode plus complexe que les méthodes chimiques.

Tableau I-2 : comparaison entre l'extraction chimique et biologique de la chitine et du chitosane

Extraction	Traitement	Avantage	Inconvénient
Chimique	Déminéralisation : par traitement acide avec HCl, HNO3, H2SO4… Déprotiénisation : par traitement alcalin à l'aide de NaOH ou KOH. Déacétylation : par traitement alcalin avec un fort NaOH ou KOH.	Temps de traitement court. DD% élevé du produit final. Utilisé à l'échelle industrielle. Élimination complète des sels organiques.	Respectueux de l'environnement. Les minéraux et protéines solubilisés ne peuvent pas être utilisés comme nutriments humains et animaux.
Biologique	Déminéralisation : utilisation d'un traitement à l'acide lactique produit par les bactéries. Déprotiénisation : par les protéases sécrétées dans le milieu de fermentation. Déacétylation : chitine déacétylase produite par des bactéries.	Haute qualité du produit final. Sans danger pour l'environnement. Les minéraux et protéines retirés peuvent être utilisés comme nutriments humains et animaux	Long temps de traitement (plusieurs jours). Limité aux études à l'échelle du laboratoire.

I.7 Solubilité de la chitine

Comme la cellulose, la chitine est insoluble dans les solvants ordinaires. Elle est cristalline et parfois orientée dans son état naturel. Les acides forts, les fluoroalcools et les chloroalcools peuvent dissoudre la chitine, mais ces solvants la dégradent et sont très dangereux à manipuler. Un solvant efficace a été proposé par Austin et al. en 1981, consistant en du diméthylacétamide (DMAc) contenant 5 % de chlorure de lithium. La dissolution de la chitine reste un problème majeur pour son utilisation, en raison des liaisons hydrogène intra- et intermoléculaires présentes dans ce polymère à l'état solide(Vaidya, Hussain, Gaugler, & Smith, 2019).

I.8 Solubilité du chitosane

La solubilité du chitosane est l'un de ses principaux atouts par rapport à la chitine, qui ne se dissout que dans des solvants très toxiques. Bien que le chitosane soit insoluble dans l'eau et les solvants organiques, cette polyamine se dissout dans les acides aqueux dilués. Il est soluble dans l'acide chlorhydrique et dans des acides organiques aqueux comme l'acide formique, l'acide acétique, l'acide oxalique et l'acide lactique. L'efficacité de la solubilité dépend de l'acide utilisé et de sa concentration. La solubilité diminue à mesure que la concentration de l'acide augmente. Par ailleurs, les solutions aqueuses de certains acides, tels que l'acide phosphorique et l'acide sulfurique, s'avèrent être de mauvais solvants pour le chitosane(Huseyn et al., 2024).

Plusieurs facteurs influencent la solubilité du chitosane, notamment la température et la durée de la réaction de désacétylation, la concentration alcaline, les traitements préalables appliqués lors de l'isolation de la chitine, le rapport chitine/base, et la taille des particules.

À un pH de 7, la solubilité du chitosane est faible. Lorsque le pH augmente, le chitosane a tendance à précipiter ou à former un gel. Ce gel se forme en raison de la création de complexes polyioniques entre le chitosane et les hydrocolloïdes anioniques(Morin-Crini et al., 2019).

I.9 Propriétés du chitosane

I.9.1 Propriétés physico-chimiques

Le chitosane est défini par son degré de désacétylation, sa viscosité et son poids moléculaire. Le degré de désacétylation (DD%) correspond au pourcentage molaire de groupements N-acétylés éliminés. Ce paramètre est crucial car il influence toutes les propriétés physico-chimiques du chitosane, telles que la masse moléculaire, la viscosité et la solubilité, en faisant ainsi le paramètre le plus important. La mesure du DD% est une analyse courante lors de l'extraction de la chitine et de la préparation du chitosane. Plusieurs techniques existent pour déterminer le DD%, notamment le titrage potentiométrique, la spectroscopie infrarouge (IR),

la spectrophotométrie UV-visible (UV-VIS), l'analyse élémentaire et la résonance magnétique nucléaire (RMN), entre autres.

- **Degré de Désacétylation (DD)**

Bien que la chitine et le chitosane aient des désignations chimiques spécifiques, ils appartiennent en réalité à la même famille de polymères. La principale différence entre eux réside dans la proportion de groupes acétyles, qui est exprimée par le degré d'acétylation. Le degré d'acétylation indique le pourcentage de groupes acétyles par rapport aux groupes non acétylés(El Knidri, Belaabed, Addaou, Laajeb, & Lahsini, 2018).

