

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة مولاي الطاهر، سعيدة  
Université MOULAY Tahar, Saida



N° d'ordre  
كلية العلوم  
Faculté des Sciences  
قسم البيولوجيا  
Département de Biologie  
**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master II**  
En Biotechnologie  
**Spécialité: biotechnologie végétale**  
Thème

---

## **Structures et Applications de la Pectine dans l'industrie Alimentaire, Biomédicale et Pharmaceutique**

---

Présenté par:

- M<sup>elle</sup>: SAIDI Rekia
- M<sup>elle</sup> : BADRI Ahlem

Soutenu le:

Devant le jury composé de:

Président	Mr. HENNI Mustapha	MCB Université UMTS
Examineur	Mme. BENABDESSLEM Yasmina	MCA Université UMTS
Rapporteur	Mr.HACHEM Kadda	Pr. Université UMTS

**Année universitaire 2022/2023**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة مولاي الطاهر، سعيدة  
Université MOULAY Tahar, Saida



N° dordre  
كلية العلوم  
Faculté des Sciences  
قسم البيولوجيا  
Département de Biologie  
**Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master II**  
En Biotechnologie  
**Spécialité: Biotechnologie végétale**  
Thème

---

## **Structures et Applications de la Pectine dans l'industrie Alimentaire, Biomédicale et Pharmaceutique**

---

Présenté par:

- M<sup>elle</sup>: SAIDI Rekia
- M<sup>elle</sup> : BADRI Ahlem

Soutenu le:

Devant le jury composé de:

Président	Mr. HENNI Mustapha	MCB Université UMTS
Examineur	Mme. BENABDESSLEM Yasmina	MCA Université UMTS
Rapporteur	Mr.HACHEM Kadda	Pr. Université UMTS

**Année universitaire 2022/2023**

# Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné la force et la patience. Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements et notre vive connaissance à Pr. Hachem K, pour nous avoir encadré et dirigé ce travail. Sa patience exemplaire et son sens de communication, sa disponibilité, ses conseils et la confiance qu'il nous a accordée, nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous tenons à dire un grand merci à Mr. HENNI Mustapha d'avoir accepté de présider le jury, et pour son aide et ses idées, et pour nous avoir permis de développer nos connaissances.

Nous adressons encore nos remerciements aux membres des jurys qui ont bien voulu examiner ce manuscrit et juger ce travail.

Également à Mme. BENABDESSLEM Yasmina nous avons grandement apprécié ses qualités humaines et bénéficié de sa connaissance. Et tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, et à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, et qui nous ont témoigné leur intérêt et leur soutien.

# Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A ma chère mère, a mon cher père.

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes freres, Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A tous ceux qui ont cru en moi et mes capacités et qui y croient encore.

Rekia

# Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs et mes chers frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille et mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour moi.

AHLEM

## **Résumé**

La pectine est un polysaccharide biocompatible doté d'une activité biologique intrinsèque, qui peut présenter différentes structures en fonction de sa source ou de sa méthode d'extraction. L'extraction de pectine à partir de divers sous-produits industriels se présente comme une option verte pour la valorisation des résidus agro-industriels en produisant un produit à haute valeur commerciale. La pectine est sensible aux changements physiques, chimiques et/ou enzymatiques. Les nombreux groupes fonctionnels présents dans sa structure peuvent stimuler différentes fonctionnalités, et certaines modifications peuvent permettre à la pectine d'avoir d'innombrables applications dans l'alimentation, l'agriculture, les médicaments et la biomédecine. La tendance actuelle est d'utiliser la pectine pour produire des revêtements comestibles destinés à protéger les denrées alimentaires, des films biologiques antimicrobiens, des nanoparticules, des agents cicatrisants et des traitements contre le cancer. Les progrès de la méthodologie, l'utilisation de différentes sources d'extraction et les connaissances sur la modification structurelle ont considérablement élargi les propriétés, les caractéristiques et les avantages de la pectine. Récemment, la pectine structurellement modifiée a montré de meilleures propriétés fonctionnelles et bioactivités que la pectine native. En outre, la pectine peut être utilisée en conjonction avec une grande variété de biopolymères aux propriétés différenciées et aux fonctionnalités spécifiques. Dans ce contexte, cette revue présente les caractéristiques structurelles et les propriétés de la pectine, ainsi que des informations sur la modification de ce polysaccharide, ses applications respectives, ses perspectives et ses défis futurs.

**Mots clés :** Pectine, Sous-produits, aliments, extraction, structure, propriétés, applications.

## Abstract:

Pectin is a biocompatible polysaccharide with intrinsic biological activity, which may exhibit different structures depending on its source or extraction method. The extraction of pectin from various industrial by-products presents itself as a green option for the valorization of agro-industrial residues by producing a high commercial value product. Pectin is susceptible to physical, chemical, and/or enzymatic changes. The numerous functional groups present in its structure can stimulate different functionalities, and certain modifications can enable pectin for countless applications in food, agriculture, drugs, and biomedicine. It is currently a trend to use pectin to produce edible coating to protect foodstuff, antimicrobial bio-based films, nanoparticles, healing agents, and cancer treatment. Advances in methodology, use of different sources of extraction, and knowledge about structural modification have significantly expanded the properties, yields, and applications of this polysaccharide. Recently, structurally modified pectin has shown better functional properties and bioactivities than the native one. In addition, pectin can be used in conjunction with a wide variety of biopolymers with differentiated properties and specific functionalities. In this context, this review presents the structural characteristics and properties of pectin and information on the modification .

Keywords: by-products; extraction; food; pectin applications; polysaccharide; structural modification.

## ملخص :

البكتين هو عديد السكاريد المتوافق حيويًا مع النشاط البيولوجي الداخلي، والذي قد يظهر تراكيب مختلفة اعتمادًا على مصدر أو طريقة الاستخراج يقدم استخراج البكتين من مختلف المنتجات الثانوية الصناعية نفسها كخيار أخضر لثمين المخلفات الزراعية الصناعية من خلال انتاج منتج ذي قيمة تجارية عالية البكتين عرضة للتغيرات الفيزيائية والكيميائية أو الانزيمية، يمكن لبعض التعديلات ان تحمل البكتين لتطبيقات لا تحصى في الغذاء والزراعة والأدوية والطب الحيوي، وهو حاليا اتجاه لاستخدام البكتين لانتاج طلاء مطوب لحماية العلف، والأفلام الحيوية المضادة للميكروبات، والجسيمات النانوية، وعوامل الشفاء، وعلاج السرطان وقد أدى التقدم في المنهجية، واستخدام مصادر مختلفة لاستخراج، والمعرفة حول التعديل الهيكلي الى توسيع خصائص ونواتج، وتطبيقات هذا السكاريد المتعدد بشكل كبير. مؤخرا، أظهر البكتين المعدل هيكليا خصائص وظيفية ونشاطات حيوية أفضل من البكتين الأصلي. بالإضافة إلى ذلك، يمكن استخدام البكتين بالتزامن مع مجموعة واسعة البوليمرات الحيوية ذات الخصائص المتباينة والوظائف المحددة في هذا السياق، هذه المراجعة الخصائص الهيكلية للبكتين وخصائصه ومعلومات عن تعديل هذا السكاريد المتعدد وتطبيقاته وآفاقه والتحديات المقبلة التي يواجهها.

الكلمات الرئيسية: النواتج الفرعية; الاستخراج; الغذاء; تسمم البكتين; عديد السكاريد، تعديل هيكلي.



# Table des matières

REMERCIEMENT	
LISTE DES TABLEAUX.	
LISTE DES FIGURES.	
LISTE DES ABREVIATIONS.	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I LES PAROIS VEGETALE	
I.1. DEFINITION DE PAROI VEGETALE.....	4
I.2. STRUCTURE DE LA PAROI VÉGÉTALE .....	5
I.2.1. LAMELLE MOYENNE .....	5
I.2.2. PAROI PRIMAIRE.....	6
I.2.3. PAROI SECONDAIRE.....	7
I.3. LES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS DE LA PAROI.....	8
I.3.1. LES CONSTITUANTS POLYSACCHARIDIQUES .....	8
I.3.1.1. LA CELLULOSE .....	9
I.3.1.1.1. SYNTHÈSE DE LA CELLULOSE.....	10
I.3.1.2. LA CALLOSE .....	11
I.3.1.3. LES HÉMICELLULOSES.....	11
I.3.1.3.1. XYLOGLUCANE.....	12
I.3.1.3.2. XYLÈNES .....	13
I.3.1.3.3. MANNANES ET GLUCOMANNANES .....	13
I.3.1.3.3.1. SYNTHÈSE DES HÉMICELLULOSES .....	14
I.3.1.4. LES PECTINES .....	14
I.3.1.4.1. SYNTHÈSE DES PECTINES.....	15
I.3.1.4.2. GOMMES ET MUCILAGES.....	18
I.3.2. LES CONSTITUANTS NON POLYSACCHARIDIQUES.....	19
I.3.2.1. LES PROTÉINES PARIÉTALES .....	19
I.3.2.2. LES LIGNINES .....	20
I.3.3. LES SUBSTANCES D'ADCRUSTATION .....	21
CHAPITRE II LES PECTINES	
II.1. DÉFINITION .....	24
II.2. LES STRUCTURES DES SUBSTANCES PECTIQUES .....	24
II.2.1. Homogalacturonane.....	
II.2.2. Rhamnogalacturonane.....	26
II.2.2.1. Rhamnogalacturonane I.....	26
II.2.2.2. Rhamnogalacturonane II .....	27
II.2.3. Xylogalacturonane .....	28
II.3. PRINCIPALE SOURCE DE PECTINE.....	28
II.4. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES .....	29
II.4.1. SOLUBILITÉ ET PRÉCIPITATION.....	29
II.4.2. STABILITÉ ET DÉGRADATION .....	30
II.4.3. DÉGRADATION DES PECTINES .....	31
II.4.3.1. RÉACTIONS DE D'ESTÉRIFICATION .....	31
II.4.3.2. RÉACTIONS DE DÉPOLYMÉRISATION .....	31

II.4.4. Viscosité.....	31
II.5. PROPRIÉTÉS FONCTIONNELLES.....	32
II.5.1. PROPRIÉTÉS GÉLIFIANTS .....	32
II.5.3. GÉLIFICATION DES PECTINES FAIBLEMENT MÉTHYLES.....	33
II.5.4. PROPRIÉTÉS ÉMULSIFIANTS.....	33
II.6. LES MÉTHODES D'EXTRACTION DES PECTINES.....	34
II.6.1. MÉTHODES PHYSICO-CHIMIQUES .....	34
II.6.1.1. HYDROLYSE EN MILIEU ACIDE.....	35
II.6.1.2. LES AVANTAGES D'EXTRACTION EN MILIEU ACIDE .....	37
II.6.1.3. LES DÉSAVANTAGES D'EXTRACTION EN MILIEU ACIDE .....	37
II.6.1.4. EXTRACTION ALCALINE .....	38
II.7. MÉTHODES PHYSICO-CHIMIQUES ACTIVÉES.....	39
II.7.1. EXTRACTION PAR MICRO-ONDES .....	39
II.7.2. EXTRACTION ASSISTÉ PAR ULTRASONS .....	40
II.7.3. EXTRACTION AVEC DES AGENTS DE CHÉLATION.....	40
II.7.4. MÉTHODES ENZYMATIQUES .....	40
II.7.5. DOSAGE DES PECTINES.....	40
II.7.6. DOSAGE COLORIMÉTRIQUE .....	41
II.7.7. DOSAGE PAR CHROMATOGRAPHIE.....	41
CHAPITRE III LES APPLICATIONS DES PECTINES	
III.1. LES APPLICATIONS DES PECTINES .....	43
III.1.1. LES APPLICATIONS DE LA PECTINE DANS L'INDUSTRIE ALIMENTAIRE.....	43
III.1.2. LES APPLICATIONS DE LA PECTINE DANS L'INDUSTRIE PHARMACEUTIQUES .....	46
III.1.2.1. L'EFFET DE LA PECTINE SUR LA BIODISPONIBILITE DES MINERAUX ET VITAMINES .....	47
III.1.2.2. PECTINE ET SANTE .....	48
III.1.2.3. EFFET THERAPEUTIQUES DES PECTINES.....	49
III.1.3. LES APPLICATIONS DE LA PECTINE DANS L'INDUSTRIE BIOMEDICALE.....	49
III.1.4. LES APPLICATIONS DE LA PECTINE DANS L'INDUSTRIE COSMETIQUE .....	51
CONCLUSION GENERALE.....	55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

## Liste des tableaux

<b>Tableau 01</b> : Principales sources de pectines d'intérêt industriel .....	29
<b>Tableau 02</b> : Les effets des différents d'extraction sur le rendement.....	35
<b>Tableau03</b> :Les avantages et les désavantages des extractions.....	41
<b>Tableau 04</b> : Les effets des différents d'extraction sur le rendement.....	39

## Liste des figures

<b>Figure 01</b> : Structure de la paroi végétale.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 02</b> : Structure de la paroi cellulaire.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 03</b> : Représentation schématique de la structure de la paroi primaire.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 04</b> : Organisation de la paroi végétale en lamelle moyenne, paroi primaire et paroi secondaire.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 05</b> : Structure chimique de la cellulose .....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 06</b> : Modèle de la machinerie cellulaire permettant la synthèse de la cellulose. Chaque protéine CESA synthétise une chaîne de $\beta(1-4)$ D-glucose, sous forme d'un ruban cristallin. Une rosette, qui est composée de 6 .....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 07</b> : Structure du callose.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 08</b> : Structure d'hémicellulose.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 09</b> : Structure d'un type de xyloglucane.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 10</b> : Molécule de la pectine.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 11</b> : Modèle de régulation des mouvements de l'appareil de Golgi et de la sécrétion contrôlée de polysaccharides.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 12</b> : Principales unités impliquées dans la structure de la lignine.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 13</b> : Molécule de la pectine.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure14</b> : Les Différentes zones dans la structure des pectines.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure15</b> : Forment la zone lisse des pectines.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure16</b> : Structure du rhamnogalacturonane I (RG I).....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure17</b> : Structure du rhamnogalacturonane II.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 18</b> : Structure chimique de xyloglacturonane.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 19</b> : Stabilité de la pectine .....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 20</b> : Réaction de $\beta$ -élimination.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 21</b> : Modèle de gélification des pectines hautement méthylée .....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>
<b>Figure 22</b> : Présentation schématique de la gélification des pectines faiblement méthylènes.....	<b>Error!</b>	<b>Bookmark</b>	<b>not defined.</b>

<b>Figure 23:</b> Schematic representation of different extraction processes.....	47
<b>Figure 24 :</b> Fruit pectine.....	48
<b>Figure 25 :</b> Gélifiant.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 26 :</b> Epaississant.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 27 :</b> Extraction et évaporation de la pectine.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 28 :</b> Des Gélules de pectine.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 29 :</b> des gélules de pectine.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 30 :</b> multivitamins.....	52
<b>Figure 31 :</b> Mécanisme de copolymérisation greffée de la pectine avec.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Polyacrylamide et libération contrôlée d'acide salicylique à partir de l'hydrogel de pectine greffée (GP) .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Figure 32 :</b> Des produits cosmétiques à la pectine.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Liste des abréviations :

**XG:** xylogalacturonane

**RG I et RG II :**les Rhamnogalacturonanes

**FM:**Faiblement Méthyles

**HM:** hautement méthylées

**CESA:**cellulose synthase

**CSL:**CELLULOSE SYNTHASE-LIKE

**TGN:** trans-Golgi network

**HRGP :**protéines appelées glycoprotéines riches en hydroxyproline

**PRP:**protéines riches en proline

**CDTA:** le cyclohexane diamanté tractâtes

**EDTA:** éthylène diamine tétra acétate

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Les bio-polymères sont très attrayants car ils sont renouvelables et leur coût de production est relativement faible. Ils sont couramment étudiés pour des applications alimentaires, pharmaceutiques et biomédicales (**Setiowati et al., 2019; Gong J et al., 2019**). Le marché mondial des bio-polymères devrait atteindre 27,9 milliards de dollars d'ici 2025. La pectine, un bio-polymère anionique soluble dans l'eau, figure parmi les bio-polymères les plus commercialisés (**Martau et al., 2019**). Le marché mondial de la pectine, estimé à 1 milliard de dollars en 2019, devrait atteindre 1,5 milliard de dollars en 2025.

La pectine est un polysaccharide structural de la paroi cellulaire des plantes (**Martau et al., 2019**), connu pour être une macromolécule de poids moléculaire élevé, qui peut être transformée en hydrogel et former un réseau flexible de chaînes de polymères (**Rodsamran et Sothornvit, 2019**). La pectine commerciale est généralement extraite des pommes et des agrumes. Cependant, les recherches se sont concentrées sur l'extraction de la pectine à partir de divers sous-produits industriels, qui se présente comme une option verte pour la valorisation des résidus agro-industriels, conformément au concept de bio-économie circulaire (**Martau et al., 2019; Freitas et al., 2020; Sheldon, 2016**).

La pectine a une structure complexe formée par l'homogalacturonane (HG), le rhamnogalacturonane I (RGI), le rhamnogalacturonane II (RGII) et le xylogalacturonane (XG) (**Ma et al., 2020**). Malgré des caractéristiques communes, les pectines peuvent présenter des structures diverses variant en fonction de la source et de la méthode d'extraction (**Wicker et al., 2014; Wang et al., 2018**).

En ce sens, il convient de noter que la pectine est susceptible de subir des modifications physiques, chimiques et/ou enzymatiques. Les nombreux groupes fonctionnels présents dans la structure de la pectine peuvent stimuler différentes fonctionnalités, et certaines modifications permettent à la pectine d'avoir de nombreuses applications (**Zhang et al., 2015; Ngouémazong et al., 2015; Freitas et al., 2020**), principalement parce qu'il s'agit d'un produit considéré comme sûr, non toxique, avec un faible coût de production et une grande disponibilité (**Martau et al., 2019**).

Les données de la littérature sur la pectine concernent principalement ses applications dans l'alimentation, l'agriculture, les médicaments et la biomédecine, avec une tendance à la production d'enrobages alimentaires comestibles, de films antimicrobiens bio-sources et de



nanoparticules pour des études sur le traitement du cancer, la cicatrisation des plaies et les pansements par l'industrie pharmaceutique (Martau et al., 2019; Munarin et al., 2012; Ouyang et al., 2020).

La possibilité de modifier sa structure permet d'utiliser la pectine dans de nouvelles fonctions, seule ou en combinaison avec d'autres bio-polymères. Ce matériau à forte valeur ajoutée et au comportement différencié a suscité l'intérêt de l'industrie et de la recherche. Ce travail rassemble donc les informations publiées les plus récentes sur ce polysaccharide, en se concentrant sur la description détaillée de sa structure en fonction des différents processus d'extraction, ainsi que sur ses applications possibles et ses tendances futures.

# **Chapitre I**

## **Les parois végétale**

## 1.1. Définition de Paroi végétale

La cellule végétale se distingue de la cellule animale par la présence d'une paroi pectocellulosique. Cette structure correspond à l'enveloppe la plus externe de la cellule ayant une structure rigide micro fibrillaire enrobée d'une matrice hydrosoluble. Elle est principalement formée de polysides (pectine, hémicellulose et cellulose), de protéines (extensive, enzymes) et de composés de nature phénolique (lignine). La paroi assure plusieurs rôles indispensables pour le maintien de la cellule végétale. Elle permet de maintenir et de déterminer la forme des cellules et l'architecture des plantes. Elle doit être modulable au rythme de la croissance des jeunes cellules, tout en restant ferme afin d'assurer son rôle dans le port érigé des plantes, ainsi qu'en tant que barrière protectrice contre les agents pathogènes, la déshydratation et les agressions environnementales. Elle permet la cohésion et la communication entre les cellules (**Cosgrove, 2005**). La paroi végétale est également à l'origine de multiples applications en tant que source agroalimentaire, source de biomatériaux ou encore de biomasse valorisable à des fins énergétiques.

La grande diversité de formes et de tailles des plantes associée à une grande diversité de formes et de tailles des cellules végétales implique la paroi, élément extracellulaire. La forme d'une cellule végétale résulte d'un équilibre entre la force hydrostatique qui pousse vers l'extérieur de la cellule et la tension de la paroi végétale qui entoure la cellule (**Cosgrove 2000 ; Thompson 2005 ; Cosgrove 2005**). L'expansion de la paroi peut influencer la morphogénèse (**Pien et al., 2001 ; Kogovsek et al., 2011 ; Scholthof et al., 2011**), même s'il reste encore à déterminer si cette expansion est à l'origine ou constitue l'aboutissement du processus (**Edwardson & Christie 1997 ; Fleming 2005**).

