



HAL
open science

Caractérisation et potentiel biologique des polysaccharides hydrosolubles issus d'Alhagi maurorum Medik. (Fabaceae)

Fatma Zohra Chakou

► **To cite this version:**

Fatma Zohra Chakou. Caractérisation et potentiel biologique des polysaccharides hydrosolubles issus d'Alhagi maurorum Medik. (Fabaceae). Biochimie, Biologie Moléculaire. Université Clermont Auvergne; Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023. Français. NNT : 2023UCFA0022 . tel-04885091

HAL Id: tel-04885091

<https://theses.hal.science/tel-04885091v1>

Submitted on 14 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE CLERMONT-AUVERGNE
UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA



*ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE,
SANTE, AGRONOMIE, ENVIRONNEMENT*



Thèse

Présentée à l'Université Kasdi-Merbah (Ouargla)
Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITE
(Spécialité : Génie biologique)

Soutenue le 31/05/2023

Fatma Zohra CHAKOU

Caractérisation et potentiel biologique des polysaccharides hydrosolubles issus d'*Alhagi maurorum* Medik. (*Fabaceae*)

M^{me} GIRARD Céline, Maitre de conférences, HDR, Université de Limoges, France
(Rapporteur)

M^{me} FENDRI Imen, Professeur, Université de Sfax, Tunisie (Rapporteur)

Mr. OULD EL HADJ Mohamed Didi, Professeur, Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie
(Président)

Mr. MICHAUD Philippe, Professeur, Université Clermont Auvergne, France
(Directeur)

Mr. BOUAL Zakaria, Professeur, Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie (Co-directeur)

Mr. PIERRE Guillaume, Maitre de conférences, Université Clermont Auvergne-
France

M^{lle} TELLI Alia, Maitre de conférences, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie

M^{me} MIMOUNI Yamina, Maitre de conférences, Université Kasdi Merbah-Ouargla,
Algérie

CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, 63178 Aubière, France

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie tout d'abord ALLAH, le tout puissant, qui m'a permis et ouvert le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Cette thèse a été réalisée en collaboration entre le Laboratoire de Protection des Ecosystèmes en Zones Arides et Semi Arides de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla et le Laboratoire CNRS, UMR 6602, Institut Pascal de l'Université Clermont-Auvergne-France.

Je tiens à remercier les Professeurs GIL Evelyne et DUSSAP Claude-Gilles pour m'avoir accueillie dans le Laboratoire de Génie des procédés Axe GePeB de l'Institut Pascal de l'Université Clermont Auvergne

Mes vifs et sincères remerciements s'adressent aux mes directeurs de thèse, Pr. MICHAUD Philippe et Pr. BOUAL Zakaria ainsi que au directeur de notre laboratoire de recherche Pr. OULD ELHADJ Mohammed Didi, de m'avoir guidé et encadré au long des années de cette thèse, qu'elle étant le fruit de leurs encouragements, leurs disponibilités, leurs esprits scientifiques et leur soutien moral. Merci de m'avoir aidé à faire de moi la scientifique que je suis aujourd'hui.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury, pour avoir pris le temps d'évaluer et d'aider à l'amélioration de ce rapport de thèse :

A Monsieur le Professeur OULD ELHADJ Mohammed Didi à l'Université Kasdi Merbah-Ouargla, pour l'honneur qui me fait l'honneur d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

A Mesdames Pr. FENDRI Imen, Pr. GIRARD Céline, Dr. TELLI Alia et Dr. MIMOUNI Yamina, et Monsieur PIERRE Guillaume votre présence pour examiner et juger ce travail est un honneur.

Mes remerciements vont également aussi à toute l'équipe de l'Axe GePeB en particulier Mme Christine GARDARIN pour votre disponibilité et votre précieuse aide durant mon

stage au laboratoire, et Mme Alina VIOLETA-URSU pour m'avoir fait part de vos connaissances en rhéologie.

Merci à Mr. Hakim BELKHALFA, Directeur du plateau technique PTAPC-CRAPC à Ouargla, merci de m'avoir accueilli et ouvrir les portes de vos laboratoires, pour pouvoir réaliser l'étude in vivo, merci d'être toujours prêt à m'aider.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mon enseignante M^{me} SAHRAOUI-SMILI Hanane, pour votre encouragement de ma réussite au concours de doctorat jusqu'à la dernière minute. Aussi, je garde un bon souvenir pour votre soutien moral et tes mots d'Or pendant le confinement et mes moments difficiles en France (Covid-19).

A la famille GHOUZI Saïd et sa femme NIOU Nadia (Lyon-France), de m'avoir accueilli et aidé pendant mes déplacements de stages en France, MERCI pour tous.

A BENSALÉM Mohammed-Laakher, votre soutien a été précieux.

A mes chers PARENTS, vous avez tant sacrifié pour la réussite de mes études, nul remerciement ne saura exprimer la grâce de votre présence et de votre soutien. Merci aussi à ma sœur Houaria et son mari Rachid, et mon neveu Abd-Ennour, merci d'être toujours à mes côtés.

Merci à tout ceux et celles qui ont contribué, encouragé ou aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, notamment mes amies (Karima, Ghania, Dounia, Zohra et Meriem).

*«Je remercie Allah de m'avoir fait traverser les déserts
dans tous leurs sens et contre sens mais toujours dans le bon
sens»*

Youcef AKAM-Regard nomade

Table des matières

Remerciements	
Dedicace	
Table de matieres	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	2
Chapitre I. Synthèse bibliographique	
I.1. Paroi cellulaire végétale	6
I.1.1. Types de parois végétales.....	6
I.1.1.1. Paroi primaire.....	7
I.1.1.2. Paroi secondaire.....	7
I.2. Principaux polysaccharides pariétaux.....	7
I.2.1. Cellulose.....	8
I.2.2. Hémicelluloses.....	10
I.2.3. Pectines.....	13
I.3. Polysaccharides constitutifs des graines	14
I.3.1. Polysaccharides de l'endosperme.....	15
I.3.2. Polysaccharides de cotylédones	20
I.3.2.2. Xyloglucanes.....	20
I.3.2.1. Arabinogalactanes.....	21
I.4. Polysaccharides végétaux et activités biologiques	21
I.4.1. Activités antidiabétiques.....	21
I.4.2. Activités anti-inflammatoires.....	24
I.4.2.1. Mécanismes d'actions.....	25
I.4.2.1.1. Régulation de la libération de médiateurs proinflammatoires	25
I.4.2.1.2. Effets sur la voie de signalisation liée au NF-κB.....	25
I.4.2.1.3. Effet sur le microbiote intestinal	26
I.4.2.1.4. Effets sur le système immunitaire.....	27
I.4.3. Activités anti-ulcère gastrique.....	27
II.1. Genre <i>Alhagi</i>	29
II.1.1. Etudes phytochimiques du genre <i>Alhagi</i>	29
II.1.2. Utilisation du genre <i>Alhagi</i> en médecine traditionnelle	34

II.2. Espèce d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	34
II.2.1. Nominations	34
II.2.2. Position systématique.....	35
II.2.3. Description botanique et aires de production	36
II.2.4. Usages traditionnels.....	37
II.2.5. Phytochimie et métabolites isolés.....	37
II.2.6. Propriétés pharmacologiques.....	39
Chapitre II. Matériels et méthodes	
II.1. Méthodologie de travail	42
II.1.1. Enquête ethnobotanique	42
II.1.1.1. Présentation de la zone d'étude.....	42
II.1.1.2. Collecte des données ethnobotaniques	43
II.1.2. Préparation du matériel d'étude.....	44
II.2. Extraction des polysaccharides hydrosolubles.....	44
II.2.1. Extraction des polysaccharides hydrosolubles des graines d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	45
II.2.1.1. Lavage et extraction des graines.....	45
II.2.1.2. Extraction des graines dépigmentées.....	47
II.2.1.3. Extraction des graines non dépigmentées.....	49
II.3. Rendements d'extraction des polysaccharides.....	50
II.4. Caractérisation des polysaccharides.....	50
II.4.1. Analyse de la composition biochimique.....	50
II.4.1.1. Oses totaux.....	50
II.4.1.2. Oses neutres et des oses acides	51
II.4.1.2.1. Oses neutres	51
II.4.1.2.2. Oses acides.....	51
II.4.1.2.3. Correction des interférences relatives entre les ON et les OA	52
II.4.1.3. Protéines	53
II.4.1.4. Composés phénoliques totaux.....	53
II.5. Analyse structurale des polysaccharides.....	54
II.5.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF)	54
II.5.2. Chromatographie échangeuse d'anions haute performance à détection ampérométrique pulsée (CEAHP-DAP)	54

II.5.3. Chromatographie en phase gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (CG/SM-IE)	56
II.5.4. Spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)	59
II.6. Caractérisation physicochimique des polysaccharides extraits.....	60
II.6.1. Détermination des grandeurs macromoléculaires des polysaccharides extraits par chromatographie d'exclusion stérique couplée à la diffusion de la lumière multiangles (CES/DLLMA).....	60
II.7. Etude des propriétés rhéologiques.....	63
II.7.1. Mesure de la viscosité apparente et complexe.....	66
II.8. Etude des activités biologiques des extraits de polysaccharides	69
II.8.1. Activité anti-hyperglycémiant	69
II.8.2. Activité anti-inflammatoire.....	70
II.8.3. Activité gastroprotectrice (<i>in vivo</i>)	71
II.8.3.1. Animaux et conditions de familiarisation.....	71
II.8.3.2. Etude de l'activité gastroprotectrice.....	71
II.8.3.2.1. Préparation des solutions de polysaccharides.....	71
II.8.3.2.2. Préparation du Gaviscon	72
II.8.3.2.3. Induction de l'ulcère gastrique.....	72

Chapitre III. Résultats et discussion

III.1. Enquête ethnobotanique.....	75
III.1.1. Profil sociodémographique des répondants.....	75
III.1.1.1. Utilisation de la plante selon le sexe.....	75
III.1.1.2. Utilisation de la plante selon l'âge et le niveau scolaire.....	76
III.1.2. Informations ethnomédicinales sur <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	77
III.1.2.1. Nomination locale	77
III.1.2.2. Parties utilisées de la plante pour des usages thérapeutiques.....	77
III.1.2.3. Utilisations traditionnelles	78
III.1.2.4. Pathologies traitées.....	79
III.2. Caractérisations biochimique et structurale des polysaccharides des graines <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	81
III.2.1. Composition globale des polysaccharides	81
III.3. Analyse structurale des polysaccharides extraits.....	85
III.3.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IR- TF)	85

III.3.2. Analyses structurales des polysaccharides.....	86
III.3.4. Spectroscopie RMN de GD2.....	88
III.4. Caractéristiques physicochimiques	90
III.4.1.Détermination des grandeurs macromoléculaires par CES/DLLMA.....	90
III.4.2. Propriétés rhéologiques de GD2.....	93
III.4.2.1. Mode d'écoulement.....	93
III.4.2.2. Mode oscillatoire.....	101
III.5. Etude des activités biologiques.....	104
III.5.1. Activité anti-inflammatoire (inhibition de la dénaturation de la SBA)	104
III.5.2. Activité anti-hyperglycémiant.....	105
III.5.3. Activité gastroprotectrice (<i>in vivo</i>)	107
Conclusion et perspectives.....	111
Références bibliographiques.....	114
Production scientifique.....	153
Résumés	

Liste des abréviations

PTI	: Paroi de type I
PTII	: Paroi de type II
CMC	: Carboxyméthyle cellulose
MC	: Méthyle cellulose
HGA	: Homogalacturonanes
RG-I	: Rhamnogalacturonanes I
RG-II	: Rhamnogalacturonanes II
DE	: Degré d'estérification
M/G	: Mannose/galactose
LDL	: lipoprotéines de basse densité
AGs	: Arabinogalactanes
GM	: Galactomannanes
AIS	: Anti-inflammatoires stéroïdiens
AINS	: Anti-inflammatoires non stéroïdiens
TNF-α	: Facteur de nécrose tumorale alpha
IL-1	: Interleukine-1
NF-κB	: Facteur nucléaire kappa B
ON	: Oxyde nitrique
TGF-β	: Facteur de croissance transformant bêta
CCl₄	: Tétrachlorure de carbone
OT	: Oses totaux
ON	: Oses neutres
OA	: Oses acides
m-HBP	: Méta-hydroxybiphényle
H₂SO₄	: Acide sulfurique
SAB	: Albumine de sérum bovin
NaCO₃	: Carbonate de sodium
TFA	: Acide trifluoroacétique
NaOH	: Hydroxyde de Sodium
C₂H₃NaO₂	: Acétate de Sodium
Rha	: Rhamnose

Ara	: Arabinose
Glc	: Glucose
Xyl	: Xylose
Man	: Mannose
Gal	: Galactose
Glc A.	: Acide glucuronique
Gal A.	: Acide galacturonique
DPPH	: 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyle
DRI	: Signal de diffusion de la lumière
IE	: Impact électronique
BSTFA	: N,O-bis(triméthylsilyl) trifluoroacétamide
TMCS	Triméthylchlorosilane
dz	Distance séparant les deux couches de fluides contiguës
dv	: Différence de vitesse entre les deux couches
g	: Gramme
G'	: Module de conservation
G''	: Module de perte
CG/SM-IE	: Chromatographie en phase gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse
CEAHP -DAP	: Chromatographie échangeuse d'anions haute performance à détection ampérométrique pulsée
IR-TF	: Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
CES/DLLMA	: Chromatographie d'exclusion stérique couplée à la diffusion de la lumière laser multiangles
M_w	: Masse moléculaire moyenne en poids
M_n	: Masse moléculaire moyenne en nombre
η	: Viscosité intrinsèque
R_g	: Rayon de gyration
R_h	: Rayon hydrodynamique
Đ	: Indice de polydispersité
η_{sp}	: Viscosité spécifique (Pa.s)
η_{réd}	: Viscosité réduite (Pa.s)
η_r	: Viscosité relative (Pa.s)

η_0	: Viscosité absolue du solvant pur (Pa.s)
C	: Concentration en polymère dissous (g/mL ou g/dL)
$\dot{\gamma}$: Vitesse de cisaillement "shear rate" (s^{-1})
η	: Viscosité dynamique (Pa.s)
F	: Force de frottement visqueux
S	: Surface en contact avec le fluide (m^2)
τ	: Contrainte de cisaillement (Pa)
σ_0	: Amplitude de la contrainte (Pa)
δ	: Déphasage ou angle de perte (rad)
SUC	: Surface Ulcéré du Contrôle positif
SUT	: Surface Ulcéré du Test

Liste des figures

Figure 1. Schéma d'une paroi cellulaire végétale	6
Figure 2. Organisation des trois principaux groupes de polysaccharides dans la paroi végétale	7
Figure 3. Chaines microfibrillaires de cellulose	8
Figure 4. Représentation des xyloglucanes d'après Angone et <i>al.</i> (2010).....	11
Figure 5. Structure des galactomannanes de plantes	11
Figure 6. Représentation des β -glucanes selon Rahar et <i>al.</i> (2011).	12
Figure 7. Arabinoxylanes de céréales	13
Figure 8. Formes d'acides galacturoniques présentes dans la pectine. 1: Acide galacturonique; 2: Méthyl-galacturonique acide; O-acétyl-galacturonique acide	14
Figure 9. Coupe transversale de graine de Guar	15
Figure 10. Interaction d'un galactomannane avec la gomme de xanthane.....	17
Figure 11. Structures de l'amylose et de l'amylopectine	19
Figure 12. Structure de xyloglucanes au niveau de la paroi végétale primaire	20
Figure 13. Structures de quelques composés identifiés chez des espèces appartenant au genre <i>Alhagi</i>	33
Figure 14. Aspect aérien (Ozenda, 2004) et classification botanique de l'espèce <i>Alhagi maurorum</i> selon Al-Snafi (2015).	35
Figure 15. <i>Alhagi maurorum</i> Medik. (Wilaya d'Illizi, Sud du Sahara algérien).....	36
Figure 16. Répartition d' <i>Alhagi maurorum</i> dans le monde.....	37
Figure 17. Structures du kaempferol (A) et de l'isorhamnetine (B) identifiés dans l'extrait éthanolique d' <i>Alhagi maurorum</i>	38
Figure 18. Structures des flavonoïdes isolés de racines <i>Alhagi maurorum</i>	39
Figure 19. Situation géographique de la zone d'étude (wilaya d'Illizi)	42
Figure 20. Spécimen d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik. répertorié.....	43
Figure 21. Questionnaire utilisé pendant l'enquête ethnobotanique.....	44
Figure 22. Méthodologie choisie pour l'étude des polysaccharides hydrosolubles des graines d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	45
Figure 23. Extraction aqueuse des polysaccharides hydrosolubles des graines lavées d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	46
Figure 24. Extraction aqueuse des polysaccharides hydrosolubles des graines (dépigmentées) d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	48

Figure 25. Extraction aqueuse des polysaccharides des graines (non dépigmentées) d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	49
Figure 26. Schéma représentant une source d'ionisation par Impact Electronique (IE).....	57
Figure 27. Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes	63
Figure 28. Comportements rhéologiques de liquides aux propriétés physiques différentes.....	65
Figure 29. Etats d'enchainement des polymères en fonction de la concentration	66
Figure 30. Rhéomètre de géométrie cône-plan-lisse (a), géométrie de cylindre concentrique (b)..	66
Figure 31. Familiarisation des rats au niveau de l'animalerie (PTAPC-CRAPC, Ouargla). Alimentation (a); Boite d'élevage des rats (b); Rats Wistar albinos (c).	71
Figure 32. Gavage intragastrique (a), dissection (b) et estomac du rat (c) (photos personnelles)...	73
Figure 33. Répartition des groupes d'âge des répondants selon le sexe.....	76
Figure 34. Niveau scolaire des personnes interrogées.....	76
Figure 35. Différentes modes de préparation d' <i>Alhagi maurorum</i>	78
Figure 36. Spectres IR obtenu pour la fraction GND2.....	85
Figure 37. Spectre Infra-rouge de la fraction GD2.....	85
Figure 38. Composition en monosaccharides des fractions C1GP4-8 (a) et GD2(b) analysées par CG-SM/IEet chromatogramme de la fraction GD2.....	87
Figure 39. Spectre ¹ H-RMN obtenu pour la fraction GD2.....	88
Figure 40. Spectre ¹³ C-RMN obtenu pour la fraction GD2.....	89
Figure 41. Spectre ¹ H/ ¹³ C HSQC de la fraction GD2 à 100g/L dans le D ₂ O. M : Mannose; G : Galactose.	89
Figure 42. Structure proposée du galactomannane constitutif des graines <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	90
Figure 43. Evolution de la masse moléculaire (A) et de la viscosité intrinsèque (B) du galactomannane extrait des graines d' <i>Alhagi maurorum</i> Medik. (—): Détection réfractométrique; (...): signal de diffusion de la lumière.	92
Figure 44. Influence des concentrations de polysaccharides GD2 préparées dans l'eau ultrapure et le NaCl 0,5M sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement à 25°C. (A) solutions préparées dans de l'eau ultrapure et (B) solutions préparées dans le NaCl 0,5M.....	93
Figure 45. Influence des températures 5 (A), 25 (B) et 60°C (C) sur la viscosité apparente des solutions de polysaccharides GD2 préparées dans de l'eau ultrapure.....	97
Figure 46. Influence des températures 5 (A), 25 (B) et 60°C (C) sur la viscosité apparente des solutions de polysaccharides GD2 préparées dans le NaCl 0,5M.....	98

Figure 47. Effet de variation de la température sur la viscosité apparente à $\gamma=100s^{-1}$ des solutions aqueuses de 0,25, 0,75%, 1,5% et 2,5% (m/v) de GD2.	100
Figure 48. Détermination de la concentration critique de recouvrement du polysaccharide GD2 extraits des graines <i>Alhagi maurorum</i> Medik à 25°C.	101
Figure 49. Représentation des modules complexes G' et G'' (A et B) en fonction de la déformation (%) des solutions salines de GD2 extrait des graines d' <i>A. maurorum</i> Medik. à 25°C.	102
Figure 50. Représentation des modules complexes G' et G'' (A et B) en fonction de la déformation (%) des solutions aqueuses (0,1 à 2,5%) de GD2 extrait des graines d' <i>A. maurorum</i> Medik. à 25°C.	104
Figure 51. Effets inhibiteurs de GD2, G1P4-8 et de l'Ibuprofène sur la dénaturation thermique de la SBA. * p >0,1 et ** p <0,01 par rapport à l'Ibuprofène. La corrélation entre l'effet inhibiteur des extraits de polysaccharides et le poids moléculaire a été exprimée avec *** p <0,001.....	105
Figure 52. Activité anti-hyperglycémiant des extraits GD2, G1P4-8 et l'hydrolysate HG4-8 sur l'inhibition de l'activité enzymatique de l' α -amylase. *p <0,001, **p <0,05, ***p <0,1 par rapport à l'acarbose (contrôle positif) ainsi qu'au poids moléculaire (*p <0,0001).....	106
Figure 53. Effet protecteur de GD2 et Gaviscon contre la formation d'ulcère gastrique chez des rats Wistar albinos. U; Ulcère	108

Liste des tableaux

Tableau 1. Galactomannanes de diverses espèces de <i>Leguminosae</i> et leurs ratios Mannose/Galactose.....	16
Tableau 2. Variabilités des ratios molaires M/G de quelques gommés et leurs propriétés résultantes.....	18
Tableau 3. Composés phytochimiques isolés de différentes espèces de genre <i>Alhagi</i>	30
Tableau 4. Traitement des rats en vue d'évaluer l'activité gastroprotectrice des polysaccharides GD2	72
Tableau 5. Pathologies traitées par <i>Alhagi maurorum</i> à Illizi et parties de la plante utilisées.....	79
Tableau 6. Conditions d'extraction et désignations des fractions de polysaccharides issues des graines d' <i>A. maurorum</i> Medik.	81
Tableau 7. Composition globale des extraits de polysaccharides hydrosolubles des graines <i>Alhagi maurorum</i> Medik.	84
Tableau 8. Déplacements chimiques ¹ H et ¹³ C (ppm) du GD2 extrait des graines <i>A. maurorum</i> Medik.	90
Tableau 9. Caractéristiques physicochimiques de GD2, MU80 et G1-80 analysées par CES/DLLMA.....	91
Tableau 10. Calcul des énergies d'activation du galactomannane extraits des graines <i>A. maurorum</i> Medik. des températures de 5, 25 et 60°C, et à un taux de cisaillement fixe de $\gamma=100 \text{ s}^{-1}$	99
Tableau 11. Pourcentages d'ulcérations et d'inhibition de la formation d'ulcère gastrique induit par l'éthanol 96% chez les différents groupes de rats Wistar albinos.....	107

Liste des équations

Equation (1). Rendement d'extraction (%) = $\frac{\text{masse du polysaccharide extrait (g)}}{\text{masse de la matière sèche de la plante (g)}} \times 100$	50
Equation (2). [OA] = DO_{mHBP} / β'	52
Equation (3). [ON] = $[DO_{\text{résorcinol}} - [\beta \left(\frac{DO_{mHBP}}{\beta'} \right)]] / \alpha$	52
Equation (4). $\frac{KC}{\Delta R_0} = \frac{1}{MW} + \frac{16\pi^2 n_0^2}{3\lambda_0^2} \times \frac{R_0^2}{3MW} \times \text{Sin}^2 \frac{\Theta}{2} + 2A_2 C + 3A_3 C^2 + \dots$	60
Equation (5). $[\eta] = \lim \left(\frac{\eta_{sp}}{C} \right)$	61
Equation (6). $\eta_{sp}/C = [\eta] + k' [\eta]^2 C + \dots$	62
Equation (7). $\sigma = \frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} = \eta \dot{\gamma}$	63
Equation (8). $V = \frac{du}{dt}$	64
Equation (9). $\dot{\gamma} = \frac{dV}{dx}$	64
Equation (10). $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$	65
Equation (11). $\eta = \frac{\eta_0}{(1 + (k\dot{\gamma})^n)}$	67
Equation (12). $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$	68
Equation (13). $\gamma^* = \gamma_0 e^{i(\omega t)}$	68
Equation (14). $G^* = \frac{\gamma^*}{\sigma^*} = G' + iG'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta)$	69
Equation (15). Inhibition (%) = $\left(\text{Contrôle}_{\text{positif}} - \frac{\text{Test}}{\text{Contrôle}_{\text{positif}}} \right) \times 100$	70
Equation (16). Inhibition (%) = $(1 - D/C) \times 100$	70
Equation (17). Ulcération (%) = $\left(\frac{\text{surface totale des lésions}}{\text{surface totale de l'estomac}} \right) \times 100$	73
Equation (18). Inhibition (%) = $\left(\frac{SUC - SUT}{SUC} \right) \times 100$	73
Equation (19). $\eta = A \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \right]$	98

Introduction

Introduction

Les ressources végétales spontanées du Sahara constituent une flore d'environ 500 espèces de plantes supérieures dont une partie est utilisée en tant que plantes médicinales sous différentes formes (macération, infusion, tisanes, compresses et poudres). Plus spécifiquement, le Sahara Septentrional Algérien présente une biodiversité marquée par la présence d'une flore endémique adaptée aux conditions environnementales extrêmes. L'adaptation de ces plantes se traduit par des modifications anatomiques, morphologiques et physiologiques qui leur permettent de survivre, même en absence de précipitations. De ce fait, certains polysaccharides présents dans ces plantes exercent un rôle majeur dans le maintien des tissus végétaux comme substrat carboné à forte affinité pour l'eau. Ces macromolécules également qualifiées de polyosides appartiennent à la grande famille des glucides et sont des polymères d'oses liés par des liaisons glycosidiques. De composition osidique (pentoses ou hexoses) et de liaisons osidiques très diversifiées, ils peuvent être classés en deux grandes familles : celle des homopolyosides (un seul type d'ose) et celle des hétéropolyosides (plusieurs espèces d'oses). Ils peuvent être linéaire ou ramifiés et comporter des groupements non-sucres (on parlera alors plutôt d'hétérosides). La caractérisation du large éventail de structures propres aux polysaccharides nécessite des techniques analytiques, physico-chimiques et rhéologiques complexes à mettre en œuvre et à interpréter. Ces polysaccharides pourront fortement affecter les propriétés d'écoulement des milieux liquides. Ils seront alors qualifiés d'hydrocolloïdes susceptibles d'être valorisées à l'échelle industrielle où ils trouveront de nombreuses applications comme agents de texture (épaississant, stabilisant et gélifiant). Ces biopolymères qui sont renouvelables, non toxiques et biodégradables ont longtemps été cantonnés à des applications à relativement faible valeur ajoutée dans différents secteurs industriels tels que l'agroalimentaire, l'industrie pétrolière, les adhésifs, l'industrie papetière ou le textile (Mirhosseini et Amid, 2012). Cependant depuis une vingtaine d'année, les nombreux progrès réalisés en glycosciences, en y incluant les approches globales de type glycomique, ont mis en évidence que de nombreuses structures polysaccharidiques peuvent être considérées comme des composés porteurs d'une ou de plusieurs informations biologiques au même titre que les acides nucléiques ou les protéines. De ce fait, un intérêt particulier a été porté aux propriétés biologiques des polysaccharides pour des applications à haute valeur ajoutée en médecine, cosmétique, nutrition, agriculture et autres. Cependant pour de nombreuses applications comme actifs biologiques les polysaccharides souffrent d'un manque d'information sur leur structure exacte. En effet, cette famille de composés se présente sous la forme d'un mélange de polymères de structure globale identique mais présentant une polydispersité. De même de

nombreux polysaccharides, composés de plusieurs espèces de monosaccharides, ne présentent pas d'unité de répétition rendant totalement impossible la détermination d'une structure complète. Travailler avec des polysaccharides revient donc à travailler avec des mélanges de macromolécules présentant des motifs structuraux similaires. Cette polydispersité empêche de répondre à certains critères propres aux molécules actives à visée thérapeutique pour lesquelles la détermination d'une structure complète et sa purification sous la forme d'une espèce monodisperse est exigée par la réglementation. Dans ce contexte l'héparine abondamment utilisée comme anticoagulant fait figure d'exception et il est probable que sa mise sur le marché, si elle avait lieu actuellement, serait impossible du fait des nombreux effets secondaires associés à son utilisation ainsi que de l'absence d'une structure précise pour ce polysaccharide animal constitué de deux espèces d'oses variablement substitués par des groupements sulfates. Par contre d'autres voies de valorisation des propriétés biologiques des polysaccharides restent possibles notamment dans le domaine des dispositifs médicaux, de la nutraceutique, de l'agriculture et surtout de la cosmétique où la réglementation est beaucoup moins contraignante. Fortes de ce constat, de nombreuses études ont pu faire la preuve de concept que la recherche de polysaccharides dans des plantes traditionnellement utilisées pour leurs vertus thérapeutiques pouvait faciliter l'identification de polysaccharides bioactifs potentiellement valorisables. Ce type de travaux permet également d'alimenter la communauté scientifique en nouvelles structures et de tenter d'établir des relations entre ces structures et les activités biologiques détectées.

Le Laboratoire de protection des écosystèmes en zone arides et semi arides de l'Université de Kasdi Merbah (Ouargla, Algérie), s'intéresse au recensement, à la caractérisation et à la préservation des écosystèmes propres au Sahara Algérien en collaboration avec l'axe Génie des Procédés, Energétique et Biosystèmes de l'Institut Pascal de l'Université Clermont Auvergne (Clermont-Ferrand, France) qui est spécialisé dans le domaine des bioprocédés appliqués, entre autres, à l'extraction et à la caractérisation de polysaccharides issus de biomasses d'origines diverses. Ces deux structures, collaborent depuis 2014 en vue de rechercher la présence de polysaccharides valorisables chez plusieurs plantes terrestres collectées dans le Sahara Septentrional Est Algérien dont elles sont endémiques. Dans ce contexte, en 2019, les deux laboratoires ont bénéficié d'un programme Hubert Curien Maghreb (PHC 19MAG36, Campus France) d'une durée de trois ans visant à l'exploration de la flore du Maghreb (plantes et macroalgues marines) pour la découverte de polysaccharides biologiquement actifs (projet EXPLORE). Ce travail s'inscrit dans ce projet sous la forme d'une thèse en cotutelle financée par le Ministère de l'Éducation Nationale, de

l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Français en partenariat avec le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Algérien. L'objectif de cette thèse consiste à extraire, purifier et caractériser la structure des polysaccharides hydrosolubles présents dans les différents organes de la plante d'*Alhagi maurorum* Medik. (*Fabaceae*) ainsi qu'à étudier leurs propriétés rhéologiques et certaines de leurs propriétés biologiques (activités anti-hyperglycémiantes, anti-inflammatoires et gastroprotectrices). De nombreux constituants phytochimiques ont été identifiés à partir de cette plante, tels que les glycosides, les flavonoïdes, les alcaloïdes, les saponines, les tannins et les stéroïdes dont la présence a pu être corrélée avec de nombreuses activités biologiques telles que des activités antibactériennes, anti-inflammatoires, antipyrétiques, analgésiques, antioxydantes et diurétiques. Cependant, aucun travail ne s'est intéressé au contenu polysaccharidique de la plante et à son potentiel biologique.

Le choix de travailler sur cette plante a été motivé par une enquête ethnobotanique préalablement réalisée dans la région d'Illizi où la plante est très présente et utilisée par la population locale. Elle nous a amené à recenser les nombreuses informations disponibles sur cette plante et ses bienfaits thérapeutiques dans la médecine traditionnelle Algérienne. Dans un second temps l'extraction des macromolécules hydrosolubles a été réalisée et s'est rapidement focalisée sur les graines riches en hydrocolloïdes. La structure des polysaccharides extraits a été déterminée ainsi que leurs propriétés biologiques et rhéologiques.

Le manuscrit est structuré en trois grands chapitres. Dans un premier chapitre, une synthèse bibliographique est consacrée à la structure de la paroi végétale et à ses principaux polysaccharides. Les activités biologiques de ces polysaccharides disponibles dans la littérature ont ensuite été synthétisées en tentant systématiquement d'associer ces activités à des structures spécifiques. Une deuxième partie du même chapitre traite des caractéristiques taxonomiques et thérapeutiques des espèces du genre *Alhagi* et notamment de l'espèce d'*Alhagi maurorum* Medik. Dans un second chapitre les matériels et méthodes utilisés dans cette étude pour extraire et élucider la structure des polysaccharides extraits et évaluer leurs propriétés physicochimiques et biologiques ont été décrits dans un souci de reproductibilité du travail expérimental. Un troisième chapitre intitulé, résultats et discussion, présente et discute les résultats obtenus et précède la description des principales conclusions et perspectives issues de ce travail.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1. Paroi cellulaire végétale

La paroi cellulaire végétale est une matrice extracellulaire de structure microfibrillaire (figure 1) enrobée d'une matière hydrosoluble et gélifiante qui délimite chaque cellule (Bacete et *al.*, 2018). Elle joue des rôles majeurs dans le contrôle de la croissance cellulaire, la morphologie et la physiologie de la plante (Brudieux, 2007). Elle fournit également à la cellule végétale une résistance mécanique importante ce qui explique sa forme polyédrique caractéristique (Karp, 2010). La structure de cette paroi est variable selon de l'espèce végétale, de l'âge et de la nature des tissus considérés ce qui rend particulièrement difficile son étude (Suty, 2014). Les différents niveaux d'organisations et d'exigences intercellulaires vont conférer différentes rigidités et donc plasticités à cette partie de la cellule végétale. Ainsi, la paroi doit être plastique chez les jeunes cellules en division, tout en étant suffisamment rigide et cohésive afin de permettre les assemblages cellulaires et assurer une fonction de barrière protectrice. Elle doit être imperméable aux rayons ultraviolets et résistante aux chocs osmotiques, tout en permettant les échanges intercellulaires et le passage des substances nécessaires au métabolisme et à la physiologie cellulaire (Brudieux, 2007).