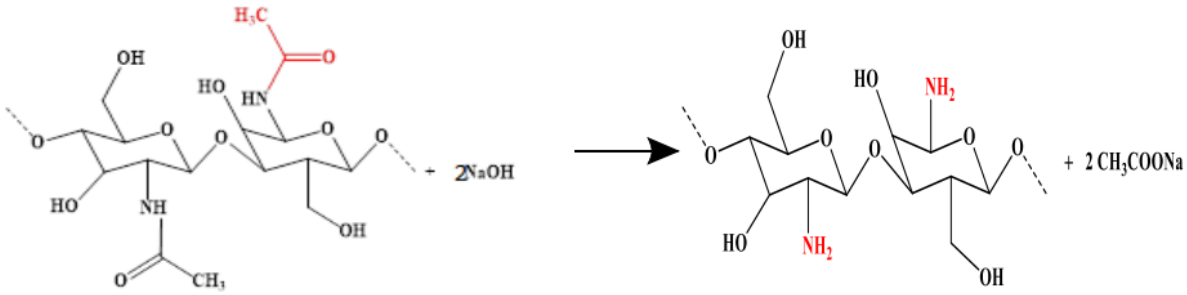


Figure I-5 : Conversion de la chitine en chitosane par désacétylation

Le degré de désacétylation (DD) représente le pourcentage molaire de groupes N-acétylés éliminés. Ce paramètre est crucial car il influence toutes les propriétés physico-chimiques du chitosane, telles que la masse moléculaire, la viscosité et la solubilité, le rendant ainsi le plus important.

La mesure du DD est une analyse de routine essentielle lors de l'extraction de la chitine et de la préparation du chitosane. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer le DD, notamment le titrage potentiométrique ou volumétrique, la spectrométrie infrarouge (IR), la spectrophotométrie UV-visible (UV-VIS), l'analyse élémentaire et la résonance magnétique nucléaire (RMN)(Chatelet, Damour, & Domard, 2001).

- **Solubilité**

La solubilité de chaque chitosane est déterminée par la teneur en solides solubles dans l'eau (p/v) dans la solution de test. Elle dépend de divers facteurs tels que le poids moléculaire du polymère, le degré d'acétylation, le pH, la température et la cristallinité du(Aranaz et al., 2021).

Comparé à la chitine, le chitosane peut être facilement dissous dans certains acides dilués (uniquement des solutions acides polaires en raison de ses propriétés de cristallinité élevée). La

solubilité dépend des types d'acides (minéraux ou organiques) et de leur concentration(Hazmi, Ahmad, Akmal, & Ralib, 2021).

En général, le chitosane est soluble dans des solutions d'acide acétique à 1 % avec un pH d'environ 4, grâce à la protonation du groupe amino NH3+, ce qui provoque une répulsion électrostatique entre les chaînes polymères. Cela facilite la solubilité du sel de chitosane. Il est également soluble dans l'acide formique (à des concentrations de 0,2 à 100 %), l'acide chlorhydrique à 1 % avec un pH allant jusqu'à 6,5 (en raison d'un nombre réduit de groupes N-acétylés et de ses groupes amino primaires), ainsi que dans les acides lactique, glutamique et nitrique dilué. En revanche, le chitosane est insoluble dans les acides sulfurique et phosphorique(Casadidio et al., 2019; Zhang, Yang, & Technology, 2021).

- **Viscosité**

La viscosité du chitosane est influencée par son degré de désacétylation : plus le chitosane est désacétylé, plus il contient de groupements amines libres, ce qui le rend plus soluble et donc plus visqueux(Balbinoti et al., 2024).

La viscosité dépend également de la concentration du polymère (elle augmente avec la concentration), de la température (elle diminue à mesure que la température augmente), du poids moléculaire (elle augmente avec le poids moléculaire) et du pH (un pH plus bas entraîne une viscosité plus élevée)(El-Araby et al., 2024).

Ce paramètre est mesuré à l'aide d'un viscosimètre.

- **Poids moléculaire**

On peut évaluer le poids moléculaire du chitosane en utilisant une HPLC. Cependant, le viscomètre reste une approche facile et rapide pour déterminer le poids moléculaire en se basant sur la formule de Marc-Houwnik et Sakurada(Zemmouri, 2008).

- **Cristallinité**

Les trois configurations α, β et γ sont présentes en fonction du type de tissu. Elle est liée à des conséquences physiologiques particulières. Les chaînes antiparallèles sont présentes dans l'α-chitine. D'autre part, les brins de β-chitine sont parallèles.
On trouve moins souvent une troisième iso-forme, γ, qui alterne alignements parallèles et antiparallèles(Bousta & Bennammer, 2022).