Outre sa fonction de support mécanique de la cellule, la paroi végétale est une clé déterminante dans les réponses de la plante à des stress environnementaux (**Kerlan 1996 ; Sasidharan et al., 2011**). Elle constitue à la fois une barrière physique

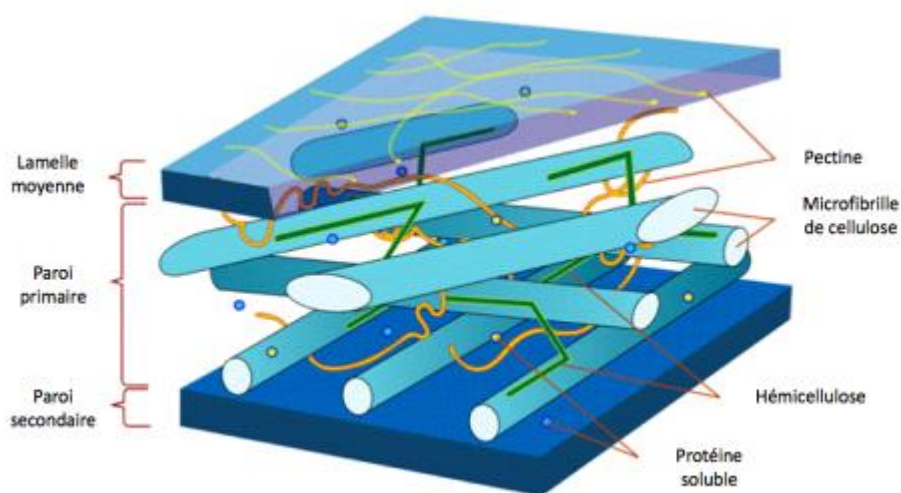
et une source de signaux impliqués dans plusieurs processus physiologiques relatifs au développement et aux réponses à l'environnement. La paroi a donc une double spécificité : elle doit être rigide pour jouer le rôle de support et de barrière contre les stress mais aussi avoir une certaine élasticité pour permettre la croissance du végétal (**Shukla et al., 1994 ; Hamann 2012**).

Ces particularités, à la fois antagonistes et complémentaires, sont à l'origine de la

complexité de la paroi végétale. Des mécanismes contrôlant l'intégrité de la paroi, permettent à une cellule de rester informée sur l'état de sa paroi (**Carrington et Dougherty 1987 ; Verchot et al., 1992 ; Wolf et al., 2012**).

## I.2. Structure de la paroi végétale

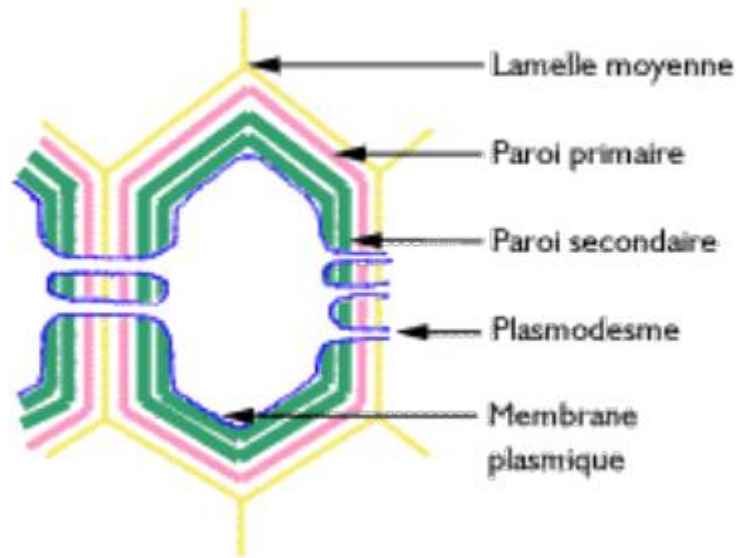
Différents niveaux d'organisation confèrent à la paroi végétale son aspect dynamique et rigide. Elle est composée d'une lamelle moyenne, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire.



**Figure 01** : Structure de la paroi végétale (**Chan 2017**).

### I.2.1. Lamelle moyenne

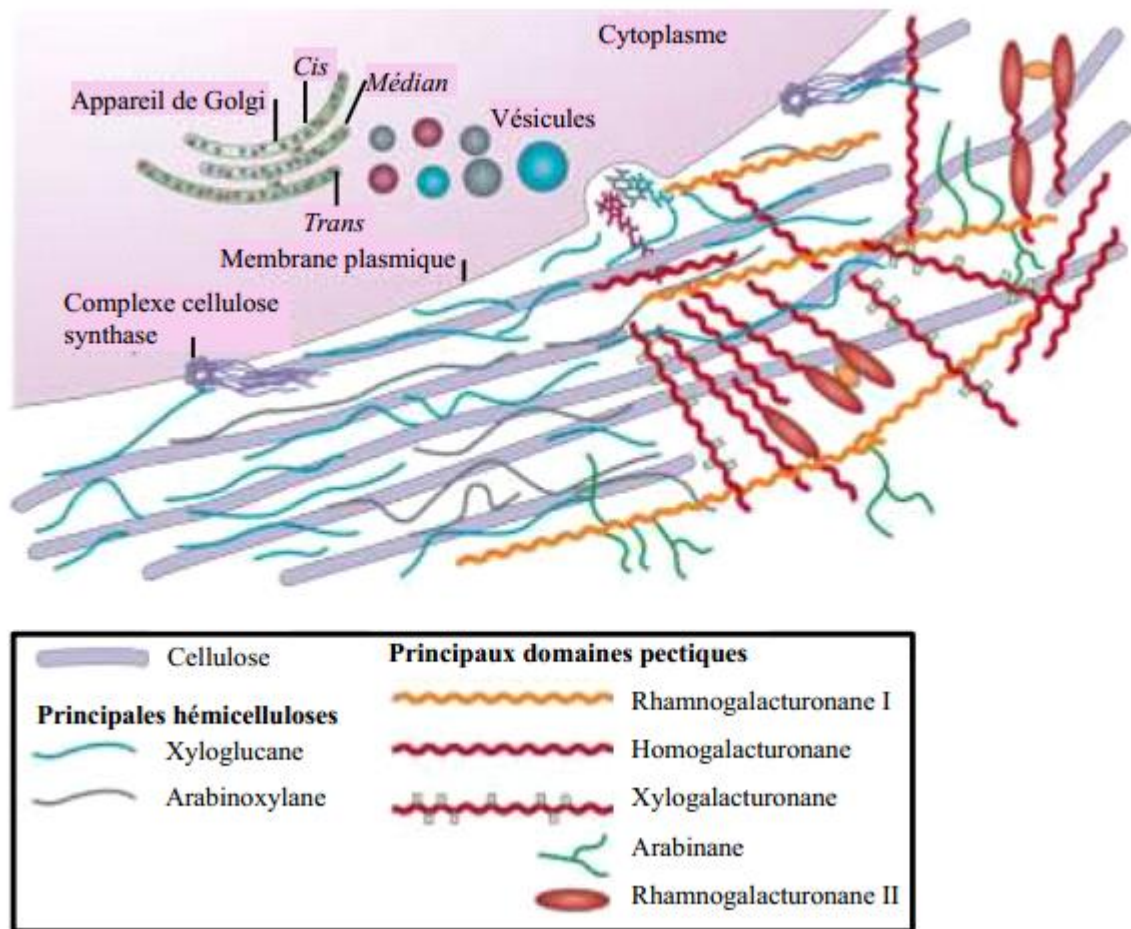
C'est la partie la plus externe de la paroi végétale. Elle est commune à deux cellules contiguës. La lamelle moyenne se forme en premier lors de la division cellulaire et elle est constituée principalement de matières pectiques (**Hopkins, 2003**). Également appelée substance intercellulaire, elle assure la cohésion entre les cellules (**Raven et al., 2008**).



**Figure 02** : Structure de la paroi cellulaire (**Raven 2008**).

### **I.2.2. Paroi primaire**

La paroi primaire est composée de protéines, de celluloses, d'hémicelluloses, de substances pectiques et d'eau. Présente dans toutes les cellules végétales, elle est la seule composante de la paroi cellulaire des cellules en croissance et en division et des cellules adultes participant à la respiration, la photosynthèse et à la sécrétion. L'armature de fibres cellulosiques, qui la compose, comprend des microfibrilles de cellulose de 10 à 25 nm. Ces fibres sont rattachées à des molécules d'hémicelluloses, de pectines et de glycoprotéines structurales. Les fibres de cellulose s'organisent sans orientation en s'entremêlant, formant une structure dispersée. En association avec le calcium, les molécules de pectine ont pour rôle de retenir l'eau, donnant un aspect de gel hydraté. Cette paroi riche en eau conserve sa plasticité, tout en étant rigide. Ainsi, lorsque la paroi cellulaire est composée uniquement de la paroi primaire, les cellules ont la possibilité de se diviser et de perdre leurs fonctionnalités pour de nouveau se différencier (**Raven 2008**).



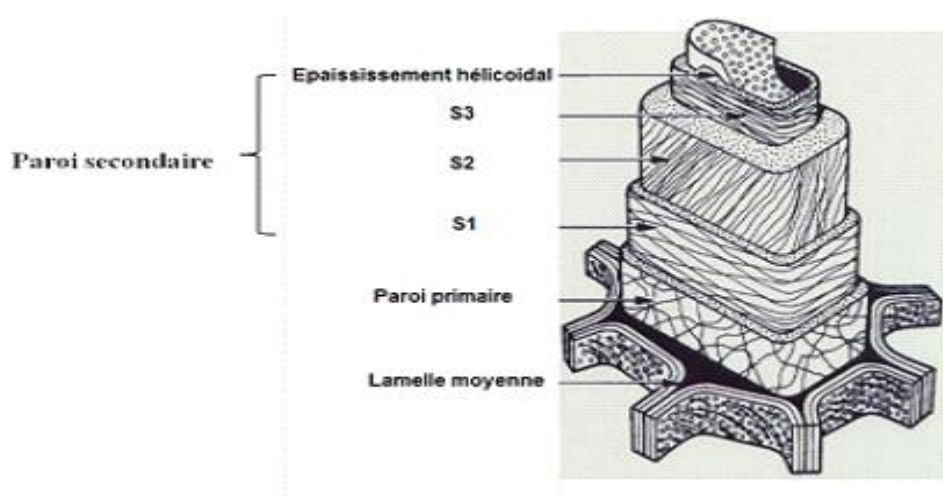
**Figure 03 :** Représentation schématique de la structure de la paroi primaire.

Les fibrilles de cellulose (mauve) sont synthétisées par les complexes hexamériques (cellulose synthases) dans la membrane plasmique. Les hémicelluloses et pectines sont synthétisées dans l'appareil de Golgi et déposées à la surface de la paroi par des vésicules. Chez la plupart des espèces végétales, les hémicelluloses sont principalement représentées par les xyloglucanes (bleu) et arabinoxylanes (gris). Les principaux polysaccharides pectiques regroupent les rhamnogalacturonanes I et les homogalacturonanes. Les xylogalacturonanes, les arabinanes, les arabinogalactanes (non représentés) et les rhamnogalacturonanes sont à des taux plus faibles. D'après Cosgrove (2005).

### I.2.3. Paroi secondaire

La paroi secondaire apparaît au moment de la différenciation des cellules. Elle est épaisse, rigide et dense. Elle est appliquée contre la paroi primaire et à l'intérieur de celle-ci. Elle se compose de cellulose hautement cristalline et d'hémicelluloses et est enrichie en composés

phénoliques, comme la lignine pour renforcer sa rigidité, ou en cutine et subérine en surface pour renforcer son imperméabilité. La lignification se déroule après la mise en place de la cellulose et des hémicelluloses. Cette différenciation peut toucher les cellules de vaisseaux conducteurs (bois), de tissu de soutien (sclérenchyme) ou de protection (liège). La paroi secondaire est déposée en trois étapes successives formant des couches aux orientations définies, appelées S1, S2 et S3. Cette disposition joue un rôle primordial pour définir les propriétés physiques de la paroi (Hopkins, 2003).



**Figure 04 :** Organisation de la paroi végétale en lamelle moyenne, paroi primaire et paroi secondaire (Hopkins, 2003).

### I.3. Les différents constituants de la paroi

#### I.3.1. Les constituants polysaccharidiques

Les polysaccharides sont les macromolécules les plus abondantes sur Terre et dans les océans. Ces macromolécules sont les éléments structuraux majeurs de la paroi des végétaux et peuvent être impliqués dans des mécanismes de reconnaissance de type végétaux/environnement. (Théo et *al.*, 2008).

Les polysaccharides sont des substrats solides qui se présentent sous la forme de fibres, de granules ou de gels dont les propriétés physico-chimiques et structurales sont intimement liées à leurs structures chimiques et, par conséquent, à leurs biosynthèses. Les polysaccharides fortement utilisés dans l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique, pour leurs propriétés technologiques, physiologiques et pharmaceutiques, sont des acteurs importants dans l'économie mondiale.

Les polysaccharides sont également les constituants importants des parois cellulaires des plantes

vertes et d'autres eucaryotes photosynthétiques.

Les polysaccharides structuraux, principalement la cellulose, les hémicelluloses et la pectine, jouent un rôle de soutien chez les végétaux (Agarwal, 2006).

### I.3.1.1. La cellulose

La cellulose est le bio-polymère le plus abondant sur Terre. Elle constitue 20 à 30 % de la matière sèche des parois primaires et de 40 à 90 % des parois secondaires (Fry, 1988). C'est un polysaccharide homogène insoluble constitué d'unités de glucose liées en  $\beta$ -1,4, avec un degré de polymérisation élevé (Kroon-Batenburg et Kroon, 1997). Deux molécules de glucose consécutives s'orientent l'une par rapport à l'autre et forment l'unité structurelle de base, le cellobiose (Brown et al., 1996; McNeil et al., 1984). Les molécules de cellulose ont la propriété de pouvoir s'associer par des liaisons hydrogènes et des forces de Van der Waals, formant des structures cristallines insolubles et très résistantes aux dégradations chimiques et enzymatiques (Kroon-Batenburg & Kroon, 1997). Les propriétés de la cellulose dépendent de la longueur et du diamètre des microfibrilles ainsi formées. Les principales formes de cellulose sont la forme I et II selon l'orientation parallèle ou antiparallèle de leurs chaînes. Dans les végétaux, les microfibrilles de cellulose sont essentiellement de type I avec deux conformations possibles  $I\alpha$  et  $I\beta$  (O'sullivan, 1997).

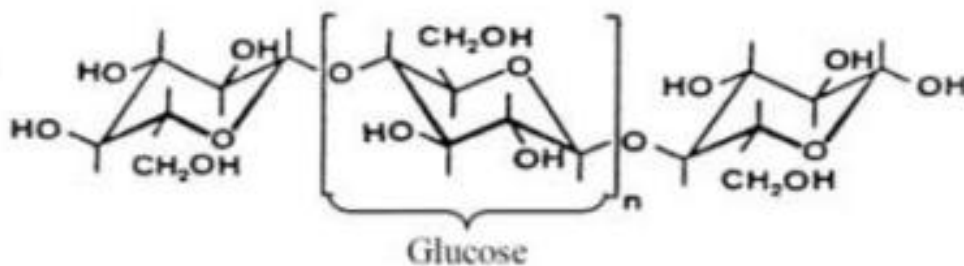


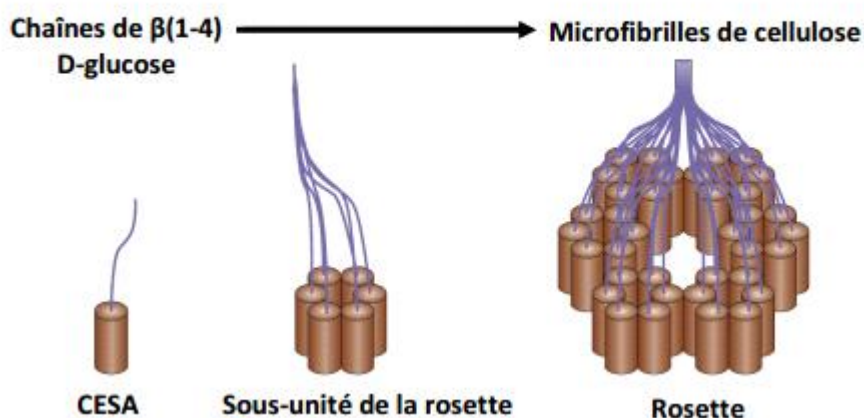
Figure 05 : Structure chimique de la cellulose (Sedan 2007).



### I.3.1.1.1. Synthèse de la cellulose

Les micro fibrilles de cellulose sont produites par un large complexe protéique membranaire appelés CESA (cellulose synthase), qui génère la cellulose à la surface de la cellule, de façon semblable à un fil d'araignée (Cosgrove, 2005 ; Saxena et Brown, 2005). On peut d'ailleurs noter que certaines bactéries, telles que *Acetobacter xilinum*, sont capables de produire et de sécréter des quantités importantes de cellulose afin de former une pellicule extracellulaire. Grâce à la bactérie *A. xilinum*, un activateur de la cellulose synthase a été découvert, ce qui a rendu possible l'amélioration de la synthèse de cellulose in vitro. À l'aide de la purification de la cellulose synthase, les gènes codant la sous-unité catalytique ainsi que d'autres protéines impliquées dans la synthèse de la cellulose ont pu être clonés (Delmer, 1999).

La cellulose synthase correspond à un assemblage de 10 ou 12 glycosyl- transférases processives de type 2 (Scheible and Pauly, 2004). Les CESA sont assemblées en rosette : chaque rosette est constituée de six sous-unités, et chaque sous-unité est constituée de six CESA (figure 4). Les microfibrilles se forment par le regroupement spontané et la cristallisation de douzaines de chaînes de cellulose, produites à partir d'UDP-glucose (uridine diphosphate glucose). Les microfibrilles font 3 à 5 nm de large, et plusieurs micromètres de long, ce qui est suffisant pour faire plusieurs fois le tour complet de la cellule (Cosgrove, 2005).

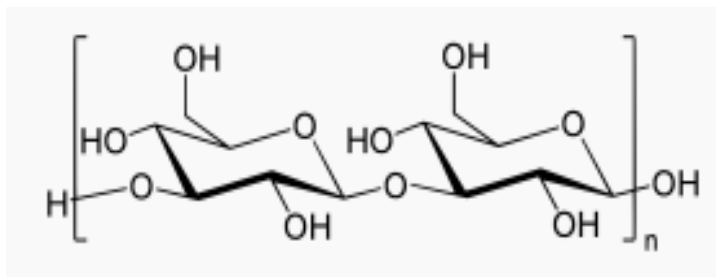


**Figure 06 :** Modèle de la machinerie cellulaire permettant la synthèse de la cellulose. Chaque protéine CESA synthétise une chaîne de  $\beta(1-4)$  D-glucose, sous forme d'un ruban cristallin. Une rosette, qui est composée de 6 hexamères de CESA, permet de former 36 chaînes de glucose, assemblées en microfibrilles.. D'après Cosgrove, 2005

### I.3.1.2. La callose

De façon semblable à la cellulose, la callose, un polysaccharide amorphe de

$\beta$  (1 $\rightarrow$ 3) D-glucose, est produit par un complexe protéique membranaire appelé CALS (callose synthase), qui utilise également comme substrat des UDP-glucose et nécessite la présence de calcium et de glucosides (**Delmer, 1999**). La callose est moins abondante que la cellulose durant les conditions de croissance normales de la plante. Cependant, ce polysaccharide est présent au niveau de la plaque cellulaire des cellules en division, dans les parois des cellules mères du pollen et dans les tubes polliniques, ainsi que dans les cribles des éléments du phloème. De plus, la callose est déposée dans la paroi suite à une blessure biotique ou abiotique (**Scheible and Pauly, 2004**).