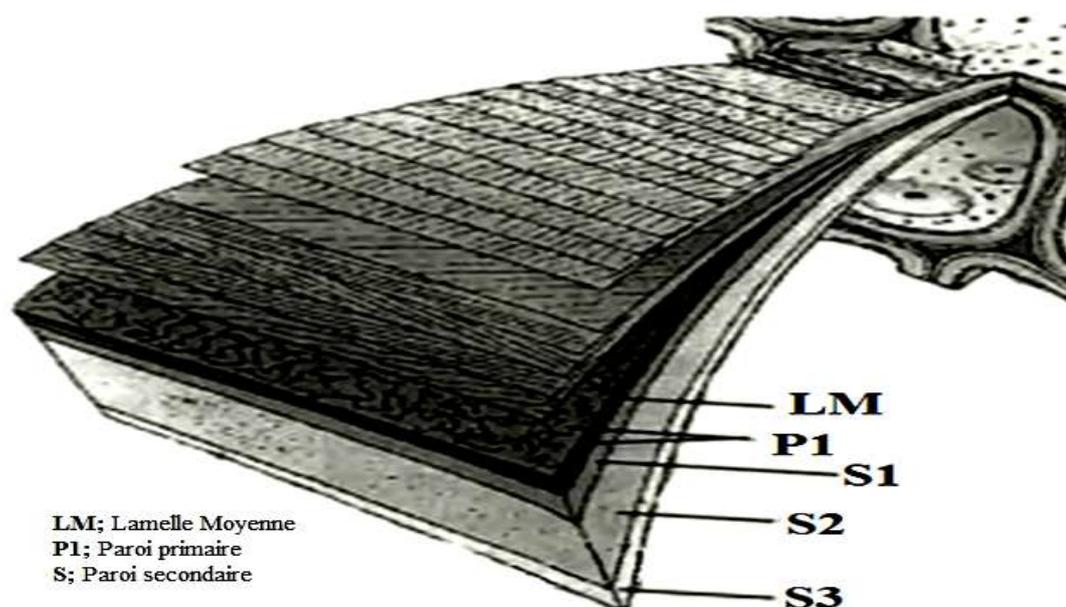


Figure 1. Schéma d'une paroi cellulaire végétale (Clair, 2001).

I.1.1. Types de parois végétales

Chez les plantes, il existe deux types de parois cellulaires, les parois primaires (de type I pour les non graminées et de type II pour les graminées) et les parois secondaires. Toutes sont composées de polysaccharides variés et de protéines. Les parois secondaires se distinguent des parois primaires par la présence de composés phénoliques (Chavez Montes, 2008).

I.1.1.1. Paroi primaire

Cette paroi d'épaisseur très fine ($\approx 1\mu\text{m}$) apparaît dès la fin de la division cellulaire. Elle est formée de plusieurs couches de microfibrilles de cellulose dans lesquelles se déposent des hémicelluloses, des substances pectiques et des lignines qui n'apparaissent qu'à la fin du développement de la paroi (Clair, 2001). Toutes les cellules possèdent une paroi de type I (PTI). Cependant, des espèces végétales appartenant à l'ordre des *Poales* et dont certaines présentent une grande importance économique telles que *Zea mays* (maïs), *Triticum spp* (blé) ou *Sorghum spp* (sorgho) possèdent un type de paroi primaire d'une composition particulière qualifiée de paroi de type II (PTII). Ces dernières diffèrent des PTI par leur contenu élevé en glucuroarabinoxylanes, habituellement présents dans les parois secondaires, ainsi que par leur faible teneur en pectines et la présence de composés aromatiques (Chavez Montes, 2008 ; Carpita, 1996).

I.1.1.2. Paroi secondaire

La paroi secondaire (ou bois) présente une structure organisée et composée de trois couches successives. Elle se forme lorsque la cellule atteint sa dimension définitive (Cooper, 1999). Elle se présente sous la forme d'une couche épaisse orientée vers l'espace extracellulaire au-dessus de la paroi primaire. Elle est constituée d'hémicelluloses, de lignines (Chavez Montes, 2008) et d'une forte proportion de cellulose (Clair, 2001).

I.2. Principaux polysaccharides pariétaux

Comme mentionné précédemment, la paroi cellulaire végétale est formée majoritairement d'un ensemble hétérogène de microfibrilles cellulosiques, d'hémicelluloses et de pectines (Cooper, 1999 ; Kheder, 2007) (figure 2). Ces polysaccharides peuvent contenir des oses neutres ou acides, être linéaires ou ramifiés par des chaînes d'oligosaccharides, ou encore substitués par des groupements non-sucres tels que des acétyles ou des méthyles (Lerouxel et al., 2006).

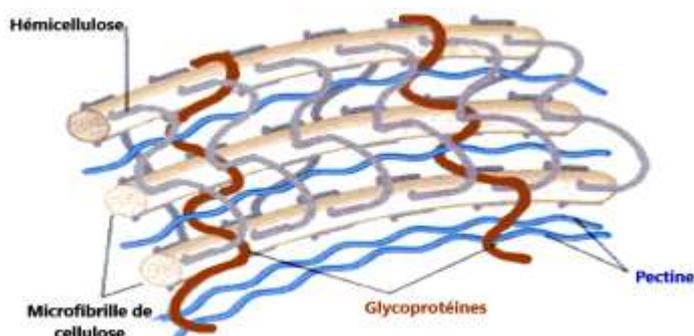


Figure 2. Organisation des trois principaux groupes de polysaccharides dans la paroi végétale (Karp, 2010).

Les polysaccharides neutres regroupent les celluloses, les arabinogalactanes, les arabinanes, les galactanes, les β -glucanes, les glucomannanes, les xyloglucanes, les xylanes, les mannanes et les galactomannanes. Les glucuronoxylanes, les homogalacturonanes et les rhamnogalacturonanes sont les principaux représentant des polysaccharides anioniques (Angone et *al.*, 2010).

I.2.1. Cellulose

La cellulose, comme son nom l'indique, est issue des cellules (Klemm et *al.*, 2005). C'est une macromolécule très abondante dans la nature et le polysaccharide le plus présent dans le milieu naturel. Cette cellulose est le constituant majoritaire de la paroi cellulaire des espèces végétales (Izydorczyk et *al.*, 2005 ; Saxena et Brown, 2005). Elle a été également identifiée chez certains champignons, la grande majorité des algues, certains organismes marins de la famille de Tunicates, des invertébrés et certaines bactéries à Gram négatif (Tayeb et *al.*, 2018). Ce polymère résulte de l'assemblage linéaire (figure 3) d'unités D-Glcp liés en β -(1,4) (Garon et Guéguen, 2014), associées en proportions variables en fonction de l'espèce végétale sous forme de microfibrilles qui font 3 à 5 nm de largeur et plusieurs micromètres de longueur (Cosgrove, 2005 ; Ratner, 1996). des complexes enzymatiques appelés rosettes, constituées de groupe de six sous-unités sont responsables de la synthèse de ces microfibrilles dans la membrane plasmique (Mueller et Brown, 1980 ; Carpita, 2011). Chaque sous unité synthétise quatre à six chaînes de glucanes, et 24 à 36 de ces chaînes sont ensuite assemblées en une microfibrille fonctionnelle (Doblin et *al.*, 2002).

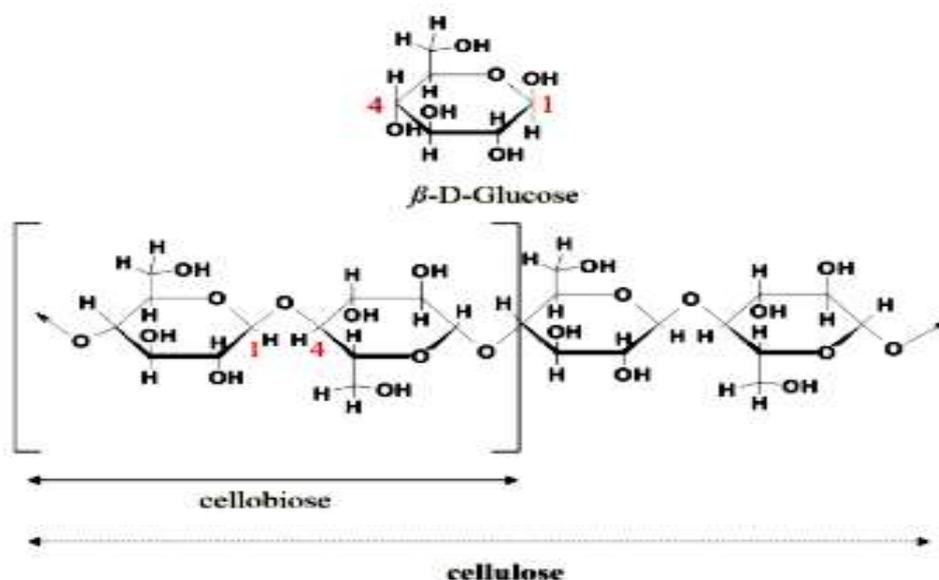


Figure 3. Chaines microfibrillaires de cellulose (Garon et Guéguen, 2014).

Au niveau de la chaîne, chaque résidu de glucose forme un angle de 180° par rapport au résidu voisin ce qui conduit à la formation de liaisons H-intermoléculaires entre les chaînes parallèles stabilisant à leur tour la structure tertiaire de la cellulose (Izydorczyk et *al.*, 2005). En outre, l'enroulement étroit des chaînes microfibrillaires les rendent résistantes à la pression osmotique interne et au stress externe (Brown, 2004). Elles servent également de structure d'ancrage aux autres polysaccharides des parois cellulaires, notamment aux pectines et aux hémicelluloses (Peters, 2016).

La cellulose est insoluble et imperméable à l'eau, et très peu soluble dans les solvants organiques usuels du fait de sa forte structure cristalline (Wei et *al.*, 2018). L'industrie a pu développer des formes solubles de cellulose en modifiant ses groupements hydroxyles par estérification, éthérification, oxydation sélective, copolymérisation par greffage et réaction de réticulation intermoléculaire (Pérez et Samain, 2010). Ces modifications structurales améliorent considérablement, non seulement la solubilité dans l'eau, mais aussi le comportement thermoplastique de la cellulose (Nešić et *al.*, 2020). Les celluloses modifiées, trouvent une large utilisation en industries. Ainsi, la cellophane (cellulose hydratée), les celluloïds (matière composée essentiellement de nitrate de cellulose et de camphre) et la ouate de cellulose sont utilisées dans l'industrie du bâtiment comme isolants thermiques et phoniques. Ces formes modifiées sont également employées dans les revêtements, peintures, encres, adhésifs, vernis, excipients, cosmétiques, etc... (Morot-Gaudry, 2016). La production du sorbitol ou de bioéthanol après hydrolyse de la cellulose par voie thermique ou par des hydrolases est également un champ d'applications important (Garon et Guéguen, 2014). La carboxyméthyle cellulose (CMC) est utilisée dans l'industrie alimentaire comme épaississant et stabilisant. A titre d'exemple, elle est utilisée comme stabilisant et inhibiteur de la croissance des cristaux de glace dans les desserts et les crèmes glacées. La CMC présente également de bonnes propriétés d'enrobage pour les poudres et les comprimés dans l'industrie pharmaceutique en raison de son insolubilité dans les fluides acides de l'estomac et de sa solubilité dans les fluides alcalins de l'intestin. La CMC trouve également des applications dans l'industrie cosmétique pour stabiliser les lotions pour les mains et les émulsions d'huile vitaminée (Izydorczyk et *al.*, 2005).

Les nitrocelluloses, sont des formes modifiées de cellulose qui stabilisent les protéines en raison de la formation d'interactions non covalentes entre les groupes nitro du polymère et les groupes amine des protéines. Cette propriété leur permet également de trouver des applications dans le domaine de l'hémodialyse et des biocapteurs (Liu et *al.*, 2021). La méthyle cellulose (MC) peut former des hydrogels thermosensibles. La transition sol-gel

réversible est induite par l'augmentation de la température. La réticulation est l'une des méthodes les plus populaires utilisées pour modifier l'hydrophilie des MC. Elle peut être réalisée en utilisant des agents de réticulation chimiques ou par rayonnement qui génèrent des aldéhydes ou des composés époxy (Liu et *al.*, 2021).

I.2.2. Hémicelluloses

Les hémicelluloses, sont des polysaccharides très abondants dans la nature (Muchlisyam et Harahap, 2016). Elles se caractérisent par leur solubilité dans des solutions alcalines (Ex. KOH 1M) (Selvendran et *al.*, 1985 ; Petera, 2016). Elles sont définies comme des complexes moléculaires (structure amorphe) (Morot-Gaudry, 2016), composés de chaîne linéaires de résidus de β -(1,4)-D-pyranes, plus ou moins ramifiés et associées aux microfibrilles de cellulose permettant d'obtenir une matrice réticulée (Carpita, 2000). La structure des hémicelluloses peut varier en fonction de leur origine (Izydorczyk et *al.*, 2005), entre les différentes couches qui constituent une même paroi cellulaire et des différents tissus d'une même plante (Scheller et Ulvskov, 2010). Ainsi, selon le monosaccharide constitutif de la chaîne principale, quatre groupes d'hémicelluloses sont décrits. Il s'agit des xyloglucanes, des mannanes, des β -glucanes et des xylanes (Cosgrove, 2005 ; Angone et *al.*, 2010). Par ailleurs, sur la base de l'hydratation des chaînes osidiques d'hémicellulose, des sous-groupes ont été décrits. Il s'agit de polysaccharides à faible degré d'hydratation qui comprennent les arabinoxylanes, les glucuronoxylanes, les xyloglucanes et les mannanes linéaires, et des polysaccharides fortement hydratés, tels que les galactoglucomannanes, les glucomannanes, les galactomannanes et les β -glucanes (Yadav et *al.*, 2007 ; Muchlisyam et Harahap, 2016).

Les xyloglucanes représentent l'hémicellulose majoritaire des parois primaires des plantes supérieures dicotylédones et d'un grand nombre de monocotylédones (Zavyalov et *al.*, 2019 ; Carpita et *al.*, 2001). Ils sont synthétisés dans l'appareil de Golgi et sont d'un point de vue structural assez homologues de la cellulose. Ils sont constitués d'une chaîne linéaire de type β -(1,4)-D-glucane qui peut être greffée par de courtes chaînes de D-xylane, d'arabinane, de xylogalactane ou de xylogalactofucane (figure 4) (Angone et *al.*, 2010 ; Lerouxel et *al.*, 2006). Ils peuvent servir de réserves énergétiques chez certaines graines de légumineuses (Santos et Buckeridge, 2004).

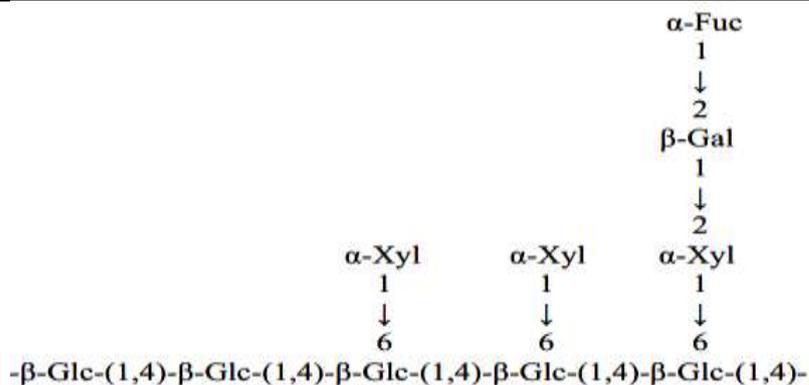


Figure 4. Représentation des xyloglucanes d'après Angone et *al.* (2010).

Les mannanes sont constitués d'une chaîne principale de type β -(1,4)-D-mannane avec quelques substitutions et/ou groupements acétyles en position O-2 ou/et O-3 (Stephen, 1983). Ces polymères sont fréquemment rencontrés dans les parois des cellules du bois (De Cherisey, 2015) et également comme substance de réserve dans les graines (endosperme) de certaines légumineuses. Ils sont abondants dans les bulbes de certaines plantes telle que la gomme de Konjac (Hoch, 2007). Selon Habibi (2004), il est possible de distinguer des galactomannanes (figure 5) composés d'une chaîne principale d'unités D-mannopyranoses liées en β -(1,4) régulièrement substituée en α -(1,6) par des résidus de D-galactopyranoses, et des glucomannanes de très haute masse molaire constitués d'une alternance de résidus D-mannopyranoses et D-glucopyranoses liés en β -(1,4) (Avat, 2013). Un hétéromannane se positionne à l'interface des deux structures précédentes. Il s'agit du galactoglucomannane qui est la structure dominante de mannanes dans les bois de résineux. Ce polymère est constitué de chaînes osidiques assez courtes de 45 à 150 unités formant la chaîne principale du glucomannane qui est régulièrement substituée en α -(1,6) par des unités D-galactopyranose (De Cherisey, 2015 ; Petera, 2016).

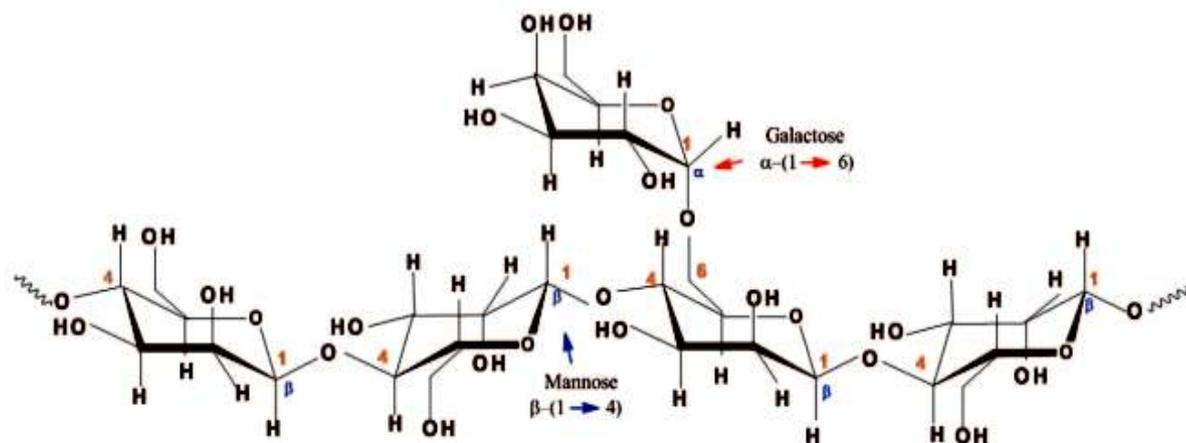


Figure 5. Structure des galactomannanes de plantes (De-Sousa et *al.*, 2019).

Les β -glucanes sont des polysaccharides hémicellulosiques de structure mixte (1,3-1,4)- β -D-glucanes (figure 6). Ils se trouvent en abondance dans les parois cellulaires des céréales et d'autres graminées (Ebringerová et al., 2005). Sans y être qualifiées d'hémicellulose, ces structures ont également pu être identifiées dans les parois cellulaires des bactéries, d'algues, de lichens, de levures et de champignons (Rahar et al., 2011). Elles ont souvent été considérées comme les composants principaux des parois cellulaires primaires. Cependant des observations récentes indiquent qu'elles peuvent également se trouver dans les parois secondaires de certains tissus (Burton et Fincher, 2009). Les β -glucanes ont des fonctions physiologiques importantes, et sont parfois décrits comme principes actifs de plantes médicinales pour prévenir et traiter le cancer, abaisser le taux de cholestérol, diminuer les charges virales (notamment dans le cas d'infections aux VIH). Ils ont des effets antidiabétiques et stimulent le système immunitaire (Rahar et al., 2011).

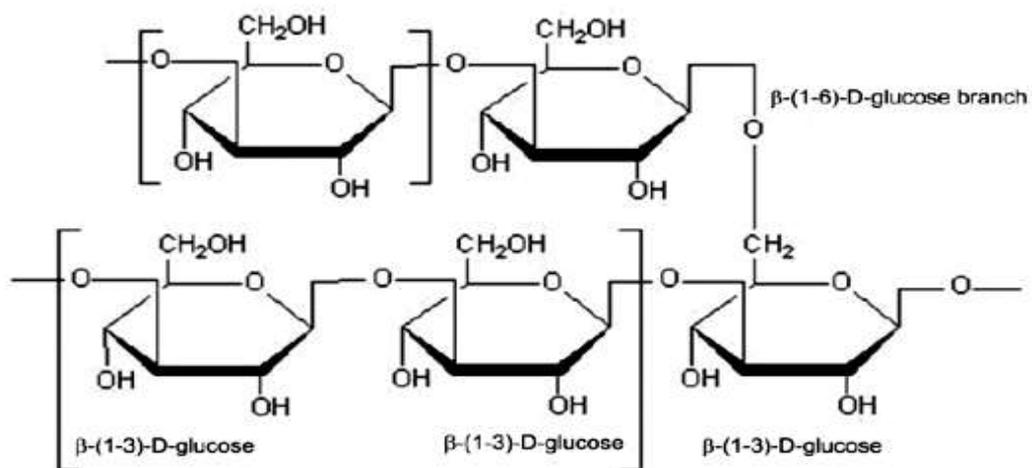


Figure 6. Représentation des β -glucanes selon Rahar et al. (2011).

Les xylanes représentent le polysaccharide végétal la plus abondante après la cellulose (Peters, 2016). On les retrouve dans les principales hémicelluloses des parois secondaires des fibres de dicotylédones ligneuses et dans les trachéides des angiospermes (Ebringerová et Heinze, 2000). Ils sont composés d'un squelette linéaire de type β -(1,4)-D-xylane (figure 7) qui peut être substitué par des résidus tels que du L-arabinose lié en α -(1,2) ou α -(1,3) (arabinoxylanes), du D-glucuronate ou du 4-O-méthyl-D-glucuronate en α -(1,2) (glucuronoxylane) ou par les deux oses précédemment cités (glucuronoarabinoxylanes) (Chavez Montes, 2008).

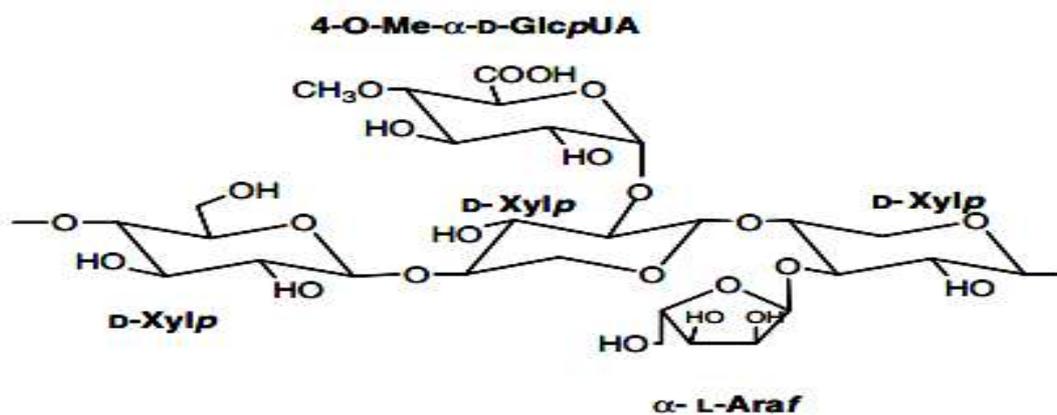


Figure 7. Arabinoxyanes de céréales (Izydorczyk et *al.*, 2005).

I.2.3. Pectines

Les pectines constituent une famille de polysaccharides complexes qui se présentent sous forme de matériaux structuraux dans toutes les plantes terrestres (Rodrigues et *al.*, 2015). Elles sont composées d'acides D-galacturoniques liés en α -(1,4) et de nombreux oses neutres tels que le L-rhamnose, le D-galactose, le L-arabinose et le D-xylose (Panda et *al.*, 2019). Elles diffèrent d'une espèce à l'autre et même au sein d'une même espèce selon l'environnement dans lequel elles se développent (Wehr et *al.*, 2004). Les pectines sont les principaux constituants de la lamelle moyenne des parois cellulaires et servent aussi de ciment biologique entre les cellules (Daher et Braybrook, 2015). La structure des pectines évolue pendant le développement de la cellule au sein d'une même paroi. Ces changements sont liés à l'évolution progressive de leur fonction (Zhang et *al.*, 2015 ; Chan et *al.*, 2016). D'abord insolubles, elles assurent la rigidité des tissus. Elles sont ensuite dégradées en mono- et oligosaccharides par voie enzymatique au cours de l'évolution de certains tissus et notamment du murissement des fruits (Petera, 2016). Elles sont impliquées dans plusieurs fonctions physiologiques chez la plante. Elles forment un réservoir d'oligosaccharides aux fonctions de signalisation importantes pour la croissance, le développement et les réactions de défense des plantes. Elles assurent le transport ionique et le régime hydrique sous forme de polymères hydratants. Elles influencent également la germination des graines (Larskaya et Gorshkova, 2015 ; Saffer, 2018 ; Tsyganova et Tsyganov, 2019).

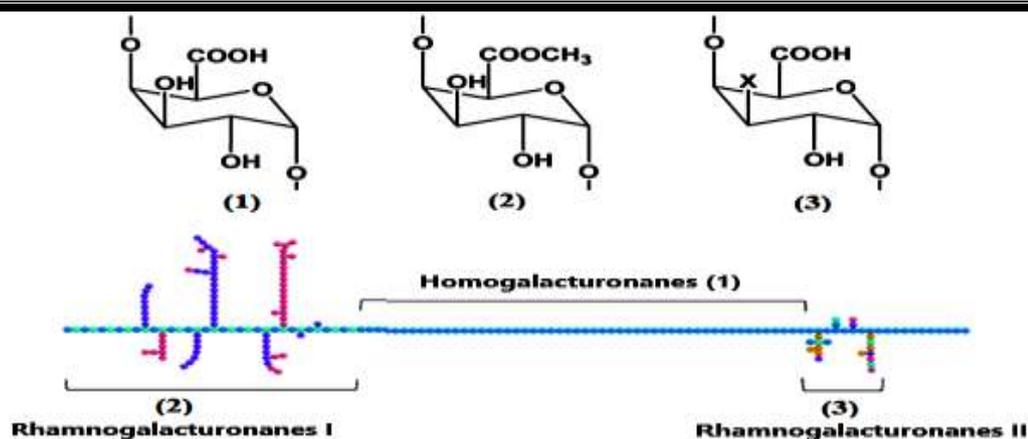


Figure 8. Formes d'acides galacturoniques présentes dans la pectine. 1: Acide galacturonique; 2: Méthyl-galacturonique acide; O-acétyl-galacturonique acide (Chan et *al.*, 2017).

D'après (Chan et *al.*, 2017), la pectine native des plantes est composée de trois domaines polysaccharidiques liés par liaison covalente pour former un réseau pectique. Il s'agit des homogalacturonanes (HGA), rhamnogalacturonanes I (RG-I) et rhamnogalacturonanes II (RG-II) (figure 8). Le principal constituant des molécules de pectine est l'HGA qui contient des groupements carboxyles se présentant sous forme d'acides libres ou d'esters méthyliques. Le taux d'unités carboxyliques estérifiées dans la chaîne de pectine a été défini comme le degré d'estérification (DE). Cette valeur (DE) influe fortement sur les propriétés rhéologiques des pectines, notamment en présence de cations multivalents tels que les ions Ca^{2+} , de mono- et disaccharides et de pH acides (Nguyen et *al.*, 2019). En conséquence, les propriétés épaississantes ou gélifiantes des pectines peuvent être améliorées et/ou modifiées chimiquement en fonction des applications visées (Panda et *al.*, 2019). Récemment, la pectine a été exploitée pour différentes applications biomédicales, notamment dans la préparation de médicaments (Panda et *al.*, 2019) et dans l'industrie alimentaire pour ses propriétés gélifiantes (Rodrigues et *al.*, 2015).

I.3. Polysaccharides constitutifs des graines

Les plantes ont différentes stratégies pour s'adapter aux environnements où elles se développent. Ces stratégies passent souvent par l'accumulation de grandes quantités de certains composés (Buckeridge et *al.*, 2000). Parmi ces substances, les polysaccharides de stockage sont très souvent les principaux composés constitutifs des graines (PSPC_G) de plantes très diversifiées sur le plan taxonomique (Buckeridge, 2010).

Dans de nombreuses graines, les parois cellulaires des tissus de stockage (l'endosperme, les cotylédones et le périsperme) sont massivement épaissies et contiennent de grandes quantités

de polysaccharides de réserve (figure 9). Ces derniers seront mobilisés après la germination (Gidley et Reid, 2006) (figure 9). Les PSPC_G sont présents dans les graines de la plupart des espèces végétales (Reid, 1985) et certains types de structures semblent se trouver exclusivement dans les endospermes des graines, tandis que d'autres se trouvent généralement dans les cotylédones de stockage (Gidley et Reid, 2006).

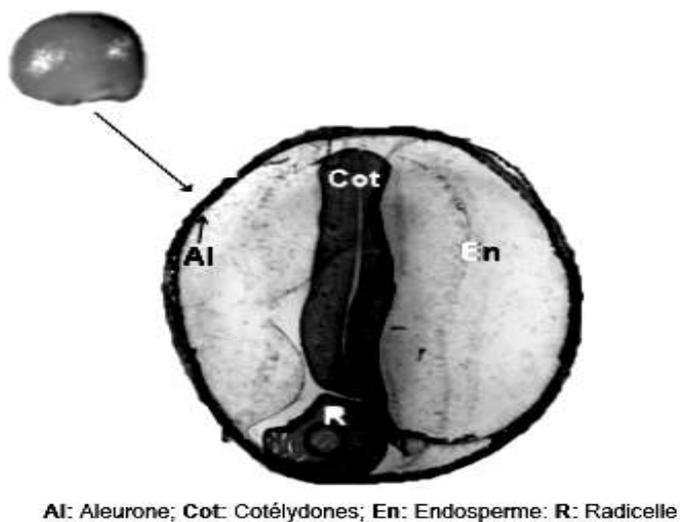


Figure 9. Coupe transversale de graine de Guar (Naoumkina et *al.*, 2007).

I.3.1. Polysaccharides de l'endosperme

L'endosperme est une source de polysaccharides de réserve et de nutriments mobilisables durant la germination des graines. Il sert également de réserve d'eau empêchant ainsi la déshydratation de graines et la dénaturation de protéines qui sont essentielles pour la germination (Srivastava et Kapoor, 2005). Plusieurs espèces de diverses familles de plantes sont connues pour avoir des graines qui stockent des mannanes, glucomannanes, galactomannanes (Buckeridge et *al.*, 2000b) ou de l'amidon (Vilaplana et *al.*, 2018).

Chez les légumineuses, la principale fonction des parois cellulaires de l'endosperme semble être le stockage de galactomannanes (GM) qui peuvent atteindre plus de 30% de la masse sèche de la graine (Buckeridge, 2010). Ils y jouent, entre autres, le rôle de substances d'imbibition (Reid et Bewley, 1979 ; Buckeridge, 2010) et de protection de l'embryon contre les agents pathogènes grâce à la barrière physique (très visqueuse) qu'ils forment pendant les premiers stades de la germination (Buckeridge, 2010).

Le ratio mannose/galactose (M/G) varie d'une espèce à l'autre (Tableau 1) (Franco, 1996) et est contrôlé génétiquement (Gidley et Reid, 2006). La valeur de ce ratio impacte fortement la solubilité, la viscosité et les interactions entre les galactomannanes et les autres

polysaccharides (figure 10) (Prajapati et *al.*, 2013). La solubilité des GM dans l'eau est impactée par les résidus de galactose dans les chaînes latérales du polymère. Elle augmente avec une teneur élevée en galactose (Rinaudo, 2008). En effet, les résidus galactose inhibent l'acquisition d'une structure ordonnée des chaînes de mannane et contribuent à l'entropie conformationnelle à l'état liquide par rotation libre de ces mêmes résidus autour des liaisons (1,6) (Picout et *al.*, 2002) (Tableau 2). En général, les GM à faible teneur en galactose sont obtenus à partir des graines d'espèces appartenant à la sous-famille de *Caesalpinioideae* plus primitives et les GM à teneur moyenne ou élevée en galactose à partir des *Faboideae* (Gidley et Reid, 2006).