I.9.2 Propriétés biologiques

- **Innocuité / toxicité**

Le chitosane est réputé pour son niveau d'innocuité et sa faible toxicité, ce qui a été prouvé par plusieurs études cliniques in vitro et in vivo chez l'animal et l'homme. Grâce à cette caractéristique, le chitosane peut être employé dans divers domaines tels que l'alimentation, la médecine et la biomédecine, ce qui explique sa polyvalence. Aucune toxicité ni effet secondaire n'a été observée lors d'une étude chez l'homme sur la chélation des graisses par administration orale de 4,5 g par jour de chitosane (DDA et PM non déterminés)(Rizeq, Younes, Rasool, & Nasrallah, 2019).

- **Biocompatibilité**

La chitine et le chitosane sont connus pour leur bonne biocompatibilité avec les cellules hôtes, mais cette propriété est influencée par plusieurs caractéristiques du polymère, notamment la source d'extraction, la méthode de préparation, le poids moléculaire (MW) et le degré de désacétylation (DD). Le chitosane présente une meilleure cytocompatibilité que la chitine, comme cela a été démontré in vitro sur des cellules myocardiques, endothéliales, épithéliales, ainsi que sur des fibroblastes, des hépatocytes, des chondrocytes et des kératinocytes. Cette biocompatibilité est principalement liée au DD, car une charge positive accrue du polymère augmente les interactions entre le chitosane et les cellules via les groupements amines libres. L'adhésion cellulaire dépend à la fois du DD et de la nature des cellules. Elle est plus marquée avec les fibroblastes, qui ont des charges négatives à leur surface, par rapport aux kératinocytes. Cependant, leur prolifération diminue avec l'augmentation du DD(Vo, Huang, Lemos, Mellor, & Novakovic, 2021).

Le chitosane ne présente pas de comportement antigénique, mais il possède des propriétés antithrombotiques et hémostatiques (hémocompatibilité), ainsi que des capacités de cicatrisation remarquables (cyto-compatibilité). Les recherches actuelles indiquent que le chitosane est un matériau sûr et sain. Toutefois, son utilisation est contre-indiquée en cas d'allergie aux fruits de mer(Rodrigues, Dionísio, Remunan Lopez, & Grenha, 2012).

- **Biodégradabilité**

Le chitosane est dégradé dans l'organisme principalement par des processus d'hydrolyse enzymatique et non enzymatique. Parmi les agents non enzymatiques, le monoxyde d'azote (NO) joue un rôle clé, notamment dans l'immunodépression qui suit de graves brûlures(Sanchez-Salvador, Balea, Monte, Negro, & Blanco, 2021).

Le lysozyme est l'enzyme principale responsable de la dégradation enzymatique du chitosane, en ciblant particulièrement les fractions plus acétylées (Hinaro et al., 1989). Les oligomères résultant de la dégradation du chitosane présentent une large distribution de tailles

et, selon leur structure, leurs propriétés biologiques sont encore mal comprises. Le taux de dégradation du chitosane dépend du degré d'acétylation (DA), qui influence également la forme solide et la cristallinité des hydrogels. Ainsi, le chitosane avec un faible DA connaît une vitesse de dégradation plus lente, pouvant s'étendre sur plusieurs mois, tandis que le chitosane avec un DA élevé se dégrade plus rapidement(Matica, Menghiu, & Ostafe, 2017; Sanchez-Salvador et al., 2021).

- **L'activité antibactérienne**

De plus, le chitosane possède des propriétés immunologiques, anti-tumorales, antibactériennes et antifongiques, ce qui lui permet d'agir contre de nombreux parasites et infections(Ardean et al., 2021).

Deux mécanismes ont été suggérés pour expliquer les actions antimicrobiennes du chitosane :

Le premier mécanisme repose principalement sur la charge positive du chitosane, qui interagit avec les phospholipides membranaires chargés négativement. Cette interaction perturbe la membrane cellulaire, réduisant les échanges de nutriments entre la bactérie et son environnement, ce qui conduit à la mort cellulaire(Yilmaz Atay & applications, 2019). La clé de l'activité antimicrobienne du chitosane réside dans la charge positive de ses groupements amines. Les interactions entre les cations du chitosane et les anions à la surface des bactéries modifient la perméabilité de la membrane cellulaire.

Le second mécanisme implique une perturbation de la synthèse des ARN messagers par le chitosane, via une interaction avec l'ADN(Li & Zhuang, 2020).