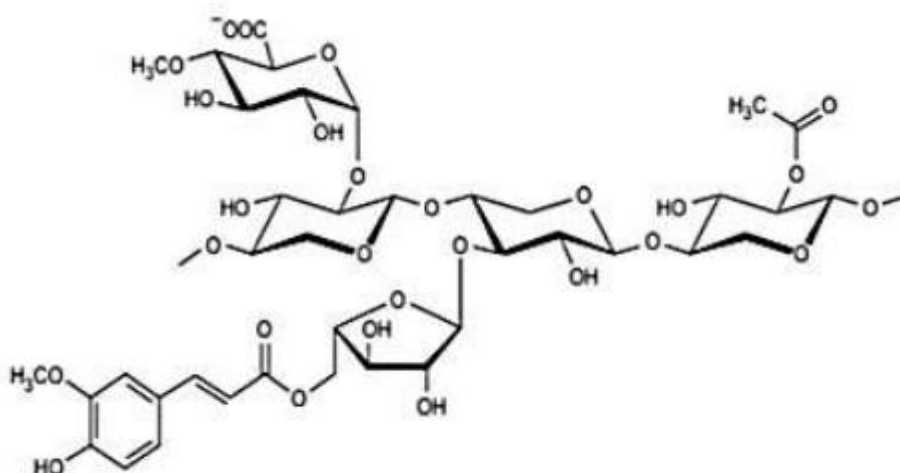


**Figure 07:** Structure du callose.

### I.3.1.3. Les hémicelluloses

Le terme d'hémicelluloses regroupe les polysaccharides non cellulosiques et non pectiques de la paroi végétale. Ce sont des polymères hétérogènes à structure linéaire pourtant de courtes chaînes latérales. Elles sont définies comme des polysaccharides dont le squelette est composé de résidus  $\beta$ -(1,4)-D-pyranose. Elles sont généralement extraites par des solutions alcalines à différentes concentrations. Les molécules d'hémicelluloses se lient étroitement à la surface des microfibrilles de cellulose par des liaisons hydrogènes. Elles représentent environ 20 à 40 % de la biomasse végétale. Les hémicelluloses sont de différents types selon qu'elles entrent dans la constitution des parois primaires ou des parois secondaires (**Fry, 1988; McNeil et al., 1984**). Au niveau de la membrane primaire des dicotylédones, les xyloglucanes sont majoritaires et jouent un rôle de cohésion entre la cellulose et les constituants ramifiés de la paroi (**Hayashi, 1989**). Les xylanes sont les hémicelluloses majeures dans la paroi primaire des monocotylédones (environ 20 %). Les mannanes constituent les composés majeurs de la paroi secondaire des gymnospermes

(Scheller & Ulvskov, 2010).

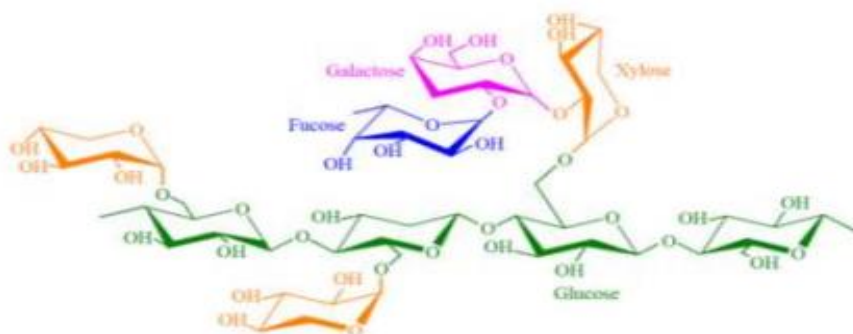


**Figure 08** : Structure d'hémicellulose (Machmudah et al.,2017).

Dans les dicotylédones, on trouve trois groupes d'hémicelluloses : .

### I.3.1.3.1. Xyloglucane

Ce sont les hémicelluloses prédominantes de la paroi primaire ; ils peuvent représenter de 20 à 25 % du poids sec. Leur squelette de base est formé par des résidus de D-glucose liées en  $\beta$ -(1,4). Leurs unités principales peuvent être substituées en  $\beta$ -(1,6) par des résidus de Dxylose (Hayashi, 1989), qui peuvent eux-mêmes porter des résidus de galactose et de fucose.



**Figure 09** : Structure d'un type de xyloglucane (Sedan 2007).

### I.3.1.3.2. Xylènes

Les xylènes constituent dans les dicotylédones entre 5 et 20 % des parois primaire et secondaire respectivement. Leur chaîne principale est constituée d'unités de xylopyranose reliées par des liaisons  $\beta$ -(1,4).

Contrairement aux xyloglucanes, les xylènes n'ont pas de structure régulière. Ils peuvent être ramifiés par des courtes chaînes et leur variabilité structurale se manifeste par le degré et la nature des substitutions qui peuvent apparaître sur les C2 et les C3 des unités de xylose, telles que les groupements arabinosyles et glucuronosyles. Les xylanes porteurs de substituants arabinose, ceux porteurs de substituants d'acide glucuronique et son dérivé Ométhylé, ceux porteurs de deux types de substituants et ceux non substitués sont appelés respectivement arabinoxylanes, glucuronoxylnes, glucuronoarabinoxylanes et homoxylnes.

Des groupements acétyles peuvent être portés par les C2 et C3 des unités de xylose. Les xylènes les plus ramifiés sont moins liés aux microfibrilles de cellulose et plus solubles dans l'eau (Fry, 1988; McNeil *et al.*, 1984).

Les xylènes peuvent former des liaisons avec la lignine via les résidus d'arabinose qui peuvent être estérifiés par les acides hydroxycinnamiques (acide férulique ou p-coumarique).

Cette association entre la lignine et les polymères polyosidiques confère plus de rigidité à la paroi végétale (McNeil *et al.*, 1984; Scheller & Ulvskov, 2010).

### I.3.1.3.3. Mannanes et glucomannanes

Les mannanes et les glucomannanes sont largement répandus dans la paroi secondaire lignifiée. Les mannanes possèdent un squelette de résidus D-mannose liés en  $\beta$ -(1,4) alors que les glucomannanes ont un squelette de résidu D-mannose et D-glucose liés également en  $\beta$ -(1,4).

Ces deux hémicelluloses peuvent être substituées en  $\alpha$ -1,6 par des résidus de D-galactose (les galactomannanes et galactoglucomannanes). Les mannanes et les glucomannanes existent souvent sous forme acétylée en C2 ou C3 (Stumpf *et al.*, 2012)

### I.3.1.3.3.1. Synthèse des hémicelluloses

A l'inverse de la cellulose et de la callose, la matrice d'hémicellulose est synthétisée dans l'appareil de Golgi, grâce à des glycosyltransférases appartenant à la même famille que les protéines CESA, responsables de la production de la cellulose. La super-famille de gènes codant ces glycosyltransférases est appelée « CSL » pour « CELLULOSE SYNTHASE-LIKE » (CSLA à CLSH). Les protéines CSL contiennent des motifs caractéristiques des  $\beta$ -glycosyltransférases et possèdent des points communs avec les CESA. Elles représentent de bonnes candidates pour la synthèse des chaînes de  $\beta$ -D-glycanes des hémicelluloses tels que le xyloclucane, le xylane, le mannane et autres  $\beta$ -D-glycanes de la paroi (Cosgrove, 2005).

D'autres glycosyltransférases de l'appareil de Golgi ont pour rôle d'ajouter les substitutions aux chaînes glycaniques (Scheible and Pauly, 2004).

Les glycosyltransférases forment des liaisons glycosidiques, en fixant une portion de sucre d'un donneur de substrat approprié (souvent un nucléotide-sucre) à un accepteur de substrat spécifique (Scheible and Pauly, 2004).

Après la formation des chaînes glycaniques et de leurs branchements, les polysaccharides sont ensuite transportés par des vésicules dérivées du Golgi vers la membrane plasmique. Ces vésicules fusionnent alors avec la membrane, relarguant les polysaccharides empaquetés vers la paroi.

Les polysaccharides sont intégrés dans le réseau pariétal par des interactions physiques, des liaisons enzymatiques et des réactions de réticulation. Contrairement aux microfibrilles de cellulose, la matrice de polysaccharides nouvellement sécrétée peut diffuser sur une certaine distance dans la paroi cellulaire, aidée par la pression de turgescence, qui étire la paroi, augmentant ainsi sa porosité, et fournissant un gradient d'énergie pour acheminer les polymères dans la paroi (Cosgrove, 2005).

### I.3.1.4. Les pectines

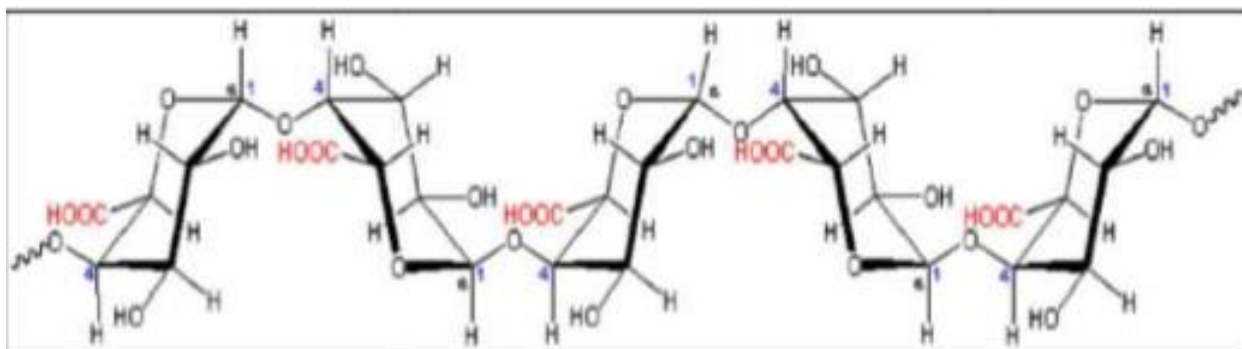
Les pectines représentent la famille de polysaccharides naturels la plus complexe du point de vue structurel (Wolf et al., 2009). Elles constituent jusqu'à 35 % de la structure des parois primaires chez les dicotylédones et les monocotylédones non graminées, mais seulement 2 à 10 % des parois primaires des herbacées et des Commelinidées. On en retrouve également dans le bois

où elles représentent 5 % des constituants de la paroi (**Mohnen, 2008**).

Les pectines sont composées à 70 % d'acides galacturoniques (**Mohnen, 2008**), principalement sous la forme d'un squelette de  $\alpha(1\rightarrow4)$  D-acides galacturoniques (GalA). Elles sont donc également nommées galacturonanes. Les pectines sont cependant constituées de 17 monosaccharides différents (**Vincken, 2003**). On estime que la biosynthèse des pectines nécessite au moins 67 transférases différentes chez *A. thaliana*, dont des glycosyl-, méthyl- et acétyltransferases (**Mohnen, 2008**).

Les pectines sont divisées en différentes classes structurales, incluant les homogalacturonanes (HG), les rhamnogalacturonanes de type I (RG-I) et les rhamnogalacturonanes de type II (RG-II), qui sont les trois principaux polysaccharides pectiques. On retrouve également en moindre quantité du xylogalacturonane (XGA), qui est un squelette d'HG avec 25 à 75 % de GalA substitués par du  $\beta$ -xylose en O-3, pouvant lui-même être occasionnellement substitué en O-4 par du  $\beta$ -xylose (**Coenen et al., 2007; Mohnen, 2008**).

Enfin, on peut retrouver chez les monocotylédones aquatiques de l'apiogalacturonane (AGA), qui est une chaîne principale d'HG substituée en O-2 et O-3 par du D-apiofuraose (**Mohnen, 2008**).



**Figure 10:** Molécule de la pectine (**Fishman et Jen, 1986**).

#### I.3.1.4.1. Synthèse des pectines

Tout comme les hémicelluloses, la synthèse des pectines a lieu dans l'appareil de Golgi, grâce à l'action de glycosyltransférases membranaires, qui nécessitent des nucléotides-sucres substrats et accepteurs spécifiques. Les polysaccharides sont alors triés et empaquetés dans des vésicules de transport, pour pouvoir être acheminés vers la membrane plasmique, la plaque de

division des cellules en division, ou la vacuole. Une fois acheminé vers la membrane plasmique, ils sont sécrétés vers la paroi cellulaire (**Caffall and Mohnen, 2009**).

L'appareil de Golgi est composé de quatre régions distinctes : le cis, le médial et le trans-Golgi, ainsi que le « trans-Golgi network » (TGN), qui correspond aux vésicules de transport émises par l'appareil de Golgi. Les glycosyltransférases y sont réparties de manière asymétrique, et chaque citerne possède des fonctionnalités spécifiques. Les polysaccharides pariétaux y sont continuellement synthétisés, et se déplacent depuis les citernes cis vers la citerne trans-Golgi. Le mouvement des polysaccharides et le maintien de la répartition asymétrique des glycosyltransférases n'est pas encore clairement établi, mais serait dû à deux mécanismes différents mais non mutuellement exclusifs, qui auraient lieu en même temps. Il s'agit du modèle de « transport vésiculaire antérograde » et du modèle de « maturation des citernes / transport rétrograde ». Ce qui différencie les deux modèles est le mouvement des enzymes résidentes et du contenu.

Dans le premier modèle, les glycosyltransférases membranaires sont retenues dans les différentes citernes, alors que les glyco molécules synthétisées sont transportées de citerne en citerne par des vésicules de transport. Selon le deuxième modèle, les enzymes résidentes sont recyclées par transport rétrograde pour établir une différence de concentration entre les différentes citernes, tandis que le contenu est transporté de manière passive à travers les différentes vésicules Golgiennes, à mesure que les citernes avancent, depuis les citernes cis vers le trans-Golgi (**Caffall and Mohnen, 2009 ; Opat et al., 2001**).

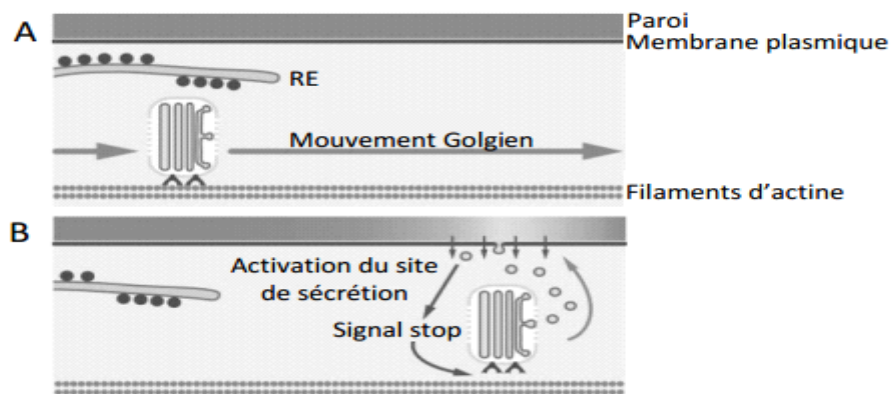
À l'aide d'anticorps spécifiques, le lieu de synthèse de différentes pectines à l'intérieur des vésicules de Golgi a pu être identifié. Les épis opes du RG-I et des HG déméthylestérifiés ont été identifiés dans le cis, le médial et le trans-Golgi. Les chaînes principales des HG et du RG-I sont assemblées dans les citernes cis et médiales, la méthyl estérification des acides polygalacturoniques a lieu principalement dans la citerne médiale, et les chaînes latérales d'arabinose sont ajoutées dans la citerne trans(**Zhang and Staehelin, 1992**).

De nombreuses glycosyltransférases sont nécessaires pour synthétiser l'ensemble des pectines, énumérées dans la revue (**Caffall and Mohnen ,2009**). 4 glycosyltransférases sont référencées pour la synthèse des HG, 36 pour le RG-I, et 19 pour le RG-II.

Les pectines ne sont pas présentes dans les mêmes proportions entre la paroi primaire et secondaire, et présentent des spécificités d'expressions cellulaires et à différents moments du développement. Leur sécrétion est donc régulée de manière temporelle, spatiale et

développementale (**Ridley et al., 2001**).

L'acheminement des polysaccharides aux endroits nécessaires (sites d'expansion de la paroi, ou zones plus fragiles) serait régulé grâce à des signaux entre la paroi et l'appareil de Golgi. En effet, l'appareil de Golgi est mis en mouvement grâce aux filaments d'actines et à la myosine (figure 07 A) (**Nebenführ et al., 1999**) ont émis l'hypothèse que les zones où la paroi nécessite l'apport de nouveaux polysaccharides serait capable d'émettre un signal vers l'appareil de Golgi. Ce signal, probablement un signal calcique, engendrerait un découplage entre l'appareil de Golgi et le réseau d'actine. L'appareil de Golgi deviendrait alors provisoirement immobile, et sécréterait via les vésicules du TGN les polysaccharides à cet endroit précis (figure 07 B).



**Figure 11** : Modèle de régulation des mouvements de l'appareil de Golgi et de la sécrétion contrôlée de polysaccharides.

**A)** Les vésicules de l'appareil de Golgi se déplacent le long des filaments d'actine, grâce à la myosine qui fait office de moteur.

**B)** Les zones où la paroi nécessiterait un apport en polysaccharides seraient capables d'émettre un signal vers l'appareil de Golgi. Ce signal stopperait son mouvement, permettant ainsi la sécrétion de polysaccharides vers la paroi grâce aux vésicules de transport. D'après **Nebenführ et al. (1999)**.



### I.3.1.4.2. Gommages et mucilages

Les gommages et les mucilages substances entre lesquelles il n'y a pas de différence chimique précise (**Guignard, 1996**), ce sont des classes de polysaccharides végétaux très proches et difficilement dissociables. Il est difficile de résoudre le problème de savoir si un exsudat de plante ou un extrait doit être nommé gomme (collante) ou mucilage (visqueux, gluant).

Les exsudats provenant de surfaces d'arbre forment un groupe reconnaissable appelé gomme (acacia, tragacanth, karaya,ghatti,...) D'un autre côté, l'appellation de mucilage tend à s'appliquer aux extraits provenant de graines ou aux substances qui coulent d'écorce ou de tissus souples (feuilles, tiges, racine) comme dans le cas des espèces psyllium (Plantago) ou linseed (Linum usitatissimum) (**Delattre, 2005**).

Les polymères constitutifs des mucilages sont en général des xylanes ou des dérivés pectiques et renferment le plus souvent des oses neutres (xylose, arabinose, galactose, rhamnose,...) et des acides uroniques (acide galacturonique, acide glucuronique). On peut citer pour exemple des arabinoxylanes, des rhamnogalacturonanes ou encore des arabinogalactoxylanes extraits de graines de lin (**Delattre, 2005**), les mucilages rencontrent au niveau de l'appareil végétatif (cellules à mucilages de la guimauve), dans les téguments des graines (lin ...) et les albumens (gomme gaur, mucilage de gleditschia...) (**Guignard, 1996**). Les mucilages se déposent en couches superposées sur les parois des cellules végétales spécialisées dites cellules mucilagineuses.

Ces fractions mucilagineuses ont la capacité de former des gels grâce à leurs propriétés absorbantes et semblent jouer un rôle clé dans l'aptitude de certains tissus à retenir l'eau Cette particularité leur confère de nombreuses applications industrielles dans le secteur des biomatériaux, de la cosmétique et de l'alimentaire. Les mucilages sont d'une grande utilité en usage externe et usage interne ; ils sont très appréciés pour leur action adoucissante (plaies, infections).

En usage interne, cas d'affections pulmonaires (**Zabeirou, 2001**). Les gommages sont des molécules complexes toujours hétérogènes et ramifiées (**Bruneton, 1999**), les gommages végétales sont poly hydroxyliques et par conséquent largement hydrophiles. Ces composés d'association de monosaccharides liés via des liaisons glycosidiques (**Warrand, 2004**), contenant des acides uroniques. (**Bruneton, 1999**).

La gomme est un exsudat végétal qui peut être produit par différents végétaux en particulier les Acacias dont il existe au moins 600 espèces différentes. La gomme arabique proprement dite est fournie par l'Acacia Verek ou Acacia sénégal.

La gomme arabique est un polysaccharide complexe dont le poids moléculaire varie de 300.000 à 1 millions, constitué par des chaînes de galactose, de rhamnose, d'arabinose et d'acides uroniques.

Il a de multiples usages :

- Dans l'alimentation (bonbons, ice-creams, chewing-gum, sodas, succédanés de jus de fruits, composés solubles en poudre pour la préparation de boissons instantanées, etc....)
- Dans la pharmacie (fabrication de sirops pectoraux, de "boules de gomme ", supports de produits chimiques de synthèse, pastilles, pullules, etc....)
- Dans l'industrie des parfums, des cosmétiques (crèmes, fards, etc....)
- Dans l'industrie des adhésifs, des peintures, des encres (**Doat, 1974**).

## **I.4.2. Les constituants non polysaccharidiques**

### **I.4.2.1. Les Protéines pariétales**

En plus des polysaccharides, les parois contiennent des protéines dont la grande diversité reflète la diversité structurale des parois ainsi que la multitude des fonctions qu'elles exercent. En particulier, un très grand nombre d'enzymes interviennent probablement dans les processus de modification et/ou de dégradation des polymères pariétaux nécessaires à la différenciation cellulaire et à la croissance de protection de la plante (**MAY, 2011**).

Les protéines structurales majoritaires sont les extensines, des protéines de type «HRGP» pour « hydroxyproline-rich glycoprotein », capables de créer des liaisons avec d'autres protéines, sans nécessairement se lier aux polysaccharides (**Carpita et Gibeaut, 1993**).