Tableau 1. Galactomannanes de diverses espèces de *Leguminosae* et leurs ratios Mannose/Galactose

Noms botaniques		Mannose/Galactose	Références
Sous-familles	Espèces		
<i>Faboideae</i>	<i>Cicer sativum</i> L.	2,4	Kodiralieva et rakhmanberdyeva (2011)
	<i>Colutea paulsenii</i> Freyn	0,76	Sharma et <i>al.</i> (2008)
	<i>Desmodium pulchellum</i>	2,0	
	<i>Lotus corniculatus</i>	1,25	Cerqueira et <i>al.</i> (2009)
	<i>Medicago sativa</i> L.	1,18	Hellebois et <i>al.</i> (2021)
	<i>Crotalaria juncea</i>	2,0	Bento et <i>al.</i> (2013)
	<i>Sesbania virgata</i>	1,5	
	<i>Cercidium torreyanum</i>	3,38	
	<i>Cacia occidentalis</i>	3,0	Petkowicz et <i>al.</i> (1998)
	<i>Caesalpiniaecae</i>	<i>Parkinsonia aculeate</i>	2,70
<i>Copaifera langsdorffii</i>		1,39	
<i>Caesalpinia gilliesii</i>		3,79	Abdel-Megeed et <i>al.</i> (2019)
<i>Cassia fastuosa</i>		4,0	Bento et <i>al.</i> (2013)
<i>Delonix regia</i>		4,0	
<i>Mimosoideae</i>	<i>Prosopis affinis</i> Spreng.	1,5	Vilaró et <i>al.</i> (2018)
	<i>Adenanthera pavoniva</i>	1,6	Bento et <i>al.</i> (2013)
	<i>Leucaena leucocephala</i>	1,6	

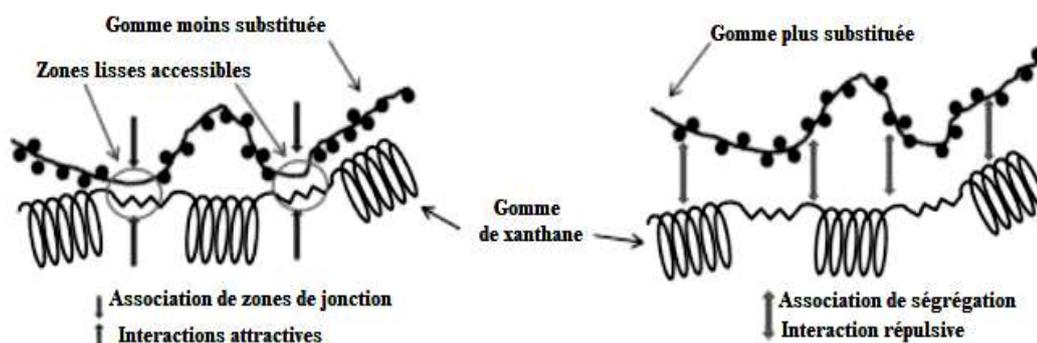


Figure 10. Interaction d'un galactomannane avec la gomme de xanthane (Asharuddin et *al.*, 2018).

Les galactomannanes (GM) sont largement utilisés comme agents épaississants et stabilisants en raison de leurs propriétés rhéologiques (Sharma et *al.*, 2021). Les molécules de GM hydratées occupent un grand volume hydrodynamique en solution aqueuse (Prajapati et *al.*, 2013) ce qui leur confère un grand avantage pour former des solutions très visqueuses à des concentrations relativement faibles. La rhéologie de ces solutions est peu affectée par le pH, la force ionique et les traitements thermiques (Sittikijyothin et *al.*, 2005). Les solutions de GM sont considérées comme des fluides viscoélastiques, car ils présentent des caractéristiques de fluides élastiques idéaux et sont capables de stocker et de récupérer l'énergie de cisaillement. La viscosité et la stabilité des solutions de galactomannane lors du stockage dépendent du temps et de la température utilisés lors de la préparation de la solution. Le chauffage des galactomannanes à des températures supérieures à 60°C tend à fournir une viscosité initiale élevée mais entraîne une stabilité inférieure (en termes de changements de viscosité en fonction du temps). Donc, la température la plus appropriée dépend de la source de galactomannane (Prajapati et *al.*, 2013). A titre d'exemple, la gomme de caroube doit être chauffée à 80°C pendant 20 à 30min pour garantir sa dispersion complète, tandis que les conditions optimales pour disperser la gomme de Guar impliquent un chauffage à 25-40°C pendant 2h (Srivastava et Kapoor, 2005).

En industrie papetière, les galactomannanes servent comme agents de renforcement des fibres et leur ajout en petites quantités à la pâte à papier peut augmenter la production de papier (Mudgil et *al.*, 2014). Le galactomannane est utilisé comme agent d'encollage dans l'industrie textile lorsqu'il est combiné avec de l'amidon et utilisé comme un épaississant dans les peintures (Thombare et *al.* 2016). Les gommes ayant un rapport M/G élevé sont largement utilisées dans la formulation de systèmes d'administration orale d'hydrogels, de systèmes multiparticulaires et de comprimés. Le galactomannane a un effet antidiabétique et

hypolipidémique en réduisant le cholestérol LDL (lipoprotéines de basse densité) en raison de sa teneur élevée en fibres solubles et agit donc comme une substance bioactive (Barak et Mudgil, 2014). Pour une large gamme de pH, de nombreuses solutions de gommes sont donc utilisées comme épaississant ou stabilisant et améliorent également la durée de conservation des boissons. Les galactomannanes possèdent des propriétés tensioactives qui peuvent être exploitées pour les utiliser comme stabilisants d'émulsions d'huile dans l'eau (Mikkonen et al., 2009).

Les propriétés des biopolymères, telles que la perméabilité à l'oxygène, au dioxyde de carbone et à l'humidité, doivent être ajustées afin de produire des films présentant une résistance à la traction et un allongement à la rupture élevés. Les galactomannanes permettent cet ajustement fin en faisant varier la structure moléculaire du biopolymère (Kontogiorgos, 2017).

Tableau 2. Variabilités des ratios molaires Mannose/Galactose (M/G) de quelques gommes et leurs propriétés résultantes.

	M/G	Propriétés résultantes	Applications	Références
Gomme de caroube	4	- Solubilité faible dans l'eau froide	-Epaississant -Stabilisant	Parvathy et al. (2005) Paramita et al. (2011)
Gomme Cassia	5	-Solubilité différente	-Epaississant -Stabilisant	Feng et al. (2016) Chouana (2017)
Gomme de Guar	2	-Meilleure solubilisation dans l'eau -Formation de gels en association avec certains polysaccharides -Traitement du cancer de colon	-Epaississant (E-427) -Stabilisant	Prajapati et al. (2013)
Gomme de fenugrec (<i>Trigonella foenum-graecum</i>)	1,02	-Soluble dans l'eau à des températures inférieures à 20°C	-Epaississant -Stabilisant	Prajapati et al. (2013)
Gomme de Tara	3	-Partiellement soluble dans l'eau froide	-Epaississant	Prajapati et al. (2013) Andrade et al. (1999)

Les céréales stockent l'énergie sous forme d'amidon dans l'endosperme qui se compose généralement de deux homopolymères de D-glucose : l'amylose et l'amylopectine. L'amylose est un polymère linéaire composé de chaînes d' α -(1,4)-D-glucanes. L'amylopectine est

constitué de chaînes d' α -(1,4)-D-glucanes fortement ramifiées par des liaisons α -(1,6) qui relient les chaînes linéaires entre elles (figure 11). Il est le polymère le plus abondant dans l'amidon et est constitué de lamelles amorphes et cristallines répétées (Jeon et *al.*, 2010). L'amidon se trouve dans les organes de stockage des céréales, des légumineuses et des tubercules, où il reste non dégradé pendant de longues périodes pour être utilisé ultérieurement par la plante notamment pour fournir du glucose aux graines/tubercules en germination (Vilaplana et *al.*, 2018). Les granules d'amidon de différentes origines botaniques présentent des différences de forme et de taille allant de 1-2 à $\sim 100\mu\text{m}$ (Jane et *al.*, 1994). Les morphologies des granules d'amidon sont notamment sphériques, ovales, en forme de disques, polygonales, allongées, en forme de rein et en forme de lobe. Certaines céréales comme le blé, l'orge et le seigle contiennent des granules de tailles différentes (granules A plus grosses et granules B plus petites) au sein d'une même plante. Le riz et l'avoine ont des granules de différentes tailles, formant des formes irrégulières dans l'endosperme (Ao et Jane, 2007). Chez la plupart des plantes supérieures, il existe deux types d'amidon : l'amidon de stockage, qui est produit dans l'amyloplaste pour le stockage d'énergie à long terme et l'amidon transitoire, qui est synthétisé et dégradé dans les chloroplastes au sein du tissu photosynthétique (Lloyd et Kossmann, 2015). Des hypothèses récentes suggèrent que l'amidon transitoire est également produit dans les plastides de stockage des cellules non photosynthétiques, comme cela a été signalé dans le parenchyme du pédoncule du blé (*Triticum aestivum* L.) (Scofield et *al.*, 2009) et dans les organes floraux d'*Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana* L.) (Hedhly et *al.*, 2016) pour le stockage temporaire du carbone et sa remobilisation rapide pendant le développement floral (MacNeill et *al.*, 2017).

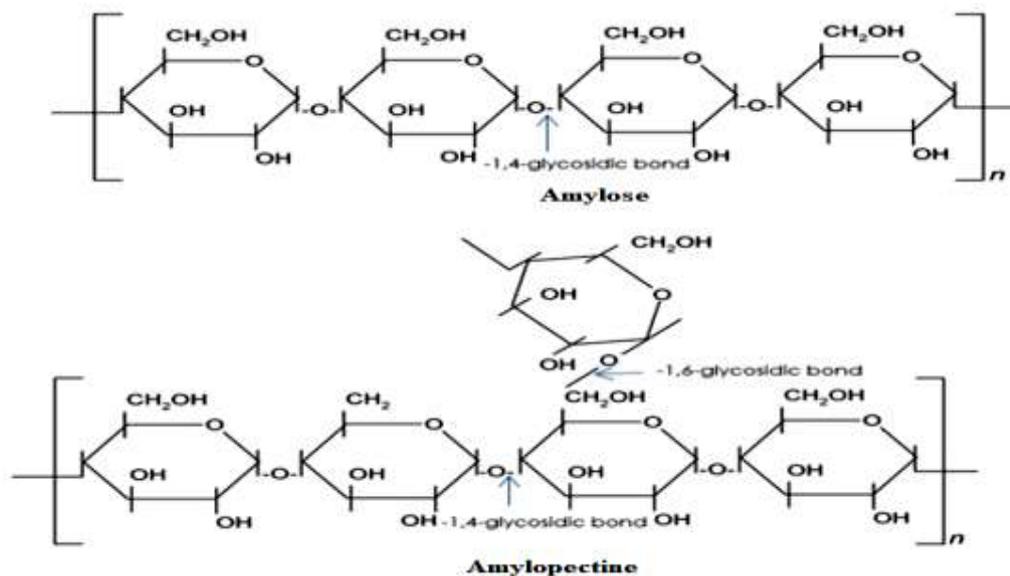


Figure 11. Structures de l'amylose et de l'amylopectine (Asharuddin et *al.*, 2018).

I.3.2. Polysaccharides de cotylédones

Contrairement à l'endosperme, le xyloglucane et l'arabinogalactane sont utilisés comme réserves dans les cotylédones. Le métabolisme de ces polysaccharides fait intervenir différents mécanismes de signalisation et d'autres fonctions que le stockage. Alors que les polysaccharides de la paroi cellulaire se dégradent, les cotylédones développent des faisceaux vasculaires pour transporter les produits vers les parties en croissance de la plante (Buckeridge, 2010).

I.3.2.2. Xyloglucanes

Les xyloglucanes (figure 12) existent dans la paroi primaire des plantes supérieures (plantes vascularisées) (Hayashi, 1989). Ils ont été caractérisés chez les dicotylédones (Ex. cultures cellulaires d'*Acer*, *Glycine*, fibres de *Lactula*, *Phaseolus*, *Populus* et *Rosa*), chez les monocotylédones (Ex. endosperme d'*Oryzae*, bulbes d'*Allium*, et cultures cellulaires d'*Oryzae*) et les Gymnospermes (ex. cultures cellulaires de *Pseudotsuga*) (Fry, 1992). Deux types de xyloglucane ont été identifiés chez les plantes, un xyloglucane qualifié de « fucosylé » qui a une fonction de maintien de la structure dans les parois cellulaires des plantes et un xyloglucane non fucosylé, comme le xyloglucane de la graine de Tamarin qui a un rôle de réserve carbonée (Urakawa et al., 2002). Cette fonction de réserve et la mobilisation de xyloglucanes après la germination des graines ont été également signalées chez les graines de *Tropaeolum majus* (Edwards et al., 1985), *Tropaeolum indica* (Reis et al., 1987) et *Copaifera langsdorffii* (Buckeridge et al., 1992). Les xyloglucanes constituent 20 à 30% de la matière sèche de la paroi cellulaire. Cette proportion est cependant réduite (5 à 10%) dans le cas des Graminées. Seules les graines de quelques plantes (Ex. *Tamarindus*, *Impatiens*, *Annona*, *Tropaeolum*, *Hymenaea*, *Detarium*) possèdent une quantité importante de xyloglucanes autour de leur cotylédone (Lohmann, 2009).

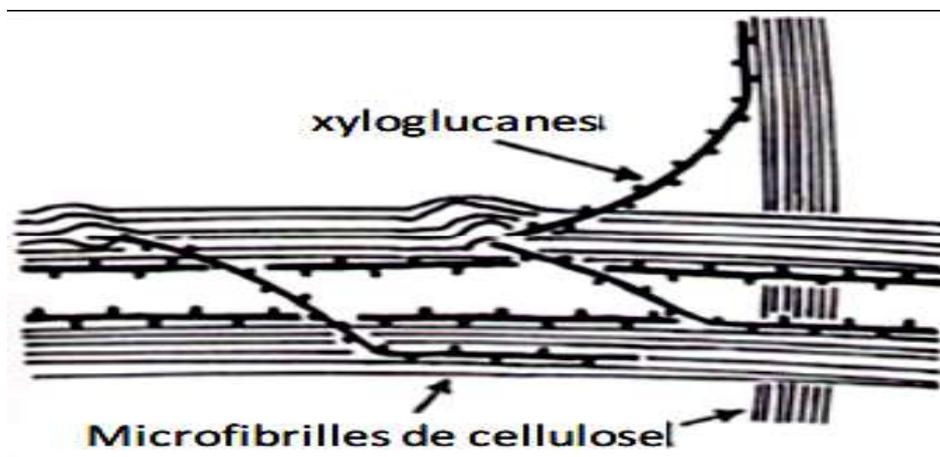


Figure 12. Structure de xyloglucanes au niveau de la paroi végétale primaire (Hayashi, 1989).

I.3.2.1. Arabinogalactanes

Les arabinogalactanes (AGs) sont des polymères présents sous forme de polysaccharides de stockage de la paroi cellulaire végétale (Buckeridge et *al.*, 2000b). Ils existent également chez certains microorganismes (Saiedy et *al.*, 2021). Il y a deux types d'AGs. Le type I est hautement ramifié et composé d'une chaîne principale d' α -(1,4)-galactane substituée de résidus arabinose liés en α -(1,3) (Habibi et *al.*, 2004). Les AGPs de type II constituent un large groupe dont les structures sont de courtes chaînes de (1,3) et (1,6)- β -D-galactanes, associées à des peptides riches en hydroxyproline (Bartetzko et *al.*, 2015). On les trouve présents en grande quantité dans le bois de mélèze ou le son de blé où leur présence influence le pétrissage de la pâte (Bewley et *al.*, 2006). Dans les cotylédones de certaines légumineuses telle que *Lupinus angustifolius*, les arabinogalactanes ainsi que des arabinanes et parfois des galactoxyloglucanes sont présents dans les parois cellulaires épaissies comme composants de stockage qui seront mobilisés après la germination (Bewley et *al.*, 2006).

I.4. Polysaccharides végétaux et activités biologiques

Un grand nombre de polysaccharides provenant de différents organes de plantes spontanées à caractère médicinal (très diverses sur le plan taxonomique) ont été purifiés et testés pour leurs effets biologiques. Dans certains cas des relations structures-fonctions ont pu être établies même si beaucoup restent à l'état d'hypothèses.

I.4.1. Activités antidiabétiques

Le diabète sucré est un groupe de troubles métaboliques caractérisés par un taux élevé de sucre dans le sang (hyperglycémie) dû à une altération soit de la capacité du pancréas à produire insuffisamment d'insuline (hormone hypoglycémisante), soit parce que l'organisme ne peut pas utiliser cette hormone correctement (Chandra et *al.*, 2020). On distingue généralement deux types de diabète, le type I (insulinodépendant) et type II (non-insulinodépendant). Le diabète de type I est généralement causé par la destruction auto-immune des cellules pancréatiques productrices d'insuline. Quant au type II, il se développe lorsque les cellules β pancréatiques ne parviennent pas à sécréter des quantités suffisantes d'insuline pour répondre à la demande métabolique. Une demande métabolique accrue d'insuline due à une résistance à l'insuline dans plusieurs tissus précède généralement le développement de l'hyperglycémie (Wang et *al.*, 2016). Une glycémie élevée sur une période prolongée en cas de diabète sucré non contrôlé peut entraîner un certain nombre de complications macro et microvasculaires à court et long termes (Chawla et *al.*, 2016 ; Chandra et *al.*, 2020).

L' α -amylase et l' α -glucosidase sont des enzymes clés de la digestion des glucides dans l'intestin grêle (Mcdougall et Stewart, 2005). Les inhibiteurs de ces enzymes retardent la dégradation de l'amidon et réduisent la glycémie postprandiale chez les patients diabétiques (Zhu et al., 2016). De ce fait, des inhibiteurs synthétiques comme l'acarbose, le miglitol, et le voglibose (Chakrabarti et al., 2014 ; Sukalingam et al., 2015) sont utilisés en thérapie clinique pour contrôler efficacement l'hyperglycémie chez les patients diabétiques de type II (Zhu et al., 2016). Cependant, ces médicaments antidiabétiques issus de la synthèse présentent des limites dans leur utilisation en raison d'effets secondaires indésirables (diarrhée, troubles abdominaux et flatulence) (Chaudhury et al., 2017 ; Hollander, 1992). Par conséquent, et pour contrôler cette pathologie, la recherche de composés d'origine naturelle a fait un grand retour via la médecine alternative. De même, l'utilisation d'aliments fonctionnels comme les plantes médicinales et les champignons pour le traitement du diabète sont actuellement fortement décrits dans la littérature (Wang et al., 2016). Certains polysaccharides de plantes ont fait l'objet d'intenses recherches, compte tenu de leur fort potentiel d'application dans le traitement du diabète (Huang et al., 2015). En Chine, plusieurs polysaccharides ont été utilisés avec succès en médecine alternative pour traiter le diabète. Parmi eux, on peut citer notamment un hétéroglucane d'*Astragalus membranaceus*, un glucomannane de Konjac et des polysaccharides neutre et acide de *Panax ginseng* (Diao et al., 2011). Les mécanismes d'actions impliqués dans l'activité antidiabétique des polysaccharides sont nombreux. Ils comprennent la protection des îlots pancréatiques via des activités antioxydantes éliminant les radicaux libres et la préservation des cellules β productrices d'insuline (Li et al., 2011). La viscosité des polysaccharides peut également inhiber la diffusion du glucose et donc son assimilation par l'intestin grêle (Chung et al., 2017 ; Hu et al., 2018 ; Kameyama et Itoh, 2014). Enfin certains polysaccharides sont des inhibiteurs des α -amylases (Wu et al., 2016) et α -glucosidases qui provoquent une réduction de la décomposition et de l'absorption des glucides complexes et donc de l'amidon (Zhang et al., 2016 ; Zhang et Li, 2015).

Des hydro (TPC-W) et alkali (TPC-A) hétéropolysaccharides, composés de rhamnose, fucose, arabinose, xylose, mannose, glucose et galactose ont été isolés de *Camellia sinensi*. Ils diminuent la glycémie et le taux d'anticorps dirigés contre l'acide glutamique décarboxylase (GAD), atténuant ainsi les symptômes du diabète chez des souris diabétiques non-obèses (Chen et al., 2010). Un polysaccharide acide (LBP) purifié à partir du fruit de *Lycium barbarum* a été caractérisé comme étant composé de rhamnose, d'arabinose, de xylose, de galactose, de mannose et d'acide galacturonique de ratio molaire relatif 1,00 : 7,85 : 0,37 : 0,65 : 3,01: 8,16 et de masse moléculaire moyenne de $2,25 \times 10^6$ Da. Le LBP a protégé les

cellules des îlots pancréatiques des dommages oxydatifs, a amélioré le taux de survie des cellules et a inhibé le développement de la résistance à l'insuline de cellules HepG2 (Zou et al., 2010). Un polysaccharide (ASKP) isolé des graines d'*Artemisia sphaerocephala* constitué de mannose, d'acides glucuronique et galacturonique, de glucose, de xylose, de galactose et d'arabinose avec un rapport molaire relatif de 9,4 : 5,8 : 13,6 : 26,7 : 19,4 : 17,2 : 8,0 a été capable d'atténuer le développement de l'hyperglycémie, de la stéatose hépatique et des lésions oxydatives chez des souris nourries au fructose (Ren et al., 2014). De façon comparable, un hétéropolysaccharide (APP) isolé d'*Andrographis paniculata* ($4,6 \times 10^4$ Da) et composé de galactose, mannose, fucose, arabinose et rhamnose avec des ratios molaires de 15,4 : 2,5 : 4,3 : 1,5 : 1,6 a amélioré les anomalies métaboliques des souris diabétiques, prévenant ou retardant la progression des complications rénales du diabète (Xu et al., 2012). Un polysaccharide hydrosoluble (CCPW-1) extrait des racines de *Coptis Chinensis* dont le glucose est l'ose majoritaire (54,8%) suivie de l'arabinose (22,3%), du xylose (11,5%), du galactose (7,6%) et de l'acide galacturonique (3,8%) a été étudié pour ses activités biologiques. CCPW-1 a significativement stabilisé l'augmentation du taux de glucose, de l'insuline sérique à jeun et du cholestérol total (CT) dans le sang en limitant les effets oxydants d'espèces réactives de l'oxygène et en activant les déshydrogénases et catalase du pancréas (Jiang et al., 2013). PPSB, un hétéropolysaccharide acide (27kDa) a été isolé du fruit de *Physalis alkekengi*. Sa composition a été déterminée comme constituée d'arabinose, de galactose, de glucose et d'acide galacturonique avec un ratio molaire de 2,6 : 3,6 : 2 et 1 respectivement. Ce polysaccharide a réduit la glycémie et la consommation d'eau et a augmenté le poids corporel de souris diabétiques (Tong et al., 2008). Des polysaccharides neutres (WGPN) et acides (WGPA) isolés de *Panax ginseng*, se sont révélés diminuer la glycémie à jeun après différents modes d'administration. WGPA a montré un effet hypoglycémique marqué, qui pourrait être dû à l'atténuation du stress oxydatif et à la stimulation de la sécrétion d'insuline (Sun et al., 2014). En outre, une étude métabolomique a indiqué que le polysaccharide hydrosoluble de Ginseng (WGP) modifiait le métabolisme des purines, du tryptophane, des acides gras, de l'ADN, des acides organiques, des hormones stéroïdiennes et le métabolisme énergétique dans son ensemble chez des rats diabétiques (Niu et al., 2012).

Tous les polysaccharides actifs décrits précédemment sont des hétéropolysaccharides incluant de l'arabinose dans leurs structures. Ces spécificités structurales semblent nécessaires au développement de propriétés antidiabétique et antioxydante. Le processus oxydatif joue en effet un rôle majeur dans le développement de dysfonctionnements des cellules du pancréas et

de la tolérance au glucose (Lupi et *al.*, 2007 ; Rains et Jain, 2011 ; Rochette et *al.*, 2014 ; Stark, 2005). Klutts et *al.* (2002) ont suggéré que l'absence d'arabinose dans les cellules de mammifères pourrait constituer une bonne opportunité thérapeutique pour les traitements antidiabétiques incluant ce sucre.

I.4.2. Activités anti-inflammatoires

L'inflammation est une réponse biologique complexe du tissu vasculaire suite à des stimuli nocifs, des agents pathogènes ou des composés irritants. Elle se caractérise par des rougeurs, une sensation de chaleur, l'apparition d'œdèmes et de douleurs (Anitha-Rani et *al.*, 2014 ; Sherwood et *al.*, 2004). Les enzymes lysosomales libérées au cours de l'inflammation entraînent des lésions tissulaires en endommageant les macromolécules et en activant la peroxydation lipidique des membranes. Ces phénomènes sont suspectés d'être responsables (ou impliqués) de (dans) certaines pathologies comme les infarctus du myocarde, les chocs septiques, la polyarthrite rhumatoïde, les rhinites, l'athérosclérose et les maladies ischémiques (Osman et *al.*, 2016 ; Anitha-Rani et *al.*, 2014 ; Libby, 2008 ; Stevens et *al.*, 2005 ; Black et Garbutt, 2002). La dénaturation des protéines apparaît être l'une des causes de la polyarthrite rhumatoïde (Van et Botting, 1995 ; Mizushima, 1966). La production d'auto-antigènes dans certaines maladies rhumatismales pourrait être due à une dénaturation *in vivo* des protéines. Le mécanisme de dénaturation implique probablement une altération des liaisons électrostatiques, hydrogènes, hydrophobes et disulfures des protéines. Plusieurs agents thérapeutiques anti-inflammatoires ont montré une capacité dose-dépendante à inhiber la dénaturation des protéines induite par la chaleur (Grant et *al.*, 1970).

La stratégie thérapeutique traditionnelle de l'inflammation fait principalement appel à des médicaments anti-inflammatoires stéroïdiens (AIS) et non stéroïdiens (AINS), qui ont tous deux des effets secondaires qui ne peuvent être ignorés tels que l'hypertension, l'ostéoporose, l'immunosuppression gastrique hémorragique, l'ulcère digestif et l'hépatotoxicité qui rendent l'utilisation de ces médicaments à long terme problématique (Yu et *al.*, 2015 ; Hou et *al.*, 2020 ; Ma et *al.*, 2016). Ces dernières années, un grand nombre de produits naturels, notamment des polysaccharides, des terpénoïdes, des phénylpropanoïdes, des lignanoïdes, des coumarines, des flavonoïdes, des anthraquinones, des alcaloïdes et des polyphénols, ont été signalés comme des substances ayant des effets thérapeutiques prometteurs sur l'inflammation, *in vivo* et *in vitro* (Wang et Zeng, 2019 ; Aswad et *al.*, 2018). Ainsi, les polysaccharides extraits de sources naturelles et à structure moléculaire complexe ont attiré l'attention du fait de leur sécurité et de leurs puissantes propriétés anti-inflammatoires et immunomodulatrices (Guo et *al.*, 2018) impliquant différents médiateurs et voies de

signalisation (Hou et *al.*, 2020). En outre, les activités biologiques des polysaccharides sont fortement influencées par leur masse moléculaire (M_w), leur composition en monosaccharides, les types de liaisons glycosidiques et la teneur en groupements sulfate (Yang et Zhang, 2009).

I.4.2.1. Mécanismes d'actions

I.4.2.1.1. Régulation de la libération de médiateurs proinflammatoires

Il a été démontré que les cytokines, telles que le facteur de nécrose tumorale alpha (TNF- α), l'interleukine-1 et 6 (IL-1 et IL-6), jouent un rôle important dans les réponses proinflammatoires. Lorsqu'elles sont libérées par les cellules inflammatoires, l'expression des molécules d'adhésion des cellules endothéliales vasculaires est induite, ce qui entraîne le recrutement de neutrophiles, de monocytes et de lymphocytes qui migrent pour atteindre un tissu lésé et provoquer une nécrose tissulaire, une hypotension et d'autres toxicités potentiellement graves de type septicémie (Cheng et *al.*, 2016 ; Abrams et *al.*, 2010).

L'inhibition de la libération de médiateurs inflammatoires ou l'amélioration de la dérégulation des cytokines proinflammatoires (IL-1 β , IL-6 et TNF- α) et des cytokines anti-inflammatoires (IL-10), est une stratégie potentielle pour le traitement de l'inflammation (Du et *al.*, 2015 ; Mueller et *al.*, 2010). Un polysaccharide alcali-soluble (ASPP) extrait de la patate douce, a montré un effet anti-inflammatoire via l'inhibition dose-dépendante des niveaux d'oxyde nitrique (ON), d'IL-6, d'IL-1 β et de TNF- α tout en augmentant la production d'IL-10 dans des cellules macrophages RAW 264.7. Un résultat comparable a été observé avec un modèle de souris traitées par un lipopolysaccharide (LPS) (Chen et *al.*, 2019). Li et *al.* (2016a, 2016b) ont signalé que des polysaccharides extraits de *Pleurotus eryngii* (PEPS) pouvaient diminuer de manière significative et dose-dépendante les ratios de sécrétion de cytokines (IL-1 β /IL-10, IL-6/IL-10 et TNF- α /IL-10) chez des patients souffrant d'un cancer du sein.

I.4.2.1.2. Effets sur la voie de signalisation liée au NF- κ B

Le NF- κ B (facteur nucléaire kappa B) est une voie de signalisation proinflammatoire qui joue un rôle essentiel dans l'expression des gènes codant pour des régulateurs proinflammatoires et notamment les cytokines, les chimiokines et les molécules d'adhésion (Zinatizadeh et *al.*, 2021 ; Lawrence, 2009). Ce facteur est considéré comme un régulateur transcriptionnel composé d'homo ou d'hétérodimères de protéines-Rel (Du et *al.*, 2015). Dans la cellule quiescente, il est situé dans le cytosol et lié à l'inhibiteur I- κ B, ce qui inhibe sa localisation nucléaire. Une fois activé, I- κ B est phosphorylé et libéré du complexe. Dans un second temps les protéines-Rel se déplacent vers le noyau et se lient à des éléments consensus de l'ADN

pour initier spécifiquement l'expression d'une cascade de gènes liés à l'inflammation et ainsi la production de divers médiateurs (Wu et *al.*, 2016 ; Du et *al.*, 2015 ; Karin et Ben-Neriah, 2000 ; Levy-Ontman et *al.*, 2017). L'inhibition de la production de cytokines proinflammatoires par la suppression de l'activation du NF- κ B est le mécanisme d'action sous-jacent de nombreux polysaccharides. Levy-Ontman et *al.* (2017) ont rapporté que les polysaccharides (PSs) extraits de la microalgue rouge *Porphyridium sp.* pouvaient réguler l'expression d'ICAM-1 (molécule d'adhésion intercellulaire1) et de VCAM-1 (molécule d'adhésion vasculaire1) de manière dose-dépendante en augmentant le niveau de I- κ B déphosphorylé dans les cellules endothéliales de l'artère coronaire humaine (HCAECs) sous l'effet du TNF- α . Sanjeeva et *al.* (2018) ont purifié quatre fractions de polysaccharides sulfatés riches en fucose de différentes masses moléculaires issues de *Sargassum horneri*. Parmi ces fractions, celle dont la masse moléculaire était supérieure à 30 kDa (F4) a montré un effet notable sur l'inhibition du NO (CI50= 87,12 μ g/mL), de la prostaglandine E2 induite par le LPS, ainsi que sur la production de cytokines proinflammatoires dans les cellules RAW 264.7. Ces activités ont pu être attribuées à la régulation négative de la cascade de signalisation NF- κ B. Ces études ont également démontré que les niveaux d'inhibition d'iNOS et de COX-2 par des solutions à respectivement 100 et à 50 μ g/mL de F4 étaient comparables à l'effet de l'aspirine à la concentration de 12,5 μ g/mL. En outre, dans le modèle d'embryon de poisson zèbre *in vivo*, F4 a également révélé une capacité à réguler à la baisse la toxicité, la mort cellulaire et la production de NO induites par le LPS (Sanjeeva et *al.*, 2018).

I.4.2.1.3. Effet sur le microbiote intestinal

Des milliards de bactéries se développent dans l'intestin grêle et le colon. Il est désormais acquis qu'elles jouent un rôle extrêmement important dans la prévention de nombreuses pathologies. Une mauvaise adaptation de l'interface hôte-microbe pourrait entraîner des réponses inflammatoires aberrantes. De même, la dérégulation du microbiote intestinal pourrait être une pathogénie sous-jacente des maladies inflammatoires de l'intestin (MII) (Danne et *al.*, 2017 ; Wang et *al.*, 2019). Le niveau réduit de probiotiques et l'abondance accrue de bactéries pathogènes dans l'intestin sont des caractéristiques typiques des patients atteints de colite (Wang et *al.*, 2019). Des études ont révélé que les polysaccharides produits par le microbiote ou agissant sur lui ont des effets anti-inflammatoires dans les MII (Thomson et *al.*, 2018). Danne et *al.* (2017) ont attribué à un polysaccharide libéré par *Helicobacter hepaticus* une induction précoce d'IL-10 dans les macrophages intestinaux et une activation de l'expression génétique anti-inflammatoire et réparatrice spécifique dépendant de MSK/CREB via le récepteur TLR2. Wang et *al.* (2019) ont rapporté que dans le modèle de colite induite

par le Dextrane de Sodium Sodique (DSS), le polysaccharide hydrosoluble d'*Arctium lappa* (ALP-1) a augmenté de manière significative l'abondance des Firmicutes, Ruminococcaceae, Lachnospiraceae et *Lactobacillus*, tout en inhibant de manière notable les niveaux de Proteobacteria, Alcaligenaceae, *Staphylococcus* et *Bacteroides*. L'amélioration de la dérégulation des cytokines proinflammatoires et anti-inflammatoires a également pu être observée et confirme son effet de protection des souris contre la colite.

I.4.2.1.4. Effets sur le système immunitaire

Wu et *al.* (2016) ont signalé qu'un β -(1,3/1,6)-glucane (MBG) de *Ganoderma lucidum* pouvait réduire l'inflammation induite par un régime riche en cholestérol chez les souris C57BL/6 mâles en induisant la production d'IgA et d'IgG sériques, en augmentant l'expression des récepteurs poly-Ig dans l'intestin grêle et en augmentant la production d'IL-2 par les cellules NK. Zhang et *al.* (2018) ont constaté que GLPss58, le dérivé sulfaté de GLP20, (un β -D-glucane purifié à partir de fruits de *Ganoderma lucidum*) avait tendance à inhiber non seulement l'inflammation médiée par la L-sélectine mais aussi le système du complément et les cytokines.