- **Activité antioxydante**

Certains pays limitent l'utilisation de ces antioxydants en raison de leurs risques potentiels pour la santé. Au cours des dernières années, l'activité antioxydante du chitosane et de ses composés a été davantage prise en compte. On a signalé que le chitosane et ses dérivés jouent un rôle d'antioxydants en capturant les radicaux d'oxygène (comme l'hydroxyle, le superoxyde, l'alkyle) ainsi que les radicaux DPPH très stables testés in vitro(Bagheri et al., 2022; Fernandes & Coimbra, 2023).

- **La mucoadhésion**

De nombreux facteurs influencent la mucoadhésion du chitosane, notamment les variables physiologiques et les propriétés physicochimiques du chitosane. Le mucus est composé de glycoprotéines appelées mucines, qui possèdent des charges négatives en raison des résidus d'acide sialique. Dans l'environnement acide de l'estomac, le chitosane est chargé positivement, ce qui lui permet d'interagir avec les mucines par des forces électrostatiques. Il a été observé

que l'augmentation du poids moléculaire du chitosane améliore sa capacité à pénétrer la couche de mucine, renforçant ainsi la mucoadhésion. De plus, un degré d'acétylation (DA) plus élevé accroît la densité de charge de la molécule, améliorant également ses propriétés adhésives (Aranaz et al., 2021).

Des expériences in vitro suggèrent qu'un pourcentage élevé de DA combiné à un faible poids moléculaire favorise également une dégradation plus rapide (Casadidio et al., 2019).

I.9.3 Propriétés bactériostatiques et fongistatiques

es propriétés du chitosane, telles que sa charge cationique et son poids moléculaire, sont déterminantes dans ses interactions avec les bactéries(Younes & Rinaudo, 2015).

En milieu acide, la surface cellulaire de la membrane bactérienne, riche en phospholipides négativement chargés, interagit avec le chitosane, qui est positivement chargé. Les études montrent un lien fort entre la quantité de chitosane adsorbé et son efficacité à inhiber les bactéries(Younes & Rinaudo, 2015).

Le poids moléculaire du chitosane joue un rôle clé : les particules de chitosane à faible poids moléculaire (MW) peuvent pénétrer la paroi cellulaire des bactéries, se lier à l'ADN et bloquer la synthèse de l'ARNm et la transcription de l'ADN. En revanche, le chitosane à haut poids moléculaire peut interagir avec la surface cellulaire, altérant ainsi la perméabilité cellulaire, ou former une barrière imperméable autour de la cellule, empêchant le transport de solutés essentiels(Younes & Rinaudo, 2015).

En outre, un degré de déacétylation (DD) élevé, associé à un faible poids moléculaire, renforce l'activité antibactérienne du chitosane. Cela se traduit par une meilleure perméabilisation et une interaction électrostatique accrue avec la membrane bactérienne (Casadidio et al., 2019).

Tableau I-3 : Relation entre les paramètres structuraux et les propriétés du chitosane(Hijazi, 2014)

Propriété	Caractéristique structurel
Biodégradabilité	↑DD ↑MW
Biocompatibilité	↑DD ↓MW
Activité antioxydant	↑DD ↓MW
La mucoadhésion	↑DD ↑MW
Activité antimicrobienne et antifongique	↑DD ↓MW

La solubilité	↑DD ↑MW
La cristallinité	↑DD ↓MW

I.10 Applications du chitosane

Grâce à ses caractéristiques particulières, comme sa compatibilité avec la nature, sa capacité à se dégrader et ses propriétés antimicrobiennes, le chitosane, en tant que biopolymère polyvalent, est employé dans différentes applications, notamment :

I.10.1 Agriculture

Le chitosane et la chitine sont reconnus pour leurs propriétés phytosanitaires et antifongiques, permettant de déclencher des mécanismes de défense chez les plantes contre les infections et les parasites, même à des doses très faibles, de l'ordre de quelques milligrammes par mètre cube d'eau. En agriculture, le chitosane est particulièrement prisé pour améliorer la santé et la productivité des cultures. Il peut être appliqué sous forme de solution, de poudre ou utilisé pour enrober les semences. En tant qu'engrais organique et stimulateur de croissance, le chitosane aide les plantes à mieux résister aux maladies et aux stress environnementaux. L'enrobage des semences avec du chitosane est une pratique courante qui améliore la germination et favorise une croissance plus vigoureuse des plantes, contribuant ainsi à des rendements agricoles accrus et plus sains(Faqir, Ma, Chai, & Environment, 2021).