Les plus représentées sont les protéines agissant sur les polysaccharides (26 %), qui comprennent de nombreuses enzymes modifiant la cellulose, les hémicelluloses et les pectines. Parmi elles, on distingue des glycosides hydrolases qui clivent par hydrolyse et/ou réarrangent les liaisons glycosidiques, des estérases qui catalysent les fonctions esters de glucides, des lyases qui clivent les liaisons glycosidiques par  $\beta$ -élimination et des expansines qui modifient les liaisons cellulose/hémicellulose.

A l'inverse, il y a des protéines de diverses familles trop peu nombreuses pour former une classe fonctionnelle (11,9 %) et des protéines de fonction inconnue (12,6 %). Plusieurs autres

classes de protéines sont représentées : des oxydoréductases (12,4 %), des protéases (11,9 %), des protéines contenant des domaines d'interaction (10,6 %) avec des sucres (lectines) ou avec des protéines (inhibiteurs de pectine méthyl estérases, PMEI, inhibiteurs de polygalacturonases, PGIP et les inhibiteurs de protéases). Dans des proportions plus faibles, par ordre décroissant, on trouve des protéines de signalisation (7,4 %), des protéines liées au métabolisme des lipides (5,4 %) et des protéines structurales (1,8 %). Ces dernières font partie de la superfamille de protéines appelées glycoprotéines riches en hydroxyproline (HRGP).

Les HRGP comprennent des protéines riches en proline (PRP) peu glycosylées, des protéines riches en glycine (GRP), des extensines et des arabinogalactanes protéines (AGP) fortement glycosylées (**Mangeon et al., 2010 ; Lamport et al., 2011**). Notons que les AGPs ont aussi une fonction de signalisation (**Seifert & Roberts 2007**).

Parmi toutes ces protéines, nous nous intéresserons tout particulièrement aux protéines impliquées dans le métabolisme des pectines : les polygalacturonases (PG), les pectines méthyl estérases (PME), les pectines acétylestérases (PAE), pectate lyases-like (PLL) et à leurs inhibiteurs tels que PMEI ou PGIP. Ces protéines sont donc largement impliquées dans les modifications de la paroi.

#### **I.4.2.2. Les lignines**

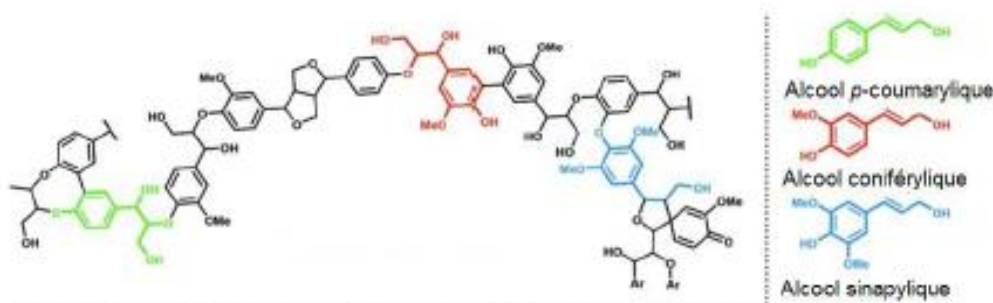
Les lignines sont les seconds biopolymères les plus abondants sur terre après la cellulose. La lignification est un processus qui débute au niveau de la lamelle moyenne au moment où la paroi secondaire s'épaissit, puis s'étend progressivement à l'ensemble des parois primaire et secondaire (**Chesson et al., 1997**).

La teneur en lignines est la plus élevée dans la lamelle moyenne et dans la paroi primaire dont l'épaisseur ne dépasse pas 1  $\mu\text{m}$  (**Wilson and Hatfield, 1997**). Toutefois, la paroi secondaire, généralement très épaisse (1-5  $\mu\text{m}$ ), constitue l'essentiel de la masse des parois lignocellulosiques et contient la plupart des lignines de la plante (**Eriksson et al., 1990**).

Les lignines contribuent à la rigidité des parois cellulaires, et ainsi au port érigé des végétaux supérieurs terrestres (**Morot-Gaudry, 2010**). Ainsi par leurs propriétés, les lignines ont permis, au cours de l'évolution, le passage du port rampant (mousses) au port dressé (arbres) plus favorable à la capture de la lumière. De plus, leur implication dans la constitution du système vasculaire, vaisseaux et trachéides, a contribué à la constitution d'un système de circulation de la sève brute (eau et sels minéraux). Leur hydrophobicité contribue également à une meilleure conduction de la sève brute.

La présence des lignines n'est pas toujours favorable. Elles sont extrêmement résistantes à la dégradation. En formant des liaisons à la fois avec la cellulose (liaison hydrogène) et les hémicelluloses (liaisons directe ou indirecte via les esters féruliques portés par les hémicelluloses), elles créent une barrière hydrophobe à toutes les solutions ou enzymes, et limitent ainsi la pénétration des enzymes lignocellulosiques au sein de la structure pariétale.

Les lignines sont des polymères aromatiques issus de la polymérisation de 3 sous unités principales que sont l'alcool p-coumarylique (H) (3-(4-hydroxyphényl)-2-propèn-1-ol), l'alcool coniférylique (G) (3-(3-méthoxy-4-hydroxyphényl)-2-propèn-1-ol) et l'alcool sinapylique (S) (3-(3,5-diméthoxy-4-hydroxyphényl)-2-propèn-1-ol) . Ces monolignols diffèrent entre eux par la présence de groupements methoxy en ortho et para du groupement phénol.



**Figure 12** : Principales unités impliquées dans la structure de la lignine.

### I.4.2.3. Les substances d'adcrustation

Les substances d'adcrustation sont des substances qui se situent à l'extérieur de la paroi végétale, elles ont pour rôle de minimiser les échanges d'eau et de gaz dans le but de protéger la plante. Parmi ces substances : les cires qui forment un dépôt sur ou dans la cuticule, on parle alors de cire supracuticulaire ou de cire intraauriculaire. Ce sont des esters d'acide gras et d'alcool gras à longue chaîne, autrement dit des cérides qui sont les constituants majeurs des cires (ruches d'abeilles, ...).

Leur présence n'est pas constante sur les végétaux. Les cires sont totalement hydrophobes, et totalement imperméable à l'eau et aux gaz, limitant ainsi la transpiration des plantes. Autre type de ces substances : la cutine qui se dépose sur l'épiderme, formant un film protecteur, appelé la cuticule.

La cutine correspond à l'assemblage d'hydroxyacides tels que l'acide palmitique, l'acide stéarique et l'acide oléique. Elle possède une structure en maillage tridimensionnel qui procure à

la molécule une insolubilité dans les solvants hydrophobes, et ceci bien qu'elle soit, constituée d'acide gras.

La cuticule est légèrement perméable aux gaz et imperméable à l'eau, mais tout en restant mouillable. Elle permet ainsi de ralentir la transpiration des végétaux et de les préserver contre des pertes d'eau excessives.

En temps sec le réseau se resserre, entraînant une imperméabilité totale (**Dallel 2012**).

# **Chapitre II**

## **Les pectines**

## II.1. Définition

Les pectines sont des macromolécules exclusivement végétales. Que l'on retrouve majoritairement dans la lamelle moyenne et la paroi primaire des plantes supérieures (**Alkorta I., et al., 1998**).

Elles participent à la cohésion de la cellule et au maintien des parois par le biais d'interactions mécaniques et chimiques avec les autres constituants (**Donato L., 2004**).

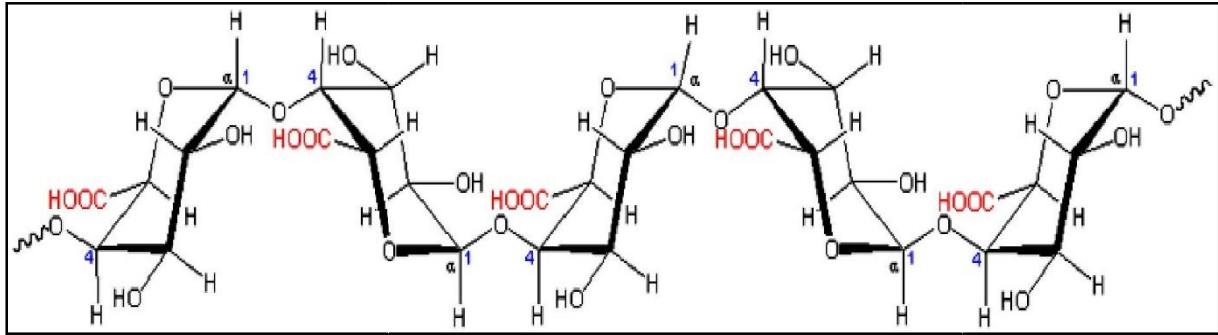
Ce sont des hétéro polysaccharides complexes caractérisés par une forte teneur en squelette principal d'acide D-galacturonique reliés entre eux en  $\alpha$ - (1→4) par des liaisons glycosuriques et de faibles quantités  $\alpha$ -L-rhamnose plus ou moins ramifiés (**Daas P.J.H. et al., 1999**), qui peuvent être estérifiés par du méthanol ou amides.

Les pectines sont des glucides contenues dans tous les végétaux, en concentration particulièrement forte dans certains fruits comme la pomme ou les agrumes. Utilisées à l'origine uniquement pour leur pouvoir texturant (dans la réalisation de confitures), elles sont aujourd'hui reconnues également pour leurs propriétés nutritionnelles .

## II.2. Les structures des substances pectiques

La structure des pectines est influencée par des réactions enzymatiques et des modifications chimiques pendant la croissance, la maturation et le stockage des fruits et des légumes (**Shuryo N., 2003**).

Le squelette de la pectine est composé majoritairement d'unités d'acide D-galacturonique reliés en  $\alpha$ -(1→4) par des liaisons glycosidiques et de faibles quantités de  $\alpha$ -L-rhamnose plus ou moins ramifiés (**Fishman et Jen, 1986**) (figure 13).



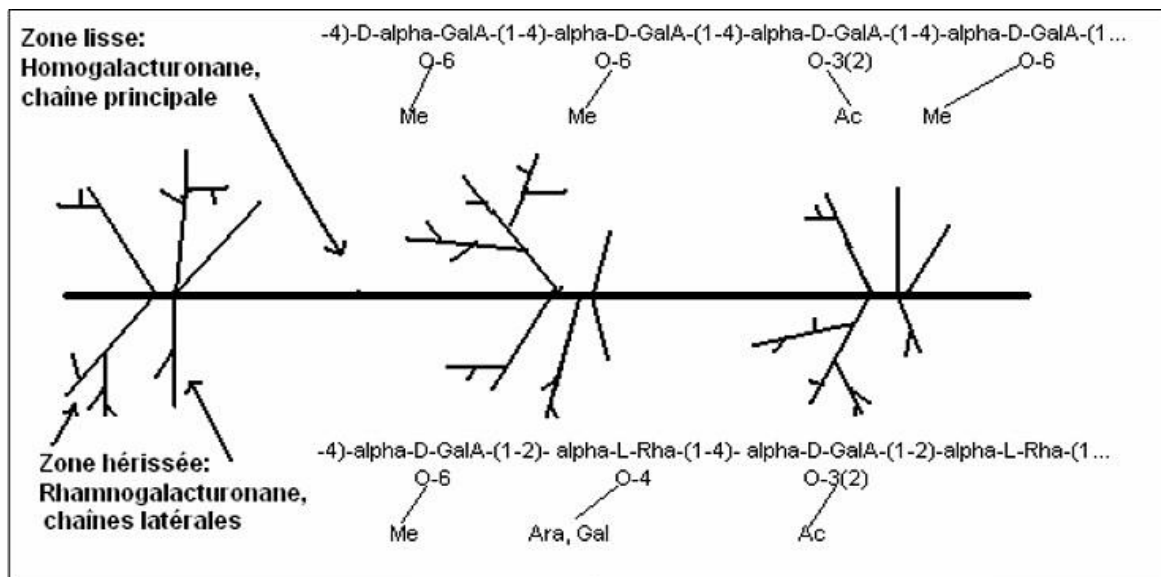
**Figure 13 :** Molécule de la pectine (Fish man et Jen, 1986).

Les pectines sont constituées principalement de trois unités structurelles différentes :

- Les Homogalacturonanes (HG) sont les plus abondants,
- les Rhamnogalacturonanes (RG I et RG II),
- les xylogalacturonanes sont des composés minoritaires des pectines,

Les polysaccharides pectiques sont formés de chaînes principales constituées de galacturonane et de rhamnogalacturonane, et de chaînes latérales constituées d'arabinane et de galactane (Schols H.A. & Voragen A.G.J, 2002).

Leur structure est souvent idéalisée par la succession de zones dites "lisses" constituées d'homogalacturonanes et de zones dites "hérissées" constituées d'un squelette principal "rhamnogalacturonane I" branché par des chaînes latérales d'oses neutres. Ces trois entités "homogalacturonane", "rhamnogalacturonane I", "chaînes latérales d'oses neutres" forment les domaines constitutifs des pectines (Vincken, J.P., Bekhouche F, 2003)

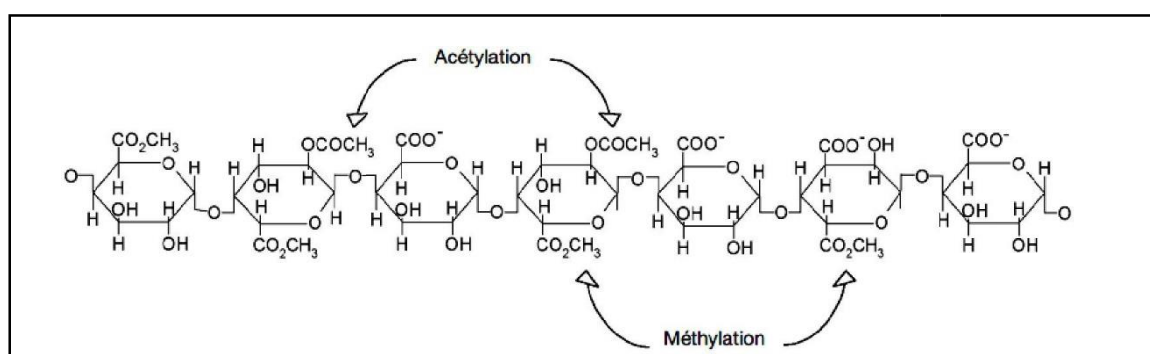




**Figure14** : Les Différentes zones dans la structure des pectines (Voragen F.,et al.,2003)

### II.2.1. Homogalacturonane

L'homogalacturonane est un homopolymère linéaire constitué d'environ 100 résidus d'acides galacturoniques (GalA) liés en  $\alpha$ -(1,4) (Thibault et al., 1993). Certains résidus GalA peuvent être estérifiés en position C-6 par des groupements méthyles ou O-acétylés en O-2 ou O-3 (Perrone et al., 2002). Ils forment la zone lisse des pectines (figure15).



**Figure15** : Forment la zone lisse des pectines

### II.2.2. Rhamnogalacturonane

#### II.2.2.1. Rhamnogalacturonane I

Le squelette osidique de rhamnogalacturonane I est constitué d'une alternance d'unités rhamnosiques et d'unités galacturoniques  $[\rightarrow 4)\text{-}\alpha\text{-D-GalA-(1}\rightarrow 2)\text{-}\alpha\text{-L-Rha-(1}\rightarrow ]$ . Comme dans l'homogalacturonane, certains résidus d'acide galacturonique de RG I sont acétylés (Dumville et Fry, 2000 ; Perrone et al., 2002), de nombreux oses peuvent se lier sur les résidus rhamnosyl en C-4 ou sur les chaînes d'acide galacturonique, dont les plus dominants sont l'arabinose, le galactose et les arabinogalactanes (Bonnin et al., 2002 ; Thibault et al., 2000 ; Ralet et al., 2001) (figure 16).

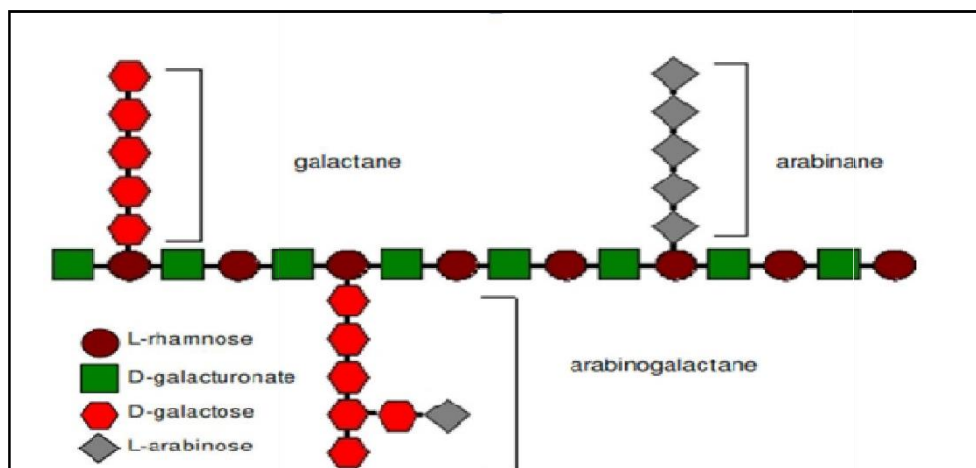
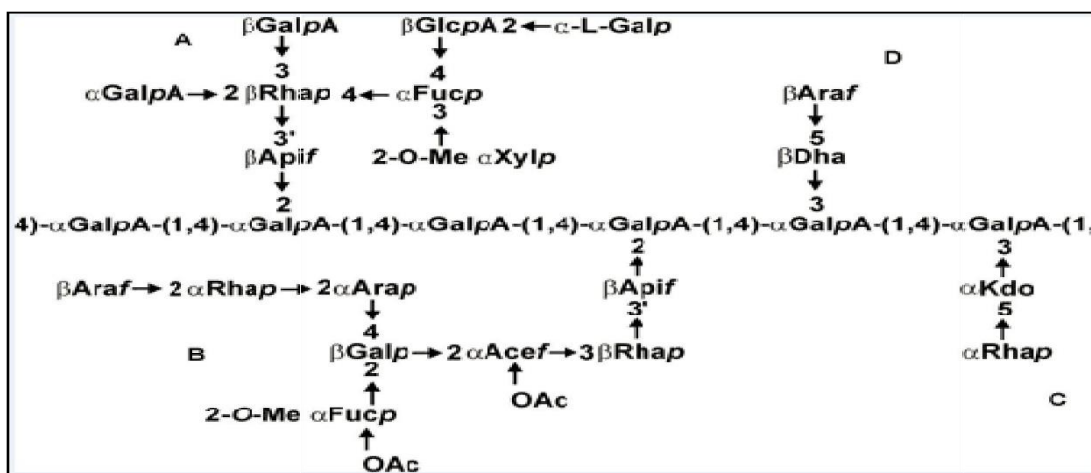


Figure16 : Structure du rhamnogalacturonane I (RG I).

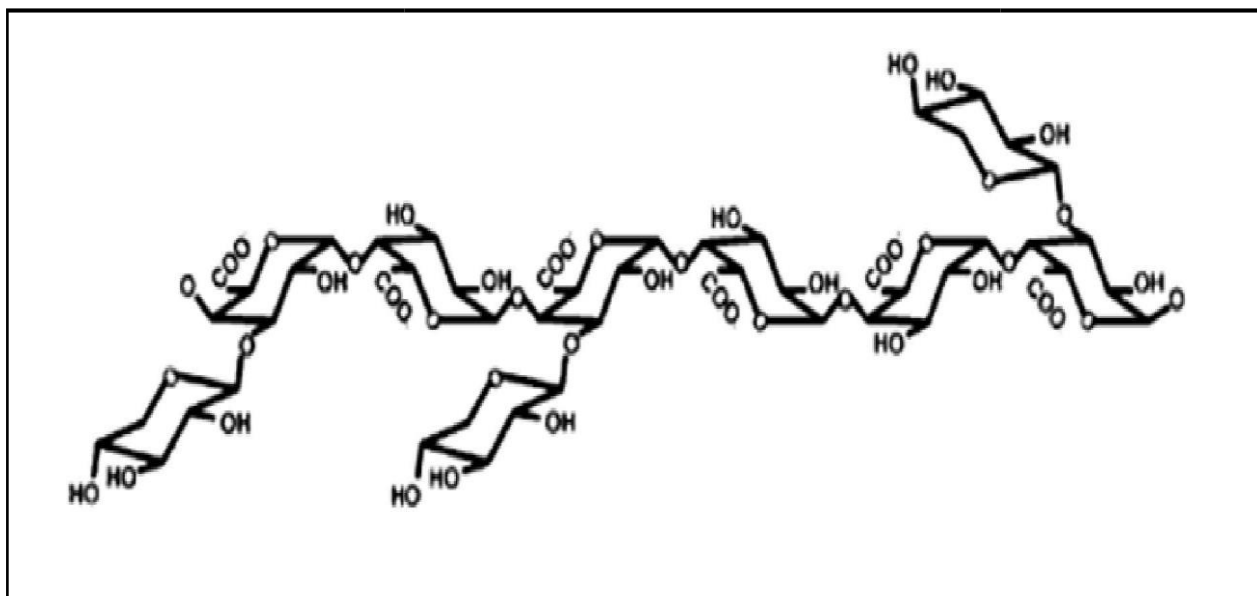
### II.2.2.2. Rhamnogalacturonane II

Le RG II comprend approximativement neuf résidus de GalA, auxquels sont unies quatre chaînes latérales complexes, nommées A, B, C et D (figure I.5) (O'Neill *et al.*, 2004). Ces chaînes latérales sont constituées d'au moins 12 résidus glycosyles différents : D-apiose, 3-C-carboxyl 5-déoxy-Lxylose (acide L-acérique), 2-O-méthyl L-fucose, 2-O-méthyl D-xylose, L-galactose, acide 3-déoxy-D-lyxo-2-heptulosarique, acide 2-kéto-3-déoxy-D-manno-octulosonique, L'arabinose, D-galactose, L-rhamnose, D'acide glucuronique et D-GalA (O'Neill *et al.*, 2004).