I.4.3. Activités anti-ulcère gastrique

L'estomac est un organe digestif qui assure la première fonction de préparation des aliments à la digestion et à l'absorption par l'intestin. Bien que divers médiateurs neuronaux et hormonaux contribuent à la fonction gastrique, la production d'acide est la composante unique et centrale de la contribution de l'estomac au processus digestif (Ramsay et Carr, 2011). Dans des conditions normales, il existe un équilibre physiologique entre la sécrétion d'acide gastrique et la défense de la muqueuse. Les cellules épithéliales de l'estomac sécrètent du mucus en réponse à l'irritation de la paroi épithéliale et à la stimulation cholinergique (Anand et Katz, 2017). Dans le cas d'un déséquilibre entre les niveaux des facteurs protecteurs (mucine, bicarbonate, prostaglandine,...) et facteurs agressifs (sécrétion acide, pepsine,...) de l'estomac (Salama et *al.*, 2016 ; Albaayit et *al.*, 2016) suite à des facteurs externes tels qu'une alimentation déséquilibrée, le stress, la consommation d'alcool et de médicaments anti-inflammatoires non stéroïdiens (Sung et *al.*, 2010 ; Miwa et *al.*, 2004 ; Lemos et *al.*, 2015 ; Ha et *al.*, 2017), une plaie ouverte qualifiée d'ulcère gastrique se produit au niveau de la paroi de l'estomac. Elle est caractérisée par la desquamation de tissus morts inflammés provoquant une sensation de brûlure épigastrique et des saignements gastro-intestinaux (Chan et Graham, 2004 ; Sung et *al.*, 2010 ; Miwa et *al.*, 2004). La stratégie thérapeutique actuelle pour traiter l'ulcère gastrique s'est principalement concentrée sur la réduction de l'acidité à l'intérieur de

l'estomac et le renforcement de la barrière de la muqueuse gastrique contre d'autres agressions physiques et chimiques (Fashner et Gitu, 2015). Pour cela, divers types d'antagonistes des récepteurs H₂ (cimétidine et ranitidine), d'inhibiteurs de la pompe à protons (oméprazole et lansoprazole) ou d'agents cytoprotecteurs (sucralfate ou analogues de prostaglandine) ont été utilisés (Awaad et al., 2013). La recherche de traitements alternatifs utilisant des composés végétaux et notamment de polysaccharides a fait l'objet de nombreuses études. Ainsi, un rhamnogalacturonane (RG) isolé des feuilles d'*Acmella oleracea* (L.) (*Asteraceae*) a montré son efficacité gastroprotectrice à une dose de 1,5 mg/kg contre des lésions gastriques induites par l'éthanol chez des rats Wistar (Nascimento et al., 2013) en diminuant les sécrétions d'acide et de pepsine, et en augmentant la production de mucus protecteur de la couche épithéliale de l'estomac (Yamada, 1994 ; Nergard et al., 2005). Un arabinogalactane-protéine extrait de l'endosperme de la graine de *Jatropha curcas* a démontré sa capacité à induire la différenciation de keratinocytes via la stimulation du facteur de croissance transformant bêta (TGF- β) (Zippel et al., 2010). Chez les patients qui présentaient des ulcères gastriques bien cicatrisés, le TGF- β et ses récepteurs étaient fortement exprimés dans la muqueuse gastrique (Shih et al., 2005). Il est possible que l'arabinogalactane puisse inciter les cellules souches gastriques à se renouveler et à se différencier en une couche muqueuse fonctionnelle par la voie de signalisation du TGF- β (Sakaki-Yumoto et al., 2013). Une fraction de polysaccharides pectiques (homogalacturonanes ramifiés par des arabinanes et arabinogalactanes de type II) obtenue à partir de l'infusion de feuilles de *Sedum dendroideum* a réduit l'ulcère gastrique induit par l'éthanol chez des rats en préservant des mécanismes de défense gastrique tels que la production de mucus et de glutathion (GSH) dans l'estomac (de Oliveira et al., 2018). Un acide polygalacturonique (PGA) extrait de feuilles de *Maytenus ilicifolia* a inhibé de manière significative les lésions gastriques induites par l'éthanol chez des rats. Les auteurs (Cipriani et al., 2009) suggèrent que la capacité du PGA à protéger la muqueuse est due à une fonction de revêtement protecteur qui diminue la sécrétion d'acide et de pepsine et augmente la synthèse du mucus. Une action antioxydante piégeant les radicaux libres a également été proposée par les auteurs. Un glucuronoarabinoxylane (CNAL) extrait de l'exsudat de gomme de *Cocos nucifera* a présenté un effet gastroprotecteur, en réduisant les lésions hémorragiques gastriques (Simas-Tosin et al., 2014). Le prétraitement des rats, utilisés comme modèle, avec le polysaccharide issu d'*Hericium erinaceus* avant l'ulcération à l'éthanol a permis de réduire la ligature du pylore en maintenant la barrière gastrique, la réduction des sécrétions gastriques ainsi que des facteurs de défense comme la

prostaglandine E2, le facteur de croissance épidermique et l'oxyde nitrique dans le tissu gastrique (Wang et *al.*, 2018).

II.1. Genre *Alhagi*

Le mot *Alhagi*, est un nom latin dérivé du mot arabe "Alhag", qui signifie "un vieux sage" (Boulus, 1983). Ce genre appartient à la famille des *Fabaceae* et est qualifié communément de "Camelthorn" ou "manne persique (Xue et *al.*, 2012). Vingt noms scientifiques d'espèces végétales existent pour ce genre. Parmi eux, 9 sont des noms d'espèces acceptées et distribuées dans les différentes régions du monde (Turgumbayeva et *al.*, 2014 ; Muhammad et *al.*, 2014). On les trouve habituellement dans les régions sèches et salines ainsi que dans les régions tropicales et subtropicales d'Afrique, Asie, États-Unis, Europe et le Moyen-Orient (Nishanbaev et *al.*, 2017). Ces espèces sont communes dans les sites urbains, abondantes le long des rivières, des canaux d'irrigation et parfois dans les champs cultivés (Turgumbayeva et *al.*, 2014). *Alhagi*, est un arbuste qui peut atteindre de 1 à 2 mètres de hauteur, avec des feuilles vertes, simples, alternes, clairsemées de 7 à 20mm de long. Ses fleurs sont courtes, de 6 à 9mm de long avec des pétales roses. Les gousses sont de couleur brun-rougeâtre, de 1-3cm de long contenant 5 à 8 graines de couleur brun verdâtre (Ali, 1977).

II.1.1. Etudes phytochimiques du genre *Alhagi*

L'analyse des données de la littérature sur les métabolites identifiés des plantes du genre *Alhagi* donne un aperçu de leur diversité (Tableau 3). En effet, près de 300 substances appartenant à différentes classes de composés naturels (figure 13) tels que des composés phénoliques, alcaloïdes, stéroïdes, phospholipides, polysaccharides, ainsi que des terpénoïdes, des acides gras et leurs aldéhydes ont été décrits (Muhammad et *al.*, 2014 ; Nishanbaev et *al.*, 2019). Selon Nishanbaev et *al.* (2019a), ces composés participent à des fonctions de protection et d'adaptation et aux processus respiratoires de la plante. Ils jouent un rôle important dans les réactions d'oxydoréduction protégeant les plantes des composés réactifs issus de l'oxygène. Ils influencent les processus de croissance des plantes et augmentent leur résistance aux pathologies. Ils les protègent également des rayonnements solaires excessifs constituant une barrière contre les facteurs mutagènes. Ils affectent la perméabilité des membranes et agissent comme des agents allélopathiques. Ils sont assimilables à des détergents pour certains.

Tableau 3. Composés phytochimiques isolés de différentes espèces de genre *Alhagi*

Nom de l'espèce	Partie étudiée	Composé(s) isolé(s)	Classe	Références				
<i>A. pseudalhagi</i> Desv.	Aérienne	Catechine Gallocatechine Epigallocatechine Leucodelphinidine Alhacine Alhacidine Pseudalhagine	Flavonoïdes	Islambekov et <i>al.</i> , 1982 Muhammed et <i>al.</i> , 2014				
	Aérienne	Acide férulique β -sitostérol Isorhamnetin β -sitostérol-D-glucopyranoside 5-hydroxymaltol Saccharose Alhagidine: D-galactose, D-glucose et L-rhamnose	Différentes classes	Sultan et <i>al.</i> ,2011				
	Aérienne	Alhaoside: 3,4-O-methylquercetin-3-O- α -L-rhamnopyranosyl-(1,6)- β -D-glucopyranosyl-7-O- α -L-rhamnopyranosyl-(1,6)- β -D-galactopyranoside	Flavonoïdes	Alimova et <i>al.</i> (2013)				
	Tiges	---	Flavonoïdes Stéroïdes Terpènoïdes Alcaloïdes	Wagay et <i>al.</i> , 2018				
Graines	Rha M% 1,8	Xyl M% 1,7	Ara M% 6,6	Man M% 1,0	Glc M% 2,0	Gal M% 2,1	Polysaccharides	Kodiralieva et Rakhmanberdyeva, 2011
<i>A. graecorum</i>	Aérienne	Tamarixetin 3-O-dirhamnoside	Flavonoïdes	El-Sayed et <i>al.</i> ,				

		Isorhamnetin 3-O-glucosyl neohesperidoside						1993	
<i>A. kirgisorum</i>	Épigéale	Isorhamnetin-3-O-β-D-glucopyranoside Isorhamnetin-3-O-α-L-galactopyranoside Isorhamnetin-3-O-(O-β-D-glucofurnosyl-(1,2)-β-D-glucopyranoside						Flavonoïdes	Burasheva et al., 1977
		<i>A. persarum</i>	Graines	Rha	Ara	Xyl	Man	Glc	Gal
M%	M%			M%	M%	M%	M%		
3,8	2,6			1,3	2,0	2,2	1,0		
Épigéale	6		1,0	4,1	1,5	1,4	1,6		
	9,4		5,6	1	1,3	15,6	20,0		
	25		6	2	110,0	1,0	10,0		
Aérienne	1,4	1,4	-	10,0	1,0	3,3	Polysaccharides hydrosolubles Substances pectiques	Eskalieva et Buracheva 2002	
	16	1,0	1,0	3,1	14,7	3,3	Hemicelluloses		
	Isorhamnetine Quercetine Quercetin 3-O-α-L-rhamnopyranoside Quercetin 3-O-α-L-arabofuranoside Isorhamnetin 3-O-β-D-glucopyranoside, Isorhamnetin 3-O-α-L-arabopyranoside 5,3',4'- trimethoxyflavone 3-O-β-D-galactopyranosido-(2,1)-α-L- rhamnopyraosido-7-O-α-L-rhamnopyranoside						Flavonoïdes		
<i>A. sparsifolia</i>	Aérienne	Naringenine Isorhamnetine Isomyricetine Narcissine Genistine						Flavonoïdes	Nishanbaev et al., 2020
		Alhagifoline Pyrrolezanthine Pyrrolezanthine-6-méthyl-éther						Alcaloïdes	Zou et al., 2012

	Epigéale	Epicatéchine Epigallocatechine Epigallocatechine gallate Catéchine Gallocatechine Proanthocyanidine B-2 Epigallocatechine-(4 β -8)-epicatechine Epigallocatechine gallate-(4 β -8)-epicatechine Proanthocyanidine B-1 Epicatechine-(4 β -8)-gallocatechine	Catéchines et proanthocyanidines	Malik et al. 1997
<i>A. Canescens</i>	Aérienne	Acide palmitique Neophytadiène <i>Cis</i> -chrysanthenyl acetate <i>Cis</i> -geranyl acetate Eucalyptol α -copaene Germacrene α -caryophyllene bicyclogermacrene (+)- δ -cadinene Borneol (+)-camphor	Huiles essentielles	Nishanbaev et al. (2019)

Rha : Rhamnose ; Xyl : Xylose ; Ara : Arabinose ; Man : Mannose ; Glc : Glucose ; Gal : Galactose; M%: Ratio molaire

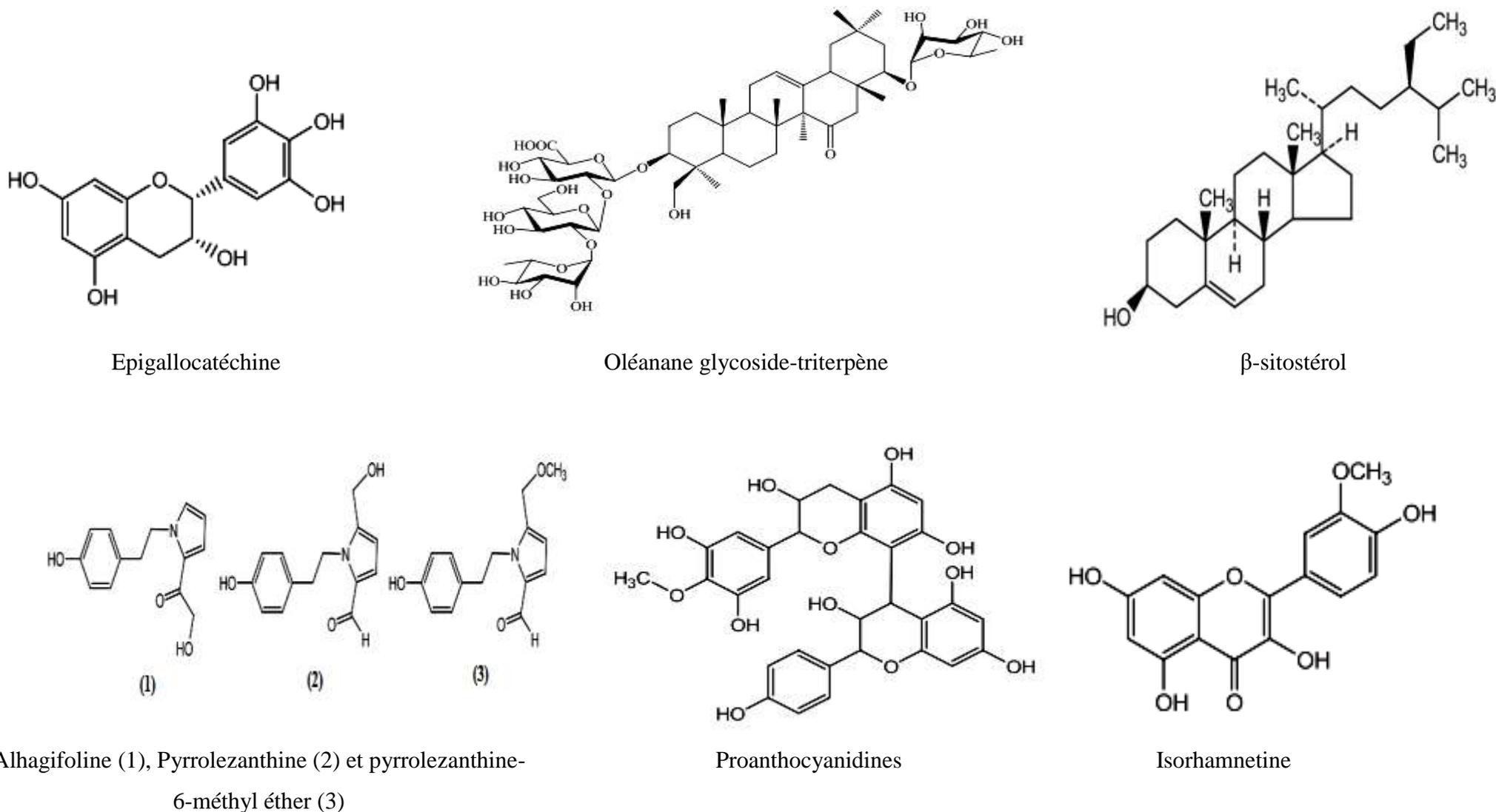


Figure 13. Structures de quelques composés identifiés chez des espèces appartenant au genre *Alhagi* (Muhammed et al., 2014).

II.1.2. Utilisation du genre *Alhagi* en médecine traditionnelle

La plupart des espèces *Alhagi* sont connues pour leurs usages médicinales (Zou et *al.*, 2012 ; Gholamhoseinian et Razmi, 2012). Pour ce faire, elles sont utilisées sous forme d'infusions et d'extraits aqueux et considérées comme des agents diurétiques, hémostatiques, thermoprotecteurs, sudorifiques, antifongiques, antiulcéreux, cicatrisants, diurétiques, laxatifs et anti-inflammatoires (Alimove et Kulliev, 2005 ; Islombekov et *al.*, 1982 ; Laghari et *al.*, 2012b ; Damirov et *al.*, 1982 ; Nishanbaev et *al.*, 2019). Ces préparations sont utilisées pour traiter de nombreuses pathologies telles que les troubles hépatiques (Al-Douri et Al-Essa, 2010), la diarrhée (Atta et Mouneir, 2004), les maux de tête et de dents (Zou et *al.*, 2012), les ulcères (Awaad Amani et *al.*, 2006), la fièvre (Khan, 2009), l'inflammation (Seredin et Sokolov, 1978) et les troubles hépatiques (Al-Douri et Al-Essa, 2010). Des usages cosmétiques ont également été signalés récemment pour le traitement de l'hyperpigmentation de la peau (Gholamhoseinian et Razmi, 2012).

En médecine traditionnelle, les décoctions d'*Alhagi pseudalhagi* sont utilisées comme un astringent pour traiter la gastrite, les ulcères de l'estomac, les pertes d'eau (Sinelnikov, 1965), les hémorroïdes (Almysheva, 1976), la dysenterie, l'angine, l'eczéma (Seredin et Sokolov, 1978) et comme un antipyrétique (Gurbanov, 1976). Ainsi, les décoctions d'*A. sparsifolia* ont été rapportées comme utiles pour soulager le stress physique, le rhume, les maux de tête, les maux de dents et même le cancer (Zou et *al.*, 2012). Dans ce dernier cas, la prudence s'impose du fait du faible nombre de publications décrivant ce type d'action curative. L'infusion des feuilles d'*A. persarum* est employée pour contrôler les calculs rénaux (Mikaili et coll., 2012) alors que les hémorroïdes et la diarrhée sanglante peuvent être traitées par la décoction des racines (Rakhimov et Dzhumamuratova, 1993 ; Muhammed et *al.*, 2014).

II.2. Espèce d'*Alhagi maurorum* Medik.

II.2.1. Nominations

D'après Al-Snafi (2015), le nom vernaculaire de cette espèce est varié d'une région et/ou pays à l'autre :

Arabe : Aqool, Shook Eljamal, Shprim, Lehlah

Anglais : Persian, Caspian manna, Camel thorn bush

Français : Alhagi des Maures

Allemand : Kameldorn, Mannastrauch

Italien : Lupinella alhagi, Manna di Persia

Afrique du sud : Kameel doringbos, Volstruis doring

II.2.2. Position systématique

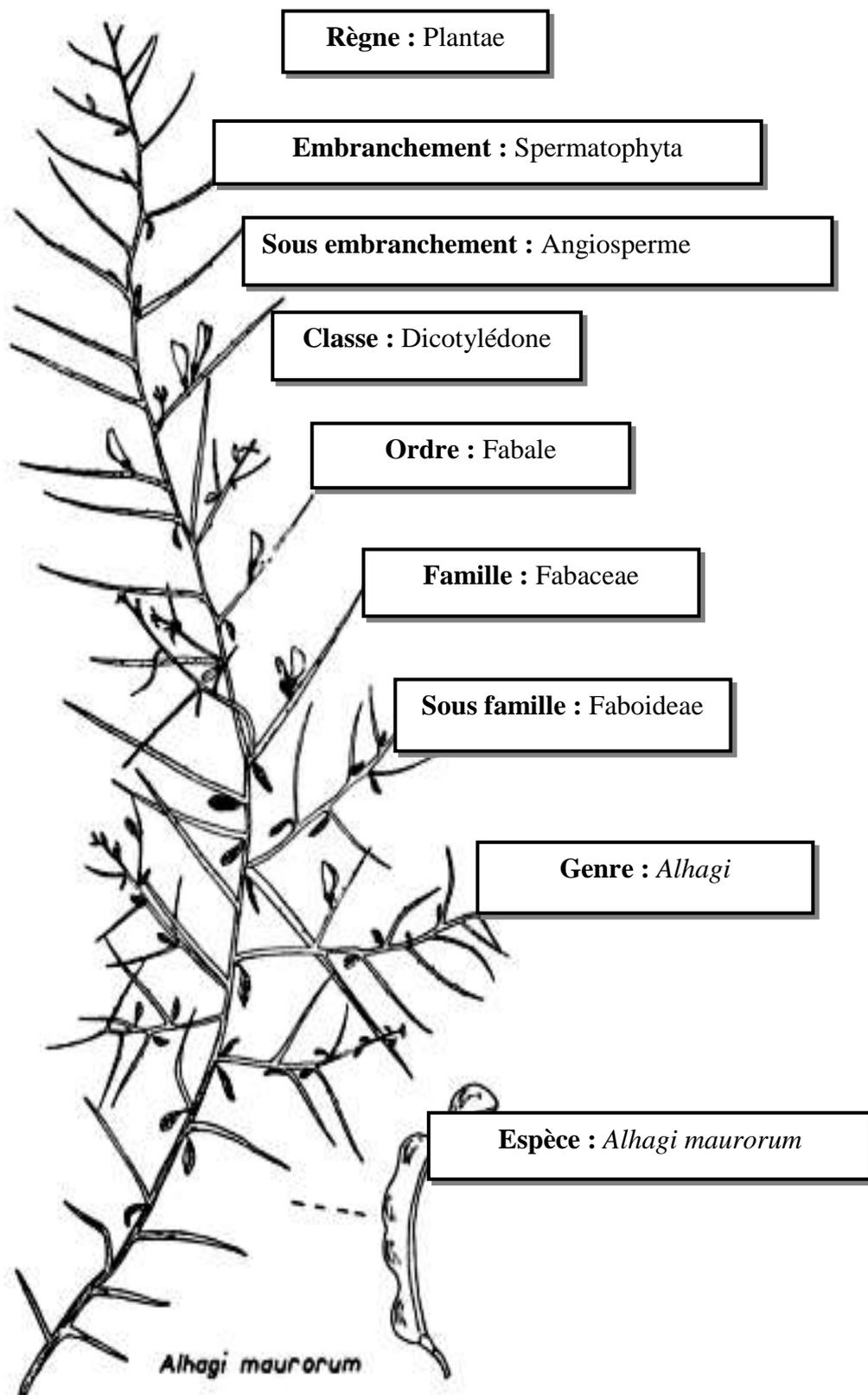


Figure 14. Aspect aérien (Ozenda, 2004) et classification botanique de l'espèce *Alhagi maurorum* selon Al-Snafi (2015).



Figure 15. *Alhagi maurorum* Medik. (Wilaya d'Ilizi, Sud du Sahara algérien). (Photo personnelle)

II.2.3. Description botanique et aires de production

Alhagi maurorum est un arbuste profondément enraciné (figure 15), jusqu'à 2,1 mètres dans le sol. L'arbuste est ramifié de façon complexe et peut atteindre de 0,45 à 1,2 mètres de hauteur (Suthar et al., 2016). La tige, est verte, grisâtre et glabre, en forme de cercles, couchée puis redressée (Suthar et al., 2016 ; Ozenda, 2004). Les feuilles sont très caduques, unifoliolées à petites stipules (Quézel et Santa, 1962, 1963). Les fleurs sont de couleur pourpre, rosâtre à bordeaux. Le fruit, est de couleur rouge-brun à brun et se termine par un court bec étroit (Suthar et al., 2016). La gousse, de 2 à 4 cm, est arquée et divisée par des étranglements irréguliers (Ozenda, 2004) (figure 14). *Alhagi maurorum* se développe principalement dans des sols humides, mais aussi dans les sols secs, rocailleux ou salins. Elle est abondante le long des rivières, canaux, fossés d'irrigation et se propage parfois dans les champs cultivés (G.M.P.N.F.A, 2005). Cette espèce est originaire d'Afrique du nord et distribuée dans certains pays de ce continent tels que l'Algérie, l'Égypte, la Libye, le Niger et le Soudan. Sur le continent européen, on la trouve à Chypre, en Tchéquie et en Russie (Ahmad et al., 2015). Pour l'Asie, elle a été décrite en Arabie saoudite, Irak, Syrie, Tadjikistan, Turquie, Turkménistan, Émirats arabes unis, Ouzbékistan et Yemen (Liu et Adilla, 1991 ; Li et al., 2010) (Figure 16).



Figure 16. Répartition d'*Alhagi maurorum* dans le monde
(www.cabi.org/isc/datasheet/4215#toDistributionMaps).

II.2.4. Usages traditionnels

Alhagi maurorum est référencée pour sa large gamme d'utilisations thérapeutiques (Abdulbary, 2019) comme étant un agent diaphorétique et expectorant (Marashdah et Farraj, 2010), analgésique, antitussif, anti-hémorroïde, antirhumatismal, diurétique, laxatif (Ahmad et *al.*, 2015), et pour traiter les douleurs de poitrine chez la femme (Suthar et *al.*, 2016). Ses fleurs sont utilisées pour traiter les hémorroïdes, la migraine et les verrues. L'huile des feuilles est utilisée dans le traitement des rhumatismes (Brown, 1995). Les extraits aqueux de graines sont utilisés pour détendre l'uretère et éliminer les calculs rénaux (Marashdah et Farraj, 2010). La décoction des parties aériennes de la plante est également utilisée pour éliminer les calculs rénaux (Bahmani et *al.*, 2016). En Iran, la décoction de cette plante est employée en traitement de la jaunisse et de la fièvre, comme coupe-faim ou diurétique (Amiri et *al.*, 2014). Les extraits de feuilles et de rameaux d'*A. maurorum* sont utilisés sous forme de décoctions consommées de façon journalière comme un expectorant et agent de purification du sang (élimination des toxines). La poudre de racines de la même plante est également décrite pour éliminer les calculs rénaux (Badshah et Hussain, 2011).

II.2.5. Phytochimie et métabolites isolés

L'analyse de différents extraits alcooliques d'*Alhagi maurorum* a permis d'identifier un large spectre de flavonoïdes, glycosides, alcaloïdes, tanins, saponines, anthraquinones et stéroïdes (Rahman et *al.*, 2011 ; Al-Snafi et *al.*, 2019). Six flavonoïdes ont ainsi pu être détectés. Il

s'agissait du kaempferol, du chrysoeriol, de l'isorhamnetine, du chrysoeriol-7-*O*-xylosoïde, du kaempferol-3-galactorhamnoside et de l'isorhamnetine 3*O*- β -D-apio-furanosyl (1-2) β -D-galactopyranoside (figure 17) (Awaad Amani et *al.*, 2006).

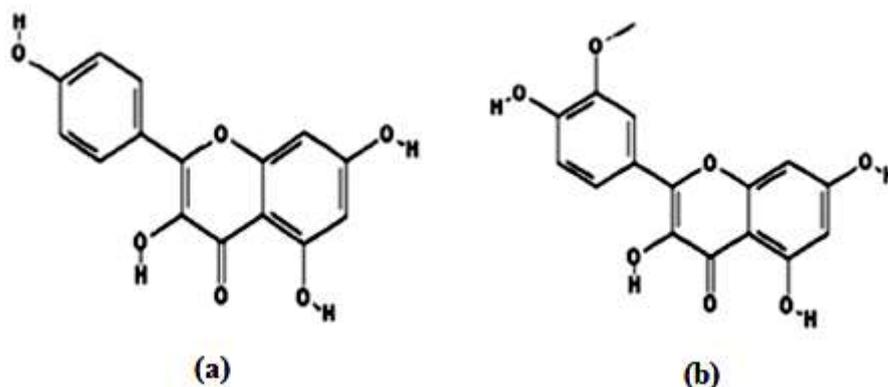


Figure 17. Structures du kaempferol (a) et de l'isorhamnetine (b) identifiés dans l'extrait éthanolique d'*Alhagi maurorum* (Ahmad et *al.*, 2015).

Des huiles essentielles ont été isolées des feuilles et des tiges *Alhagi maurorum*. Elles contiennent des fractions volatiles identifiées comme des terpénoïdes (26,8% et 18,7% respectivement), des cétones (4,4% et 5,2% respectivement) et des dérivés d'acide carboxylique (1,5% et 1,8% respectivement) (Muhammad et *al.*, 2014). Hamed et *al.* (2012) ont signalé trois nouveaux triterpènes glycosylés de type oléanane, ainsi que quatre composés glycosidiques connus : upinoside, soyasaponine, abrisaponine A et abrisaponine I dans les racines d'*A. maurorum*. Récemment, l'étude phytochimique de l'extrait racinaire d'*A. maurorum* suivie de tests de piégeage des radicaux libres, a permis d'isoler 14 flavonoïdes dont quatre aglycones (quercétine, isorhamnetine, kaempferol et naringénine) et dix glycosides (Isorhamnetine-3-*O*-rutinoside, isorhamnetine-3-robinobioside, alcesefoliside, mauriti anine, typhaneoside, isorhamnetine-3-*O*-(2,6-di-*O*- α -rhamnosyl)- β -D-galactopyranoside, isorhamnetine-3-*O*-rutinoside-7-*O*-glucopyranoside, genistine, 3'-*O*-methylroboïol, 7-*O*- β -D-glucoside et naringénine-7-glucopyranoside). Neuf d'entre eux ont été identifiés pour la première fois (Al-Saleem et *al.*, 2019) (figure 18).

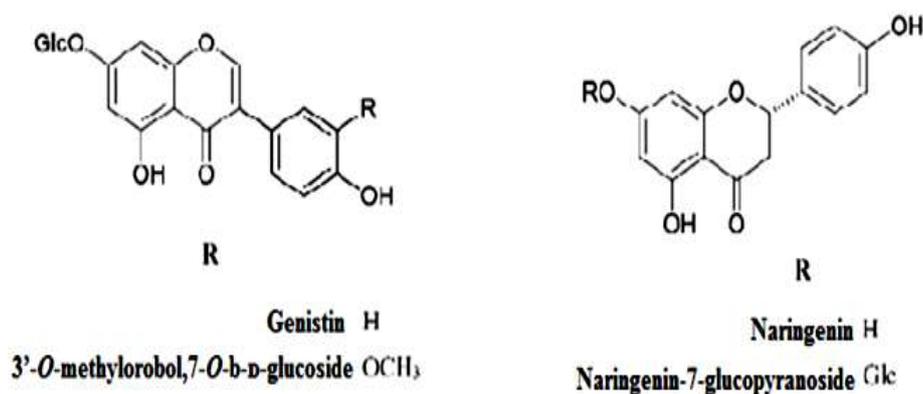


Figure 18. Structures des flavonoïdes isolés de racines *Alhagi maurorum* (Al-Saleem et al., 2019).

II.2.6. Propriétés pharmacologiques

Alhagi maurorum possède de nombreuses propriétés pharmacologiques telles que des activités antibactériennes, anti-inflammatoires, antipyrétiques, analgésiques, antioxydantes, gastro-intestinales, diurétiques, dermatologiques, et antifongiques (Al-Saleem et al., 2019 ; Al-Snafi et al., 2019). Ces propriétés ont été constatées après différents tests *in vivo* et *in vitro*. *In vivo*, Khalifa et al. (2020) ont démontré que l'activité hépatoprotectrice de l'extrait aqueux de la plante permettait d'atténuer les effets secondaires (augmentation des taux des enzymes hépatiques et rénales, thrombocytose ...) du norfloxacine (un antibiotique). L'administration de l'extrait par gavage oral à la dose de 300mg/Kg/jour a significativement réduit des enzymes antioxydantes tissulaires telles que la catalase, la glutathion peroxydase ainsi que la superoxyde dismutase. Il a également permis d'éviter les changements dégénératifs induits par la norfloxacine dans les tissus du foie et des reins. Un effet positif de l'extrait aqueux des feuilles *Alhagi maurorum* (300mg/kg) sur la spermatogenèse et le niveau de glutathion, de superoxyde dismutase, de malondialdéhyde a été détecté chez des rats exposés au stress oxydatif induit par le tétrachlorure de carbone (CCl₄) (Ahmed, 2019). Une activité antifongique a été obtenue avec l'extrait phénolique des parties vertes d'*Alhagi maurorum*. Al-Snafi et al. (2019) rapportent que cette activité de l'extrait sur 5 espèces de champignons dépend de la concentration utilisée et des espèces fongiques. L'effet de l'extrait phénolique à une concentration de 0,25-2mg/ml sur *Altenaria alternata* était similaire à celui de la Nystatine à une concentration de 0,25mg/ml, tandis que son effet à une concentration de 128mg/ml était nettement meilleur que celui de la Nystatine et du Clotrimazole à une concentration de 0,25mg/ml (p<0,01). Les activités anti-inflammatoire, analgésique, antioxydante et antibactérienne de l'extrait aqueux d'*A. maurorum* ont été testées sur des

souris à des doses de 125, 250 et 500µg/animal. L'eau distillée a été utilisée comme contrôle négatif et le diclofenac comme un témoin positif. Il a été prouvé que l'extrait aqueux de cette plante possède un potentiel anti-inflammatoire et antioxydant importants de 64,65% et 86,70% respectivement, pour une concentration maximale employée de l'extrait est de 500µg/animal. Cependant aucune activité antibactérienne n'a été détectée (Neamah, 2012).

L'extrait hydroalcoolique de la partie aérienne de la plante a révélé un effet régulateur d'hormones chez des rats à une dose de (100-300mg/kg). Cet effet portait sur la réduction du taux de testostérone et l'augmentation de la prolactine et des gonadotrophines conduisant à une stimulation de l'allaitement (Zarei et al., 2014). Des effets diurétiques des extraits méthanoliques de la partie aérienne d'*Alhagi maurorum*, ont été testés à des doses de 500-1000mg/kg après ingestion par voie orale par des rats de type albinos. Les concentrations en ions Na⁺ et K⁺ dans l'urine des animaux ont été augmentées significativement avec l'augmentation de la dose d'extrait (Atta et al., 2012).

Une étude *in vivo*, a montré après administration de 660mg/kg d'un extrait éthanolique d'*Alhagi maurorum* chez des souris, l'apparition d'une activité hépatoprotectrice importante caractérisée par une diminution (significative) de l'activité des transaminases sériques contre des agents tératogènes tels que le tétrachlorure de carbone et l'acétaminophène (Gargoum et al., 2013). Les extraits méthanoliques des feuilles et de fleurs *Alhagi maurorum* ont révélés un potentiel antioxydant élevé sur la réduction du DPPH soit 83,5% et 72,3% respectivement (Laghari et al., 2012).