I.10.2 Biomédical

La chitine et le chitosane se présentent sous diverses formes d'application, notamment les hydrogels, membranes, nanofibres, billes, micro/nanoparticules, échafaudages et éponges. Ils sont couramment utilisés dans de nombreuses applications biomédicales, telles que la cicatrisation des plaies, l'ingénierie tissulaire et la fabrication de lentilles ophtalmiques(Bandara, Du, Carson, Bradford, & Kommalapati, 2020).

Le chitosane et ses dérivés sont reconnus pour leurs propriétés antibactériennes, étant généralement non toxiques ou faiblement toxiques. Parmi ces dérivés, le chitosane quaternaire, un sel d'ammonium, est le plus utilisé. De plus, le chitosane joue un rôle important dans la fabrication de médicaments anti-inflammatoires et est utilisé comme fibre de remplissage dans les matériaux de pansement(W. Wang et al., 2020).

I.10.3 Cosmétique

De nombreuses applications dans le domaine de la cosmétique sont basées sur ces caractéristiques filmogènes. Il est possible de retenir des principes actifs dans des films ou des billes de chitosane. Ces substances actives sont libérées lorsqu'elles entrent en contact avec la peau en raison de la baisse du pH. Les produits les plus fréquemment utilisés comprennent des produits de soin pour la peau, contre l'acné et pour les cheveux, en particulier pour leur

flexibilité. Cette méthode s'appuie sur les caractéristiques électrostatiques du chitosane(Thambiliyagodage et al., 2023).

I.10.4 Industrie alimentaire

Le chitosane a été approuvé comme additif alimentaire et fibre diététique pour ses effets hypocholestérolémiants, ainsi que comme ingrédient fonctionnel pour le consommateur. Depuis les années 1990, il est également approuvé comme additif alimentaire au Japon et en Corée, en raison de sa nature bioactive et de sa charge cationique. Le chitosane est utilisé dans divers domaines nutritionnels, notamment comme additif alimentaire, ingrédient fonctionnel, agent antimicrobien et antioxydant pour la protection des aliments. Il est également employé pour les revêtements antimicrobiens des fruits et légumes, dans les produits alimentaires anti-cholestérolémiques et comme nutraceutique(Crini, 2019).

Les activités antimicrobiennes du chitosane se manifestent sous forme de solution, de poudre, de films comestibles et de revêtements contre les micro-organismes. Les résultats les plus efficaces ont été obtenus avec du chitosane de faible poids moléculaire, qui peut être utilisé comme agent antimicrobien contre les micro-organismes alimentaires. Le chitosane et ses dérivés offrent un large éventail d'applications uniques dans l'industrie alimentaire, telles que la conservation des aliments contre la détérioration microbienne, la prolongation de la durée de conservation, la formation de films biodégradables et les emballages alimentaires. Ainsi, il est utilisé comme matériau d'emballage ou de revêtement(Crini, 2019).

I.10.5 Pharmaceutique

Le chitosane est fréquemment employé dans le domaine pharmaceutique comme un excipient et un agent de libération contrôlée dans la production de médicaments. La biodisponibilité des médicaments est améliorée grâce à ses propriétés biocompatibles et mucoadhésives, ce qui permet une libération prolongée et ciblée des substances actives, ce qui améliore l'efficacité des traitements(Sivanesan et al., 2022). Il est également utilisé comme antimicrobien(Goy, Britto, & Assis, 2023).

I.10.6 Environnementale

Dans le domaine d'environnement, le chitosane est employé dans le domaine du traitement de l'eau et de la gestion des déchets. Il contribue à l'élimination des métaux lourds, des colorants et d'autres contaminants organiques des eaux usées grâce à ses capacités de chélation et de floculation. Cela favorise la purification de l'eau et la préservation de l'environnement(Kumar & Ravi, 2023).

I.11 Applications du chitosane dans le traitement des eaux

L'eau est une ressource essentielle sur Terre, et sa contamination peut avoir des conséquences graves pour tous les êtres vivants. L'élimination des polluants de l'eau est donc une priorité majeure. Le chitosane, dérivé de la chitine, s'est révélé efficace pour éliminer les métaux lourds tels que le chrome vert de l'eau (Pourmortazavi et al., 2019). Grâce à ses propriétés de bio-adsorption, ce biopolymère peut adsorber des ions de métaux lourds, des colorants et des molécules de protéines. Les dérivés protonés du chitosane, dotés de groupes hydroxyles et amino, améliorent sa capacité à interagir électrostatiquement avec les contaminants, facilitant ainsi la biosorption des métaux lourds(Yanat, Schroën, & Polymers, 2021).