### II.2.3. Xylogalacturonane

Les homogalacturonanes peuvent également être substitués par des unités simples de  $\beta$ -D xylose liées sur le C-3 des acides galacturoniques. Ces zones sont appelées Xylogalacturonane.



**Figure 18** : Structure chimique de xylogalacturonane (Wong, 2008).

### II.3. Principale source de pectine

La pectine est contenue naturellement dans l'endocarpe des fruits sous forme de proto pectines qui sont libérées sous forme de pectines lors de la cuisson. La teneur en pectines des fruits est variable en fonction de la nature de fruits et de leur maturité (Michel, 2002).

La teneur en substances pectiques des plantes varie en fonction de son origine botanique et de son histoire (mode de culture, période de plantation croître...).

Bien que la pectine puisse être extraite d'un grand nombre de plantes.

Les sources industrielles principales sont le marc de pomme et les écorces d'agrumes (citron, orange) D'un point de vue nutritionnel, les pectines sont considérées comme des fibres solubles ayant une forte capacité de rétention d'eau (Donato, 2004)

**Tableau 01** : Principales sources de pectines d'intérêt industriel (**Paquot et al., 2010**).

Fruit	Teneur en substance pectine (%)
Zeste d'orange	3.5 – 5.5
Pulpe de citron	2.5 – 4.0
Pomme	0.5 - 1.6
Banane	0.7 – 1.2
Pêche	0.1 – 0.9
Fraise	0.6 – 0.7
Tomate	0.2 – 0.6
Carotte	0.2 – 0.5
Fruit de passion	0.5
Mangue	0.26 – 0.42
Ananas	0.04 – 0.13

L'industrie utilise des ressources abondantes Pectine, comme le marc de pomme (restes de pomme écrasés et pressés) ou la pelure Agrumes riches en pectine (précurseurs de la pectine liés à d'autres ingrédients) et de l'acide pectique. D'autres sources moins utilisées existent, telles que Betteraves, mangue et fruit de la passion.

## II.4. Propriétés physico-chimiques

Les caractères polymérique et poly électrolytique des pectines leur confèrent un certain nombre de caractéristiques physico-chimiques, dont nous citons :

### II.4.1. Solubilité et précipitation

La pectine est soluble dans l'eau, formant une solution colloïdale, opalescente et insoluble dans l'éthanol. La solubilité des pectines est conditionnée par un certain nombre de facteurs : température, masse moléculaire, taux de ramification, degré de méthyl estérification et répartition des groupements méthyl esters. Ainsi, une pectine sera d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible, que sa structure est fortement ramifiée et que ces fonctions carboxyliques sont engagées dans une estérification avec le

méthanol (taux de méthyl estérification fort) (Thibault *et al.*, 1991).

Les pectines peuvent être aisément précipitées en présence de solvants organiques (Acétone, éthanol, isopropanol) et de cations mono et multivalents ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ).

#### II.4.2. Stabilité et dégradation

Les pectines en solution dans un milieu acide sont stables, en revanche, des réactions de désestérification et de dépolymérisation (hydrolyse ou  $\beta$ -élimination) peuvent se produire sous des conditions données de pH et de température. Aux températures inférieures à  $10^\circ\text{C}$ , la désestérification prédomine alors qu'à des températures plus élevées, la dépolymérisation a lieu plus rapidement et peut conduire à la dégradation totale de la pectine (Voragen *et al.*, 1995). En milieu alcalin et à basse température, les groupements esters sont saponifiés (figure I.10). les réactions de  $\beta$ -élimination des substituants en  $\text{O}_4$  sont accélérées à des températures supérieures à  $60^\circ\text{C}$  (Kim *et al.*, 1978 ; Oosterveld *et al.*, 1996) selon le mécanisme où l'hydrogène en  $\text{C}_5$ , rendu plus acide par le groupe ester méthylique, est attaqué par l'ion hydroxyde. Il se produit alors un arrangement avec transfert électronique aboutissant à la rupture de la liaison glycosidique et la formation entre les  $\text{C}_4$  et  $\text{C}_5$  d'une double liaison qui est conjuguée avec celle de la fonction carboxylique (Morris *et al.*, 2002)(figures 19 et 20).

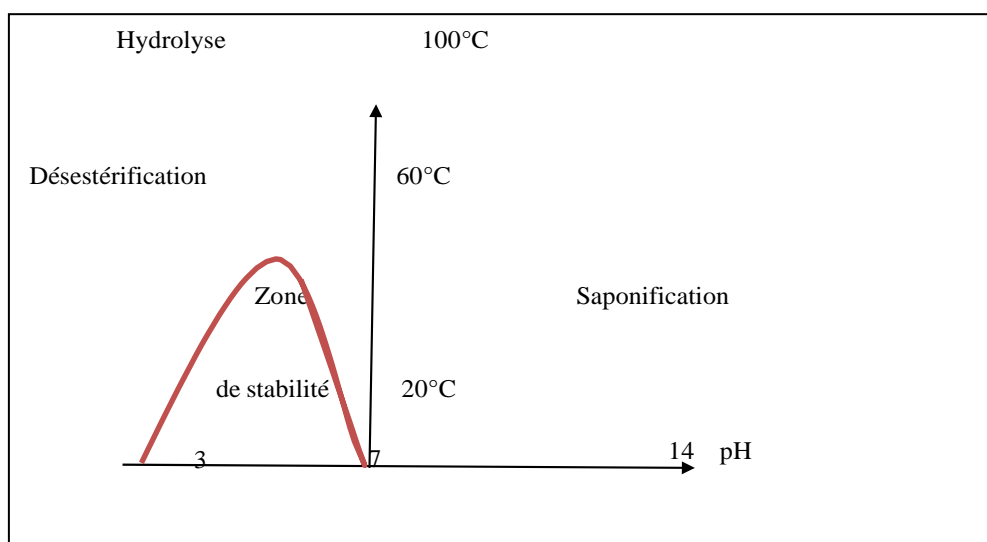


Figure 19 : Stabilité de la pectine (Renard, 2010).

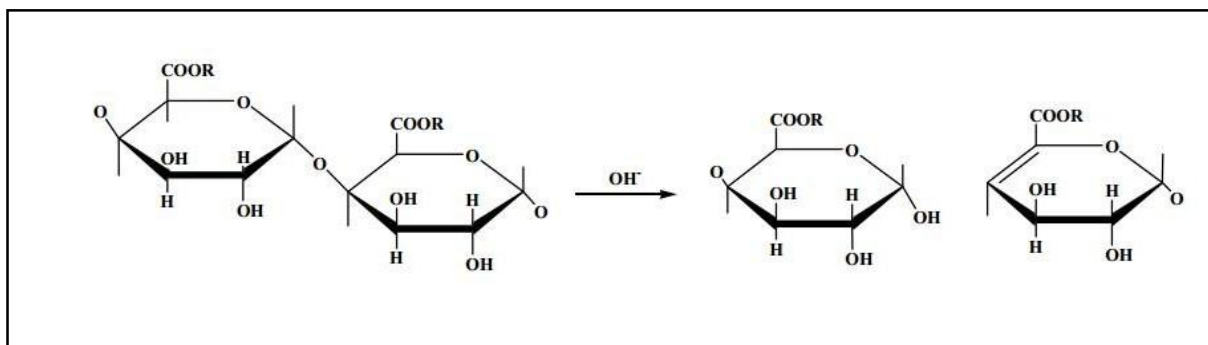


Figure 20 : Réaction de  $\beta$ -élimination

### I.4.3. Dégradation des pectines

Les substances pectiques en solution peuvent subir deux grands types de dégradations : d'estérification et dépolymérisation (Donato L. Renard C, 2004).

#### II.4.3.1. Réactions de d'estérification

C'est un ensemble de réactions classiques qui libèrent le méthanol et forment des pectases (Donato L. Renard C, 2004).

#### II.4.3.2. Réactions de dépolymérisation

Elles s'effectuent soit par hydrolyse des liaisons  $\alpha$  (1-4), soit par des réactions de  $\beta$  élimination qui provoquent la rupture des liaisons glycosidiques adjacentes en un groupe estérifié entre les résidus d'acide galacturonique et l'apparition d'une double liaison entre les carbones C-4 et C-5 (Donato L. Renard C, 2004).

### II.4.4. Viscosité

Le pouvoir épaississant des pectines peut être évalué grâce à leur viscosité intrinsèque qui reflète le volume hydrodynamique occupé par le polymère à des conditions données. La viscosité intrinsèque des pectines est influencée par le DM (lié à la masse molaire) (Yoo, S.H., et al., 2006). Le pouvoir d'épaississement dépend, aussi des conditions extrinsèques (température, nature de solvant, pH) (Mesbahi, G., et al. 2005).

## II.5. Propriétés fonctionnelles

### II.5.1. Propriétés gélifiants

La gélification se définit par l'établissement d'un réseau continu tridimensionnel de molécules de polymère reliées entre elles par des zones de jonction retenant une phase liquide entre les mailles du réseau (Ouiza, Melle SEBAOUI, 2018).

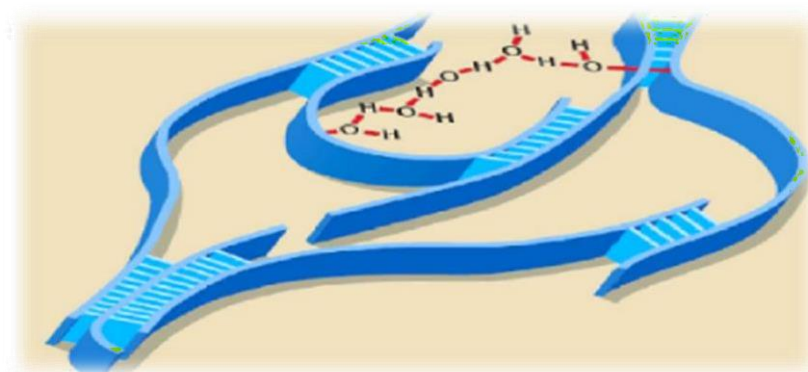
Les pectines sont capables de former des gels par différents mécanismes, quel que soit leur degré de méthylation. Pour des pectines hautement méthylées, plus le degré d'estérification (DE) élevé, plus la formation du gel est rapide.

Les pectines faiblement méthylées (FM) sont capables de fixer fortement les ions divalents (Capel, F., et al. 2006).

### II.5.2. Gélification des pectines hautement méthylées

Les pectines hautement méthylées ( $HM \geq 50\%$ ) forment un gel dans un milieu acide à forte teneur en présence d'un sucre ( $>50\%$ ), et à pH situé entre 2.20 jusqu'à 2.80. Ces deux éléments favorisent les interactions pectine-eau, ceci suite à la diminution des répulsions électrostatiques intermoléculaire (pH acide) et de l'activité de l'eau (présence de sucre).

La stabilité des zones de jonctions serait assurée par la combinaison de liaisons de type hydrogène entre les groupements carboxyliques résidus d'acide galaturonique non estérifiés et les alcools secondaires et des interactions hydrophobes entre groupement méthyles (Sharma B.R., et al. 2019.).

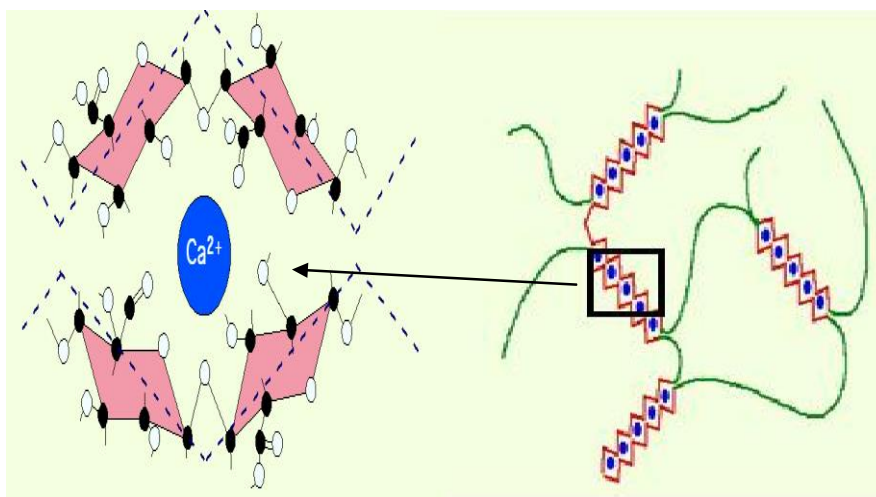


**Figure 21** : Modèle de gélification des pectines hautement méthylées.

### I.5.3. Gélification des pectines faiblement méthyles

Les pectines faiblement méthyles (FM<50%) forment des gels alimentaires thermoréversibles par différents mécanismes en présence des ions de calcium (Yapo B, 2007). Avec un large intervalle de pH allant de 2,8 à 7 avec ou sans le sucre. Le gel serait formé par l'association de chaînes pectiques, au niveau des zones homogènes non estérifiées

La gélification est due à la formation des zones de jonction entre les régions HG des deux chaînes pectiques via des ponts  $Ca^{++}$  (Ouiza, Melle SEBAOUI, 2018), en formant des cavités qui permettent l'association des chaînes de pectines par la chélation des ions de calcium, formant ainsi un réseau moléculaire sous la forme de "boîte à œufs" par analogie aux alginate (figure:22) (Sriamornsak P, 2003).



B : boîte à œufs

A : gel de pectine

**Figure 22** : Présentation schématique de la gélification des pectines faiblement méthylées (Axelos, M.A.V., Thibault, J.F, 1991).

### II.5.4. Propriétés émulsifiants

Le rôle d'un agent émulsifiant est de réduire la tension inter-faciale d'une émulsion : eau dans l'huile. Pour lui permettre de se diviser en fines gouttelettes et d'être stable. Les pectines peuvent être utilisées comme agents émulsifiants à condition de réduire leurs interactions avec les ions divalents (Akhtar, M., et al. 2002).

Le mécanisme d'émulsifiations des pectines commence par la formation des gouttelettes d'émulsion, par la fraction protéique, par son caractère amphotère, ensuite



ces gouttelettes sont stabilisées par les chaînes polysaccharidiques hydrophiles qui fournissent une couche protectrice épaisse le long des molécules. Les études démontrent qu'une forte stabilité d'émulsifiations est liée à la présence des groupements acétyles (LEROUX J., *et al.* 2003).

## II.6. Les propriétés épaississantes des pectines

Les pectines sont des additifs alimentaires continent de code E 440, ce sont des matières épaississantes anioniques. La pectine peut former une solution viscoélastique et un réseau structural qui sont largement exploités dans les confitures, gelées et marmelades (Ptichkina N.M., Markina O.A. & Rumyantseva G.N, 2008).

L'ajout de pectine HM diminue à la fois la concentration en composés majeurs et l'intensité olfactive du composé apolaire (BAISSISSE SALIMA, 2009).

## II.7. Les Méthodes d'extraction des pectines

La pectine est principalement extraite de son sous-produit de fruit (peau ou marc). Le processus d'extraction de la pectine consiste en l'hydrolyse et l'isolement de la pectine des tissus végétaux et sa dissolution dans un solvant (Methacanon, P., *et al.* 2014).

Plusieurs méthodes, simples et combinées, ont été développées pour extraire la pectine. Les méthodes uniques sont principalement comprenant des extractions d'acide, d'alcali et d'enzyme. Méthodes combinées se réfèrent généralement à l'utilisation de l'extraction de l'irradiation par micro-ondes ou ultrasons pour améliorer le rendement et / ou diminuer le temps d'extraction de la pectine à l'aide de méthodes conventionnelles à l'eau, à l'acide et à l'alcali.

Les méthodes d'extraction influencent fortement les caractéristiques structurales, et donc

Les propriétés fonctionnelles des pectines (Jiefen Cui a, *et al.*, 2021).

### II.7.1. Méthodes physico-chimiques

Les pectines sont des hydrocolloïdes et à ce titre, elles sont fréquemment isolées après extraction en solution aqueuse (à froid ou à chaud) suivie d'une coagulation dans l'alcool. Le coagulat ainsi obtenu est filtré, lavé, séché et enfin, broyé pour obtenir une poudre fine.

Le procédé d'extraction fait appel à la méthode conventionnelle en utilisant un

système à reflux ou un « soxhlet ». L'extraction des pectines acides faiblement méthyl estérifiées est facilitée par la présence de chélateurs de calcium tels que le CDTA, l'EDTA, l'imidazole ou l'oxalate d'ammonium (Redgwell *et al.*, 1992 ; Yeoh *et al.*, 2008).

Les pectines sont généralement extraites avec de l'eau chaude (90 à 100°C), en milieu acide (pH compris entre 1.5 et 3.0) et à des temps allant de 0.5 à 6 heures (Ralet *et al.*, 2002).