Chapitre II

Matériels et méthodes

II.1. Méthodologie de travail

Notre étude s'intéresse à une plante spontanée à caractère médicinal nommée *Alhagi maurorum* Medik. Elle a consisté dans un premier temps à réaliser une enquête ethnobotanique auprès de différentes catégories de la population d'illizi (citadins et tradipraticiens) susceptibles de connaître la plante et ses vertus thérapeutiques. Dans un second temps, différentes parties de la plante contenant potentiellement des polysaccharides hydrosolubles ont été collectées et ont fait l'objet d'extractions.

II.1.1. Enquête ethnobotanique

II.1.1.1. Présentation de la zone d'étude

La wilaya d'illizi, est l'une des plus vastes « wilayas » (collectivités territoriales) d'Algérie. Elle est située à l'extrême sud-est du pays et a une superficie totale de 284 618 Km² (figure 19). Elle est bordée au Nord par la wilaya d'Ouargla, au Nord-Est par la Tunisie, à l'Est par la Libye, à l'Ouest par la wilaya de Tamanrasset et au Sud par le Niger. Cette wilaya est comprise entre 21°50 et 30°34 de latitude Nord et 5°54 et 12°00 de longitude Est. La population d'illizi a été estimée à 57 100 habitants lors du dernier recensement (2013). Cette wilaya est soumise à un climat saharien désertique, caractérisé par de grandes chaleurs, une sécheresse de l'air importante et des précipitations très réduites (A.N.D.I., 2013). Juin est le mois le plus chaud de l'année et janvier le plus froid (Abid, 2018).

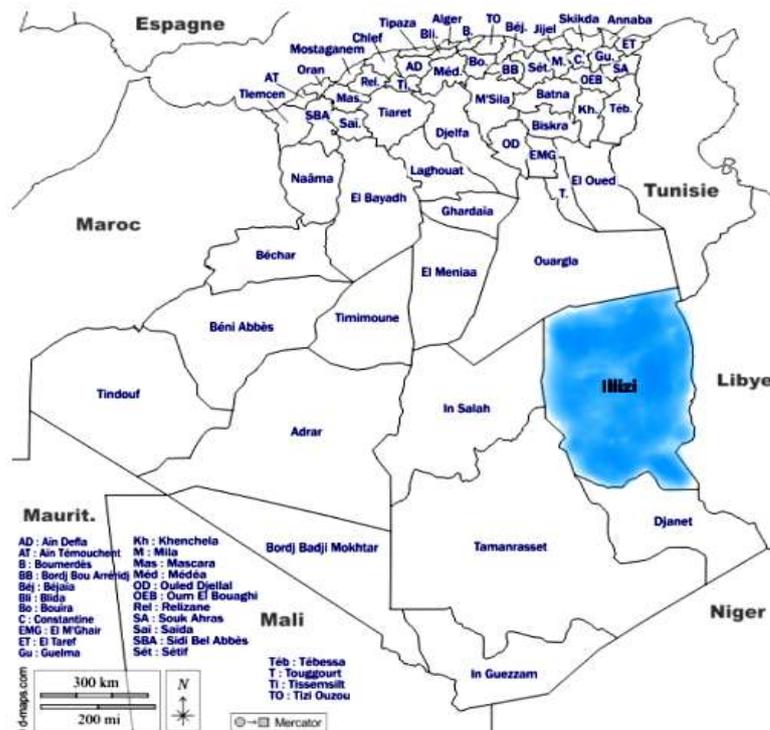


Figure 19. Situation géographique de la zone d'étude (wilaya d'illizi) (https://d-maps.com/carte.php?num_car=4429&lang=fr).

II.1.1.2. Collecte des données ethnobotaniques

Alhagi maurorum Medik. a été identifiée à l'aide des clés d'identification de la flore du Sahara (Ozenda, 2004 ; Quézel et Santa, 1962 ; 1963). La plante se caractérise par des branches rigides et très épineuses, des gousses de couleur rouge-brune divisée par des étranglements irréguliers. Des échantillons des parties décrites ci-dessus ont été collectés dans le Sahara de la wilaya d'Illizi et utilisés en qualité de spécimens indexés pour l'étude ethnobotanique.

L'enquête a été menée durant les mois de juin et septembre 2018 auprès d'Illizi (chef-lieu de la wilaya). Elle a fait intervenir 73 personnes (des tradipraticiens et des résidents, nés et/ou vivant depuis longtemps (plus de 10 ans) dans le district). Pour les besoins de cette étude, une méthode d'entretien d'inventaire qui nécessite moins de temps pour collecter des données ethnobotaniques a été choisie (Silva et *al.*, 2014). Cette dernière consiste à montrer un échantillon de la plante préparé dans un spécimen d'*Alhagi maurorum* répertorié et déposé dans l'herbier du Laboratoire ECOSYS à l'Université Kasdi Merbah-Ouargla (Lot No. AM0818) (figure 20) et a posé des questions ouvertes en langues arabe et amazighe (figure 21).



Figure 20. Spécimen d'*Alhagi maurorum* Medik. répertorié.

Le formulaire d'enquête a été préparé suivant Bouallala et *al.* (2014) avec quelques modifications. Il contient huit paramètres divisés en deux parties.

La première partie dépend du répondant (commune, âge, sexe et niveau de scolarité). La deuxième partie portait sur la plante à partir du nom local, de la partie utilisée, des maladies

traitées et des méthodes de préparation. Ensuite, les données collectées ont été enregistrées sous Microsoft Excel et traitées via le test de Chi-square/SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Fiche d'enquête numéro (.....)

Commune de: _____

Âge (ans) de: 20-35 36-50 Plus de 51

Sexe: Mâle Femelle

Niveau éducatif: Sans Moyen Lycéen Universitaire
niveau

Informations sur *Alhagi maurorum*

Nomination vernaculaire	Partie utilisée	Maladie traitée	Méthode (s) d'utilisation

Figure 21. Questionnaire utilisé pendant l'enquête ethnobotanique.

II.1.2. Préparation du matériel d'étude

Les graines d'*Alhagi maurorum* Medik. ont été collectées à partir de gousses récoltées dans le Sahara de la localité d'Illizi au mois d'Aout 2019. Elles ont été séparées manuellement des gousses et conservées dans un papier kraft à l'abri de la lumière jusqu'au jour d'utilisation.

II.2. Extraction des polysaccharides hydrosolubles

La procédure mise en œuvre pour extraire et caractériser les polysaccharides des graines d'*Alhagi maurorum* Medik. est synthétisée dans la figure 22.

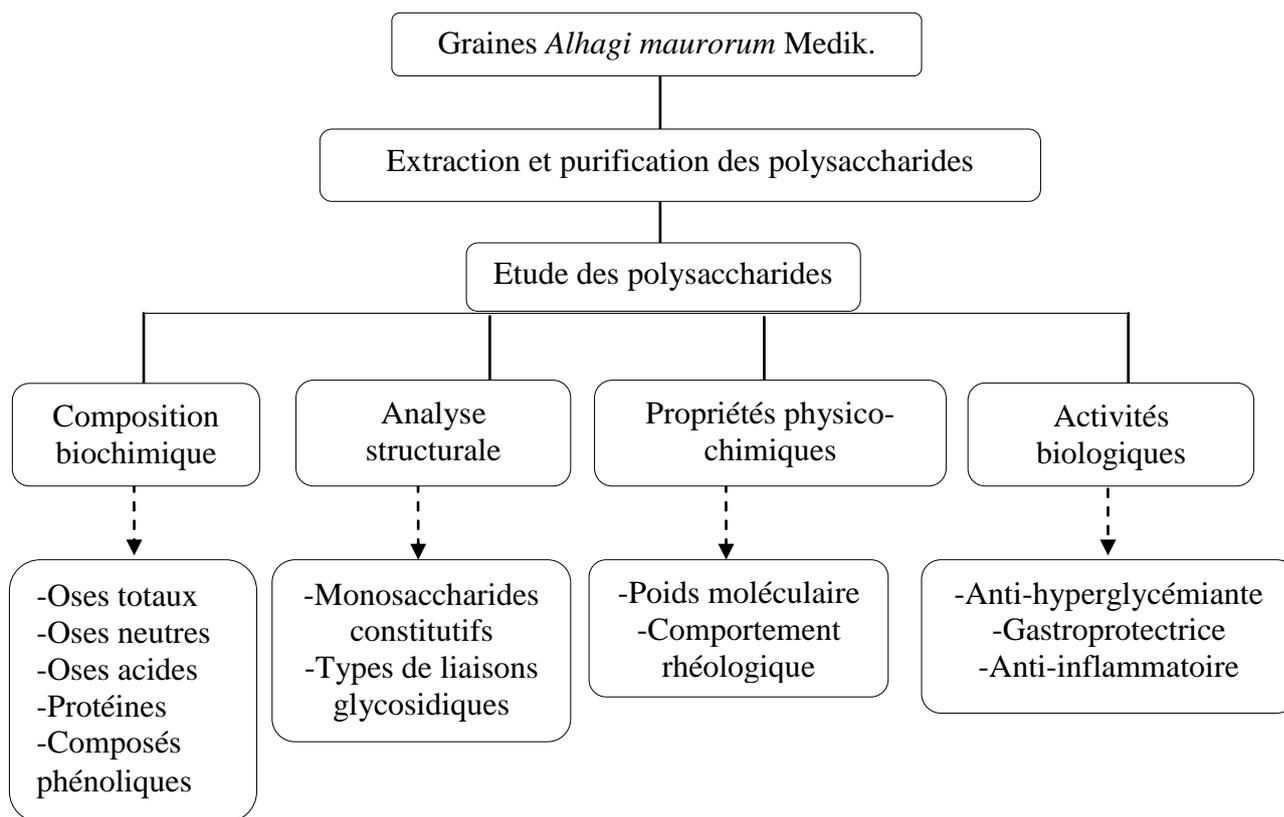


Figure 22. Méthodologie choisie pour l'étude des polysaccharides hydrosolubles des graines d'*Alhagi maurorum* Medik.

II.2.1. Extraction des polysaccharides hydrosolubles des graines d'*Alhagi maurorum* Medik.

II.2.1.1. Lavage et extraction des graines

Vingt g de graines non broyées ont été mises en suspension dans 200mL d'eau milli-Q. Les suspensions ont été incubées sous agitation pendant 2h à 40°C (MU40) ou à 80°C (MU80). Les mélanges ont été centrifugés (20000g ; 20min ; 20°C). Les surnageants dilués au demi pour diminuer leur viscosité ont été filtrés sous vide à travers un verre fritté (100-160µm). Les filtrats obtenus ont été concentrés ensuite au tiers du volume initial sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif (rotavapor RII- BUCHI) à une température de 60°C. Les extraits ont alors été précipités par trois volumes d'isopropanol 96% froid (-20°C) pendant une nuit. Après une centrifugation de 12000g (20min, 20°C), les culots ont été collectés, remis en solution dans de l'eau milli-Q (30mL) puis précipités par trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C) pendant 24 heures avant centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C). Les culots ont ensuite été lyophilisés puis broyés à l'aide d'un broyeur mécanique (Waring) (figure 23).

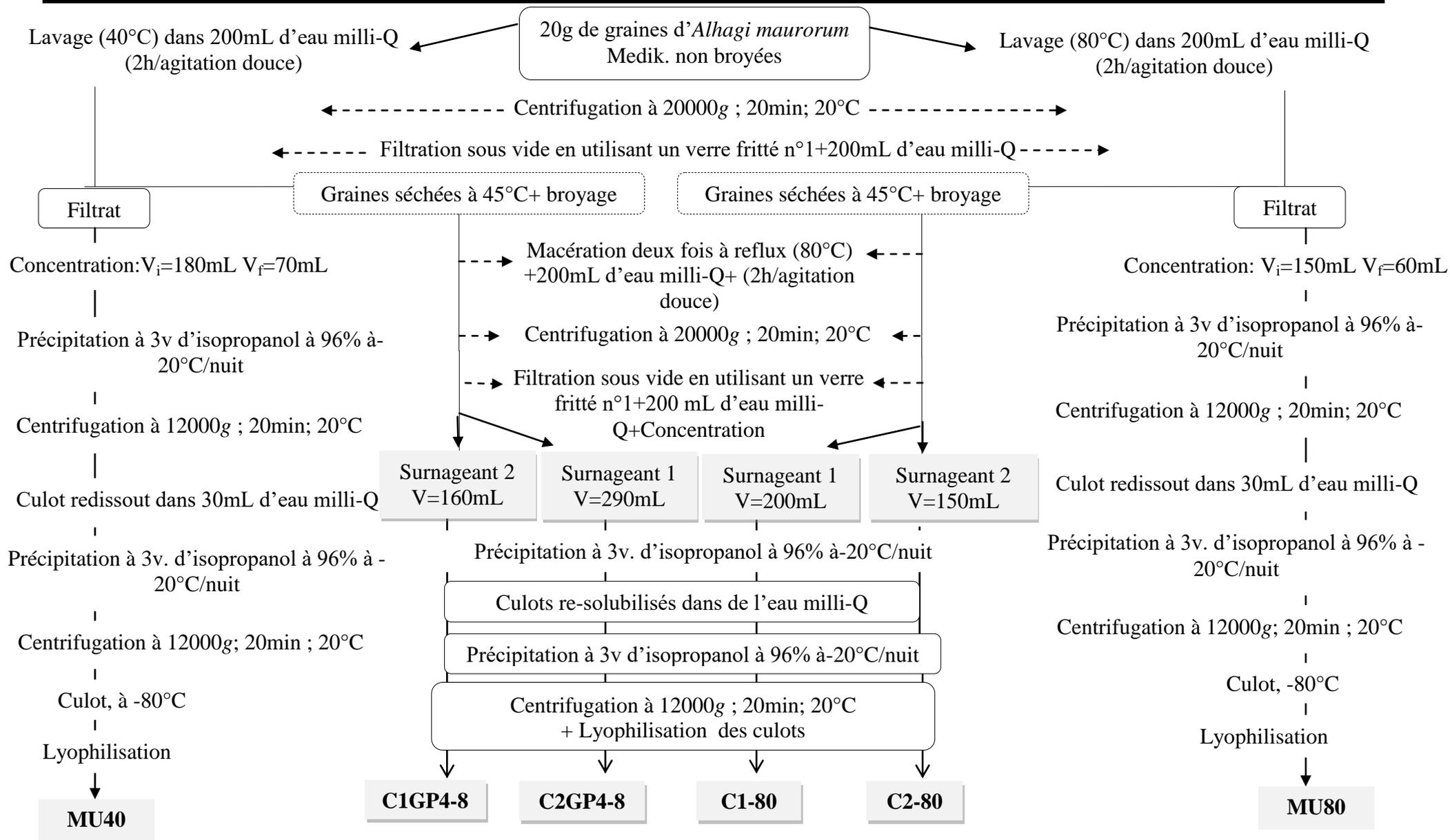


Figure 23. Extraction aqueuse des polysaccharides hydrosolubles des graines lavées d'Alhagi maurorum Medik.

Les graines lavées précédemment, ont été par la suite séchées à 45°C, broyées et macérées à 80°C pendant 2h sous agitation douce. Après centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C), les surnageants ont été dilués au demi puis filtrés sous vide à travers un verre fritté (100-160µm). Les filtrats obtenus ont été concentrés au tiers du volume initial sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif (rotavapor RII- BUCHI) à une température de 60°C. Les extraits ont alors été précipités par trois volumes d'isopropanol 96% à froid (-20°C) pendant 12 heures. Après centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C), les culots ont été dissous dans 50mL d'eau milli-Q puis précipités par trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C, 12 heures) avant d'être finalement centrifugés (12000g ; 20min ; 20°C). Les culots ont alors été collectés puis lyophilisés et broyés (C1-GP48, C2-GP48, C1-80 et C2-80) (figure 23).

II.2.1.2. Extraction des graines dépigmentées

Des graines broyées d'*Alhagi maurorum* (60,27g) ont été dépigmentées à l'acétone 96% (600mL) pendant 14h sous agitation (1200rpm) à température ambiante et à reflux. Après filtration sous vide à travers un verre fritté (100-160µm) pour éliminer l'acétone, les graines broyées ont été traitées par 320mL d'éthanol 96% pendant 2h sous agitation (1200rpm) à 80°C à reflux. L'extrait dépigmenté collecté après filtration, a été suspendu dans un ballon et additionné à 800mL d'eau milli-Q. La suspension a été agitée à 1400rpm pendant 2h à 80°C à reflux en vue de la solubilisation des polysaccharides hydrosolubles. Le mélange était alors centrifugé (20000g ; 20min ; 20°C) et filtré sous vide à travers un verre fritté (100-160µm) en ajoutant 200mL d'eau milli-Q. Le filtrat1 a été conservé à 4°C et l'insoluble a été retraité deux fois comme précédemment à reflux dans de l'eau milli-Q à 80°C pendant 2h pour épuiser les graines en polysaccharides hydrosolubles (filtrat2 et filtrat3). Les filtrats réunis ont été concentrés sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif (rotavapor RII- BUCHI) à une température de 65°C puis précipités par trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C) pendant 12h. Les précipités contenant les polysaccharides ont été collectés par centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C) et mis en solution dans 2400mL d'eau milli-Q sous agitation (1400rpm) à température ambiante. Trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C/nuite) ont alors été ajoutés aux solutions pour précipiter les polysaccharides présents. Après centrifugation (12000g ; 20 min ; 20°C), les culots obtenus ont été lyophilisés (Thermo Electron Corporation, Heto Power Dry OL 6000). Le procédé d'extraction des polysaccharides des graines *Alhagi maurorum* Medik. est schématisé dans la figure 24.

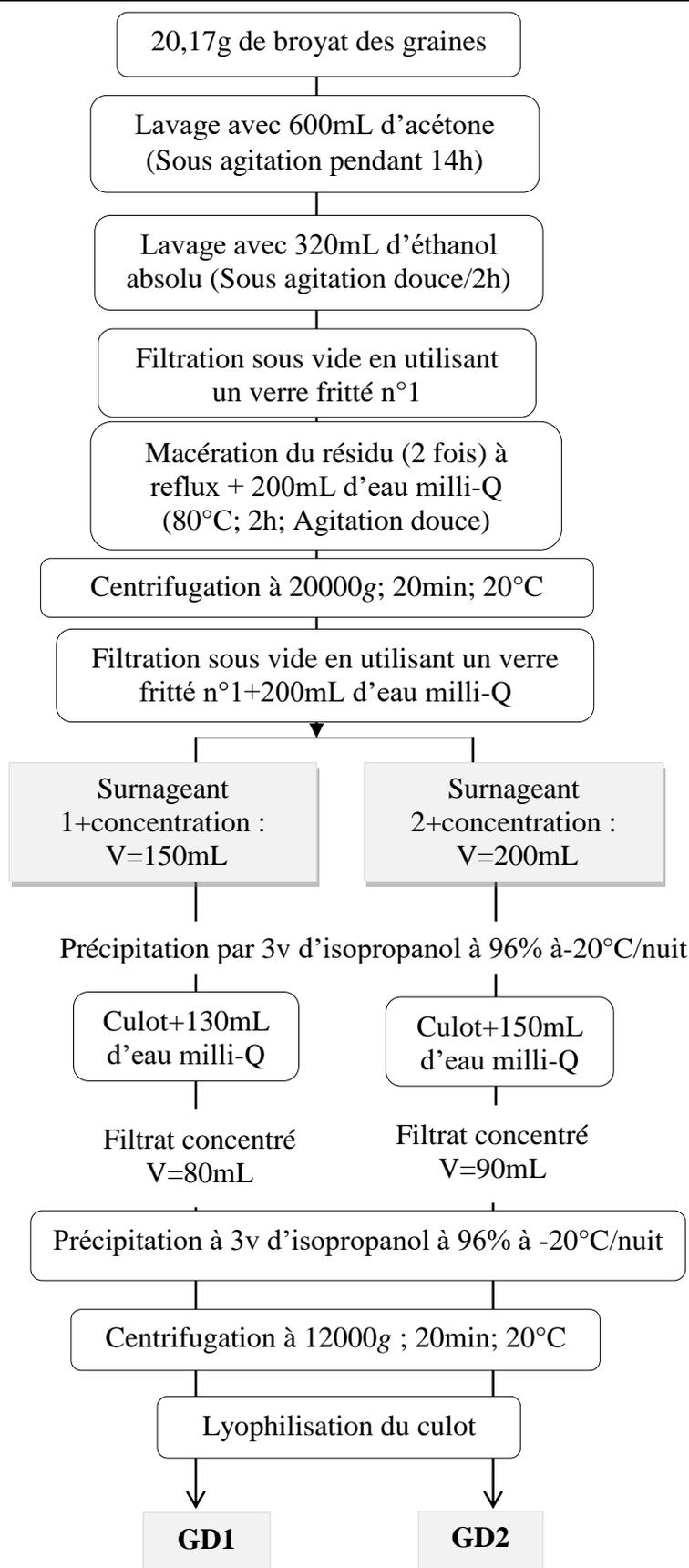


Figure 24. Extraction aqueuse des polysaccharides hydrosolubles des graines (dépigmentées) d'*Alhagi maurorum* Medik.

II.2.1.3. Extraction des graines non dépigmentées

Des graines broyées (20,19 g) ont été macérées (deux fois) dans 200mL d'eau milli-Q pendant 2h à 80°C sous reflux et sous agitation (1200rpm). Après centrifugation (20000g ; 20 min ; 20°C), le culot a été traité comme précédemment (filtrat2), le surnageant récupéré puis filtré (+200mL d'eau milli-Q) en utilisant un verre fritté (100-160µm), Les filtrats 1 et 2 ont ensuite été concentrés à l'aide d'un évaporateur rotatif (rotavapor RII- BUCHI) à une température de 65°C et précipités par trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C) pendant 12h. Les précipités obtenus ont alors été récupérés par centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C) et redissous dans 2400mL d'eau milli-Q sous agitation (1400rpm) à température ambiante. Une deuxième précipitation des polysaccharides présents dans les solutions, a été effectuée par trois volumes d'isopropanol 96% (-20°C/12h). Après centrifugation (12000g ; 20min ; 20°C), les culots obtenus ont été lyophilisés (Thermo Electron Corporation, Heto Power Dry OL 6000) et broyés en une poudre fine (GND1 et GND2) (figure 25).

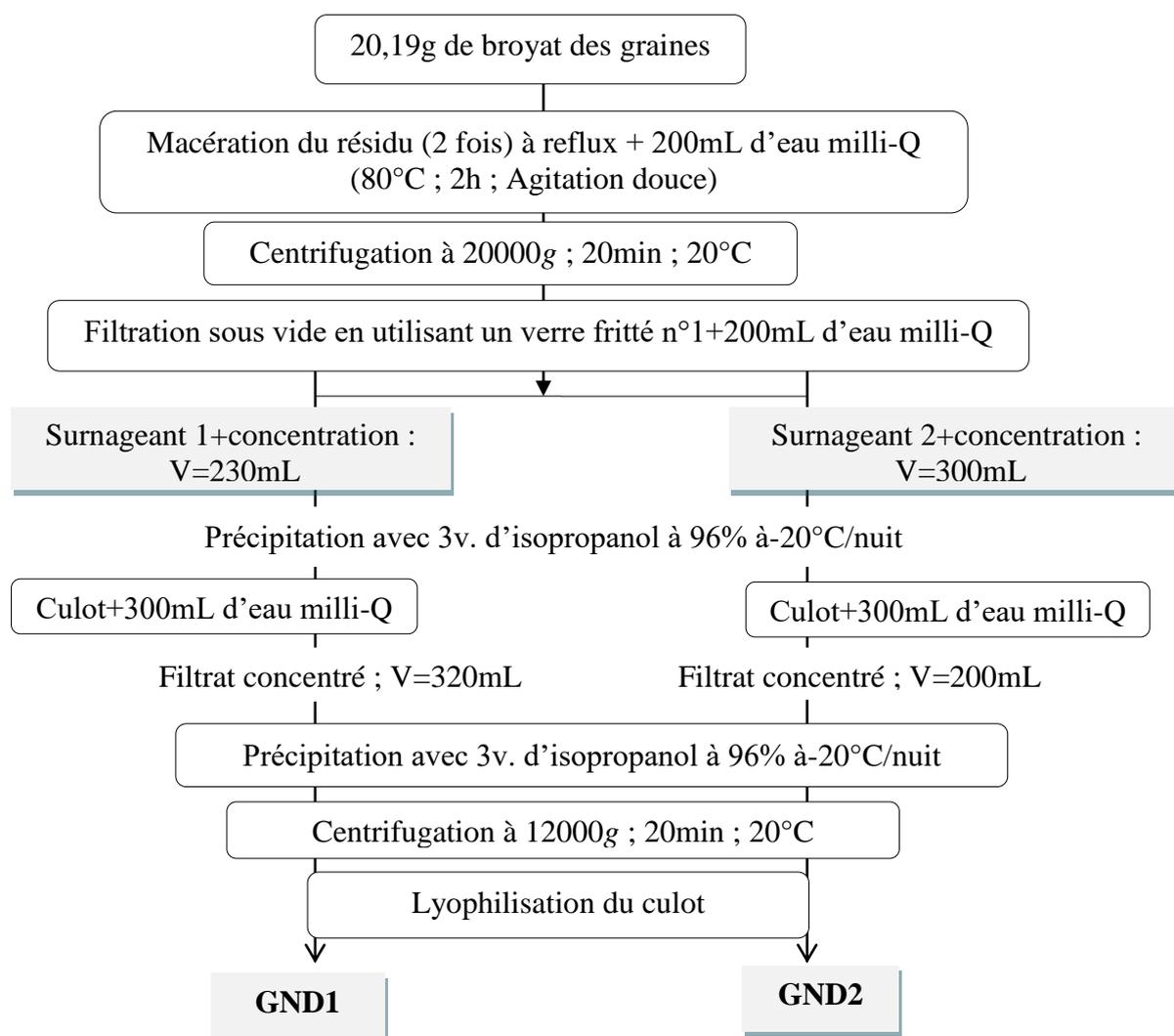


Figure 25. Extraction aqueuse des polysaccharides des graines (non dépigmentées) d'*Alhagi maurorum* Medik.

II.3. Rendements d'extraction des polysaccharides

Le rendement d'extraction des polysaccharides des graines d'*Alhagi maurorum* Medik. a été calculé suivant l'équation (1):

$$\text{Equation (1) Rendement d'extraction(\%)} = \frac{\text{masse du polysaccharide extrait (g)}}{\text{masse de la matière sèche de la plante (g)}} \times 100$$

II.4. Caractérisation des polysaccharides

II.4.1. Analyse de la composition biochimique

Les teneurs en oses totaux, oses neutres, oses acides, oses réducteurs, composés phénoliques et protéines des polysaccharides extraits d'*Alhagi maurorum* Medik. ont été déterminées par des méthodes colorimétriques.

II.4.1.1. Oses totaux

Les oses totaux ont été quantifiés par la méthode de Dubois et *al.* (1956) en se basant sur la condensation par estérification des composés issus de l'hydrolyse acide (acide sulfurique) à chaud des polysaccharides avec des composés phénoliques (phénol) pour former des chromophores de coloration jaune-orange absorbant dans le domaine du visible à 485nm.

Solutions et réactifs :

- Solution de polysaccharides à 0,01% (m/v) ;
- Une gamme étalon de glucose est préparée dans de l'eau milli-Q avec des concentrations en ose allant de 0,002 à 0,01% (m/v) ;
- Une solution de phénol à 5% (m/v) est préparée en dissolvant 5g de phénol dans 100 mL d'eau milli-Q.

Mode opératoire :

Dans des tubes de dosage en verre :

- Déposer 200 μ L d'échantillon ;
- Ajouter 200 μ L de solution de phénol ;
- Ajouter 1mL d'acide sulfurique à 80% ;
- Incuber les tubes à température ambiante pendant 10min ;
- Homogénéiser vigoureusement pendant 10s au vortex ;
- Incuber les tubes à 35°C pendant 30min au bain marie ;
- Mesurer l' A_{483} .

II.4.1.2. Oses neutres et des oses acides

Les dosages très sensibles d'oses neutres et d'oses acides (seuil de détection de 1µg) sont basés sur la condensation de dérivés furfuriques, produits suite à l'action d'un acide fort à chaud avec, soit le résorcinol pour donner un complexe brun-orange absorbant à 450nm dans le cas des oses neutres (ON) (Monsigny *et al.*, 1988), soit le méta-hydroxybiphényle (m-HBP) en formant un complexe rose-violet permettant de mesurer la teneur en oses acides (OA) à 520nm (Blumenkrantz et Asboe-Hansen, 1973).

II.4.1.2.1. Oses neutres

Solutions et réactifs :

- Solution de polysaccharides à 0,01% (m/v) ;
- Deux gammes étalons de glucose et d'acide glucuronique sont préparées de 0,015 à 0,04 % (m/v) ;
- Une solution de résorcinol est préparée en dissolvant 0,6g de résorcinol dans 100mL d'eau milli-Q ;
- Acide sulfurique à 80% ;

Mode opératoire :

- Déposer dans les tubes de dosage 200µL d'échantillon ;
- Ajouter 200µL de résorcinol ;
- Ajouter 1mL d'H₂SO₄ à 80% ;
- Boucher et vortexer les tubes ;
- Placer les tubes au bain marie à 90°C pendant 30min ;
- Laisser les tubes 30min à l'abri de la lumière et à température ambiante ;
- Ajouter 1,4mL d'eau milli-Q et bien vortexer le tube jusqu'à l'homogénéisation du contenu ;
- Mesurer l'A₄₅₀.

II.4.1.2.2. Oses acides

Solutions et réactifs :

- Solution de polysaccharides à 0,01% (m/v) ;
- Deux gammes étalons de glucose et d'acide glucuronique sont préparées de 0,015 à 0,04% (m/v) ;

- Une solution de Borax à 0,12M (solution A) est préparée dans un bain de glace en dissolvant 22,88g de tétraborate de sodium dans 500mL d'acide sulfurique à 97% ;
- Une solution de m-HBP (solution B) est préparée dans un bain de glace en dissolvant 100mg de m-HBP dans 1mL de DMSO ;
- Une solution C est préparée en mélangeant 100µL de la solution de m-HBP avec 4,9mL d'acide sulfurique à 80%.

Mode opératoire :

- Déposer dans les tubes de dosage 200µL d'échantillon ;
- Ajouter 1mL de solution de A ;
- Vortexer et placer les tubes 1h au bain marie à 90°C ;
- Ajouter 200µL de la solution C ;
- Placer les tubes de nouveau au bain marie à 90°C pour 2min ;
- Mesurer l' A_{520} .

II.4.1.2.3. Correction des interférences relatives entre les ON et les OA

Lors du dosage colorimétrique des ON et des OA, ces deux espèces d'oses interfèrent l'une avec l'autre ce qui entraîne des erreurs de quantification. Afin d'éliminer ces interférences, il est possible d'utiliser la méthode de correction développée par Spik et Montreuil (1964). Les concentrations en ON (Equation 3) et OA (Equation 2) sont calculées en utilisant les équations suivantes :

$$DO_{\text{résorcinol}} = \alpha [\text{ON}] + \beta [\text{OA}]$$

$$DO_{\text{m-HBP}} = \alpha' [\text{ON}] + \beta' [\text{OA}] \approx \beta' [\text{OA}] \text{ (La concentration en ON est négligeable)}$$

$$\text{Equation (2)} \dots \dots \dots [\text{OA}] = DO_{\text{mHBP}} / \beta'$$

$$\text{Equation (3)} \dots \dots \dots [\text{ON}] = [DO_{\text{résorcinol}} - [\beta \left(\frac{DO_{\text{mHBP}}}{\beta'} \right)]] / \alpha$$

Sachant que :

α et β : Coefficients directeurs de la gamme étalon d'ON obtenu par dosage au résorcinol et de la gamme étalon d'OA obtenu par dosage au résorcinol, respectivement.

α' et β' : Coefficients directeurs de la gamme étalon d'ON obtenu par dosage au m-HBP et de la gamme étalon d'OA obtenu par dosage au m-HBP, respectivement.

II.4.1.3. Protéines

La teneur en protéines des extraits a été quantifiée suivant la méthode de Bradford (1976). Dans ce dosage, le bleu de Coomassie se lie aux protéines en interagissant avec les acides aminés aromatiques et basiques donnant une coloration bleue quantifiable à 595nm.

Solutions et réactifs :

- Solution de polysaccharides à 0,01% (m/v) ;
- Solutions d'albumine de sérum bovin (SAB) de 0,001% à 0,01% (m/v) ;
- Réactif de Bradford.

Mode opératoire :

- Introduire dans les tubes de dosage 100µL d'échantillon ;
- Ajouter 5mL de réactif de Bradford ;
- Agiter le mélange ;
- Incubation du mélange pendant 30min à l'obscurité ;
- Mesurer l' A_{595} .

II.4.1.4. Composés phénoliques totaux

Les composés phénoliques totaux peuvent être quantifiés par la méthode de Folin-Ciocalteu décrite par Gutfinger (1982). Le principe repose sur l'oxydation des composés phénoliques par le réactif utilisé (un mélange de phosphomolybdate et tungstate de sodium) qui est réduit en milieu alcalin en un chromogène de couleur bleu absorbant entre 725-750nm.

Solutions et réactifs :

- Solution de polysaccharides à 0,01% (m/v) ;
- Gamme étalon d'acide gallique allant de 0 à 0,1% (m/v) ;
- Réactif de Folin Ciocalteu ;
- Solution de carbonate de sodium (NaCO_3) à 35% (m/v).