Le chitosane est également utilisé comme floculant dans le traitement des eaux usées, réduisant la teneur en matières en suspension (MES) responsables de la turbidité de 70 à 98 %, et la demande chimique en oxygène (DCO) de 55 à 80 %. Sa densité de charge élevée permet aux dérivés de la chitine d'interagir efficacement avec les MES, les micro-organismes et les ions métalliques, ce qui est exploité pour piéger, éliminer ou mesurer les composés dangereux. En outre, le chitosane est utilisé pour recycler les effluents de l'industrie textile en retenant les pigments. Il est principalement employé comme floculant, aidant à agglomérer les colloïdes en suspension, les métaux lourds, les colorants des eaux de teintureries, ainsi que les molécules aromatiques et phénoliques. Les flocs formés sont ensuite retenus par filtration, réduisant ainsi les MES de 50 %. Une autre approche consiste à intégrer le chitosane directement dans les membranes de filtration. De plus, des techniques d'adsorption utilisant le chitosane et ses dérivés ont été développées pour éliminer les colorants anioniques en solution aqueuse. L'adsorption des ions métalliques par le chitosane a fait l'objet de nombreuses études, en raison de ses propriétés bioadhésives qui permettent de former des nanoparticules stables avec différents métaux en solution(M. Wang, Feng, You, & Zheng, 2021).

Conclusion

La chitine et le chitosane, deux biopolymères naturels dérivés principalement des exosquelettes de crustacés, représentent des matériaux d'une grande polyvalence et d'intérêt croissant dans divers domaines scientifiques et industriels. Ce mémoire a exploré en profondeur les multiples facettes de ces substances, en commençant par leur historique, leurs sources, et les méthodes d'extraction et de transformation, pour aboutir à une analyse détaillée de leurs propriétés et applications.

L'étude a démontré que la chitine, bien que largement disponible, nécessite des processus de déminéralisation, de déprotéinisation et de blanchiment pour être convertie en chitosane, un dérivé qui présente une solubilité et des propriétés fonctionnelles supérieures. Le chitosane se distingue par ses propriétés physico-chimiques, biologiques, bactériostatiques et fongistatiques, qui en font un matériau de choix pour une multitude d'applications.

Dans le domaine biomédical, le chitosane est utilisé pour ses capacités de cicatrisation et son activité antimicrobienne. En cosmétique, il est prisé pour ses propriétés hydratantes et filmogènes. L'industrie alimentaire et pharmaceutique bénéficient également de ses capacités de gélification et d'encapsulation. En agriculture, il est employé comme biostimulant et agent de protection des plantes.

Cependant, c'est dans le traitement des eaux que le chitosane révèle tout son potentiel. Ses propriétés de floculation et d'adsorption permettent d'éliminer efficacement les polluants, y compris les métaux lourds, les colorants et les matières en suspension, contribuant ainsi de manière significative à la protection de l'environnement et à l'amélioration de la qualité de l'eau.

Les perspectives d'avenir pour l'utilisation de la chitine et du chitosane dans le traitement des eaux sont prometteuses. Le développement de matériaux composites, l'intégration dans des nanostructures, et l'optimisation des procédés de production pourraient encore accroître leur efficacité et leur adoption à grande échelle. La recherche continue dans ce domaine est essentielle pour exploiter pleinement les avantages de ces biopolymères et répondre aux défis environnementaux actuels.

En conclusion, la chitine et le chitosane, grâce à leurs propriétés uniques et leurs multiples applications, jouent un rôle crucial dans le développement de solutions durables et innovantes. Leur potentiel, particulièrement dans le traitement des eaux, ouvre la voie à des avancées significatives pour la protection de l'environnement et la gestion des ressources en eau.

Références Bibliographie

Abubakar, I. A., Jimoh, A., Yahya, M. D., & Auta, M. (2017). Optimizing Deproteinization of Chitin Using Response Surface Methodology.

Al Shaqsi, N. H. K., Al Hoqani, H. A. S., Hossain, M. A., Al Sibani, M. A. J. B., & Reports, B. (2020). Optimization of the demineralization process for the extraction of chitin from Omani Portunidae segnis. *23*, 100779.

Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Heras Caballero, A., & Acosta, N. J. P. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *13*(19), 3256.

Ardean, C., Davidescu, C. M., Nemeş, N. S., Negrea, A., Ciopec, M., Duteanu, N., . . . Musta, V. J. I. J. o. M. S. (2021). Factors influencing the antibacterial activity of chitosan and chitosan modified by functionalization. *22*(14), 7449.

Bagheri, M., Validi, M., Gholipour, A., Makvandi, P., Sharifi, E. J. B., & medicine, t. (2022). Chitosan nanofiber biocomposites for potential wound healing applications: Antioxidant activity with synergic antibacterial effect. *7*(1), e10254.