### II.7.1.1. Hydrolyse en milieu acide

Le procédé d'extraction en milieu acide de la pectine consiste à hydrolyser le polymère, en milieu acide (fort; typique) et chaud, pendant des heures (0.5 à 6 h) sous agitation continue (Khedmat, L.,*et al.* 2011) (voie (Tableau I.2)

**Tableau 02** : Les effets des différents d'extraction sur le rendement.

Méthode d'extraction	Source	Condition
Assistée par micro-onde	Écorces de citron	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solvant: Acide acétique, pH 1,5à 3,0</li> <li>• Rapport liquide / solide:15: 1</li> <li>• Puissance: 300–700 W</li> <li>• Temps d'irradiation: 1 à 3 min</li> <li>• Rendement 5,8–25,3%</li> </ul>
	Pomélo peler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solvant: 50 mM NaOH</li> <li>• Rapport liquide / solide 30: 1</li> <li>• Puissance: 550–1100 W</li> </ul>
Assisté par ultrasons	Marc de pomme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temps d'irradiation: 2 à 15 min</li> <li>• Rendement 24,2 à 29,8%</li> <li>• Solvant: Acide acétique, pH 1,8</li> <li>• Rapport liquide / solide: 10 :1</li> <li>• Puissance d'ultrasons: 70 W</li> <li>• Temps de sonication: 30 min</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement : 9.2%</li> </ul>
	Pamplemousse peler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Température: 60 à 80°C</li> <li>• Solvant: HCl, pH 1,5</li> <li>• Rapport liquide / solide: 50: 1</li> <li>• Temps de sonication: 20 à 40min</li> <li>• Rendement : 23,1–27,3%</li> </ul>
Enzymatique	Marc de pomme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapport liquide / solide : 10: 1</li> <li>• Dose : 20 à 60 <math>\mu</math>L / g marc</li> <li>• Température : 40–60 °C</li> <li>• pH : 4,5</li> <li>• Durée : 12–24 h</li> <li>• Rendement : 3,4–8,1%</li> </ul>
	Epluchure d'orange	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapport liquide / solide : 30: 1</li> <li>• Dose : 150 <math>\mu</math> / g de peau</li> <li>• Température : 50 °C</li> <li>• pH : 4,5</li> <li>• Durée : 4 h</li> <li>• Rendement 11,7%</li> </ul>

### II.7.1.2. Les avantages d'extraction en milieu acide

- À haute température, la paroi cellulaire est perturbée, ce qui facilite la diffusion d'acide et la libération de pectine de la matrice végétale.
- L'acide dégrade les réseaux imbriqués complexes de la paroi cellulaire, ce qui favorise la dissolution et la libération de la pectine.
- Facile à utiliser.
- A bas prix. (Jiefen Cui a, et al., 2021)

### II.7.1.3. Les désavantages d'extraction en milieu acide

- Les acides organiques sont généralement moins destructeurs et produisent moins de dépolymérisation catalysée par protons de la structure de la pectine.
- Corrosivité élevée.
- Le type d'acide, la température d'extraction, le rapport liquide / solide, le temps d'extraction et la concentration d'acide peuvent influencer le rendement en pectine (Jiefen Cui a, et al., 2021)

**Tableau 03** : Les avantages et les désavantages des extractions (Marie Carene Nancy Picot-Allain a, et al., 2020).

Méthode d'extraction	Avantage	Désavantage
Assistée par micro-onde	<p>Nécessite un temps de traitement plus court, moins de solvant</p> <p>L'extraction assistée par micro-ondes est une technologie respectueuse de l'environnement caractérisée par une consommation d'énergie relativement faible et une utilisation moindre de solvants</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• production difficile à grande échelle</li> </ul>

Assisté par ultrasons	Un débit plus élevé et une extraction plus rapide L'extraction assistée par ultrasons à tendance à être plus sûre, réduit la consommation d'énergie et utilise moins de solvants	L'extraction par ultrasons souffre mauvaise régularité car les ultrasons diminuent avec l'intensité distance de l'émetteur
Enzymatique	<p>Pas de corrosion de l'équipement par les acides ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une basse température de traitement est nécessaire, réduisant ainsi la consommation d'énergie ;</li> <li>• La spécificité des enzymes produit une augmentation pectine de qualité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La spécificité enzymatique de différents enzymes, pourraient influencer le rendement de la pectine.</li> <li>• coût élevé</li> <li>• faible rendement</li> </ul>
Avec des agents de chélation	Ne pas endommager les chaînes de pectine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La purification des chélateurs est difficile.</li> <li>• Leur présence dans le produit final affecte les propriétés de gélification de la pectine</li> </ul>

#### II.7.1.4. Extraction alcaline

La pectine des fruits peut également être extraite à l'aide de solutions alcalines à pH 9–13 et 32–80 °C sous agitation continue (Cui, J., Zhao C., Zhao, S., Tian, G., Wang, F., Li, C., et al., 2020) (Cui, J., Ren, W., Zhao, C., Gao, W., Tian, G., Bao, Y., et al., 2020) (Zhang, H., Chen, J., Li, J., Yan, L., Li, S., Ye, X., et al., 2018). Les ions hydroxydes dans les solutions alcalines gonflent la paroi cellulaire, ce qui conduit à l'inactivation des molécules liaisons hydrogène entre la cellulose et d'autres sucres (Wandee, Y., Uttapap, D., & Mischnick, P., 2019). Voir le (Tableau ....).

**Tableau 04** : Les effets des différents d'extraction sur le rendement.

Solvant d'extraction	Source	Condition
hydroxyde De Sodium	Pamplemousse pelé.	Température : 80 °C pH : 9–11 Rapport liquide / solide : 30: 1 Durée : 1 h Rendement : 17,9 à 24,5%
	Ecorce d'orange.	Température : 80 °C pH : 10 Rapport liquide / solide : 30: 1 Durée : 1h Rendement : 23,0%

## II.8. Méthodes physico-chimiques activées

Différentes méthodes physiques comme les micro-ondes, l'irradiation  $\gamma$  et les ultrasons peuvent être utilisées pour activer les réactions chimiques de l'extraction des pectines. L'utilisation des microondes pour extraire les pectines permet de réduire la durée, les coûts de l'extraction avec de bons rendements et de limiter les phénomènes de dépolymérisation par rapport aux méthodes conventionnelles (Liu, Y., Shi, J., Langrish. T.A.G, 2006) (Wang, S., et al., 2007) (Maran, P.J., et al., 2014) (Fishman, M.L., et al. 2000).

### II.8.1. Extraction par micro-ondes

L'extraction par micro-ondes est une méthode qui réduit considérablement le temps et les coûts d'extraction par rapport à l'hydrolyse en milieu acide. En effet, il faut par micro-ondes 15 minutes de chauffage pour extraire la quantité équivalente de pectine extraite d'un milieu acide pendant 3 heures (Mahé Joaquim 2018).

Dans ce processus, pendant le chauffage par micro-ondes, la pression s'accumule dans les matériaux à extraire. Cette pression modifie la structure cellulaire du résidu et permet une meilleure pénétration des solvants d'extraction (acide citrique, acide chlorhydrique et acide

nitrique) (Dranca F., Oroian M, 2018) ( Srivastava P. et Malviya R. 2011).

### II.8.2. Extraction assisté par ultrasons

L'échographie a été utilisée pour récupérer la pectine de différents déchets et sous-produits de fruits (Marie Carene Nancy Picot-Allain a, b,et *al.*, 2020).

L'extraction assistée par ultrasons est un processus non thermique qui s'applique énergie acoustique pour augmenter les taux de libération et de diffusion de la cible matériaux par cavitation du solvant (Misra, N. N.,et *al.* 2018). Cela entraîne la formation de bulles microscopiques instables qui vont imploser, ce qui permet une meilleure pénétration des solvants d'extraction. Ce phénomène fait varier la température et la pression à proximité des bulles (Mahé Joaquim. 2018).

### II.8.3. Extraction avec des agents de chélation

La pectine est très répandue dans la lamelle moyenne. Dans cette zone, elle forme des liaisons avec des ions calcium, formant des pectases de calcium. Ainsi, cette caractéristique est utilisée pour l'extraction par les agents chélateurs. Les chélateurs, comme l'éthylène diamine tétra acétate (EDTA), le cyclohexane diamanté tractâtes (CDTA) ou encore les tampons imidazole, vont capter le cation  $Ca^{2+}$  pour former un complexe. Cette capture entraîne une désorganisation de la structure formée avec le cation et permet l'extraction de la pectine désolidarisée de la matrice (Munarin F.,et *al.* 2012).

## II.9. Méthodes enzymatiques

L'extraction enzymatique de la pectine dépend de la capacité des enzymes à montrer des réactions avec une spécificité et une sélectivité précises. Les enzymes utilisées pour l'extraction de la pectine perturbent composants de la paroi cellulaire végétale, facilitant la libération de pectine, diminuant ainsi globalement temps d'extraction (Yang, Y., et *al.* 2018).

## II.10. Dosage des pectines

Le dosage des pectines repose d'une part sur des méthodes colorimétriques globales et d'autre part sur des méthodes chromatographiques nécessitant une dépolymérisation préalable en éléments monomériques.

### II.10.1. Dosage colorimétrique

Les dosages colorimétriques sont des techniques d'analyse quantitative rapides et simples à mettre en œuvre. Elles s'appliquent aussi bien aux résidus, qu'aux extraits et permettent de doser de manière globale les sucres totaux et de manière spécifique les acides uroniques.

Le principe des dosages colorimétriques repose sur la condensation par estérification d'un chromogène avec les produits de déshydratation des pentoses, hexoses et acides uroniques. Le dosage des sucres totaux, utilise de préférence le phénol plus sensible à la détermination quantitative des oses que des chromogènes (**Dubois *et al.*, 1956**). Le méta- hydroxy diphenyle en présence de tétraborate de sodium a été utilisé comme chromophore sélectif lors du dosage des acides uroniques (**Thibault *et al.*, 1991**).

### II.10.2. Dosage par chromatographie

La détermination de la composition monomérique des pectines nécessite une dépolymérisation préalable puis un dosage généralement réalisé par séparation chromatographique (phase gazeuse ou HPLC). La principale difficulté réside dans l'étape de dépolymérisation qui s'effectue le plus souvent par voie acide en raison de la résistance à l'hydrolyse des liaisons impliquant les acides uroniques ; leur réduction préalable a été proposée pour diminuer les difficultés du dosage.

En outre, la nature chimique complexe des substances pectiques rend également délicate la séparation des différents constituants. C'est pour cela que les méthodes chromatographiques sont de nos jours les plus utilisées, bien qu'elles ne permettent pas la détermination simultanée des acides uroniques et des oses neutres.

La méthanolyse suivie d'un dosage en phase gazeuse ou en HPLC, constitue une alternative intéressante à l'hydrolyse acide et permet de doser simultanément les acides uroniques et les oses neutres (**Thibault *et al.***).



# **Chapitre III**

## **Les applications des pectines**

### III.1. Les applications des pectines

Les substances pectiques ont fait l'objet de nombreuses recherches portant notamment sur leurs fonctions au sein de la paroi végétale, leur structure chimique et leur caractérisation en tant qu'additifs. Toutes ces recherches ont conduit au développement de nombreuses applications de la pectine dans divers domaines tels que : l'industrie cosmétique, alimentaire, plastique et pharmaceutique (**Sebaoui, 2018**).

La pectine peut être utilisée dans de nombreuses applications, principalement parce qu'il s'agit d'un produit sûr, non toxique, peu coûteux à produire et largement disponible (**Martau, G.A.; Mihai, M.; Vodnar, D.C. 2019**) ; de plus, ses fonctionnalités sont influencées par sa structure (**Naqash, F.; 2017.**).

#### III.1.1. Les applications de la pectine dans l'industrie alimentaire

L'incorporation de pectine dans les régimes pauvres en fibres, contenant des hydrates de carbone raffinés, fait taire/éradiquer les facteurs responsables du diabète dans l'alimentation. Après ingestion, les aliments glucides non raffinés entraînent une augmentation contrôlée du taux de sucre dans le sang par rapport aux glucides raffinés.

La pectine répond à l'exigence d'une teneur en fibres dans le régime alimentaire et joue donc un rôle important dans le contrôle du diabète. Elle joue donc un rôle important dans le contrôle du diabète. Elle favorise également la qualité nutritionnelle des aliments sous la forme d'acides gras à chaîne courte. (**Ho, Matia-Merino, & Huffman, 2015 ; Jenkins, et al., 1977**).

En plus de fournir des avantages nutritionnels, la pectine modifie également les propriétés fonctionnelles et texturales de la pâte utilisée dans l'industrie de la boulangerie. L'implication de la pectine dans les aliments de base populaires comme le pain améliore le. (**Sivam, et al., 2011**)



**Figure 24 : Fruit pectine (bakingbites.2012)**

La pectine forme des complexes hydrophiles avec les protéines du gluten par le biais d'interactions électrostatiques qui contribue à la stabilité de la pâte, élève la hauteur de la pâte et améliore considérablement propriétés fermentaires de la pâte. L'ajout de 0,2 % de pectine à 0,6 % améliore considérablement Capacité de rétention de gaz et extensibilité de la pâte. (Li, Zhu, Yadav, & Li, 2019).

Dans la fabrication du pain, la teneur en protéines de gluten de la farine de blé est un élément essentiel qui est utile pour fournir une structure de chapelure fine. Pectine en combinaison avec des agents émulsifiants appropriés peuvent être utiles dans la fabrication de pain avec substitution de différentes farines végétales déficientes en teneur en protéines de gluten. La pectine est responsable d'Améliorer le volume spécifique du pain et la fermeté du pain composite, (Eduardo, Svanberg, & Ahrné, 2016).

La pectine améliore les performances de cuisson et agit comme substitut de graisse. Incorporation de la pectine extraite du marc de Yuja (**Citrus junos.**) dans le rendement de la pâte à gâteau une plus grande viscosité et un moindre comportement de fluidification par cisaillement.

La concentration de pectine est fortement corrélée à la gravité spécifique de la pâte à gâteau et à l'augmentation du volume après la cuisson. Dans les produits de boulangerie, la pectine peut remplacer jusqu'à 10 % de la matière grasse. Cette substitution de la pectine dans les produits de boulangerie provoque une douceur accrue, une couleur de surface plus claire, une réduction significative des calories et des graisses. Contenu des produits. (Lim, Ko, & Lee, 2014).

La pectine est généralement utilisée dans l'industrie alimentaire comme gélifiant, épaississant, stabilisant et agent émulsifiant (Ma, X.;et al., 2020).

La pectine forme des hydrogels et est donc largement utilisée dans aliments hydratés et visqueux (Douglas, T.E.L.;et al,2018). Populaire pour une utilisation dans les confitures, les jus de fruits, les desserts, les produits laitiers (Jindal, M.;et al. 2013), et les gelées, c'est pourquoi les propriétés gélifiantes de la pectine sont bien connues (Masuelli, M.A.).

Le l'utilisation comme agent stabilisant dans les dispersions colloïdales varie entre les émulsions, les aliments enrichis avec des antioxydants, des boissons lactées acidifiées et des boissons aux fruits à haute teneur en protéines (Naqash, F.et al., 2017).



**Figure 25 : Gélifiant (Savanna shoemaker.2019)**

L'utilisation d'emballages alimentaires et d'enrobages comestibles à base de matériaux dérivés des sources pétrolières sont liées à l'épuisement des ressources naturelles (Gaona-Sánchez, V.A.,et al, 2021). En revanche, la pectine les revêtements ont été étudiés pour prolonger la durée de conservation des produits alimentaires au cours des dernières années, principalement en raison du fait qu'ils sont renouvelables, biodégradables et biocompatibles. (Sucheta., et al. 2019).

Ces caractéristiques sont liées au principe des chimies vertes et sont très importantes pour atteindre le monde durable. Dans les produits alimentaires, l'enrobage a un effet significatif sur contrôler la perte d'eau et réduire la pourriture des fruits, en maintenant leur fermeté et en prolongeant leur durée de conservation. (Anastas, P. ; Eghbali, N. 2020).



**Figure 26** : Epaisissant

### **III.1.2. Les applications de la pectine dans l'industrie pharmaceutiques**

La pectine possède naturellement diverses propriétés biologiques bénéfiques à l'homme. Malgré ces effets thérapeutiques constatés dans de nombreuses études, la pectine est toujours considérée comme un complément alimentaire. En 2012, les autorités de santé européennes (**EFSA, European Food Safety Authority et la Commission européenne**) ont estimé, d'après les données scientifiques disponibles, que les alicaments utilisant la pectine ne pouvaient prétendre qu'à une réduction du pic de glycémie et à une contribution au maintien d'un taux sanguin en cholestérol normal (**VIDAL. 2014**).

Il sera détaillé les principales propriétés thérapeutiques de la pectine et de la pectine modifiée, ainsi que les mécanismes pharmacologiques impliqués. Il sera étudié les propriétés hypolipémiante et hypoglycémiant, son utilisation dans le traitement des diarrhées chroniques chez l'enfant, son rôle d'élimination des métaux toxiques et ses propriétés anticancéreuses.

Jusqu'en 2002, la pectine était l'un des ingrédients principaux utilisés dans des pastilles pour le mal de gorge comme adoucissant. Dans les produits cosmétiques, elle agit en tant que stabilisateur, elle est employée dans les préparations curatives de blessures et surtout dans les adhésifs médicaux, tels que les dispositifs de colostomie (**Pranati et al., 2011**). Comme prophylactique naturel, la pectine agit contre l'empoisonnement des cations toxiques. Elle s'est montrée efficace dans l'élimination du plomb et du mercure dans l'appareil gastro-intestinal et les organes respiratoires. Lorsqu'elle est injectée par voie intraveineuse, elle réduit le temps de coagulation du sang prélevé.

De ce fait, elle est utile dans le contrôle de l'hémorragie ou de saignement local. Les combinaisons de celle-ci avec d'autres colloïdes ont été largement utilisées pour traiter la diarrhée, particulièrement chez les enfants en bas âge (**Pranati et al., 2011**). Cependant elle a une action

antimicrobienne in vitro à l'égard de quelques souches bactériennes (Ziad et al., 2013). La pectine s'est révélée aussi d'une action prometteuse dans les colites ulcéreuses, la maladie de Crohn et du cancer du côlon (Pranati et al., 2011).



**Figure 27** : Extraction et évaporation de la pectine (Pranati et al., 2011)



**Figure 28** : Des Gélules de pectine (NSAIDs.2020)

### III.1.2.1. L'effet de la pectine sur la biodisponibilité des minéraux et vitamines

Les effets de l'ingestion de pectine peuvent donc être bénéfiques (métaux, radionucléides) mais également délétères (minéraux, vitamines) en fonction des éléments considérés. Suite à une administration orale de pectine on observe une diminution de l'absorption intestinale des acides aminés, des sucres (tel que le glucose) ainsi que des ions sodiques et chlorures.

La structure de la pectine administrée semble avoir une influence sur ces modifications d'absorption intestinale : ainsi, les pectines hautement méthoxylées présentent un effet inhibiteur sur l'absorption de glucose plus important que les pectines faiblement méthylées.

Il est maintenant bien connu que les effets bénéfiques des fibres alimentaires ne doivent pas masquer leurs effets indésirables sur la disponibilité biologique de certains nutriments, notamment des minéraux et des vitamines (Boudraa, 2017).

Les effets sur les minéraux dépendent du degré d'estérification et de la nature de la pectine administrée : ainsi, une pectine faiblement méthoxylée diminue l'absorption et la rétention des minéraux, conduisant alors à un déséquilibre des balances des éléments calcium, magnésium et zinc (Genevois, 2016).



**Figure 29** : des gélules de pectin (boxpharmacy.2015)



**Figure 30** : multivitamins (actifproduct.2019)

### III.1.2.2. Pectine et santé

La pectine utilisée en tant que fibre alimentaire exerce un effet physiologique sur l'intestin en réduisant le temps de transit et l'absorption du glucose (Olano-Martin et al., 2002). En tant qu'additif alimentaire, les pectines peuvent conduire à des effets néfastes pour la santé.

On définit la dose journalière admissible, au-delà de laquelle cette dose peut engendrer :

- Des réactions d'allergie et d'intolérance avec la manifestation d'une intolérance beaucoup plus remarquée qu'une allergie.
- Des symptômes cliniques dont les plus courants se produisent au niveau des voies respiratoires (asthme et rhinite) et sur la peau (urticaire ou angioedème).
- Des symptômes migraine, irritation de l'appareil intestinal, troubles psychologiques et arthralgie (Baissise, 2009)

### III.1.2.3. Effet thérapeutiques des pectines

La pectine joue un rôle essentiel en nutrition humaine en fixant un nombre d'éléments présents de la lumière intestinale. Parmi les effets bénéfiques :

- La régulation du taux de cholestérol hépatique (**Sharma et al., 2006; Willats et al., 2006**).
- La fixation des substances toxiques comme les radio-nucléotides et les métaux lourds (**Jourdain et al. 2005**).
- L'effet ou activité anti-cancer de divers types, surtout ceux de la prostate, du colon et du sein (**Willats, 2006**).
- L'amélioration de la digestibilité des protéines.
- La pectine présente une activité anti-inflammatoire.
- Elle est considérée comme une fibre alimentaire, réglant ainsi le transit intestinal, absorbant les sels biliaires et présentant une action sur la satiété (**Herbsthler et Fox, 1998**).
- Les pectines sont considérées comme des ingrédients prébiotiques spécifiques, qui favorisent la croissance d'organismes bénéfiques dans le colon, tout en freinant le développement et l'activité des organismes pathogènes (**Manderson et al., 2005 ; Sharma et al., 2006**).

Selon (**Manderson et al., 2005**), la combinaison de la pectine avec un organisme pro biotique permet

D'améliorer la santé intestinale ;

De renforcer le système immunitaire ;

D'accroître la résistance à la maladie.

### III.1.3. Les applications de la pectine dans l'industrie biomédicale

Un grand nombre d'études *in vivo* et *in vitro* a été mené sur l'effet des NDO. Bien que certains des effets ne soient pas clairement démontrés, certaines données indiquent des effets cliniquement significatifs qui justifient l'ensemble des travaux actuels (**Swennen et al., 2006**).

Par exemple, les NDO sont connus pour avoir des effets sur le métabolisme bactérien, la croissance des bactéries dans le colon, la diminution du risque de cancer, la modulation du système immunitaire, la diminution du cholestérol (**Mussatto et al., 2007 ; Qiang et al., 2009**).

Les fragments pectiques font partie des NDO et peuvent présenter des effets santé. Ainsi, il a été rapporté que les fragments pectiques pouvaient inhiber l'adhésion des bactéries aux cellules épithéliales et ainsi être utilisés comme des agents thérapeutiques.



Par exemple, l'acide d'galacturonique empêche l'adhésion d'*Escherichia coli* sur les cellules uro épithéliales *in vitro* (**Hotchkiss et al., 2003; Olano-Martin et al., 2003**) ont montré que les POS exerçaient un rôle protecteur en inhibant les Shiga-toxines sécrétées par *Escherichia coli* O157:H7.