Mode opératoire :

- Diluer 0,1mL d'échantillon dans 5mL de l'eau milli-Q ;
- Ajouter 0,5mL de Folin Ciocalteu ;
- Ajouter 1mL de solution de NaCO_3 après 3min ;
- Mesurer l' A_{725} .

II.5. Analyse structurale des polysaccharides

Des techniques spectrales et chromatographiques ont été employées pour analyser les oses constitutifs du polysaccharide des graines *Alhagi maurorum* Medik.

II.5.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IR-TF)

La spectroscopie infrarouge (IR), est une méthode d'analyse physique qui permet l'identification des groupements moléculaires d'un échantillon. Elle est basée sur les vibrations des atomes d'une molécule en faisant passer un rayonnement électromagnétique infrarouge à travers un échantillon qui possède un moment dipolaire permanent ou induit et en déterminant quelle fraction du rayonnement incident est absorbée à une énergie particulière (Stuart, 2000 ; Kumirska et *al.*, 2010). Cette dernière, est présentée dans le spectre IR sous forme d'un pic, correspond à la fréquence de vibration d'une partie de la molécule, ce qui permet une identification qualitative de certains types de liaisons dans l'échantillon. De nos jours, le spectre total est analysé par un processus d'interférence et converti en fréquence ou en nombre d'onde au moyen d'un processus mathématique connu sous le nom de transformée de Fourier. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier a considérablement amélioré la qualité des spectres infrarouges et réduit le temps nécessaire pour obtenir des données (Stuart, 2000 ; Smith, 1996 ; Kumirska et *al.*, 2010).

Appareillage et réactifs :

Instrument IR-TF (Bruker, Vertex 70 IR-TF ; Module ATR (Bruker, A225, pointe diamant) ;
Logiciel OPUS (version 7.2)

Mode opératoire :

- Disperser les échantillons de polysaccharides secs sur la pointe en diamant du module ATR A225 ;
- Enregistrer les spectres IR (50 scans) à une température ambiante (référéncé contre l'air, 20 scans) sur la plage 500-4000cm⁻¹ ;
- Analyser les spectres avec le logiciel OPUS 7.2.

II.5.2. Chromatographie échangeuse d'anions haute performance à détection ampérométrique pulsée (CEAHP -DAP)

La chromatographie échangeuse d'anions combinée à la détection ampérométrique pulsée, a été utilisée pour l'analyse de la composition en oses des polysaccharides sans dérivatisation des échantillons (Ren et *al.*, 2019). Les monosaccharides et les oligosaccharides des

polysaccharides hydrolysés peuvent être dissociés en oxyanions ou alcoolates ($-O^-$) par élution à un $pH > 12$. Ils seront échangés et distribués sur une résine échangeuse d'anions haute performance et détectés par un détecteur ampérométrique pulsé. Le principe consiste à mesurer le courant électrique généré par les molécules oxydées à la surface d'une électrode en or. Pour cela, une séquence de trois potentiels est appliquée à l'électrode : tout d'abord le potentiel E1 permet de mesurer le courant dû à l'oxydation du sucre. Ensuite, ce potentiel est augmenté au niveau E2 de manière à oxyder la surface de l'électrode et éliminer le sucre. Il est ensuite abaissé au niveau E3 afin de réduire la surface de l'électrode. L'élution est effectuée en gradient avec une solution d'hydroxyde de sodium et d'acétate de sodium. La composition en monosaccharides peut être déterminée et quantifiée par comparaison avec des monosaccharides standards avec un degré de sensibilité pouvant atteindre la picomole (Ren et al., 2019 ; Miao et al., 2014).

Appareillage et réactifs :

Chromatographie ionique (Dionex Corporation, ICS3000) ; Précolonne CarboPac-PA1 (Dionex Corporation, 4x50mm) ; Colonne CarboPac PA1 (Dionex Corporation, 4x250mm) ; phase stationnaire constituée de billes de polystyrène et divinylbenzène de 10 μ m de diamètre sur lesquelles sont agglomérées des particules fonctionnalisées par des groupements NR_4^+ ; Filtre (Sartorius, Minisart RC4, 0,22 μ m) ; Logiciel d'acquisition et de traitement Chroméleon (version 6.8) ; Eau ultrapure ; Solutions de NaOH 18mM et 200mM ; Solution d'acétate de sodium 1M ; acétate de sodium (Sigma-Aldrich, 71183) ; hydroxyde de sodium 46-51% (Fischer, S/4930/05) ; hydroxyde d'ammonium 30-33% (Honeywell Fluka, 05002) ; solutions standards injectées de 10^{-1} à 10^{-3} g/L (D-Glc A. (Sigma-Aldrich, G5269), D-Gal A. (Sigma-Aldrich, 48280), D-Gal (Sigma-Aldrich, G0750), D-Glc (Sigma-Aldrich, G8270), L-Rha (Sigma-Aldrich, W373011), D-Rib (Sigma-Aldrich, R7500), L-Fuc (Sigma-Aldrich, F2252), L-Ara (Sigma-Aldrich, 13256), D-Xyl (Sigma-Aldrich, X1500), D-Man (Sigma-Aldrich, M6020) ; Eluant A (Solution d'hydroxyde de sodium à 100mM) ; Eluant B (Solution d'acétate de sodium ($C_2H_3NaO_2$) 1M dans l'éluant A).

Mode opératoire :

- 10mg d'extrait polysaccharidique ont été hydrolysés par 1mL d'acide trifluoroacétique (TFA) 2M dans un bain marie sec à 120°C pendant 1h30min ;
- Les échantillons hydrolysés ont été neutralisés par une solution d'ammoniaque à 35% puis centrifugés à 14000g pendant 15min à 4°C ;

- Des dilutions (1mL) à 1/10, 1/100 et 1/1000 de la concentration mère de l'hydrolysate (10g/L) ont été préparées et filtrées sur 0,22 μ m ;
- Vingt cinq μ L d'échantillon ont été injectés dans les colonnes thermostatées élues à 25°C avec un débit de 0,5mL/min ;
- Pour l'analyse des oses neutres, l'élution des échantillons est en mode isocratique par une solution de NaOH décarbonatée à 16mM pendant 20min à un débit de 0,5 mL/min. Après chaque élution, une chasse de 30min avec une solution de NaOH à 100 mM est réalisée pour éluer les éventuels contaminants encore en interaction avec la phase stationnaire. Avant chaque analyse la colonne est équilibrée pendant 10min avec la solution de NaOH 16mM ;
- Les oses acides sont élués par un gradient binaire à 0,5mL/min :
 - Eluant A : Solution d'hydroxyde de sodium à 100mM ;
 - Eluant B : Solution d'acétate de sodium (C₂H₃NaO₂) 1M dans l'éluant A (NaOH 100mM);
- Le programme d'analyse est : 100 % d'éluant A pendant 5 min, suivi d'un gradient linéaire d'éluant B dans A de 0 à 100% pendant 60min, puis 100% d'éluant B maintenus pendant 10min.
- L'étalonnage est effectué avec des solutions L-rhamnose, L-arabinose, D-glucose, D-xylose, D-mannose, D-galactose, acide glucuronique et acide galacturonique. Les injections (échantillons et standards) sont réalisées en triplicat et l'acquisition des données et leur traitement sont réalisés par le logiciel Chromeleon (version 6.8).

II.5.3. Chromatographie en phase gazeuse couplée à la Spectrométrie de Masse (CG/SM-IE)

La composition en monosaccharides des polysaccharides extraits d'*Alhagi maurorum* Medik. a été déterminée par la technique de CG/SM-IE. Les oses libérés après hydrolyse acide sont rendus volatils par dérivatisation de leurs groupes hydroxyles. La dérivatisation empêche la formation de liaisons hydrogènes et masque les dipôles entraînant une volatilisation des monosaccharides à des températures inférieures à 300°C (Carpéné, 2013). Les dérivatisations les plus utilisées sont la méthylation, l'acétylation et la silylation. Les substituants triméthylsilyles et acétyles présentent l'avantage de rendre les monosaccharides plus volatiles et d'améliorer leur ionisation par l'impact électronique (IE) (figure 26). L'ionisation par IE consiste en un impact d'électrons sur les molécules en sortie de chromatographie. Ces électrons atteignent le plus souvent les hétéroatomes constituant des molécules en formant

des radicaux vrais et/ou des cation-radicaux. Les molécules à analyser reçoivent une énergie transférée par les électrons de 70eV, ce qui permet la fragmentation des liaisons C-C. La fragmentation et l'abondance des fragments donnent à chaque composé un spectre de masse caractéristique correspondant à une empreinte. De ce fait, les spectres de masses en IE^+ présentent rarement le pic de l'ion moléculaire. Lorsque le sucre est dérivé, les groupements acétyles ou triméthylsilyles forment des zones de forte densité électronique, qui seront des cibles préférentielles pour les électrons issus de la source d'ionisation et induiront ainsi les fragmentations internes (Peters, 2016).

L'identification de chaque monosaccharide se fait par comparaison de son temps de rétention relatif (par rapport à un étalon interne) avec ceux des monosaccharides purs étudiés dans les mêmes conditions opératoires. De même, un coefficient de réponse est calculé pour chaque monosaccharide par rapport à l'étalon interne afin de définir la proportion de chacun au sein du polysaccharide. Il est à noter que chaque monosaccharide donnera plusieurs signaux correspondant à ses différentes formes anomériques et conformations possibles (Chouana, 2017).

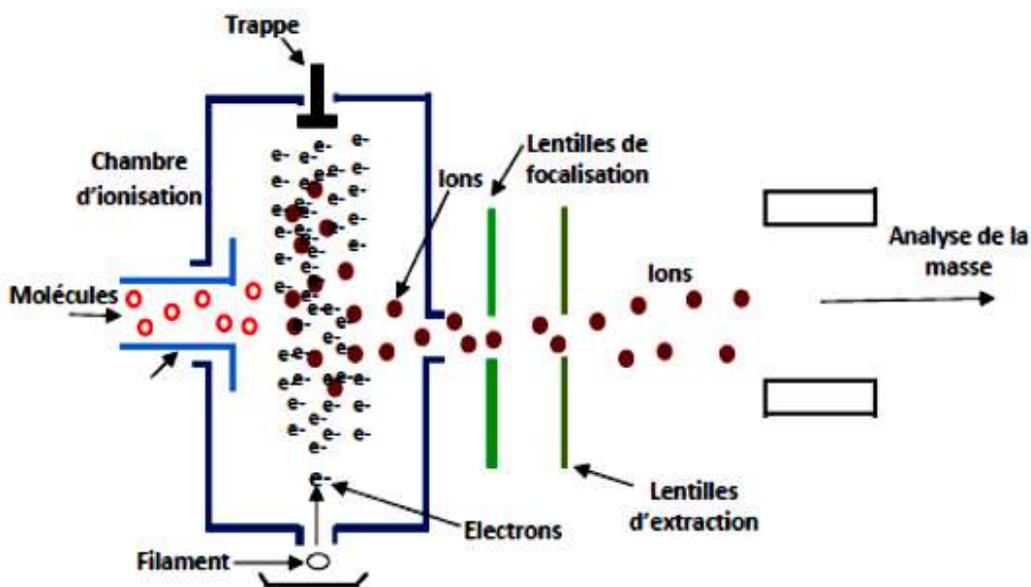


Figure 26. Schéma représentant une source d'ionisation par Impact Electronique (IE) (Peters, 2016).

Appareillage et réactifs :

CG-S-MGP2020NX (Shimadzu Nexis GC-2030) ; Colonne CG (Macherey-Nagel, 30m, 0,32mm, 0,25 μ m) ; Evaporateur sous jet d'azote (Stuart, Block Heater SBH 200D/3 et Concentrateur SBH CONC/1) ; méthanol (Sigma-Aldrich, 323415); BSTFA/TMCS (99:1)

(Sigma-Aldrich, 33149) ; pyridine (Sigma-Aldrich, 270407) ; dichlorométhane (Sigma-Aldrich, 270997) ; solutions standards injectées de 0,1 à 10mg/mL (D-Glc A. (Sigma-Aldrich, G5269), D-Gal A. (Sigma-Aldrich, 48280), D-Gal (Sigma-Aldrich, G0750), D-Glc (Sigma-Aldrich, G8270), L-Rha (Sigma-Aldrich, W373011), D-Rib (Sigma-Aldrich, R7500), L-Fuc (Sigma-Aldrich, F2252), L-Ara (Sigma-Aldrich, 13256), D-Xyl (Sigma-Aldrich, X1500), D-Man (Sigma-Aldrich, M6020), D-GlcN (Sigma-Aldrich, 129407) et D-GalN (Sigma-Aldrich, G0500).

Mode opératoire :

- Solution A: N,O-bis(triméthylsilyl) trifluoroacetamide (BSTFA)/triméthylchlorosilane (TMCS) (99/1) ;
- 10 mg de polysaccharide sont mélangés à 1mL de TFA 2M ;
- Le mélange est vortexé et incubé dans un bain marie sec à 120°C pendant 90min ;
- La solution est ensuite co-évaporée avec 1mL de méthanol sous un courant d'azote ;
- Les monosaccharides libérés sont dérivatisés par l'ajout de 50µL de pyridine et 50µL de la solution A de N,O-bis(triméthylsilyl) trifluoroacetamide (BSTFA)/triméthylchlorosilane (TMCS) (99/1) ;
- Incuber le mélange pendant 2h à température ambiante puis l'évaporer sous jet d'azote ;
- Les résidus triméthylsilyl-O-glycosides sont solubilisés dans 500µL de dichlorométhane avant analyse en chromatographie en phase gazeuse ;
- Préparer les solutions de standards sous les mêmes conditions à quatre concentrations différentes (0,1 ; 1 ; 2 ; 4 et 10mg/mL);
- Injecter les échantillons sur une colonne de type OPTIMA-1MS en mode split ratio 50:1 avec un débit de gaz vecteur (hélium) de 2,3mL/min et une pression fixée à 8,8psi ;
- Fixer la température initiale du four à 100°C, pendant 3min ;
- Programmer une montée en température de 8°C/min jusqu'à 200°C et maintenir la température 1min. Terminer par une montée en température de 5°C/min jusqu'à 215°C (runtime de 19min 50);
- L'ionisation est réalisée par impact électronique (70eV). La température à la trappe est fixée à 150°C et la plage de masses de 40-800m/z.

II.5.4. Spectroscopie de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)

La spectroscopie de RMN, est l'une des techniques les plus puissantes pour l'étude structurale et physico-chimique des composés organiques, de petites molécules et de polymères (Kumirska et *al.*, 2010). Elle simplifie les étapes d'analyse des polysaccharides et fournit des informations sur leur structure, y compris l'identification des monosaccharides constitutifs, des anomères alpha et bêta, du type de liaison glycosidique et des séquences unitaires répétitives de la chaîne polysaccharidique. La RMN bidimensionnelle est d'ailleurs la principale méthode utilisée pour élucider la structure de polysaccharides (Ren et *al.*, 2019). Le principe de cette technique est fondé sur la mesure de l'absorption d'une radiation de radiofréquence par un noyau atomique dans un champ magnétique fort. L'absorption de la radiation pousse le spin nucléaire à se réaligner ou à retourner dans la direction de la plus haute énergie. Après avoir absorbé l'énergie, les noyaux atomiques réémettront une radiation RF et retourneront à leur état initial de moindre niveau d'énergie (Benaoun, 2017).

Appareillage et réactifs :

Spectromètre RMN (Bruker AVANCE III HD) de 500MHz équipé d'une sonde (Bruker 5 mm inverse probe TXI) ; Lyophilisateur (Thermo Electron Corporation, Heto Power Dry OL 6000) ; boudin de dialyse en cellulose régénérée (Thermo Fischer Scientific, 68035, 3,5kDa) ; eau ultrapure ; acide sulfurique 95-97% (Honeywell, 30743) ; hydroxyde de sodium (Sigma-Aldrich, 30620) ; oxyde de deutérium (Sigma-Aldrich, 151882) ; solution de NaOH 10M et Solution H₂SO₄ 20% (v/v).

Mode opératoire :

- Un g de polysaccharides est hydrolysé dans 100mL de H₂SO₄ 20% à 50°C pendant 30min sous agitation ;
- L'hydrolysate est neutralisé en utilisant une solution de NaOH à 10M, puis centrifugé à 10000g/15min ;
- Le surnageant est dialysé (seuil de coupure 3,5KDa) pendant 72h contre de l'eau ultrapure puis lyophilisé ;
- L'hydrolysate de polysaccharides est dissous à 100g/L dans du D₂O (99,9% D) puis lyophilisé. Cette opération est répétée trois fois ;
- Avant analyse, l'échantillon a été dissous dans du D₂O à 100g/L ;
- Les spectres ¹H RMN des solutions à analyser sont enregistrés à 60°C en utilisant un spectromètre de 500MHz ;

- Les expériences ont été enregistrées avec une largeur spectrale, un temps d'acquisition de 3,3s, une largeur d'impulsion de 9,7 μ s, une puissance de 14W, un temps de relaxation de 4s et 128 balayages ;
- Les spectres ^{13}C RMN ont été enregistrés sur le même spectromètre que les spectres ^1H et ont été acquis à l'aide d'une séquence ZGPG (découplage à régulation de puissance WALTZ16 avec un temps d'impulsion de 80 μ s à 0,2W) ;
- 20000 balayages ont été collectés à 90° avec un temps d'impulsion de 12 μ s et à une puissance de 190W et temps de relaxation de 2s, une acquisition de 1,20s, une fenêtre spectrale de 220ppm et des données de 65K points remplis de 0 à 131K avant transformation de Fourier avec élargissement de la ligne à 3Hz ;
- Les spectres HSQC (RMN 2D) ont été acquis en utilisant une spectroscopie corrélée à double quantum filtré (DQF-COZY).

II.6. Caractérisation physicochimique des polysaccharides extraits

II.6.1. Détermination des grandeurs macromoléculaires des polysaccharides extraits par chromatographie d'exclusion stérique couplée à la diffusion de la lumière laser multiangles (CES/DLLMA)

La masse moléculaire des polysaccharides a été déterminée via la Chromatographie d'Exclusion Stérique (CES) couplée à un détecteur de diffusion de lumière multiangles et un réfractomètre différentiel (DLLMA; Diffusion de la Lumière laser Multi-Angles)

Cette technique est basée sur la séparation des macromolécules par chromatographie haute performance d'exclusion stérique à travers des pores de tailles variables d'une phase stationnaire dans le sens décroissant de leur volume hydrodynamique (V_h), et à la détermination de leurs masses moléculaires par un détecteur à diffusion de lumière multi-angles. Un réfractomètre différentiel positionné en sortie de colonne permet de déterminer la concentration de l'échantillon par le biais d'un indice de réfraction différentiel (dn/dc) (Hadrich, 2019). Une source laser sera diffusée par les macromolécules de façon variable selon leurs conformations. Des photodiodes placées à des angles caractéristiques recueillent le signal qui permet d'accéder à la masse moléculaire de la molécule analysée. Un viscosimètre capillaire (Viscostar II, Wyatt Technology Corp., États-Unis) permet d'accéder à la viscosité intrinsèque de l'échantillon.

Le logiciel Astra donne les variations de l'intensité de la lumière diffusée au niveau de chaque photorécepteur, selon l'équation 4 décrite par Zimm (1948).

$$\text{Equation (4)} \dots\dots\dots \frac{KC}{\Delta R_0} = \frac{1}{M_W} + \frac{16\pi^2 n_0^2}{3\lambda_0^2} \times \frac{R_0^2}{3M_W} \times \sin^2 \frac{\Theta}{2} + 2A_2 C + 3A_3 C^2 + \dots$$

Sachant que :

$$K = \frac{2\pi^2}{\lambda_0^4 N_a} \left(\frac{dn}{dc} \right)^2 ;$$

C: Concentration de polymère (g/mL) ; ΔR_0 : Rapport de Rayleigh ; M_W : Masse molaire moyenne en poids du polymère ; n_0 : Indice de réfraction du solvant ; λ_0 : Longueur d'onde du faisceau incident (nm) ; R_g : Rayon de gyration (nm) ; Θ : Angle d'observation par rapport à la lumière incidente ; A_2 : Second coefficient du viriel ; N_a : Nombre d'Avogadro ; dn/dc : Incrément d'indice de réfraction.

La technique consiste à fractionner l'échantillon, selon le volume hydrodynamique des polymères, puis à analyser les fractions à l'aide des différents détecteurs (Chouana, 2017).

Après détermination de la concentration en polymère par réfractométrie la diffusion de la lumière et le viscosimètre capillaire, permettent d'estimer la masse moléculaire moyenne en poids (M_w), la masse moléculaire moyenne en nombre (M_n), la viscosité intrinsèque $[\eta]$, le rayon de gyration (R_g), le rayon hydrodynamique (R_h) et l'indice de polydispersité ($D = M_w/M_n$) du polysaccharide extrait en utilisant un dn/dc de 0,15mL/g.

La viscosité intrinsèque d'un polymère notée $[\eta]$ représente la perturbation de l'écoulement de la solution par une seule macromolécule (Champetier et Monnerie, 1969), elle se définit également comme la limite de la viscosité réduite quand la concentration tend vers zéro (Equation 5) (Saidou, 2013 ; Chouana, 2017):

$$\text{Equation (5)} \dots\dots\dots [\eta] = \lim \left(\frac{\eta_{sp}}{C} \right)$$

$$\eta_{\text{réd}} = \frac{\eta_{sp}}{C} = \frac{\eta - \eta_0}{C\eta_0}$$

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0}$$

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0}$$

Où :

η_{sp} : viscosité spécifique (Pa.s) ;

$\eta_{\text{réd}}$: viscosité réduite (Pa.s) ;

η_r : viscosité relative (Pa.s) ;

η_0 : viscosité absolue du solvant pur (Pa.s), la viscosité de l'eau est de 10^{-3} Pa.s;

C : concentration en polymère dissous (g/mL ou g/dL).

La viscosité intrinsèque est obtenue graphiquement par extrapolation à concentration nulle de la viscosité réduite (Saidou, 2013). Elle rend compte du volume hydrodynamique occupé par une macromolécule dans le solvant considéré. Cette variation linéaire $\eta_{sp}/C=f(C)$ est obtenue à partir de l'équation (6) de Huggins (Chouana, 2017) :

$$\text{Equation (6)} \dots \eta_{sp}/C = [\eta] + k' [\eta]^2 C + \dots$$

Où k désigne une constante caractéristique du polymère et du solvant à la température d'expérimentation. Sur la représentation de Huggins ($\eta_{sp}/C = f(C)$), la viscosité intrinsèque est obtenue en prenant la valeur de l'ordonnée à l'origine. La pente est représentative du paramètre d'Huggins (k'). Par ailleurs, la viscosité intrinsèque est directement proportionnelle au volume hydrodynamique occupé par les macromolécules en solution. La constante de Huggins traduit les interactions polymère-polymère.

Appareillage et réactifs :

Chromatographie d'exclusion stérique couplée de trois détecteurs : un laser He-Ne ($\lambda=690\text{nm}$) associé à un détecteur de diffusion de la lumière multi angles (HELEOS II, Wyatt Technology Corp, Santa Barbara, CA, USA) équipé d'une cellule K5 (50 μL) ; un réfractomètre différentiel (RID10A Shimadzu, Japan) et un viscosimètre (Viscostar II, Wyatt Technology Corp., USA) ; colonnes (Shodex, SB806 et 804HQ) ; filtres (Millipore, 0,1 et 0,45 μm) ; nitrate de sodium (Sigma-Aldrich, 229938) ; nitrate de lithium 0,1M (Sigma Aldrich, 62574) ; logiciel d'acquisition Astra (version 6.1).

Mode opératoire :

- Solubiliser l'échantillon de polysaccharides à 1g/L dans du LiNO_3 0,1M, sous agitation pendant 48h à température ambiante ;
- Filtrer la solution à travers un filtre de 0,45 μm avant injection dans une boucle de 100 μL ;
- Les colonnes de chromatographie sont éluées à 0,5mL/min par une solution de LiNO_3 à 0,1M ;
- Les résultats recueillis seront traités via le logiciel Astra (version 6.1).

II.7. Etude des propriétés rhéologiques

La rhéologie est la science qui étudie et décrit l'écoulement, la déformation et la rupture des corps sous l'effet d'une contrainte (Couarraze et Grossiord, 2000 ; Saidou, 2013 ; Chan et *al.*, 2017). Elle a été considérée comme un domaine majeur dans les sciences des polymères. La rhéologie est régie par la relation entre la force, la déformation et le temps. Elle peut être fonction de certains facteurs liés à l'environnement physico-chimique tels que la température le pH ou la force ionique de la solution et d'autres facteurs plus spécifiques du polymère comme sa conformation et sa structure (Gliksman, 1982 ; Gouarraze et Grossiord, 2000). La rhéologie met en œuvre couramment un mouvement appelé cisaillement. Un exemple particulièrement simple de cisaillement concerne le mouvement d'un échantillon entre deux surfaces planes (figure 27), l'une au repos et l'autre animée d'un déplacement parallèle à la première.

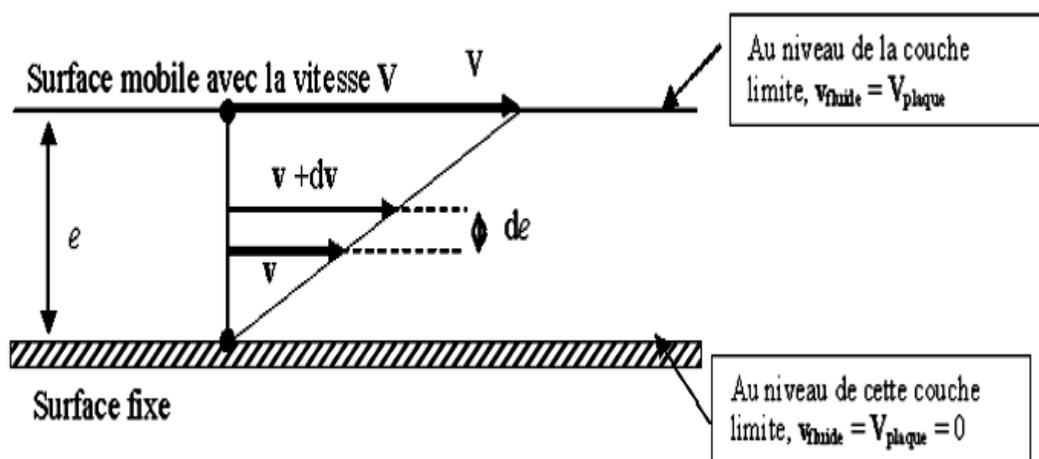


Figure 27. Mouvement de cisaillement entre deux surfaces planes (Saidou, 2013).

Ce mouvement peut être celui d'une peinture étalée sur un mur, d'une crème cosmétique étendue sur la peau, du beurre étalé sur la tartine du pain (Couarraze et Grossiord, 2000). Sous l'effet de ce cisaillement, le fluide s'écoule en couches planes parallèles, animées des vitesses différentes qui varient de «0» pour la couche au contact de la surface fixe à «V» pour la couche au contact de la surface mobile (Saidou, 2013) avec une force tangentielle F qui est exercée sur le plan supérieur. La force appliquée par unité de surface d'un fluide correspond à la contrainte de cisaillement σ (Pa ou N.m^{-2}), grandeur définie en tout point du matériau. Elle est représentée par l'équation 7:

$$\text{Equation (7)} \dots \sigma = \frac{F}{S} = \eta \frac{dv}{dz} = \eta \dot{\gamma}$$

Avec :

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement "shear rate" (s^{-1}) ; η : viscosité dynamique (Pa.s) ; F : force de frottement visqueux qui s'exerce à la surface de séparation de deux couches qui s'opposent au glissement d'une couche sur l'autre (N) ; S: surface en contact avec le fluide (m^2) ; dv: différence de vitesse entre les deux couches ($m.s^{-1}$) ; dz: distance séparant les deux couches de fluides contiguës (m).

Dans un écoulement de cisaillement simple, le fluide est placé entre deux plans parallèles distants de "e", dont l'un est en translation par rapport à l'autre.

Pour schématiser l'écoulement, on pose les hypothèses suivantes :

L'écoulement est laminaire et les couches de fluide glissent les unes sur les autres. Le matériau est assimilé à une superposition de couches adjacentes, d'une très faible épaisseur.

Considérons un élément de volume infinitésimal situé à l'instant $t=0$ à une distance x du plan fixe. A un instant t, cet élément de volume aura parcouru la distance u (x, t).

On définit V la vitesse (m/s) (Equation 8) :

$$\text{(Equation 8)} \dots \dots \dots V = \frac{du}{dt}$$

La vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (s^{-1}) définie par la relation suivante (Equation 9) :

$$\text{(Equation 9)} \dots \dots \dots \dot{\gamma} = \frac{dV}{dx}$$

Cette vitesse dépend de la vitesse de déplacement du plan mobile et de l'épaisseur "e" cisailée. Si "e" est faible, il est possible d'atteindre des vitesses de cisaillement élevées, même avec V faible.

La façon dont la contrainte de cisaillement τ , varie en fonction de la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$, dépend de la viscosité. La viscosité peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière. Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. L'unité de viscosité est le Pa.s. La grandeur caractéristique de l'écoulement est la viscosité dynamique ou viscosité apparente η (en Pa.s).

La viscosité dynamique (ou viscosité apparente) peut être exprimée selon l'équation 10:

(Equation 10)..... $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$

Avec :

η : viscosité dynamique (Pa.s) ;

τ : contrainte de cisaillement (Pa) ;

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement "shear rate" (s⁻¹).

La viscosité apparente d'un fluide ne dépend que de σ et $\dot{\gamma}$. La manière dont la viscosité apparente d'un liquide évolue avec le taux de cisaillement va permettre de définir le comportement rhéologique du liquide à savoir (figure 28). Ainsi on parlera de :

- Fluides newtoniens Si la viscosité est indépendante du taux de cisaillement;
- Fluides plastiques ou fluides à seuil où le seuil représente la limite d'énergie qu'il faut franchir afin que l'écoulement ait lieu ;
- Fluides rhéofluidifiants ou pseudoplastiques lorsque la viscosité diminue avec l'augmentation du taux du cisaillement ;
- Fluides rhéoépaississants lorsque la viscosité augmente avec l'augmentation du taux de cisaillement.

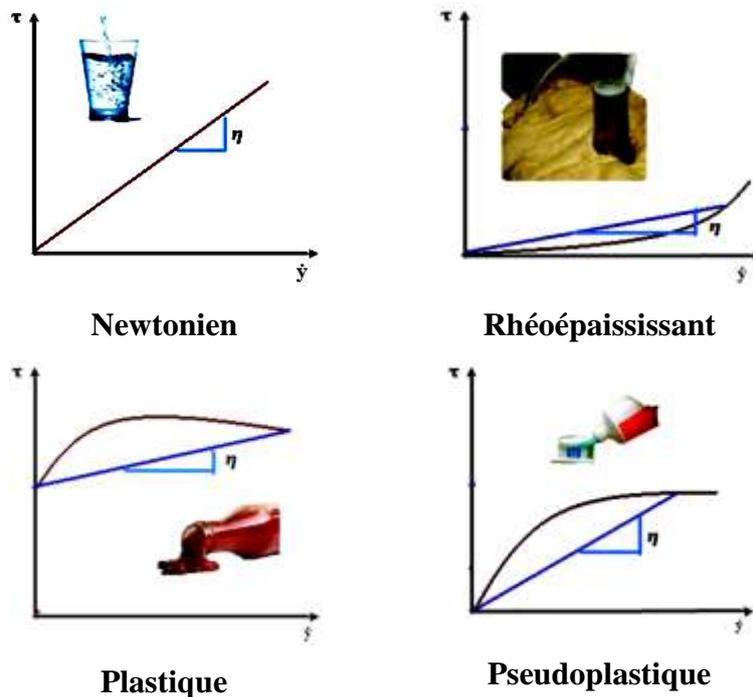


Figure 28. Comportements rhéologiques de liquides aux propriétés physiques différentes.

L'étude des propriétés d'écoulement des solutions de polymères permet également d'appréhender les interactions des macromolécules les unes avec les autres au sein d'une solution. Ainsi, la limite entre le système non enchevêtré et le réseau enchevêtré est

caractérisée par la concentration critique de recouvrement (C^*) (figure 29) c'est-à-dire la concentration de transition entre le régime dilué et le régime semi-dilué. Elle est calculée à partir du diagramme log-log de la viscosité spécifique (η_{sp}) en fonction de la concentration du polysaccharide. Ainsi, elle est déterminée en première approximation par le croisement des deux segments de droite provenant d'une courbe maitresse donnant la viscosité spécifique à gradient de vitesse nul ou très faible en fonction de la concentration en polymère (Saidou, 2013).

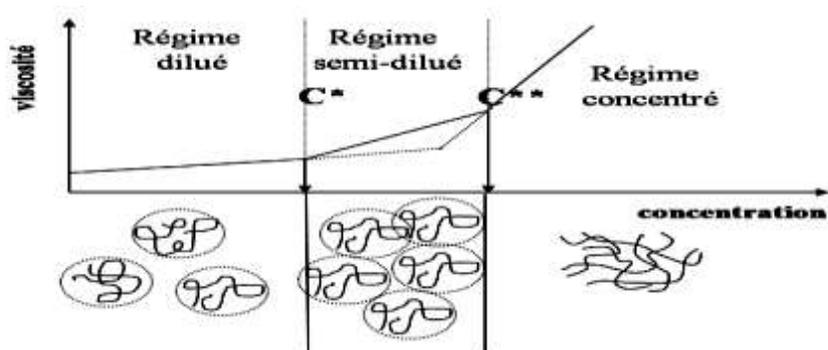


Figure 29. Etats d'enchaînement des polymères en fonction de la concentration (Benaoun, 2017).