Balbinoti, J. R., Jorge, R. M. M., dos Santos Junior, R. E., Balbinoti, T. C. V., de Almeida Coral, L. A., & de Jesus Bassetti, F. J. J. o. E. C. E. (2024). Treatment of low-turbidity water by coagulation combining Moringa oleifera Lam and polyaluminium chloride (PAC). *12*(1), 111624.

Bandara, S., Du, H., Carson, L., Bradford, D., & Kommalapati, R. J. N. (2020). Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials. *10*(10), 1903.

Ben Seghir, B. (2019). *Extraction et Optimisation de Degré de Désacétylation du Chitosane.*

Bousta, N. E., & Bennammer, F. (2022). *Etude de l'adsorption du vert de méthyle par un matériau hybride à base de chitosane.* université ibn khaldoun-tiaret,

Casadidio, C., Peregrina, D. V., Gigliobianco, M. R., Deng, S., Censi, R., & Di Martino, P. J. M. d. (2019). Chitin and chitosans: Characteristics, eco-friendly processes, and applications in cosmetic science. *17*(6), 369.

Chatelet, C., Damour, O., & Domard, A. J. B. (2001). Influence of the degree of acetylation on some biological properties of chitosan films. *22*(3), 261-268.

Crini, G. J. E. C. L. (2019). Historical review on chitin and chitosan biopolymers. *17*(4), 1623-1643.

DAVID, M. (2018). *Fonctionnalisation du chitosane: vers un revêtement biosourcé pour la protection des métaux contre la corrosion.* Politecnico di Torino, Turin,

El-Araby, A., Janati, W., Ullah, R., Ercisli, S., & Errachidi, F. J. F. i. C. (2024). Chitosan, chitosan derivatives, and chitosan-based nanocomposites: eco-friendly materials for advanced applications (a review). *11*, 1327426.

El Knidri, H., Belaabed, R., Addaou, A., Laajeb, A., & Lahsini, A. J. I. j. o. b. m. (2018). Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. *120*, 1181-1189.

Faqir, Y., Ma, J., Chai, Y. J. P., Soil, & Environment. (2021). Chitosan in modern agriculture production. *67*(12), 679-699.

Fernandes, P. A., & Coimbra, M. A. J. C. P. (2023). The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview. 120965.

Gades, M. D., & Stern, J. S. J. O. r. (2003). Chitosan supplementation and fecal fat excretion in men. *11*(5), 683-688.

Goy, R., Britto, D., & Assis, O. (2023). A review of the antimicrobial activity of chitosan. *19*, 58.

Hazmi, A., Ahmad, F., Akmal, M. M., & Ralib, A. (2021). *Microbial chitosan for the fabrication of piezoelectric thin film.* Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Hijazi, N. (2014). *Développement de composites nanostructurés à base de biopolyesters et de nanoparticules de chitosane générées par des procédés assistés par CO2 supercritique.* Ecole des Mines d'Albi-Carmaux,

Huseyn, P. I., Ibrahimova, M. J., Abbasov, V. M., Nasirov, F. A., Aslanbeyli, A. M. J. P. o. P., & Refining, O. (2024). CHITOSAN BIOPOLYMER IN INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT. *25*(1).

Jaouen, D. J. P. T. e. p. (1994). Chitine, Chitosane et Dérivés.

Kumar, M., & Ravi, N. (2023). A review of chitin and chitosan applications. *Journal of Applied Polymer Science,, 46*(1), 1-27.

Li, J., & Zhuang, S. J. E. P. J. (2020). Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives. *138*, 109984.

Lv, J., Lv, X., Ma, M., Oh, D.-H., Jiang, Z., & Fu, X. J. C. P. (2023). Chitin and chitin-based biomaterials: A review of advances in processing and food applications. *299*, 120142.

Matica, A., Menghiu, G., & Ostafe, V. J. N. F. i. C. (2017). Biodegradability of chitosan based products. *26*(1).

Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., Torri, G., Crini, G. J. S. a. r. c., chitosan: history, f., & innovations. (2019). Fundamentals and applications of chitosan. 49-123.

Moussian, B. J. T. c.-c. o. (2019). Chitin: Structure, chemistry and biology. 5-18.

Muzzarelli, R. A. J. C. P. (1983). Chitin and its derivatives: new trends of applied research. *3*(1), 53-75.

Nguyen, H. M., Le, T. T. N., Nguyen, A. T., Le, H. N. T., & Pham, T. T. J. R. a. (2023). Biomedical materials for wound dressing: Recent advances and applications. *13*(8), 5509-5528.