Par ailleurs, certains effets anti-cancérogènes ont été rapportés. Les pectines et les POS sont capables d'induire une mort par apoptose des cellules d'adénocarcinome HT-29 du colon (**Olano-Martin et al., 2003**). Des essais réalisés sur des lignées de cellules myéloïdes (**Chauhan et al., 2005**) et sur des cellules cancéreuses de la prostate (**Jackson et al., 2007**) ont montré les mêmes effets. En outre, certains dérivés de la pectine ont été utilisés pour la préparation de vaccins, mais aussi en tant que vecteurs dans l'administration de produits pharmaceutiques (**Souto-Maior et al., 2010**).

La pectine présente également des applications dans l'industrie biomédicale en raison de ses propriétés uniques. Voici quelques-unes de ses utilisations dans ce domaine:

Matrices de libération de médicaments : La pectine peut être utilisée pour créer des matrices ou des hydrogels qui permettent la libération contrôlée de médicaments. Ces matrices peuvent être utilisées pour administrer des médicaments localement, par exemple dans le traitement des affections gastro-intestinales ou des infections buccales. (**Kapoor, M., et al. 2018**). (**Zhao, Y., et al. 2020**).

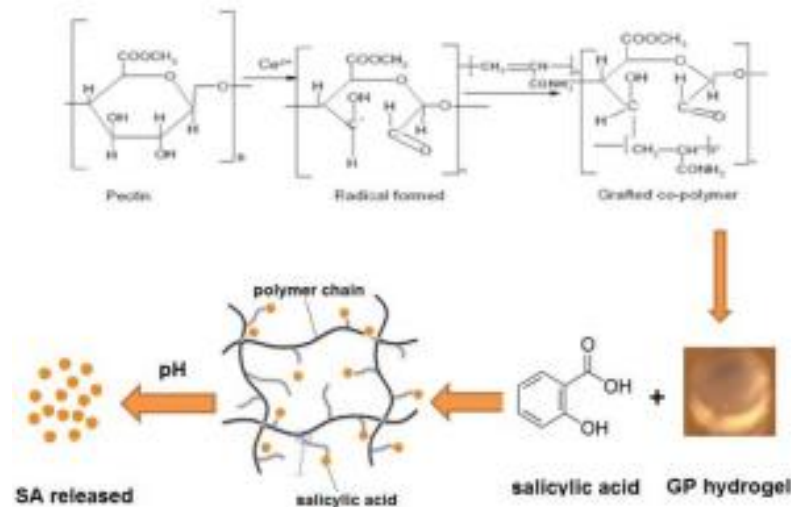
1. Supports de greffes et de régénération tissulaire : En raison de ses propriétés de biocompatibilité et de bio adhésivité, la pectine peut être utilisée comme support pour les greffes de tissus ou la régénération tissulaire. Elle peut faciliter la croissance cellulaire et l'adhésion des tissus, favorisant ainsi la guérison des plaies et des lésions. (**Rajendran, S., et al. 2021**).

2. Applications dans le diagnostic médical : La pectine peut être utilisée comme revêtement ou matrice pour les dispositifs de diagnostic médical tels que les biosenseurs. Elle peut aider à améliorer la sensibilité et la spécificité des tests diagnostiques en permettant une meilleure immobilisation des agents de détection. (**Malviya, R., et al. 2019**).

3. Systèmes d'administration ciblée : La pectine peut être modifiée chimiquement pour être sensible à des stimuli spécifiques tels que le pH, la température ou les enzymes. Cela permet de concevoir des systèmes d'administration de médicaments ciblés qui libèrent les médicaments dans des conditions spécifiques, ce qui peut améliorer l'efficacité thérapeutique et réduire les effets indésirables. (**Silva, C., et al. 2018**).

Il convient de noter que ces applications sont encore en développement et font l'objet de recherches approfondies dans le domaine biomédical. La pectine présente un potentiel prometteur en

tant que matériau polyvalent pour diverses applications biomédicales en raison de ses propriétés physicochimiques et de sa biocompatibilité.



**Figure 31 :** Mécanisme de copolymérisation greffée de la pectine avec Polyacrylamide et libération contrôlée d'acide salicylique à partir de l'hydrogel de pectine greffée (GP) (Silva, C.,et al. 2018).

### III.1.4. Les applications de la pectine dans l'industrie cosmétique

La pectine présente plusieurs applications dans l'industrie cosmétique en raison de ses propriétés fonctionnelles et de sa compatibilité avec la peau et les cheveux. Voici quelques-unes de ses utilisations spécifiques dans ce domaine:

**1. Gélifiants et épaississants :** La pectine est utilisée comme agent gélifiant ou épaississant dans les produits cosmétiques tels que les crèmes, les lotions, les gels douche et les shampooings. Elle confère une texture agréable aux produits, améliore leur stabilité et facilite leur application. (Kumbhar, D.,et al. 2017).

**2. Stabilisateurs d'émulsion :** En raison de sa capacité à former des gels et à retenir l'eau, la pectine est utilisée comme stabilisateur d'émulsion dans les formulations cosmétiques. Elle permet de maintenir la stabilité de l'émulsion, empêchant la séparation des phases huile et eau.

**3. Agents filmogènes :** La pectine peut former un film mince sur la peau ou les cheveux, ce qui en fait un agent filmogène utilisé dans les produits de soins capillaires tels que les masques capillaires, les

après-shampooings et les produits coiffants. Ce film aide à sceller l'hydratation, à protéger des agressions extérieures et à améliorer la brillance des cheveux. **(Paula, H. C. B., et al. 2018).**

4. Agents conditionnants : La pectine est utilisée comme agent conditionnant dans les produits capillaires pour améliorer la douceur, la facilité de coiffage et la résistance des cheveux. Elle aide à réduire les frisottis, à renforcer les cheveux et à les rendre plus maniables. **(Ibrahim, H. M., & El Zowalaty, M. E. 2018).**

5. Agents texturants : La pectine peut être utilisée comme agent texturant dans les produits cosmétiques tels que les gels coiffants, les mousses et les produits coiffants structurants. Elle aide à créer des coiffures durables en offrant une tenue et une structure aux cheveux. **(Balan, V. K., & George, M. 2016).**

6. Agents d'exfoliation douce : La pectine peut être utilisée dans les produits exfoliants pour la peau, offrant une exfoliation douce et éliminant les cellules mortes de la peau, tout en préservant l'hydratation et la douceur de la peau. **(Ribeiro, M. R., et al. 2017).**

Il convient de noter que ces applications peuvent varier en fonction des formulations spécifiques et des objectifs des produits cosmétiques. Les propriétés de la pectine en tant qu'ingrédient cosmétique sont sujettes à des recherches continues et à des développements technologiques dans l'industrie cosmétique.

Caractéristiques de propriétés gélifiantes exceptionnelles, excellente biocompatibilité et non toxicité, ainsi que la biodégradabilité, permettent à la pectine d'être un nouveau produit biopolymère attrayant qui peut être utilisé dans les applications cosmétiques et de promotion de la santé.

La pectine sert d'émulsion stabilisant dans les produits cosmétiques. Il est utilisé pour fabriquer des lotions pour le corps et les mains, du maquillage formulations, shampooings, après-shampooings et cosmétiques pour la propreté personnelle **(Augustine., et al. 2015).**

La pectine offre un avantage significatif dans L'industrie cosmétique sous forme de gélification, de viscosité, d'absorption d'humidité, Émulsification, estérification, adhésion et chélation.

Micro encapsulassions de lipophile Matériaux est un moyen de formuler un matériau liquide sous une forme posologique solide pour favoriser son maniabilité, en renforçant sa stabilité et en préservant sa libération **(Turchiuli et al., 2005).**

L'incorporation de ces microcapsules/microsphères dans une base de gel cosmétique améliorera l'attrait esthétique de ces produits et assurent une libération lente des composants actifs tout en préservant la stabilité et l'efficacité du produit tout au long de sa durée de conservation. Les conclusions d'une étude a révélé que le rapport 5:1,5 des microsphères d'alginate de pectine est le mieux adapté à l'incorporation dans une base de gel.

De telles microsphères peuvent être remplies de vitamine E ou de tout autre antioxydant ou parfum pour améliorer la stabilité du produit et améliorer l'efficacité de la formulation (**Shalaka., et al. 2009**), Si elles sont frottées entre les paumes, ces microsphères se rompent en libérant vitamine E.

En outre, des gels de pectine physiquement perturbés ont été utilisés dans les lotions et les crèmes formulation sans utilisation de tensioactif (**Bouyer.,et al. 2012**), Les agrumes à haute teneur en méthoxyle et la pectine de pomme peuvent remplacer d'autres hydrocolloïdes ou émulsifiants en tout ou en partie (**Endreß & Rentschler, 1999**).

La pectine hydratée lors du gonflement système de particules lisses et humides qui donne aux crèmes pour la peau une texture grasse.

La forme non estérifiée lorsqu'il est utilisé dans les produits de soin, protège les tissus des effets des rayons ultraviolets, retarde le processus de photovieillessement et présente des propriétés hydratantes.

L'unique gélifiante capacité de la pectine et sa bioadhérence efficace est un point de repère dans la production de nombreux produits de soins de la peau (**Endreß & Rentschler, 1999**).



**Figure 32** : Des produits cosmétiques à la pectine (cosmoll.2020)

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

En conclusion, la pectine est un polymère naturel extrait principalement de fruits et utilisé dans diverses applications industrielles. Elle présente des propriétés fonctionnelles uniques qui en font un ingrédient polyvalent dans plusieurs industries, notamment l'industrie alimentaire, biomédicale, pharmaceutique, cosmétique, et bien d'autres.

- l'industrie alimentaire, la pectine est largement utilisée comme agent gélifiant, épaississant et stabilisant dans la fabrication de confitures, gelées, produits laitiers, desserts et autres produits alimentaires. Elle améliore la texture, la stabilité et la qualité des produits tout en offrant une expérience sensorielle agréable.
- l'industrie biomédicale et pharmaceutique, la pectine trouve des applications prometteuses en tant que matériau pour la libération contrôlée de médicaments, support de greffes et de régénération tissulaire, revêtement pour les dispositifs médicaux, et dans d'autres domaines de la recherche biomédicale. Ses propriétés biocompatibles et sa capacité à former des gels sont exploitées pour développer des produits pharmaceutiques innovants.
- l'industrie cosmétique, la pectine est utilisée pour ses propriétés gélifiantes, épaississantes, stabilisantes, filmogènes, conditionnantes et texturants. Elle est intégrée dans les produits de soins de la peau, les produits capillaires, les produits de maquillage et autres formulations cosmétiques pour améliorer leur texture, leur performance et leur attrait esthétique.

En plus de ses applications spécifiques dans chaque industrie, la pectine présente également des avantages tels que sa sécurité d'utilisation, son faible coût de production et sa disponibilité élevée. Elle est considérée comme un ingrédient naturel, non toxique et respectueux de l'environnement.

Cependant, il convient de noter que les applications de la pectine continuent d'être étudiées et développées, et de nouvelles avancées scientifiques et technologiques peuvent élargir ses possibilités d'utilisation dans le futur.

# **Références bibliographiques**



## Référence bibliographique

**Agarwal, U. P. (2006).** Raman imaging to investigate ultrastructure and composition of plant cell walls: distribution of lignin and cellulose in black spruce wood (*Picea mariana*). *Planta*, 224(5), 1141.

**Akhtar, M., Dickinson, E., Mazoyer, J., Langendorff, V.,** "Emulsion stabilizing properties of depolymerized pectin. *Food Hydrocolloids*."(2002),16, 249 – 256.

**Alkorta I., Garbisu C., Liama M.J. & Serra J.L.,** "Industrial applications of pectic enzymes".a review. *Process. Biochem.*, (1998), 33(1), 21-28.

**Anastas, P.; Eghbali, N. Green chemistry: Principles and practice. Chem. Soc. Rev. 2010, 39,** 301–312. [CrossRef] [PubMed] And bioactive health-promoting aspects". *Carbohydrate Polymers* 229, 115474 (2020).

**Axelos, M.A.V., Thibault, J.F.,** "The chemistry of low-methoxyl pectin gelation. *The Chemistry and Technology of Pectin*. Editeur: Walter, R.H.", New York, Academic Press, (1991),109- 118.

**BAISSISSE SALIMA.,** "Extraction et appréciation des pectines à partir d'écorces d'oranges, des pulpes d'abricots et pommes", Mémoire magistère en science agronomique, 10/01/2009.

**Balan, V. K., & George, M. (2016).** Pectin-based hydrogels: Versatile biomaterials for pharmaceutical and biomedical applications. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 13(11), 1609-1623.

**Baskin TI. 2005.** Anisotropic expansion of the plant cell wall. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, Vol. 21, 203-222.

**Bekhouche F.;** "Bactéries lactiques du lait cru de vache et Microorganismes pectinolytiques des olives noires et vertes : 1. Isolement et Identification biochimique. 2. Evaluation et Optimisation de la production d'enzyme polygalacturonase". *Thèse de Doctorat*. Université Mentouri de Constantine. Algérie (2006).

**Blanco P., Sieiro C. & Villa G.T.,** "Production of pectic enzymes in yeasts". *FEMS Microbiol. Lett.*, (1999), 175, 1-9.

**Boon EJMC, Struik PC, Engels FM, Cone JW. 2012.** Stem characteristics of two forage maize (*Zea mays* L.) cultivars varying in whole plant digestibility. IV. Changes during the growing season in anatomy and chemical composition in relation to fermentation characteristics of a lower internode. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences* 59, 13-23.

**Boon EJMC, Struik PC, Tamminga S, Engels FM, Cone JW. 2008.** Stem characteristics of two forage maize (*Zea mays* L.) cultivars varying in whole plant digestibility. III. Intrastern variability in anatomy, chemical composition and in vitro rumen fermentation. *Njas Wageningen Journal of Life Sciences* 56, 101-122.

**Brown, R. M., Saxena, I. M., & Kudlicka, K. (1996).** Cellulose biosynthesis in higher plants. *Trends in Plant Science*, 1(5), 149-156.

**BRUNETON J ; 1999.** *Pharmacognosie (Phytochimie, Plantes médicinales) 3e Ed:Tec et Doc*, Paris, 34-102.

**Caffall, K.H., and Mohnen, D. (2009).** The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides. *Carbohydr. Res.* 344, 1879–1900.

**Capel, F., Nicolai, T., Durand, D., Boulenguer, P., Langendorff, V.,** " Calcium and acidinduced gelation of (amidated) low methoxy pectin.", *Food Hydrocolloids*, (2006), 20, 901 - 907.

**Carpita, N., and Gibeaut, D. (1993).** Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth. *Plant J.* 3, 1–30.

**Carrington JC, Dougherty WG. 1987.** Small nuclear inclusion protein encoded by a plant potyvirus genome is a protease. *Journal of Virology* 61: 2540–2548.

**Casler MD, Jung HJG. 2006.** Relationships of fibre, lignin, and phenolics to in vitro fibre digestibility in three perennial grasses. *Animal Feed Science and Technology* 125, 151-161.

**Chabbert B, Tollier MT, Monties B, Barriere Y, Argillier O. 1994.a.** Biological variability in lignification of maize: expression of the brown midrib bm2 mutation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 64, 455-460.

**Chabbert B, Tollier MT, Monties B, Barriere Y, Argillier O. 1994.b.** Biological variability in lignification of maize: expression of the brown midrib bm3 mutation in three maize cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 64, 349-355. **Chen F, Dixon RA. 2007.** Lignin modification improves fermentable sugar yields for biofuel production. *Nature Biotechnology* 25, 759-761.

**Chan S-Y., Choo W.S., Young D-J. et al. ( 2017).** « Pectin as a Rheology Modifier: Origin, Structure, **Commercial Production and Rheology** ». *Carbohydrate Polymers* 161: 118-139.

**Chen L, Auh C, Chen F, Cheng XF, Aljoe H, Dixon RA, Wang ZY. 2002.** Lignin deposition and associated changes in anatomy, enzyme activity, gene expression, and ruminal degradability in stems of tall fescue at different developmental stages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 5558-5565.

**Chesson A, Provan GJ, Russell W, Scobbie L, Chabbert B, Monties B. 1997.** Characterisation of lignin from parenchyma and sclerenchyma cell walls of the maize internode. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 73, 10-16.

**Coenen, G.J., Bakx, E.J., Verhoef, R.P., Schols, H.A., and Voragen, A.G.J. (2007).** Identification of the connecting linkage between homo- or xylogalacturonan and rhamnogalacturonan type I. *Carbohydr. Polym.* 70, 224–235.

**Cosgrove D.** 2000. Loosening of plant cell walls by expansins. *Nature* 407: 321–326.

**Cosgrove, D. J. (2005).** Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(11), 850-861.

**Cui, J., Ren, W., Zhao, C., Gao, W., Tian, G., Bao, Y., et al.,** —The structure– property relationships of acid- and alkali-extracted grapefruit peel pectins." , *Carbohydrate Polymers* (2020), 229.

**Cui, J., Zhao, C., Zhao, S., Tian, G., Wang, F., Li, C., et al.,** "Alkali + cellulase extracted citrus pectins exhibit compact conformation and good fermentation properties." , *Food Hydrocolloids* (2020), 108.

**Daas P.J.H. et al.,** "Investigation of the non-esterified galacturonic acid distribution in pectin with endopolygalacturonase". *Carbohydr. Res.*, (1999), 318, 135-145.

**Dallel. M.,** « Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil », Thèse de docteur, Université de Haute Alsace, 2012.

**DÉLATTRE CÉDRIC., 2005.** Stratégie d'obtention d'oligosaccharides anioniques par dégradation enzymatique de gluconate, pdf, 4-11.

**Delmer, D.P. (1999).** Cellulose biosynthesis: exciting times for a difficult field of study. *Annu. Rev. Plant Biol.* 50, 245–276.

**DOAT JACQUELINE., 1974.** Application de la chromatographie sur couche mince a l'analyse des gommes et des bois tropicaux, pdf, 67-68.

**Donaldson LA. 2001a.** Lignification and lignin topochemistry - an ultrastructural view. *Phytochemistry* 57, 859-873.

**Donato L.,** "Gélification et séparation de phase dans les mélanges protéines globulaires/pectines faiblement méthylées selon les conditions ioniques". Thèse Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires (2004).

**Douglas, T.E.L.; Hempel, U.; Zydek, J.; Vladescu, A.; Pietryga, K.; Kaeswurm, J.A.H.; Buchweitz, M.; Surmenev, R.A.; Surmeneva, M.A.; Cotrut, C.M.; et al.** Pectin coatings on titanium alloy scaffolds produced by additive manufacturing: Promotion of human bone marrow stromal cell proliferation. *Mater. Lett.* 2018, 227, 225–228.

**Dranca F., Oroian M.,** "Extraction, Purification and Characterization of Pectin from Alternative Sources with Potential Technological Applications." , *Food Research International* 113 (2018), 327-350.

**Dranca, F., Vargas, M., & Oroian, M.,** "Physicochemical properties of pectin from *Malus domestica* "Faticeni" apple pomace as affected by non-conventional extraction techniques." , *Food Hydrocolloids*, (2020), 100, 105383.

**Edwardson JR, Christie RG. 1997.** Viruses infecting peppers and other solanaceous crops. University of Florida 2: 190.

**Eriksson KEL, Blanchette RA, Ander P. 1990.** Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components.

**Fishman, M.L., Chau, H.K., Hoagland, P., Ayyad, K.,** "Characterization of pectin, flash extracted from orange albedo by microwave heating, under pression.", *Carbohydr. Res* 323 (2000), 126 – 138.

**Fishman, M.L., Jen, J.J. (1986):** Chemistry and Function of Pectins. American Chemical Society. Washington.

**Fleming AJ. 2005.** The co-ordination of cell division, differentiation and morphogenesis in the shoot apical meristem: a perspective. *Journal of Experimental Botany* 57: 25–32.

**Freitas, C.M.P. ; Costa, A.R. ; Rodrigues, F.Á. ; Júnior, M.M.J. ; Dias, M.M. ; Sousa, R.C.S.** Optimisation de l'extraction de la pectine du fruit de la passion (*Passiflora edulis flavicarpa*) à l'aide de la méthode de la surface de réponse. *Braz. J. Dev.* 2020,6, 25609-25625.

**Freitas, C.M.P. ; Sousa, R.C.S. ; Dias, M.M. ; Coimbra, J.S.** Extraction de pectine à partir d'écorces de fruits de la passion. *Food Eng. Rev.* 2020, 12, 460-472.

**Fry, S. C. (1988).** The growing plant cell wall: chemical and metabolic analysis. New York: Longman Group Limited. 333pp.