II.7.1. Mesure de la viscosité apparente et complexe

Pour caractériser le comportement rhéologique des polysaccharides des graines d'*Alhagi maurorum*, différentes solutions ont été préparées de 0,1 à 2,5% (m/v) dans de l'eau ultrapure ou dans une solution de NaCl 0,5M sous agitation pendant 72h à température ambiante. Les mesures de viscosité apparente ont été réalisées en utilisant un rhéomètre AR-2000 (TA Instrument) équipé d'une géométrie cône-plan de 40mm, plan/plan-lisse et plan/plan-strié (figure 30).



Figure 30. Rhéomètre de géométrie cône-plan-lisse (a), géométrie de cylindre concentrique (b) (Photo personnelle).

Les mesures du déplacement sont effectuées grâce à un dispositif à encodeur optique équipé d'un système de contrôle de température à effet Peltier pour en assurer un contrôle précis. Pour chaque analyse, la solution polysaccharidique a été soigneusement chargée entre les deux plaques où les mesures de viscosité apparente sont réalisées à trois températures différentes (5, 25 et 60°C) sur une gamme de cisaillement comprise entre 10^{-3} et 10^3s^{-1} . La contrainte de cisaillement (τ) et la viscosité apparente (η) sont enregistrées en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) (Equation 11).

$$\text{Equation (11)} \dots \eta = \frac{\eta_0}{(1 + (k\dot{\gamma})^n)}$$

Avec :

η : viscosité apparente (Pa.s)

η_0 : viscosité à cisaillement nul (Pa.s);

k : constante de temps (s) ;

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement (s^{-1});

n : indice de fluidité.

La concentration critique de recouvrement C^* (g/L) de **GD2** a été mesurée dans l'eau à 25°C et exprimée au moyen de modèle Williamson (1929) (Equation 12). C^* a été déduite du tracé en échelle logarithmique de la viscosité spécifique par rapport à la concentration du polymère en traçant la relation $\log \eta_{sp} = f(\log C)$, η_{sp} étant la viscosité spécifique mesurée à cisaillement nul et C correspond à la concentration du polysaccharide. La rupture de la pente donne accès à C^* .

Les données de viscosité sont recueillies et analysées en utilisant le modèle de Williamson (1929) (Equation 12) pour décrire le comportement rhéofluidifiant de la solution de l'extrait polysaccharidique.

Des mesures de la viscosité complexe ont également été effectuées à trois températures (5, 25 et 60°C) en mode oscillatoire (dynamique), à une fréquence comprise entre 0,1 et 10Hz permettant d'appliquer des déformations faibles de sorte que la linéarité entre la contrainte et la déformation soit respectée. Le principe consiste à soumettre l'échantillon à une déformation sinusoïdale (γ) au cours du temps. La contrainte résultante (σ) est également sinusoïdale et de même fréquence (ω) mais présentant un déphasage ou angle de perte (δ) (Equation 12).

$$\text{Equation (12)} \dots \gamma = \gamma_0 \sin \omega t$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin (\gamma + \delta)$$

Où :

γ : taux de cisaillement (s^{-1})

γ_0 : amplitude de la déformation (s^{-1})

ω : fréquence ($rad.s^{-1}$)

σ : contrainte (Pa)

σ_0 : amplitude de la contrainte (Pa)

δ : déphasage ou angle de perte (rad)

Trois cas sont possibles :

$-\delta=0$: En réponse à une contrainte et quelle que soit la vitesse appliquée, le matériau se rapproche d'un solide de Hooke et se déforme de manière élastique instantanément et proportionnellement à la contrainte (phénomène indépendant du temps).

$-\delta=\pi/2$: le matériau est un fluide visqueux. En réponse à une sollicitation, il s'écoule irréversiblement.

$-0<\delta<\pi/2$: le matériau possède à la fois un comportement élastique et visqueux. Il est viscoélastique.

La présentation de la contrainte et de la déformation par des vecteurs tournants permet de représenter γ et σ pour des modules complexes (*) (Equation 13):

$$\text{Equation (13)} \dots \gamma^* = \gamma_0 e^{i(\omega t)} \\ \sigma^* = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)}$$

Avec :

γ^* : déformation (s^{-1})

γ_0 : amplitude de la déformation (s^{-1})

ω : fréquence ($rad.s^{-1}$)

σ : contrainte (Pa)

σ_0 : amplitude de la contrainte (Pa)

δ : déphasage ou angle de perte (rad)

On peut alors définir le module complexe de cisaillement selon l'équation 14:

$$\text{Equation (14)} \dots G^* = \frac{\gamma^*}{\sigma^*} = G' + iG'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \\ G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \text{ et } G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \\ \tan \delta = \frac{G''}{G'}$$

Le module élastique G' (module de stockage), le module visqueux G'' (module de perte) et la tangente de perte ($\tan \delta = G''/G'$) (facteur d'amortissement), en fonction de la fréquence (Hz ou rad.s^{-1}), sont évaluées pendant l'analyse rhéologique. G' (Pa) est la composante élastique (appelée module de conservation, représentant l'énergie emmagasinée sous forme élastique) et G'' (Pa) la composante visqueuse (appelée module de perte, représentant l'énergie dispersée donc irrécupérable sous forme d'écoulement visqueux) de G^* . On définit $\tan \delta$ comme le facteur de perte.

Les mesures viscoélastiques dynamiques ont été réalisées en utilisant le rhéomètre AR-G2 (TA Instruments, France) aux géométries cône-plan/lisse et cylindre concentrique sur des solutions de polysaccharide à des concentrations de 0,1 à 2,5% (m/v) dans de l'eau ultrapure ou dans une solution de NaCl 0,5M (0,25 à 2,5%). Elles ont permis de caractériser leur comportement viscoélastique en mesurant les modules de conservation (ou module élastique) G' (Pa) et de perte (ou module visqueux) G'' (Pa) pour un cisaillement oscillant de petite amplitude d'écoulements aux fréquences s'étendant de 0,1 et 10Hz à des déformations comprises entre 5 et 60% à 25 °C.

Appareillage et réactifs :

Rhéomètre équipé d'un système de contrôle de température à effet Peltier (TA-Instrument, AR-2000) ; modules de géométrie cône-plan de diamètre 40mm, plan-plan/lisse, plan-plan/strié et cylindre concentrique (couite) ; logiciel d'acquisition et de traitement (TA Instrument Rheology Advantage Data Analysis software) ; solution de NaCl 0,5M ; Eau milli-Q.

II.8. Etude des activités biologiques des extraits de polysaccharides

II.8.1. Activité anti-hyperglycémiant

Le contrôle de la production de glucose après la consommation de sources alimentaires en utilisant des composés tels que des inhibiteurs d' α -amylase pourrait être une bonne approche pour la gestion du diabète de type 2 ainsi que de l'hyperglycémie (Wang et *al.*, 2017 ; Chen et *al.*, 2016). Pour cette raison, les polysaccharides et hydrolysats de polysaccharides de cette étude ont été étudiés en évaluant l'inhibition de l'activité α -amylase comme décrit par Kumar et *al.* (2011) et Kajaria et *al.* (2013).

Soixante μL de différentes solutions aqueuses (1,25, 2,5, 3,75, 5, 6,25, 7,5, 8,75 et 10 mg/mL) de polysaccharide (hydrolysé ou non) et d'acarbose (contrôle positif) ou d'eau ultrapure (contrôle négatif) ont été mélangés avec 30 μL d' α -amylase provenant de pancréatite humaine

subie (5UI/L) et incubées à 37°C pendant 15min. Par la suite, 150µL (0,5mg/mL) de 2-chloro-p-nitrophényl-α-D-maltotriose (CNP3) utilisés comme substrat ont été ajoutés sous agitation. Le pouvoir anti-hyperglycémiant a été évalué via la capacité des composés testés à inhiber l'activité α-amylase en libérant du 2-chloro-p-nitrophénol qui absorbe à 405nm (Yadav et Prakash, 2011). Il est exprimé selon l'équation 16. Les résultats obtenus ont été exprimés en moyenne ± les erreurs standards de la moyenne (SEM).

$$\text{Equation (15)....Inhibition (\%)} = \left(\text{Contrôle}_{\text{positif}} - \frac{\text{Test}}{\text{Contrôle}_{\text{positif}}} \right) \times 100$$

Contrôle_{positif}: Acarbose

Test: Solution de polysaccharide

II.8.2. Activité anti-inflammatoire

Cette activité a été évaluée suivant les méthodes d'Osman *et al.* (2016) et Bakka *et al.* (2019) avec de légères modifications pour tester la capacité des extraits polysaccharidiques à inhiber la dénaturation thermique de l'albumine (BSA). Les solutions de polysaccharide ou l'Ibuprofène (contrôle positif) ont été préparées dans une gamme de concentrations allant de 0,1 à 1% (m/v). Le milieu réactionnel contient 450µL de BSA 0,5% (m/v), 50µL de solution polysaccharidique ou l'Ibuprofène à l'exception du contrôle négatif. Ensuite, le mélange est incubé à 37°C pendant 20min puis chauffé à 70°C 10min. Après refroidissement 2,5mL de PBS (Tampon phosphate pH 7,4) sont ajoutés avant mesure de l'A₆₆₀. Les résultats obtenus ont été exprimés en moyenne ± les erreurs standard de la moyenne (SEM). L'inhibition de la dénaturation est calculée selon l'équation 16 (Osman *et al.*, 2016) :

$$\text{Equation (16).....Inhibition (\%)} = (1 - D/C) \times 100$$

D_{A660}: polysaccharide

C_{A660}: Contrôle négatif

II.8.3. Activité gastroprotectrice (*in vivo*)

II.8.3.1. Animaux et conditions de familiarisation

Pour évaluer l'activité gastroprotectrice des polysaccharides extraits des graines *Alhagi maurorum* Medik., des rats femelles de type Wistar albinos ont été utilisés. Leurs poids corporels variaient de 80-125g et leur moyenne d'âge était de cinq semaines. Ces animaux provenaient du département de biologie de l'Université de Hamma Lakhder à El-Oued (Algérie). Ils ont été familiarisés une semaine avant manipulation au niveau du centre de recherche scientifique et technique en analyse physico-chimique (PTAPC-CRAPC) de Ouargla (Algérie).

Les rats ont été mis sous des conditions de température ($21\pm 1^{\circ}\text{C}$), cycle de lumière obscurité/lumière de 12h par jour, eau minérale et alimentation sous forme de bouchons (figure 31).



Figure 31. Familiarisation des rats au niveau de l'animalerie (PTAPC-CRAPC, Ouargla). Alimentation (a); Boîte d'élevage des rats (b); Rats Wistar albinos (c). (Photos personnelles)

Matériels et réactifs:

Balance de précision ; agitateur ; pH mètre ; verrerie et trousse de dissection ; sonde de gavage ; seringue de 1mL ; éthanol à 96% ; eau distillée ; eau physiologique (NaCl 0,9%) ; Gaviscon (500mg Alginate de sodium ; 267 bicarbonate de sodium).

II.8.3.2. Etude de l'activité gastroprotectrice

II.8.3.2.1. Préparation des solutions de polysaccharides

Trois concentrations de polysaccharides de 100, 250 et 500mg/kg ont été préparées en solubilisant la quantité nécessaire de polysaccharide dans 50mL d'eau distillée sous agitation vigoureuse pendant 48h.

II.8.3.2.2. Préparation du Gaviscon

Le Gaviscon est un traitement commercial des ulcères. Il se présente sous la forme d'un gel de 10mL contenant de 500mg d'Alginate de sodium et de 267mg bicarbonate de sodium. Il a été utilisé comme un contrôle positif protecteur de la paroi gastrique.

II.8.3.2.3. Induction de l'ulcère gastrique

L'effet protecteur des polysaccharides vis à vis de la formation de l'ulcère gastrique induit par l'éthanol à 96% chez le rat a été évalué en adoptant les méthodes de Robert et *al.* (1979) et Simas-Tosin et *al.* (2014) avec des modifications.

Un total de 36 rats, ont été divisés d'une manière aléatoire en six lots (n=6). Ils ont été prétraités par gavage oral (figure29-a) avec 10ml/kg de solutions de polysaccharide (100, 250 et 500mg/kg-3 lots), du Gaviscon (10ml/kg-1 lot) utilisé comme référence, de l'eau distillée comme témoin à raison de 1ml/rat (1 lot) et un groupe a reçu de l'éthanol absolu à 96% (1mL/rat) (Tableau 4).

Tableau 4. Traitement des rats en vue d'évaluer l'activité gastroprotectrice des polysaccharides **GD2**

Numéro de lot	Solutions administrées
Groupe 1	Eau minérale
Groupe 2	Eau distillée+Ethanol à 96%
Groupe 3	Gaviscon+Ethanol à 96%
Groupe 4	100mg/kg de GD2+Ethanol à 96%
Groupe 5	250mg/kg de GD2+Ethanol à 96%
Groupe 6	500mg/kg de GD2+Ethanol à 96%

Une heure après l'administration des solutions par voie orale, l'éthanol à 96% a été administré de la même manière à raison de 1ml par 200g. Au bout d'une heure, les animaux ont été sacrifiés (figure 32) par dislocation cervicale, les estomacs ont été récupérés, le pH gastrique a été mesuré avant que l'estomac ne soit nettoyé avec de l'eau physiologique à 0,9%. Les estomacs étalés sur une plaque en polystyrène ont alors été photographiés. Les zones de lésions ont été dessinées, mesurées à l'aide du programme Image J et exprimées en mm². Les résultats obtenus ont été exprimés en moyenne ± les erreurs standard de la moyenne (SEM).

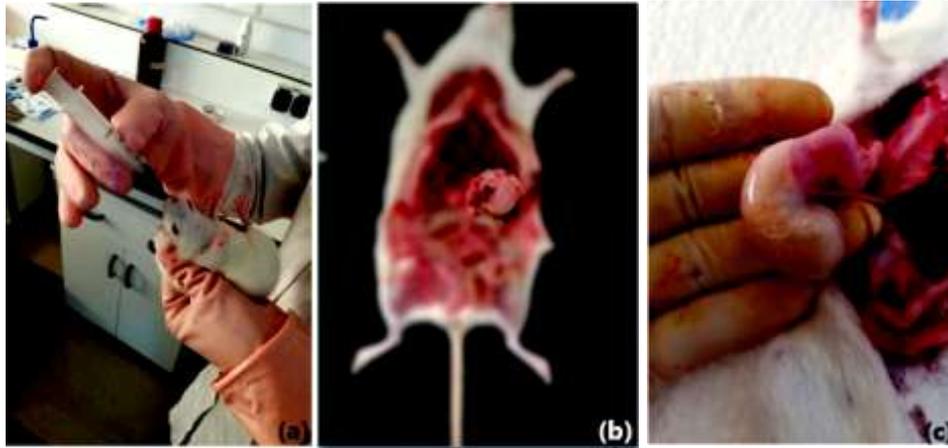


Figure 32. Gavage intragastrique (a), dissection (b) et estomac du rat (c) (photos personnelles).

Une fois les surfaces des estomacs et des lésions calculées, les pourcentages d'ulcération (Equation 17) et d'inhibition de l'ulcère gastrique (Equation 18) peuvent être déterminés :

$$\text{Equation (17).....Ulcération (\%)} = \left(\frac{\text{surface totale des lésions}}{\text{surface totale de l'estomac}} \right) \times 100$$

$$\text{Equation (18).....Inhibition (\%)} = \left(\frac{\text{SUC-SUT}}{\text{SUC}} \right) \times 100$$

Avec:

SUC: Surface Ulcéré du Contrôle positif

SUT: Surface Ulcéré du Test

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Enquête ethnobotanique

L'ethnobotanique est un domaine de recherche interdisciplinaire entre la science des plantes et l'ethnologie (Suthari et *al.*, 2021). Elle étudie la relation entre les espèces végétales et l'homme (Zimdahl, 2018) qui joue un rôle important dans la compréhension des relations dynamiques entre la diversité biologique et les systèmes sociaux et culturels (Ahmad et *al.*, 2014). Plusieurs études ethnobotaniques ont déjà été entreprises dans certaines régions de l'Algérie et précisément dans le Sahara central (région d'Illizi) (Hammiche et Maiza, 2006 ; Miara et *al.*, 2019) et le Sahara nord-est (région de Ouargla) (Ould El Hadj et *al.*, 2003) pour documenter la place des plantes spontanées dans la médecine traditionnelle. Cependant, ce pays reste encore peu exploré, malgré sa richesse en ressources naturelles et sa diversité floristique due à sa grande superficie et à des conditions climatiques extrêmes et très spécifiques (Mechaala et *al.*, 2022). Ainsi, le but de cette enquête ethnobotanique était de recenser et documenter les différentes utilisations médicinales traditionnelles d'une plante, *Alhagi maurorum* Medik., par la population de la région d'Illizi. Les résultats recueillis de et analyser par le test de Chi-square donneront un aperçu général sur la nomination locale, le pouvoir curatif et les modes d'emploi des différentes parties de cette plante telles qu'elles sont connues et utilisées par la population d'Illizi.

III.1.1. Profil sociodémographique des répondants

III.1.1.1. Utilisation de la plante selon le sexe

Parmi les 73 personnes interrogées, 69 ont déclaré connaître la plante *A. maurorum* Medik. révélant par de là une pratique médicinale très répandue à Illizi, notamment par les femmes (52,17% - 37 personnes interrogées contre 47,83% - 32 personnes interrogées pour les hommes). Cependant, aucune relation significative entre le sexe des personnes interrogées et l'utilisation de la plante n'a été révélée ($p=0,473 > \alpha$). Cela signifie que les deux sexes ont échangé des informations sur cette plante. Des recherches ethnobotaniques réalisées récemment dans les différentes régions de l'Algérie, sur les wilayas de Skikda (Bouasla et Bouasla 2017) et M'sila (Bakiri et *al.* 2016) rapportent également une dominance des femmes comme détentrices des connaissances sur les plantes. Bouasla et Bouasla (2017) ont attribué cette constatation aux traditions de la région de Skikda (Nord-est de l'Algérie) qui amènent plutôt les femmes que les hommes à préparer des recettes à base de plantes pour l'ensemble des membres de la famille. Les connaissances liées à l'identification et à l'usage des plantes médicinales sont ainsi transmises de génération en génération, de mères en filles.

III.1.1.2. Utilisation de la plante selon l'âge et le niveau scolaire

Comme il est montré dans la figure 33, la classe d'âge utilisant le plus la plante est celle des plus de 51 ans avec 56,52%, suivie par la classe d'âge des 36-50 ans avec 39,14%. La classe d'âge ayant les plus faibles utilisations d'*Alhagi maurorum* est celle des 20-35 ans avec 4,34%.

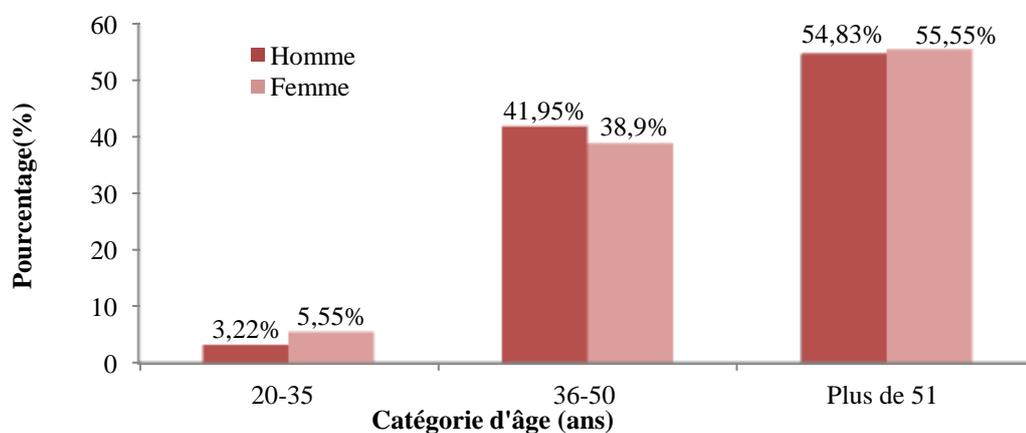


Figure 33. Répartition des groupes d'âge des répondants selon le sexe.

Pour les deux sexes (figure 34), 82,6% sont analphabètes, suivis des niveaux moyen, secondaire et universitaire à 8,7%, 5,8% et 2,9%, respectivement.

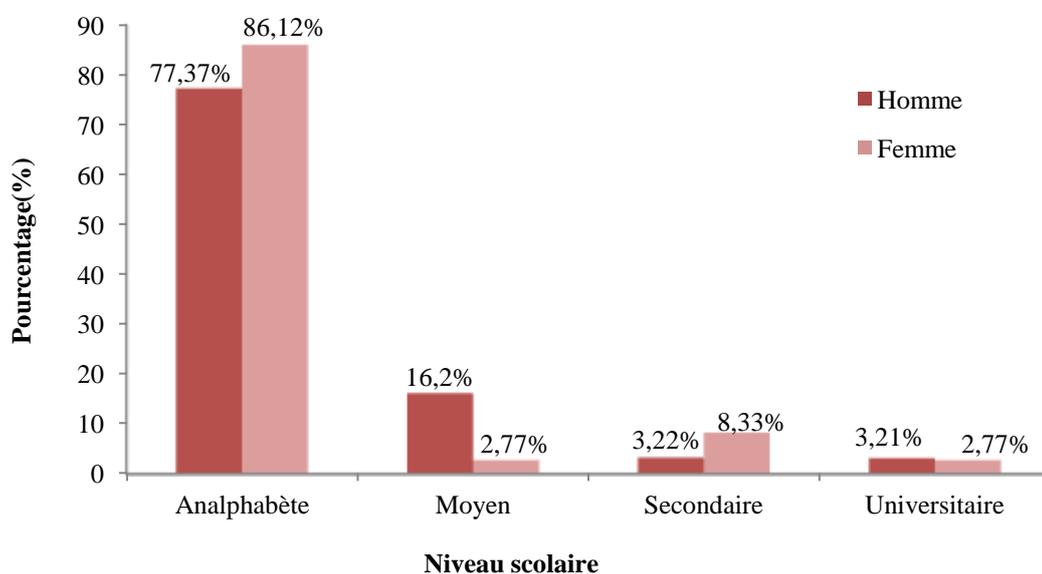


Figure 34. Niveau scolaire des personnes interrogées.

Les catégories qualifiées de «niveau moyen» et «d'analphabètes» correspondent à des personnes ayant un niveau scolaire extrêmement limité et issues de familles très modestes. La plupart d'entre elles ont travaillé dès l'enfance dans l'élevage des moutons qui est la principale source de subsistance des villes et villages de la région d'Illizi qui sont très isolés

géographiquement et mal desservis par les transports. Ces conditions de vie semblent créer une relation particulière entre la flore médicinale et les habitants de cette région depuis l'enfance. Les personnes de la région plus éduquée et donc ayant accès à des traitements thérapeutiques plus conventionnels apparaissent comme moins enclin à utiliser des plantes médicinales originaires de la région et donc disposent de moins de connaissances botaniques.

III.1.2. Informations ethnomédicinales sur *Alhagi maurorum* Medik.

III.1.2.1. Nomination locale

La plante collectée a été présentée aux habitants locaux. Pour la plupart de la communauté Touareg d'Illizi, *A. maurorum* Medik. est connue sous quatre termes communs utilisés par les personnes interrogées. Ces noms, qui n'ont jamais été rapportés auparavant à notre connaissance, sont Atjer (57,98%) et Ahjer (28,98%) qui signifient tous deux "Quelque chose qui apporte du bien", Karde (7,24%) qui peut se traduire par "nourriture pour le chameau" et Debagh (5,80%) pour "tannage". Ces dénominations reflètent bien les usages qui sont fait de cette plante qui est utilisée pour ces vertus médicinales, qui sert de nourriture aux chameaux et qui être mise en œuvre lors du tannage des cuirs.

III.1.2.2. Parties de la plante utilisées pour des usages thérapeutiques

Les feuilles constituent la partie de la plante la plus utilisée (59,42% des usages) comme agent anti-hyperglycémique. Les graines (37,58% des usages) sont réservées au traitement de la fièvre tandis que les racines et la gomme (1,5% des usages chacune) sont uniquement utilisées pour lutter respectivement contre les troubles gastro-intestinaux et l'hyperglycémie. Une étude ethnobotanique menée à Illizi par Miara et *al.* (2019) confirme ces usages en rapportant que les feuilles (52%) suivies des graines (13%) sont les parties les plus utilisées dans les préparations traditionnelles de la communauté Touareg.

L'utilisation majoritaire des feuilles peut être expliquée par la disponibilité et la facilité de collecte de cette partie de la plante (Akerreta et *al.*, 2007). Par ailleurs, les feuilles en tant qu'organe photosynthétique sont le siège des réactions photochimiques et parfois du stockage des métabolites secondaires responsables de nombreuses propriétés biologiques (Bigendako-Polygenis et Lejoly, 1990). Ainsi, un contenu en composés phénoliques totaux élevé et une activité antioxydante de 83,5% (piégeage des radicaux libres) ont été mesurés par Laghari et *al.* (2012) pour l'extrait de feuilles d'*Alhagi maurorum*. Des composés actifs issus de l'extrait aqueux des feuilles de la plante comprennent plusieurs sous-classes de flavonoïdes et d'acides phénoliques tels que le chrysoeriol, l'isorhamnetine, le chrysoeriol-7-oxyloside, les acides coumarique, caféique et férulique (Ahmed, 2019). Des acides gras et coumarines ont été

identifiés dans des extraits d'éther diéthylique et d'éther de pétrole comme principaux constituants des parties aériennes d'*A. maurorum* (Loizzo et al. 2014). Des fractions volatiles composées de terpénoïdes, de cétones, de dérivés acides et d'hydrocarbures ont pu être identifiées dans les feuilles et les tiges de la plante (Muhammad et al., 2014). Plus récemment, Al-Saleem et al. (2019) ont isolé d'un extrait alcoolique de racines quatorze flavonoïdes dont la quercétine, l'isorhamnetine, le kaempférol, la naringénine et la mauritanine.

III.1.2.3. Utilisations traditionnelles

L'étude ethnobotanique réalisée a permis de mettre en évidence les principales formes d'utilisation d'*Alhagi maurorum* Medik. Pour faciliter l'administration des composés actifs, la macération des graines (34,78%) et des feuilles (8,69%) dans de l'eau chaude est la méthode la plus fréquente dans la préparation de la plante (43,47%), suivie des suspensions de poudres dans de l'eau ou du lait (30,45%), infusions dans de l'eau chaude (13,04%) des feuilles (11,59%) et des graines (1,45%) et décoctions de racines sèches (1,45%) (Figure 35).

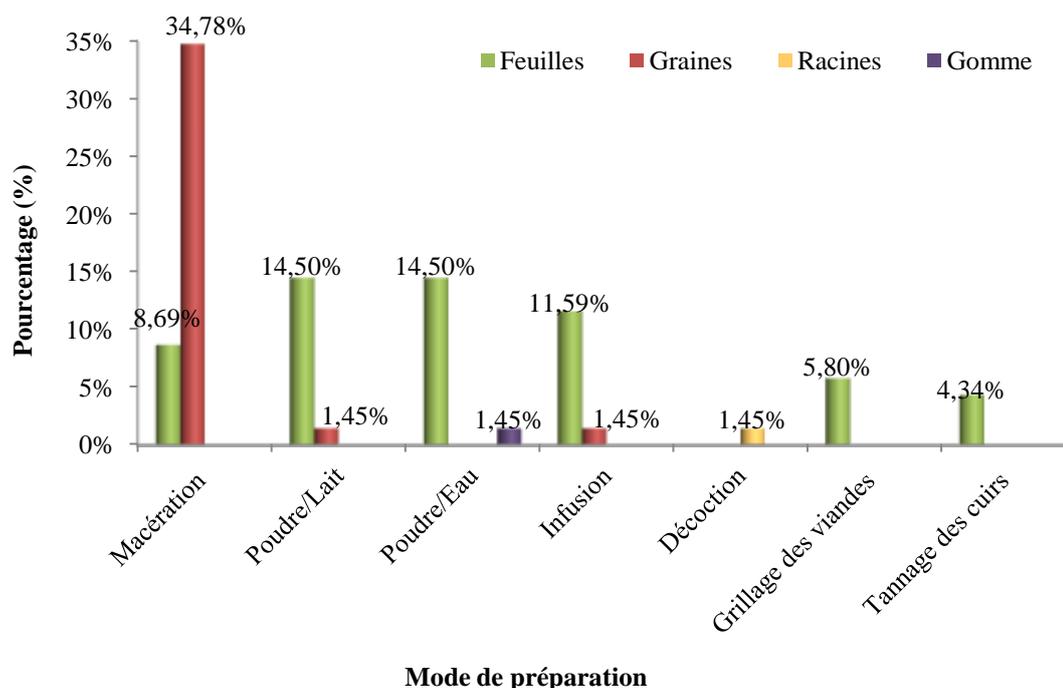


Figure 35. Différentes modes de préparation d'*Alhagi maurorum*.

Deux autres modes de préparation mineurs ont également été rapportés concernant les usages d'*Alhagi maurorum* Medik. Il s'agit d'ajouter de la poudre de feuilles pendant le grillage des viandes (5,8%) et le tannage des cuirs (4,34%). La poudre de la gomme exsudat d'*A. maurorum* Medik. a également été mélangée à des graines de fenugrec (*Trigonella foenum-graecum*) pour le traitement de l'hyperglycémie. Dans la même région d'étude (Illizi), une enquête ethnobotanique menée par Hammiche et Maiza (2006) rapporte les utilisations des

plantes fraîches ou/et sèches, essentiellement sous forme de décoction, macération et infusion dans l'eau. Parfois, des huiles et exceptionnellement du lait sont utilisés. L'infusion et la décoction ont également été signalées comme étant les méthodes de préparation les plus courantes à Illizi (Miara et al. 2019).

III.1.2.4. Pathologies traitées

L'analyse des résultats obtenus lors de l'étude ethnobotanique a permis de recenser les diverses pathologies traitées par *Alhagi maurorum* dans la pharmacopée Saharienne de la wilaya d'Illizi. Les principales pathologies sont représentées par la fièvre (28,99%) et les troubles gastro-intestinaux (26,08%). D'autres pathologies ont également été signalées comme pouvant être traitées par cette plante de façon mineure. Il s'agit du traitement de l'hyperglycémie (18,84%), des infections génito-urinaires chez les femmes (11,60%), de la diarrhée (8,7%) et des hémorroïdes externes (1,45%) (Tableau 5).

Tableau 5. Pathologies traitées par *Alhagi maurorum* à Illizi et parties de la plante utilisées.

Affection/Object	Partie utilisée	Mode de préparation
Fièvre	Feuilles	M : 1 à 2 verres d'eau par jour P : prendre une cuillère à thé avec un verre d'eau ou du lait
	Graines	M : 1 à 2 verres d'eau par jour
Troubles gastro-intestinaux	Feuilles	In : 1 tasse par jour P : avec un verre d'eau
	Graines	M: 1 tasse par jour
	Racines	D: 1 à 2 verres d'eau par jour
Hyperglycémie	Gomme	P : mélangée à la poudre de fenugrec avec de l'eau, après le repas
	Feuilles	In : 1tasse après le repas M : 1tasse après le repas P : pendant le grillage des viandes P : prendre une petite quantité entre les doigts avec une tasse d'eau après le repas
Infections génito-urinaires chez la femme	Feuilles	M : usage externe
	Graines	M : usage externe
Diarrhée	Feuilles	P : Prendre une petite quantité entre les doigts avec de l'eau ou du lait M : 1 à 2 verres d'eau par jour
	Graines	
Tannage des cuirs	Feuilles	P : sur les cuirs des animaux
Hémorroïdes externes	Feuilles	In : utiliser le vapeur de l'infusion après le refroidissement

Poudre (P) ; Macération (M) : Tremper l'herbe dans l'eau froide/huile pendant plusieurs heures ; Infusion (In) : Verser l'herbe dans de l'eau bouillie pendant quelques minutes ; Décoction (D) : Faire bouillir dans l'eau les parties les plus rigides (racines, écorces ...) de la plante

Statistiquement, aucune corrélation significative entre toutes les maladies traitées et les parties utilisées ($p=0,175>\alpha$) n'a pu être mise en évidence. L'indépendance des parties utilisées (notamment les feuilles et les graines) par rapport aux pathologies indique l'efficacité des différentes parties d'*A. maurorum* et de leur contenu phytochimique dans le traitement des maladies communes mentionnées ci-dessus. Ces résultats sont soutenus par les études d'Ahmed (2019) et d'Al-Saleem et al. (2019). En effet, ces auteurs ont rapporté la présence de flavonoïdes dans les feuilles et les racines de la plante. Certaines utilisations ethnomédicales ont été décrites dans différents pays du monde comme l'Égypte (Srivastava et al., 2014), la Palestine (Ali-Shtayeh et al., 2000) ou l'Arabie saoudite (El-Shabasy, 2016).