No, H. K., & Meyers, S. P. J. J. o. a. f. p. t. (1995). Preparation and characterization of chitin and chitosan—a review. *4*(2), 27-52.

Novikov, V. Y., Konovalova, I., Dolgopyatova, N. J. A. B., & Microbiology. (2022). The mechanism of chitin and chitosan deacetylation during long-term alkaline treatment. *58*(3), 309-314.

Olafadehan, O., Ajayi, T., & Amoo, K. J. T. F. o. C. E. (2020). Optimum conditions for extraction of chitin and chitosan from Callinectes amnicola shell waste. *54*, 1173-1194.

Peter, M. G. (2005). Chitin and chitosan from animal sources.

Rizeq, B. R., Younes, N. N., Rasool, K., & Nasrallah, G. K. J. I. j. o. m. s. (2019). Synthesis, bioapplications, and toxicity evaluation of chitosan-based nanoparticles. *20*(22), 5776.

Rodrigues, S., Dionísio, M., Remunan Lopez, C., & Grenha, A. J. J. o. f. b. (2012). Biocompatibility of chitosan carriers with application in drug delivery. *3*(3), 615-641.

Sanchez-Salvador, J. L., Balea, A., Monte, M. C., Negro, C., & Blanco, A. J. I. J. o. B. M. (2021). Chitosan grafted/cross-linked with biodegradable polymers: A review. *178*, 325-343.

Sedaghat, F., Yousefzadi, M., Toiserkani, H., & Najafipour, S. J. I. J. o. B. M. (2017). Bioconversion of shrimp waste Penaeus merguiensis using lactic acid fermentation: An alternative procedure for chemical extraction of chitin and chitosan. *104*, 883-888.

Sivanesan, I., Tasneem, S., Hasan, N., Shin, J., Muthu, M., Gopal, J., & Oh, J.-W. J. P. (2022). Surveying the oral drug delivery avenues of novel chitosan derivatives. *14*(11), 2131.

Sobczak-Kupiec, A., Drabczyk, A., Florkiewicz, W., Głąb, M., Kudłacik-Kramarczyk, S., Słota, D., . . . Tyliszczak, B. J. M. (2021). Review of the applications of biomedical compositions containing hydroxyapatite and collagen modified by bioactive components. *14*(9), 2096.

Thambiliyagodage, C., Jayanetti, M., Mendis, A., Ekanayake, G., Liyanaarachchi, H., & Vigneswaran, S. J. M. (2023). Recent advances in chitosan-based applications—a review. *16*(5), 2073.

Vaidya, A. A., Hussain, I., Gaugler, M., & Smith, D. A. J. C. p. (2019). Synthesis of graft copolymers of chitosan-poly (caprolactone) by lipase catalysed reactive extrusion. *217*, 98-109.

Vo, N. T., Huang, L., Lemos, H., Mellor, A. L., & Novakovic, K. J. J. o. A. P. S. (2021). Genipin-crosslinked chitosan hydrogels: Preliminary evaluation of the in vitro biocompatibility and biodegradation. *138*(34), 50848.

Wang, M., Feng, L., You, X., & Zheng, H. J. C. (2021). Effect of fine structure of chitosan-based flocculants on the flocculation of bentonite and humic acid: Evaluation and modeling. *264*, 128525.

Wang, W., Meng, Q., Li, Q., Liu, J., Zhou, M., Jin, Z., & Zhao, K. J. I. j. o. m. s. (2020). Chitosan derivatives and their application in biomedicine. *21*(2), 487.

Yanat, M., Schroën, K. J. R., & Polymers, F. (2021). Preparation methods and applications of chitosan nanoparticles; with an outlook toward reinforcement of biodegradable packaging. *161*, 104849.

Yilmaz Atay, H. J. F. c. d. d., & applications, b. (2019). Antibacterial activity of chitosan-based systems. 457-489.

Younes, I., & Rinaudo, M. J. M. d. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *13*(3), 1133-1174.

Zargar, V., Asghari, M., & Dashti, A. J. C. r. (2015). A review on chitin and chitosan polymers: structure, chemistry, solubility, derivatives, and applications. *2*(3), 204-226.

Zemmouri, H. (2008). *Utilisation du chitosane comme agent floculant dans le traitement des eaux.* Alger, Ecole Nationale Polytechnique,

Zhang, H., Yang, F.-Q. J. E., & Technology, M. (2021). Equipment-free quantitative determination of urea based on paper-based sensor via urease-mediated chitosan viscosity change. *148*, 109830.