**Gaona-Sánchez, V.A.; Calderón-Domínguez, G.; Morales-Sánchez, E.; Moreno-Ruiz, L.A.; Terrés-Rojas, E.; de la Salgado-Cruz, M.P.; Escamilla-García, M.; Barrios-Francisco, R.** Physicochemical and superficial characterization of a bilayer film of zein and pectin obtained by electrospraying. *J. Appl. Polym. Sci.* 2021, 138, 1–15. [CrossRef]

**Glicksman M., Gum "technology in the Food Industry".** ACADEMIC PRESS(Ed). New York San Francisco London, (1969), pp159-189.

**Gong, J. ; Chen, X. ; Tang, T.** Progrès récents dans la carbonisation contrôlée des (déchets) polymères. *Prog. Polym. Sci.* 2019,94, 1-32.

**Guerriero G, Fugelstad J, Bulone V. 2010.** What Do We Really Know about Cellulose Biosynthesis in Higher Plants? *Journal of Integrative Plant Biology* 52, 161-175.

**GUIGRARD JEAN.LOUIS., 1996.** Biologie végétale, centre culturel universitaire ALGER, 96-107.

**Hamann T. 2012.** Plant cell wall integrity maintenance as an essential component of biotic stress response mechanisms. *Frontiers in Plant Science* 3: 1–5.

**hang, G.F., and Staehelin, L.A. (1992).** Functional Compartmentation of the Golgi Apparatus of Plant Cells : Immunocytochemical Analysis of High-Pressure Frozen- and FreezeSubstituted

Sycamore Maple Suspension Culture Cells. *PLANT Physiol.* 99, 1070–1083.

**Hayashi, T. (1989).** Xyloglucans in the primary cell wall. *Annual Review of Plant Biology*, 40(1), 139-168.

**Ho, Matia-Merino, & Huffman, 2015;** Jenkins, Leeds.

**Hopkins, W. G. (2003).** *Physiologie végétale.* Bruxelles : De Boeck Supérieur. 495pp.

**Ibrahim, H. M., & El Zowalaty, M. E. (2018).** Utilization of pectin as a natural polymer for pharmaceutical and biomedical applications. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 10(2), 64-70.

**Ibrahim, H. M., & El Zowalaty, M. E. (2018).** Utilization of pectin as a natural polymer for pharmaceutical and biomedical applications. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*  
**Jiefen Cui a, Chengying Zhao a, LipingFeng a, Yanhui Han b, Hengjun Du b, Hang Xiao b,\*\*, JinkaiZheng a,\*.** "Pectins from fruits: Relationships between extraction methods, structural characteristics, and functional properties.", *Trends in Food Science & Technology* 110 (2021): 39-59.

**Jindal, M.; Kumar, V.; Rana, V.; Tiwary, A.K.** Aegle marmelos fruit pectin for food and pharmaceuticals: Physico-chemical, rheological and functional performance. *Carbohydr. Polym.* 2013, 93, 386–394. [CrossRef]

**Kapoor, M., Yadav, A., & Sharma, R. (2018).** Pectin and its applications in drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 769-781.

**Kerlan C. 1996.** La Pomme de terre : production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations. Rousselle P, Robert Y, Crosnier C eds. *Maladies à virus.* INRA Editions, 232–260.

**Khedmat, L., Izadi, A., Mofid, V., & Mojtahedi, S. Y.,** "Recent advances in extracting pectin by single and combined ultrasound techniques: A review of Techno functional.

**Kogovsek P, Kladnik A, Mlakar J, Tušek Žnidarič M, Dermastia M, Ravnikar M, Pompe-Novak M. 2011.** Distribution of Potato virus Y in potato plant organs, tissues and cells. *Phytopathology* 101: 1292–1300.

**Kroon-Batenburg, L., & Kroon, J. (1997).** The crystal and molecular structures of cellulose I and II. *Glycoconjugate Journal*, 14(5), 677-690.

**Kumbhar, D., Pokharkar, V., & Kulkarni, A. (2017).** Pectin based hydrogel for cosmetic applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 41, 204-213.

**Kutschera U, Nikas KJ. 2007.** The epidermal-growth-control theory of stem elongation: An old and a new perspective. *Journal of Plant Physiology* 164, 1395-1409.

**Lamport DTA, Kieliszewski MJ, Chen Y, Cannon MC. 2011.** Role of the extensin superfamily in

primary cell wall architecture. *Plant Physiology* 156: 11–19.

**LEROUX J., LANGENDORFF V., SCHIK G., VAISHNAV V. & MAZYER J.** "Emulsion stabilising properties of pectin.", *Food Hydrocolloids*, (2003), 17, 455- 462.

**Liu, Y., Shi, J., Langrish. T.A.G.,** "Water-based extraction of pectin from flavedo and albedo of orange peels." , *Chemical Engineering* 120 (2006): 203-209.

**Lloyd C, Chan J. 2004.** Microtubules and the shape of plants to come. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 5, 13-22.

**Ma, X. ; Chen, W. ; Yan, T. ; Wang, D. ; Hou, F. ; Miao, S. ; Liu, D.** Comparaison de la pectine d'agrumes et de la pectine de pomme en conjugaison avec isolat de protéine de soja (SPI) dans des conditions contrôlées de chauffage à sec. *Food Chem.*2020, 309, 125501.

**Ma, X.; Chen, W.; Yan, T.; Wang, D.; Hou, F.; Miao, S.; Liu, D.** Comparison of citrus pectin and apple pectin in conjugation with soy protein isolate (SPI) under controlled dry-heating conditions. *Food Chem.* 2020, 309, 125501. [CrossRef]

**Mahé Joaquim.** "Applications d'un polymère biodégradable dans le domaine de la santé.", Thèse pour Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie, UNIVERSITE D'ANGERS (2018): 19.

**Malviya, R., Srivastava, P., & Bansal, M. (2019).** Pectin: A versatile polymer for pharmaceutical applications. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 9(4), 238-246.

**Mangeon A, Junqueira RM, Sachetto-Martins G. 2010.** Functional diversity of the plant glycine-rich proteins superfamily. *Plant Signaling & Behavior* 5: 99–104.

**Maran, P.J., Sivakumar, V., Thirugnanasambandham, K., Sridhar, R. ,** Microwave assisted extraction of pectin from waste *Citrullus lanatus* fruit rinds.", *Carbohydrate Polymers* 101 (2014), 786 - 791.

**Marga F, Grandbois M, Cosgrove DJ, Baskin TI. 2005.** Cell wall extension results in the coordinate separation of parallel microfibrils: evidence from scanning electron microscopy and atomic force microscopy. *Plant Journal* 43, 181-190.

**Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M., & Rimac Brnčić, S.,** "An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from **plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction.** ", *Trends in Food Science & Technology* 76 (2018): 28–37.

**Marie Carene Nancy Picot-Allain a, b, Brinda Ramasawmy b, and Mohammad Naushad Emmambux a.,** "Extraction, Characterisation, and Application of Pectin from **Tropical and Sub-Tropical Fruits: A Review.**", *Food Reviews International* (2020), 8.

**Martau, G.A. ; Mihai, M. ; Vodnar, D.C.** The use of chitosan, alginate, and pectin in the biomedical and food sector-biocompatibility, bioadhesiveness, and biodegradability. *Polymers* 2019,

11, 1837.

**Martau, G.A.; Mihai, M.; Vodnar, D.C.** The use of chitosan, alginate, and pectin in the biomedical and food sector-biocompatibility, bioadhesiveness, and biodegradability. *Polymers* 2019, 11, 1837. [CrossRef] [PubMed]

**Masuelli, M.A.** Viscometric study of pectin. Effect of temperature on the hydrodynamic properties. *Int. J. Biol. Macromol.* 2011, 48, 286–291. [CrossRef]

**McNeil, M., Darvill, A. G., Fry, S. C., & Albersheim, P. (1984).** Structure and function of the primary cell walls of plants. *Annual Review of Biochemistry*, 53(1), 625-663.

**Mesbahi, G., Jamalian, J., Farahnaky, A.,** "A comparative study on functional properties of beet and citrus pectins in food systems. *Food Hydrocolloids*", (2005), 19, 731 - 738.

**Methacanon, P., Krongsin, J., & Gamonpilas, C.,** "Pomelo (*Citrus maxima*) pectin: Effects of extraction parameters and its properties. ", *Food Hydrocolloids* (2014).

**Misra, N. N., Martynenko, A., Chemat, F., Paniwnyk, L., Barba, F. J., & Jambrak, A. R.,** "Thermodynamics, transport phenomena and electrochemistry of external field assisted non-thermal food technologies.", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 11.58 (2018).

**Mohnen, D. (2008).** Pectin structure and biosynthesis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11, 266–277.

**Morot-Gaudry JF. 2010.** Lignines (les). in *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 96, 67-84.

**Morrison TA, Jung HG, Buxton DR, Hatfield RD. 1998.** Cell-wall composition of maize internodes of varying maturity. *Crop Science* 38, 455-460.

**Munarin F., Tanzi M.C. et Petrini P.,** "Advances in Biomedical Applications of Pectin Gels.", *International Journal of Biological Macromolecules* 4.51 (2012), 681-689.

**Munarin, F. ; Tanzi, M.C. ; Petrini, P.** Progrès dans les applications biomédicales des gels de pectine. *Int. J. Biol. Macromol.* 2012, 51, 681-689.

**Naqash, F.; Masoodi, F.A.; Rather, S.A.; Wani, S.M.; Gani, A.** Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin—A Review. *Carbohydr. Polym.* 2017, 168, 227–239. [CrossRef] [PubMed]

**Naqash, F.; Masoodi, F.A.; Rather, S.A.; Wani, S.M.; Gani, A.** Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin—A Review. *Carbohydr. Polym.* 2017, 168, 227–239. [CrossRef] [PubMed]

**Naseri-Nosar, M., & Ziora, Z. M. (2018).** Wound dressings from naturally occurring polymers: A review on homopolysaccharide-based composites. *Carbohydrate Polymers*, 189, 379-398.

**Nebenführ, A., Gallagher, L.A., Dunahay, T.G., Frohlick, J.A., Mazurkiewicz, A.M., Meehl, J.B., and Staehelin, L.A. (1999).** Stop-and-go movements of plant Golgi stacks are mediated by the

acto-myosin system. *Plant Physiol.* 121, 1127–1141.

**Ngouémazong, E.D. ; Christiaens, S. ; Shpigelman, A. ; Van Loey, A. ; Hendrickx, M.** Les propriétés émulsifiantes et stabilisatrices d'émulsion de la pectine : A review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2015, 14, 705-718.

**O'Neill, M., and York, W.S. (2003).** The composition and structure of plant primary cell walls. In *The Plant Cell Wall*, (J.K.C. Rose), pp. 1–54.

**Opat, A.S., Houghton, F., and Gleeson, P.A. (2001).** Steady-state localization of a medial Golgi glycosyltransferase involves transit through the trans-Golgi network. *Biochem. J.* 358, 33–40.

**O'sullivan, A. C. (1997).** Cellulose: the structure slowly unravels. *Cellulose*, 4(3), 173-207.

**Ouiza, Melle SEBAOUI,** "Modélisation et optimisation de l'extraction de la pectine à partir du zeste de citron et de son utilisation dans l'encapsulation des composés phénoliques des margines de l'industrie oléicole. ", THESE DE DOCTORAT LMD, Spécialité : Chimie, Option : Chimie des Matériaux et de l'Environnement, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU 16, (2018): 16,.

**Ouyang, J. ; Yang, M. ; Gong, T. ; Ou, J. ; Tan, Y. ; Zhang, Z. ; Li, S.** Nanocellule de pectine core-shell chargée de doxorubicine : Un nouveau.

**Paula, H. C. B., Soares, R. M. A., & De Paula, R. C. M. (2018).** Pectin as a natural polymer for drug delivery applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 47, 464-475.

**Pien S, Wyrzykowska J, McQueen-Mason S, Smart C, Fleming A. 2001.** Local expression of expansin induces the entire process of leaf development and modifies leaf shape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98: 11812–11817.

**Ptichkina N.M., Markina O.A. & Rumyantseva G.N.,** "Pectin extraction from pumpkin with the aid of microbial enzymes", *Food Hydrocolloids*, (2008), 22:192- 195.

**Rajendran, S., Senthil Kumar, N., Sudhakar, Y., & Narayanan, V. (2021).** Pectin-based materials for biomedical applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 261, 117859.

**Ralph J, Grabber JH, Hatfield RD. 1995.** Lignin-ferulate cross-links in grasses: active incorporation of ferulate polysaccharide esters into ryegrass lignins. *Carbohydrate Research* 275, 167-178.

**Raven P. H., Evert R. F. et Eichhorn S. (2008).** « Biologie végétale » 7e éd., De Boeck, Bruxelles, 733 p.

**Renard C.,** "Les pectines dans la paroi végétale", Université Avignon. France, (2010).

**Ribeiro, M. R., Bezerra, R. M., Sousa, I. M., & Farias, L. A. (2017).** Pectin and its applications in cosmetic and personal care products. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1972-1979.



**Ridley, B.L., O'Neill, M.A., and Mohnen, D. (2001).** Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling. *Phytochemistry* 57, 929–967.

**Rodsamran, P. ; Sothornvit, R.** La pectine de tilleul intégrée à l'eau de coco et à l'extrait de tilleul comme nouveau sachet film bioactif pour retarder l'oxydation de l'huile de soja. *Food Hydrocoll.* 2019, 97, 105173.

**Sasidharan R, Voeselek LA, Pierik R. 2011.** Cell wall modifying proteins mediate plant acclimatization to biotic and abiotic stresses. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30: 548–562.

**Scheible, W.-R., and Pauly, M. (2004).** Glycosyltransferases and cell wall biosynthesis: novel players and insights. *Curr. Opin. Plant Biol.* 7, 285–295.

**Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010).** Hemicelluloses. *Plant Biology*, 61(1), 263.

**Schols H.A. & Voragen A.G.J.,** "The chemical structure of pectins. In :Pectins and their Manipulation". Blackwell Publishing Ltd (Ed). UK. (2002), Chapter 1 :pp 1-29.

**Scholthof KG, Adkins S, Czosnek H, Palukaitis P, Jacquot E, Hohn B, Hohn T, Saunders K, Candresse T, Ahlquist P, et al. 2011.** Top 10 plant viruses in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology* 12: 938–954.

**Sedan. D., 2007.** « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges.

**Seifert GJ, Roberts K. 2007.** The biology of arabinogalactan proteins. *Annual Review of Plant Biology* 58: 137–161.

**Setiowati, A.D. ; Rwigamba, A. ; Van der Meeren, P.** L'influence du degré de méthylation sur l'activité émulsifiante et thermostabilisante des conjugués protéine de lactosérum-pectine. *Food Hydrocoll.* 2019, 96, 54-64.

**Sharma B.R., Naresh L., Dhuldhoya N.C., Merchant S.U. & Merchant U.C.,** An overview on pectins. *Times Food Processing Journal, India*, (2006), pp 44-51.

**Sheldon, R.A.** Chimie verte, catalyse et valorisation de la biomasse résiduelle. *J. Mol. Catal. A Chem.* 2016, 422, 3-12.

**Shukla DD, Ward CW, Brunt AA. 1994.** The Potyviridae. CAB International.

**Shuryo N., "Pectins and their Manipulation"** - Book review - *Food Research International*, (2003), 36 (6): 643.

**Silva, C., Pinho, E. D., & Macedo, M. F. (2018).** Pectin-based formulations for oral drug delivery. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 44(3), 414-4.

**Soto ML, Moure A, Domínguez H, Parajó JC.** Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review. *J Food Eng.* 2011;105(1):1-27.

doi:10.1016/j.jfoodeng.2011.01.026.

**Sriamonrnsak P.**, "Chemistry of pectin and its pharmaceutical uses:areview,",(2003),206-228.

**Srivastava P. et Malviya R.**" Sources of Pectin, Extraction and Its Applicationsin Pharmaceutical Industry – An Overview|. Indian Journal of Natural Products andResources 2(1), ( 2011), 10-18.

**Stumpf, W., Conn, P. M., & Preiss, J. (2012).** The biochemistry of plants: Carbohydrates. London: Academic Press. 529 pp.

**Sucheta; Chaturvedi, K.; Sharma, N.; Yadav, S.K.** Composite edible coatings from commercial pectin, corn flour and beetroot powder minimize post-harvest decay, reduces ripening and improves sensory liking of tomatoes. Int. J. Biol. Macromol. 2019, 133, 284–293. [CrossRef]

**Terashima N, Fukushima K, He L-F, Takabe K. 1993.** Comprehensive Model of the Lignified Plant Cell Wall. Forage Cell Wall Structure and Digestibility acespublicati, 247-270.

**Théo Efstathiou, Christian Nio; 2008.** Article Analyse des polysaccharides : 3326.

**Thompson MV. 2005.** Scaling phloem transport: Elasticity and pressure–concentration waves. Journal of Theoretical Biology 236: 229–241.

**Verchot J, Herndon KL, Carrington JC. 1992.** Mutational analysis of the tobacco etch potyviral 35-kDa proteinase: identification of essential residues and requirements for autoproteolysis. Virology 190: 298–306.

**Vincken, J.-P. (2003).** If Homogalacturonan Were a Side Chain of Rhamnogalacturonan I. Implications for Cell Wall Architecture. PLANT Physiol. 132, 1781–1789.

**Vincken, J.P.,** "If homogalacturonan were a side chain of rhamnogalacturonan I. Implications for cell wall architecture". Plant Physiology(2003), 132, 1781 - 1789.

**Voragen F., Schols H., Visser R.,** "Advances in Pectin and Pectinase Research". *Kluwer Academic Publishers*. The Netherlands (2003), pp. 76.

**Wandee, Y., Uttapap, D., & Mischnick, P.,** "Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions.", Food Hydrocolloids 87 (2019), 237-244.

**Wang, S., Chen, F., Wu, J., Wang, Z., Liao, X., Hu, X.,** "Optimization of pectin extraction assisted by microwave from apple pomace using response surface methodology"., Journal of Food Engineering 78 (2007).

**Wang, W. ; Chen, W. ; Zou, M. ; Lv, R. ; Wang, D. ; Hou, F. ; Feng, H. ; Ma, X. ; Zhong, J. ; Ding, T. ; et al.** Applications of power ultrasound in oriented modification and degradation of pectin : A review. J. Food Eng. 2018, 234, 98-107.

**WARRANT JÉRÔME., 2004.** Etude structurale et propriétés en solution des polysaccharides

constitutifs du mucilage de lin (*linum usitatissimum*L.), pdf, 22p.

**Wicker, L. ; Kim, Y. ; Kim, M.J. ; Thirkield, B. ; Lin, Z. ; Jung, J.** Pectine as a bioactive polysaccharide extracting tailored function from less. *Food Hydrocoll.* 2014, 42, 251-259.

**Wilson JR, Hatfield RD. 1997.** Structural and chemical changes of cell wall types during stem development: Consequences for fibre degradation by rumen microflora. *Australian Journal of Agricultural Research* 48, 165-180.

**Wolf S, Hématy K, Höfte H. 2012.** Growth control and cell wall signaling in plants. *Annual Review of Plant Biology* 63: 381–407.

**Wolf, S., Mouille, G., and Pelloux, J. (2009).** Homogalacturonan Methyl-Esterification and Plant Development. *Mol. Plant* 2, 851–860.

**Yang, X., Li, A., Li, X., Sun, L., & Guo, Y. (2020).** An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. *Trends in Food Science & Technology*.

**Yang, Y., et al.**, "Efficient Extraction of Pectin from Sisal Waste by Combined Enzymatic and Ultrasonic Process.", *Food Hydrocolloids* 79 (2018), 189-196.

**Yapo B.**, 'Etude de la variabilité structurale des pectines. ', Thèse de doctorat .France, (2007).

**Yoo, S.H., Fishman, M.L., Hotchkiss, J., Arland, T., Lee, H.G.,** "Viscometric behavior of high-methoxy and low-methoxy pectin solutions" *Food Hydrocolloids.* (2006), 20 (1), 62-67.

**Z.I.Kertesz.**, "Pectic substances", Interscience Publishers, Inc.; New York, (1951).

**ZABEIROU H., 2001.** Contribution à l'inventaire des plantes spontanées et leur utilisation éventuelle en médecine traditionnelle par la population de Ouargla. Mémoire. Ing. Agro. Sah, INF/AS, Ouargla, 180p.

**Zhang, H., Chen, J., Li, J., Yan, L., Li, S., Ye, X., et al.** "Extraction and characterization of RG-I enriched pectic polysaccharides from Mandarin citrus peel.", *Food Hydrocolloids* 79 (2018), 579-586.

**Zhang, W. ; Xu, P. ; Zhang, H.** La pectine dans la thérapie du cancer : A review. *Trends Food Sci. Technol.* 2015, 44, 258-271.

**Zhao, Y., Wang, L., Yan, M., & Li, Y. (2020).** Pectin-based biomaterials: A versatile platform for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 236, 116024.