Les méthodes de préparation d'*A. maurorum* mentionnées au niveau du tableau 5 (macération, infusion et décoction dans l'eau) facilitent la libération des flavonoïdes, des glycosides, des alcaloïdes, des tanins, des saponines et des stéroïdes considérés comme étant les principes actifs de la plante (Rahman et al., 2011 ; Al-Snafi et al., 2019). Leur présence dans les extraits de plantes peut expliquer leur potentiel curatif tel que décrit pour les infusions de feuilles préparées pour lutter contre les troubles gastro-intestinaux. Ainsi, Amani et al. (2006) ont rapporté une activité antiulcéreuse très prometteuse des extraits éthanoliques (200, 300 et 400mg/kg) de la plante contenant six flavonoïdes actifs (utilisation du rat comme modèle). Le macérat des feuilles utilisé pour la fièvre et les infections génito-urinaires chez les femmes contenait des agents antioxydants comme décrit par Ahmed (2019). De plus, l'extrait aqueux de feuilles de la plante administré à 300mg/kg à des rats exposés au stress oxydatif induit par le tétrachlorure a révélé son action positive sur le nombre, la vitalité, la normalité des spermatozoïdes et le statut antioxydant (glutathion). Une autre étude a également rapporté les propriétés antioxydantes et antiprolifératives des parties aériennes d'*A. maurorum* dans des extraits d'éthers diéthylique et de pétrole contre plusieurs lignées cellulaires cancéreuses humaines en utilisant le test de la sulforhodamine B (Loizzo et al., 2014). L'extrait d'éther de diéthyle composé d'acides gras (acide oléique, linoléate d'éthyle, acide myristique et oléate d'éthyle) et de coumarines comme principaux constituants, a montré sa plus forte activité contre la lignée cellulaire de mélanome C32 (CI₅₀=2,7μg/mL) et la plus forte activité de piégeage des radicaux contre le radical ABTS (CI₅₀=4,7μg/mL). L'extrait d'éther de pétrole composé principalement d'acides gras a présenté une activité antiproliférative plus faible

contre la lignée cellulaire de mélanome C32 (CI50=62,3µg/mL) et une réduction du radical ABTS (CI50=5,9µg/mL) (Loizzo et al., 2014).

Les feuilles et les graines utilisées pour traiter la diarrhée et les racines décoctées pour les troubles gastro-intestinaux ont été également décrites pour leurs effets antibactériens. Ainsi des extraits phénoliques des parties vertes d'*A. maurorum* se sont révélés particulièrement efficaces contre *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus* (Al-Kamel et Al-Snafi, 2019). Ici, nous rapportons également l'utilisation de la gomme d'exsudat et des graines de la plante d'*A. maurorum* comme traitement contre l'hyperglycémie. Jusqu'à présent, aucune étude scientifique n'a été portée sur la composition chimique et les activités biologiques d'*A. maurorum* dans le but de rendre claires ses utilisations médicinales par les habitants d'Illizi.

III.2. Caractérisations biochimique et structurale des polysaccharides des graines *Alhagi maurorum* Medik.

Cette partie consiste en l'analyse de la composition biochimique (les teneurs en oses totaux, oses neutres, oses acides, protéines et composés phénoliques) des différentes fractions polysaccharidiques obtenues après extraction (Tableau 6) au moyen de méthodes colorimétriques. Des bandes caractéristiques de ces polysaccharides sont révélées par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier. Les monosaccharides constitutifs des polysaccharides extraits sont libérés après une hydrolyse acide avant d'être analysés par des méthodes chromatographiques (Chromatographie Echangeuse d'Anions Haute Performance, Chromatographie Phase Gaz couplée à la Spectrométrie de Masse). Les types de liaisons glycosidiques reliant ces monomères ont été analysés par spectroscopie RMN ¹H et ¹³C.

III.2.1. Composition globale des polysaccharides

Les protocoles d'extractions des polysaccharides hydrosolubles des graines *Alhagi maurorum* Medik. ont conduit à l'obtention de 10 fractions en fonction des différentes conditions de lavage des graines, de dépigmentation et de températures d'extraction (Tableau 6).

Tableau (6). Conditions d'extraction et désignations des fractions de polysaccharides issues des graines d'*A. maurorum* Medik.

Graines	Traitement	Température (°C)	Fraction extraite	Fraction après épuisement
Non broyées	Lavage	40	MU40	---
Non broyées	Lavage	80	MU80	---
Graines lavées*	Broyage + extraction	80	C1GP4-8	C2GP4-8
Graines lavées**	Broyage + extraction	80	C1-80	C2-80
Graines dépigmentées	Dépigmentation+ extraction	80	GD1	GD2
Graines non dépigmentées	Extraction	80	GND1	GND2

* : lot 1 des graines lavées à 40°C ; ** : lot 2 des graines lavées à 80°C ; --- : aucun épuisement

Les rendements massiques des fractions obtenues et leurs compositions biochimiques à savoir la teneur en oses totaux, oses neutres, oses acides, ainsi que de composées phénoliques et protéines sont représentés dans le tableau (7).

Le meilleur rendement d'extraction (11,85%) a concerné la fraction C1-80. Les fractions C2GP4-8, et **GD2** ont présenté des rendements proches de 9,83%, 9,1% et 8,96% respectivement. Des rendements plus faibles ont été obtenus pour les autres fractions à savoir C2-80 (3,48%), GND2 (3,3%), GD1 (3,15%), C1GP4-8 (3,14%), MU80 (2,18%) et MU40 (0,065%). L'hétérogénéité de ces rendements d'extraction de polysaccharides trouve son explication dans les procédures d'extractions notamment le lavage des graines dont le meilleur rendement est obtenu avec celles des graines lavées à 80°C puis broyées et extraites à la même température (C1-80), suivi de l'extrait d'épuisement (C2GP4-8) des graines lavées à 40°C. La présence de pigments dans les graines n'a pas empêché l'eau d'extraire les polysaccharides (GND1). Cependant, le prétraitement des graines a augmenté la capacité du solvant à pénétrer et solubiliser les polysaccharides (**GD2**). Ces rendements sont apparus comme élevés comparés à ceux de l'extraction aqueuse à température ambiante des graines d'autres espèces d'*Alhagi* telles que d'*Alhagi pseudalhagi* Desv. (2,80%) (Kodiralieva et Rakhmanberdyeva, 2011) et proches des rendements d'extraction des graines d'*Alhagi persarum* Boiss (4%) (Rakhimov and Dzhumamuratova, 1993). De même, dans des conditions similaires le rendement massique en polysaccharides extraits des graines *Astragalus armatus* était de 4,21% (Boual et al., 2014).

Liu et al. (2017) rapportent qu'un volume élevé de solvant par apport à la matière à extraire facilite la solubilisation des polysaccharides. Ainsi, la température en tant que variable

indépendante augmente la capacité du solvant à solubiliser les composés et diminue la viscosité du milieu d'extraction ce qui permet une meilleure pénétration du solvant dans la matrice solide (Eikani et *al.*, 2012).

L'analyse biochimique des extraits polysaccharidiques issus des graines d'*A. maurorum* Medik. a montré des valeurs moyennes de composition en oses totaux supérieures à 40% et atteignant jusqu'à 54,55 % pour C1 80. Une faible teneur en oses a été notée pour la fraction MU40 extraite à 40°C (24,23%) traduisant la faible extraction des polysaccharides par rapport à d'autres fractions non glucidiques solubles à cette température. Sur l'ensemble des fractions, le dosage des différentes familles de composés a révélé la présence majoritaire d'oses neutres, des concentrations faibles en oses acides et protéines, ainsi que des quantités non négligeables de composés phénoliques. Pour rappel, un prétraitement de dépigmentation a été réalisé uniquement lors de l'extraction des fractions GD1 et **GD2**. Il semblerait que ce traitement soit assez peu efficace, ces deux fractions ayant des contenus en composés phénoliques peu différents des autres fractions. La précipitation des polysaccharides extraits deux fois à l'isopropanol effectuée pour toutes les fractions peut expliquer les faibles différences observées entre les fractions issues de traitements de dépigmentation et les autres. Ces contenus faibles en composés phénoliques et protéines confirment l'efficacité de précipitation alcoolique dans la purification de polysaccharides et rendent inutiles les traitements de dépigmentation précédant les extractions.

Tableau 7. Composition globale des extraits de polysaccharides hydrosolubles des graines *Alhagi maurorum* Medik.

	MU40	C1GP4-8	C2GP4-8	MU80	C1 80	C2 80	GD1	GD2	GND1	GND2
Rendement (%)	0,065	3,14	9,83	2,18	11,85	3,48	3,15	8,96	9,1	3,3
Masse (g)	0,013	0,62	1,96	0,43	2,37	0,69	0,63	1,79	1,82	0,66
Oses Totaux¹ (%)	24,23 ± 0,9	40,25 ± 1,5	43,95 ± 2,6	44,85 ± 1,6	54,55 ± 3,6	50,05 ± 3,4	45,72 ± 1,25	49,21 ± 3,7	41,77 ± 2,1	53,00 ± 5,2
Oses Neutres² (%)	-----	41 ± 2,4	51 ± 0,9	39 ± 1,4	62 ± 1,4	67 ± 2,1	52 ± 1,1	59 ± 2,0	48 ± 2,1	54 ± 3,00
Oses Acides³ (%)	-----	13 ± 1,1	14 ± 0,5	16 ± 3,0	13 ± 0,5	15 ± 0,6	13 ± 1,5	13 ± 2,9	16 ± 2,1	16 ± 1,3
Composés phénoliques⁴ (%)	-----	12 ± 4,9×10 ⁻³	10 ± 0,5×10 ⁻³	11 ± 19×10 ⁻³	7 ± 3,21×10 ⁻³	9 ± 2,08×10 ⁻³	10 ± 1,52×10 ⁻³	8 ± 2×10 ⁻³	12 ± 12,5×10 ⁻³	9 ± 2,51×10 ⁻³
Protéines⁵ (%)	-----	4,3 ± 0,2	1,6 ± 0,05	4,9 ± 0,04	2,8 ± 0,07	3,4 ± 0,3	4,2 ± 0,3	2,3 ± 0,1	4,7 ± 0,2	2,9 ± 0,6

¹Dubois et al. (1956) ; ²Monsigny et al. (1988); ³Blumenkrantz et Asboe-Hansen (1973); ⁴Bradford (1976); ⁵Singleton et al. (1999)

----- ; n'est pas déterminée

% : m/m

III.3. Analyse structurale des polysaccharides extraits

III.3.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IR-TF)

L'analyse des spectres IR des trois fractions de polysaccharides **GND2**, **GD2** et **C1GP4-8** révèle des bandes similaires caractéristiques des polysaccharides entre 526 et 3354cm^{-1} (figure 36). Ces spectres sont dominés par les contributions des fonctions C=O, C-O et C-H dans la gamme de longueurs d'ondes 527 - 1727cm^{-1} .

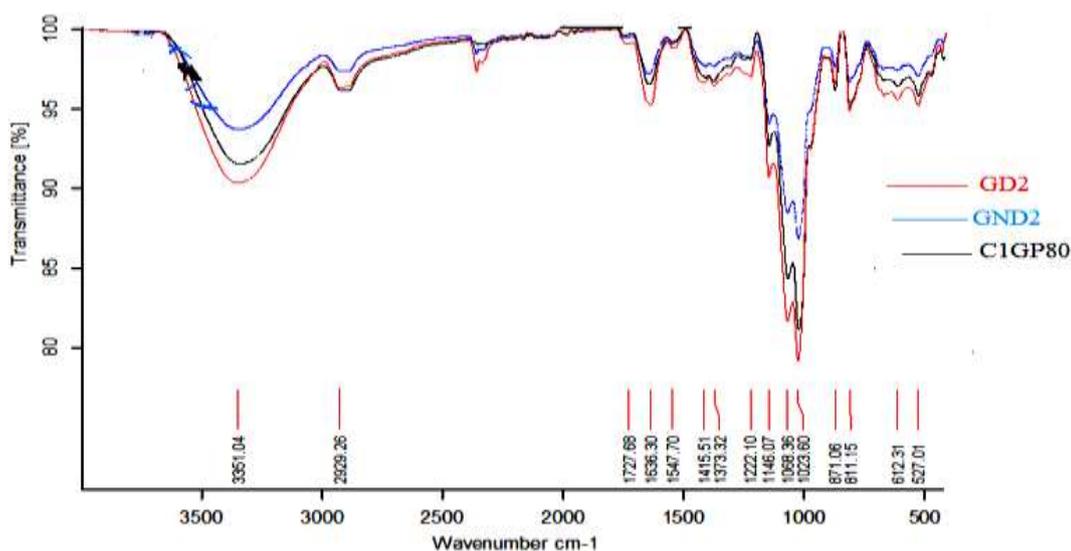


Figure 36. Spectres IR obtenu pour la fraction GND2.

Le spectre IR de la fraction **GD2** (figure 37), montre une large bande intense à $3351,04\text{ cm}^{-1}$ correspondant à la vibration d'élongation des groupements hydroxyles (-OH), tandis qu'un faible signal obtenu à $2929,26\text{cm}^{-1}$ est attribué à la vibration asymétrique du groupement C-H (Rjeibi et *al.*, 2019).

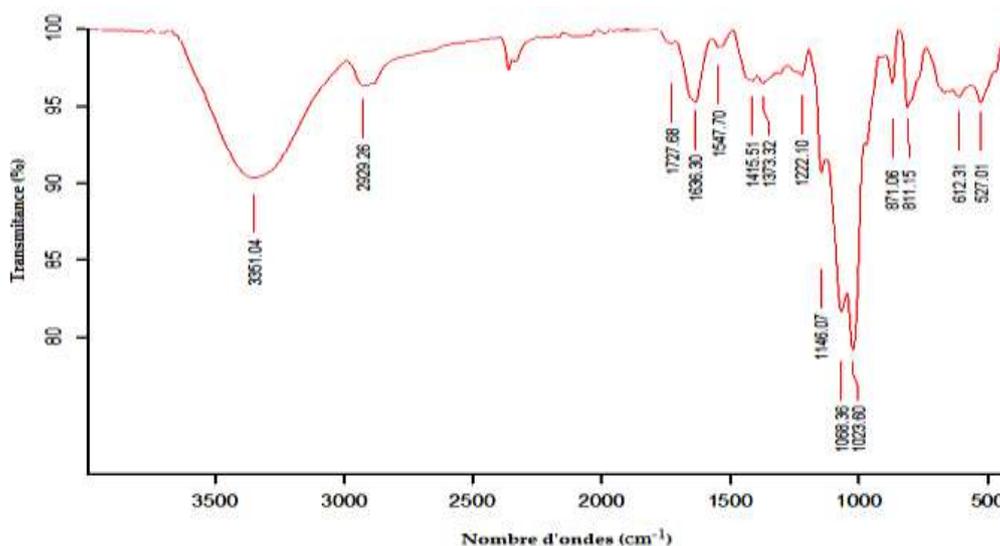


Figure 37. Spectre Infra-rouge de la fraction GD2.

Les bandes d'absorption autour de $1636,30\text{cm}^{-1}$ et de $1222,10\text{cm}^{-1}$ à 1547cm^{-1} ont été respectivement attribuées à la présence de groupements carboxylates (C=O) (Lukova et *al.*, 2020) et vibrations rotationnelles des groupements aliphatiques (C-H) (Chouana, 2017). Le pic obtenu à $1146,07\text{cm}^{-1}$ a été attribué aux fonctions C-O des hydrates de carbone (Patel et *al.*, 2018). Les pics à $1023,60\text{cm}^{-1}$ et $1068,36\text{cm}^{-1}$ suggèrent une forme pyranose des monosaccharides constituant les polysaccharides GD2 (Ren et *al.*, 2017). Les bandes d'absorption à $871,06\text{cm}^{-1}$ et $811,15\text{cm}^{-1}$ correspondent aux configurations de type α pour les anoméries des résidus engagés dans la chaîne principale du polysaccharide GD2 (Shabani et *al.*, 2016) et plus précisément des résidus de α -D-galactopyranoses (Xu et *al.*, 2009 ; Tamaki et Tako, 2010).

III.3.2. Analyses structurales des polysaccharides

L'analyse de la composition en oses constitutifs des fractions **C1GP4-8** et **GD2** a été réalisée par deux méthodes chromatographiques, à savoir, la chromatographie échangeuse d'anions haute performance à détection ampérométrique pulsée (CEAHP-DAP) et la chromatographie en phase Gazeuse couplée à la spectrométrie de Masse avec Impact Electronique (CG-SM/IE).

Après analyse par CEAHP, les deux fractions **C1GP4-8** et **GD2** se sont révélées majoritairement composées de mannose et de galactose avec des ratios molaires mannose/galactose (M/G) de 1,41 et 1,27. De faibles quantités de fucose, rhamnose, arabinose, glucose, acide galacturonique et de l'acide glucuronique, ont également été détectées laissant présager d'un galactomannane présentant une pollution partielle par des composés pectiques. Les mêmes fractions analysées après hydrolyse et dérivatisation par la CG-SM/IE (figure 38) se sont révélées exclusivement composées de mannopyranose et de galactopyranose (abondance du rapport m/z: 204/217 comme décrit par Harris et *al.* (1984)) confirmant la présence de galactomannane de ratios M/G de 2,22 et 2,44.

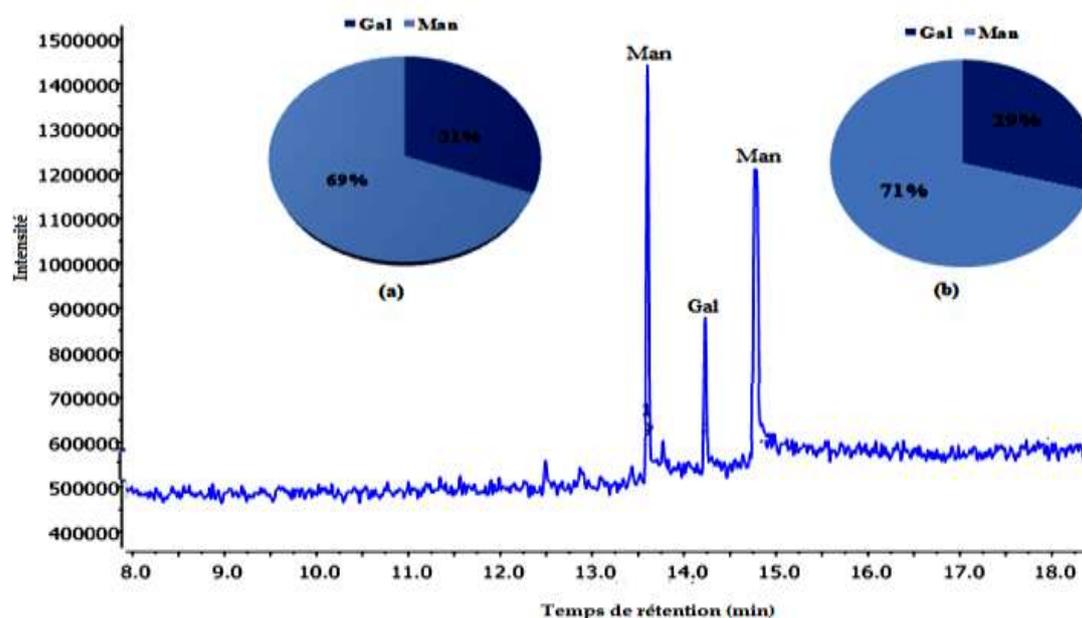


Figure 38. Composition en monosaccharides des fractions **C1GP4-8** (a) et **GD2**(b) analysées par CG-SM/IE et chromatogramme de la fraction **GD2**.

Ces rapports sont proches de ceux rapportés pour les polysaccharides extraits de graines de *Fabaceae* (Bento et al., 2013), *A. persarum* Boiss (2,00) (Rakhimov et Dzhumamuratova, 1993) et *Sonoran mezquite* (2,05) (Figuroa et al., 2017). Kodiralieva et Rakhmanberdyeva ont publié un ratio M/G de 0,5 pour le polysaccharide extrait de graines d'*A. pseudalhagi* (MB) Desv., ainsi que la présence d'autres monosaccharides constitutifs tels que l'arabinose, le xylose et le rhamnose (contamination ou artefacts analytiques). Comme largement décrit dans la littérature, ces résultats sont cohérents avec ceux issus de l'analyse de nombreux polysaccharides de graines de *Fabaceae*, ces dernières étant décrites comme sources de galactomannanes (Chouana et al., 2017 ; Boual et al., 2015) (partie I.3.1). Les différences de teneurs en monosaccharides sont fortement influencées d'une part, par les procédés d'extraction et de purification et d'autre part, par la nature du sol, la température et le taux d'humidité dans les zones de récolte (Sáenz et al., 2004 ; Petera, 2016) mais surtout par le patrimoine génétique (Saulnier et al., 2007) et l'état physiologique de la plante (Buckeridge et al., 2000). Ainsi, la teneur en mucilage brut composé principalement de monosaccharides neutres (rhamnose, arabinose, galactose et glucose) est augmentée dans tous les organes de *Kosteletzkya pentacarpos* (*Malvaceae*) en réponse à un stress (Zinc). Le zinc a induit l'augmentation de la teneur en hémicellulose et diminue la teneur en lignine et en cellulose dans la tige. Parallèlement, les teneurs des acides uroniques dans les racines et les tiges sont

augmentées alors qu'une proportion élevée d'acides uroniques a été observée dans les feuilles (Zhou et *al.*, 2020).

III.3.4. Spectroscopie RMN de GD2

Comme illustré dans les figures 39, 40 et 41, les analyses 1D-RMN (^1H et ^{13}C) et 2D-RMN ($^1\text{H}/^{13}\text{C}$ HSQC) de la fraction **GD2** ont révélé des signaux spécifiques et caractéristiques des galactomannanes (Tableau 8).

Le spectre de ^1H -RMN (figure 39) a montré deux signaux distincts à 5,51 et 5,23ppm attribués aux protons anomériques H-1 α de l' α -D-galactopyranose (G1) et H-1 β du β -D-mannopyranose (M1/M1'), respectivement. Le rapport molaire de M/G calculé à partir des intégrations des surfaces de pic relatives de ces deux signaux est de 1,96. Cette valeur est cohérente avec celle obtenue après l'analyse par la CG-SM/IE (M/G= 2,22).

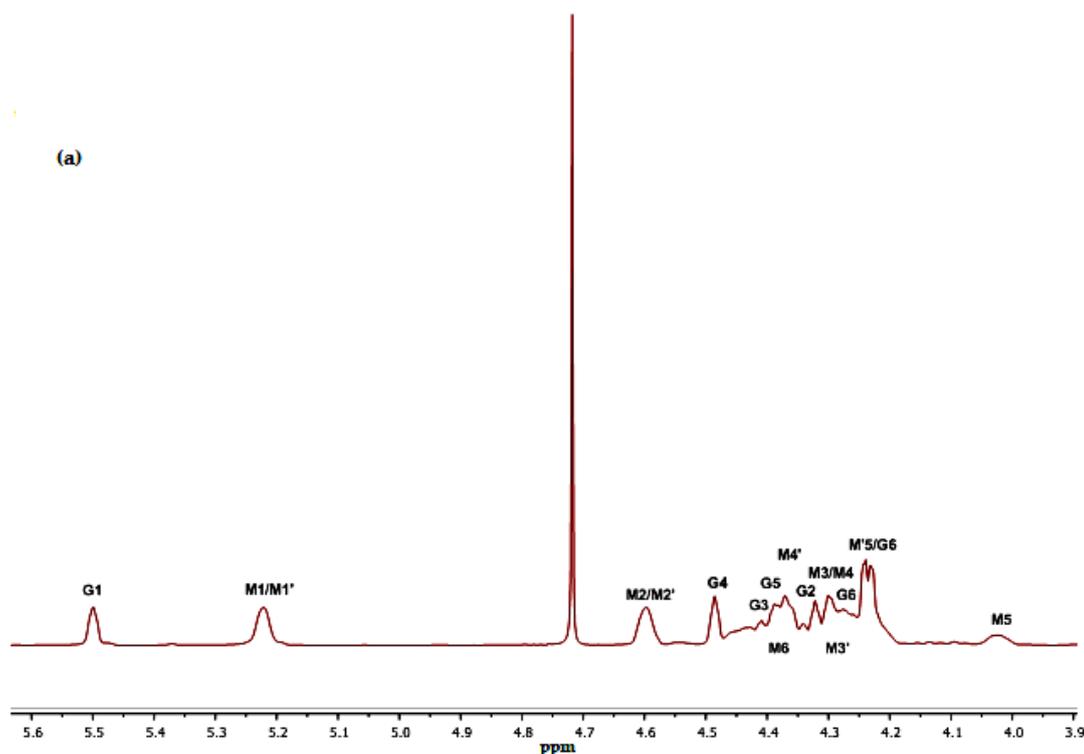


Figure 39. Spectre ^1H -RMN obtenu pour la fraction **GD2**.

Comme le montre le spectre ^{13}C -RMN (figure 39), les signaux anomériques à 99,51 et 100,67 ppm ont été attribués au C-1 de l' α -D-galactopyranose et du β -mannopyranose non substitués, respectivement. De plus, les signaux observés à 61,85, 61,29 et 67,27 ppm ont été attribués au C-6 de l' α -D-galactopyranose (G6), au C-6 du β -D-mannopyranose non substitué (M6) et au C-6 d'un β -D-mannopyranose substitué (M'6) respectivement.

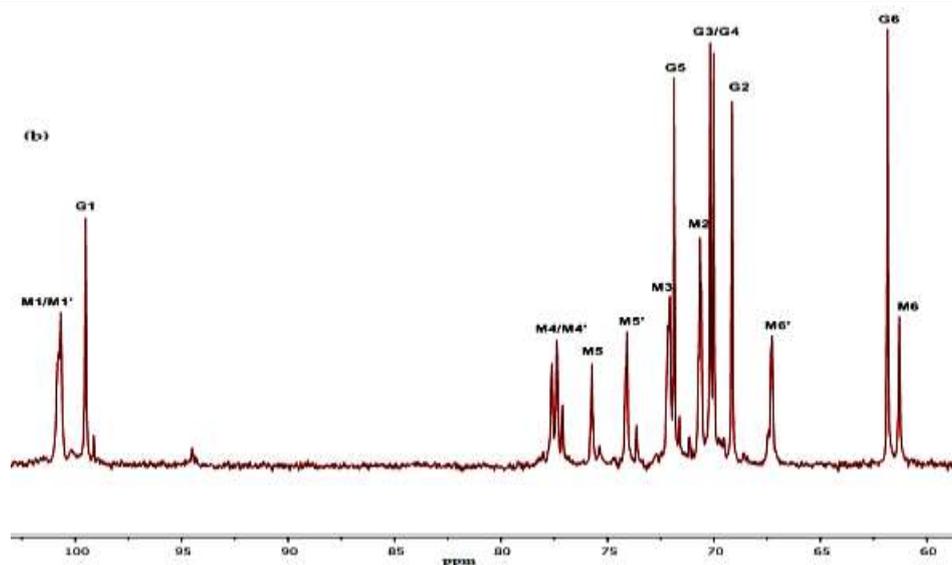


Figure 40. Spectre ^{13}C -RMN obtenu pour la fraction **GD2**.

Comparativement à d'autres galactomannanes extraits des graines de différentes plantes légumineuses, le rapport M/G de **GD2** est légèrement plus élevé que ceux estimés pour *Astragalus gombo* Bunge, *Sesbania virgata* et *Leucaena leucocephala* à 1,7, 1,5 et 1,6 respectivement (Srivastava et Kapoor, 2005 ; Figueroa et al., 2017). La pureté du galactomannane et les rapports M/G des graines de *Fabaceae* ont été décrits comme fortement liés à l'origine de la plante et aux procédés d'extraction (Rakhimov et Dzhumamuratova, 1993 ; Srivastava et Kapoor, 2005 ; Chaubey et Kapoor, 2001).

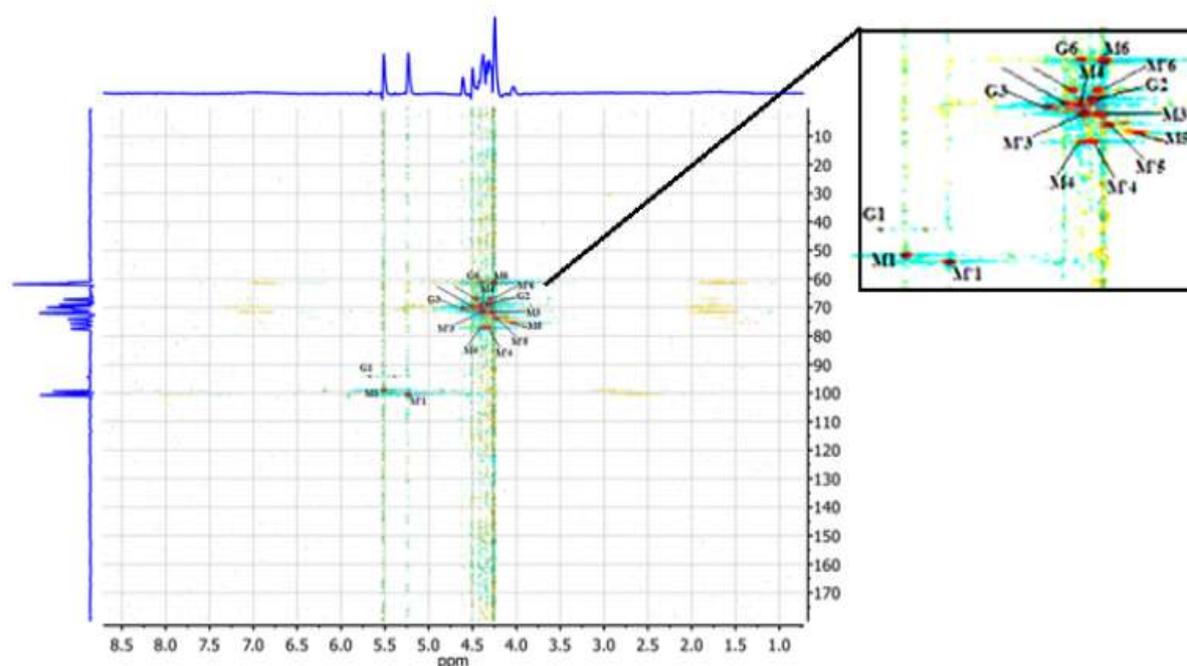


Figure 41. Spectre $^1\text{H}/^{13}\text{C}$ HSQC de la fraction **GD2** à 100g/L dans le D_2O . M : Mannose; G : Galactose.

Tableau 8. Déplacements chimiques ^1H et ^{13}C (ppm) de la fraction **GD2** extrait des graines *Alhagi maurorum* Medik.

Type d'ose	Déplacement chimique (ppm)					
	H-1 C-1	H-2 C-2	H-3 C-3	H-4 C-4	H-5 C-5	H-6 C-6
α -D-galactopyranosyl (G)	5,51 99,51	4,32 69,15	4,41 70,17	4,50 70,01	4,39 71,87	4,25 61,85
β -D-mannopyranosyl non substitué (M)	5,23 100,67	4,61 70,66	4,30 72,16	4,31 77,34	4,03 75,73	4,38 61,29
β -D-mannopyranosyl substitué (M')	5,23 100,77	4,61 70,66	4,30 72,16	4,36 77,50	4,22 74,08	4,31 67,27

A partir des spectres RMN, il a été possible de confirmer que le polysaccharide constitutif des graines *Alhagi maurorum* Medik. est de type galactomannane. Il est constitué d'une chaîne principale de type β -(1,4)-D-Mannane substituée en position O-6 par des résidus de α -D-galactopyranose avec un ratio molaire de M/G=2,22 (figure 42):

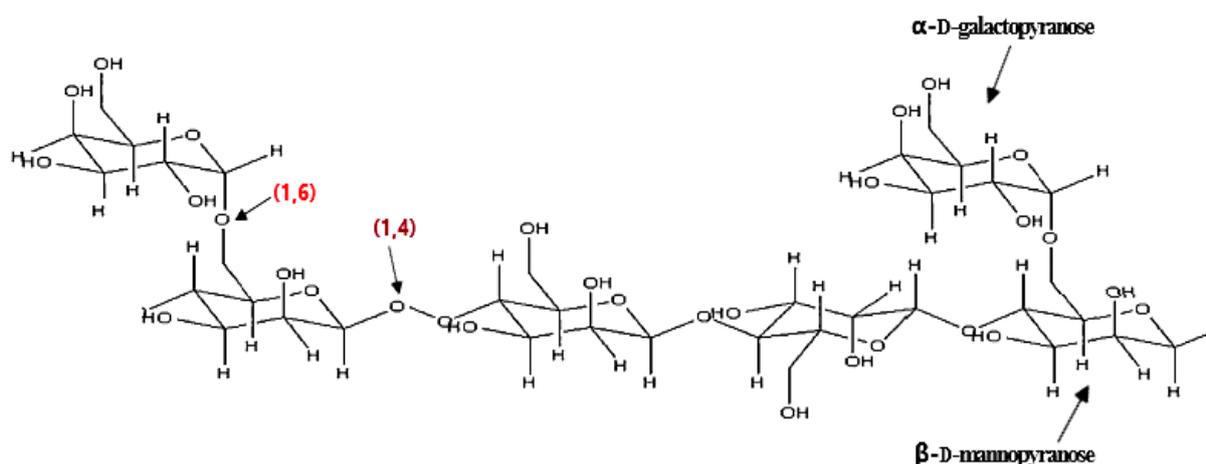


Figure 42. Structure proposée du galactomannane constitutif des graines *Alhagi maurorum* Medik.

III.4. Caractéristiques physicochimiques

III.4.1. Détermination des grandeurs macromoléculaires par CES/DLLMA

Les grandeurs caractéristiques moyennes intrinsèques de **GD2**, **MU80** et **G1-80** à savoir la masse moléculaire moyenne en poids (M_w), la masse moléculaire moyenne en nombre (M_n) et la viscosité intrinsèque $[\eta]$ ont été déterminées en milieu dilué par Chromatographie d'Exclusion Stérique Haute Performance couplée à un détecteur de diffusion de lumière multi-angles, à un réfractomètre différentiel et à un viscosimètre en ligne (Tableau 9).

Tableau 9. Caractéristiques physicochimiques de **GD2**, **MU80** et **G1-80** analysées par CES/DLLMA.

	M_w (g/mol)	M_n (g/mol)	Indice de polydispersité (\bar{D})	Viscosité intrinsèque [η](mL/g)	R_h (nm)
GD2	$1,40 \times 10^6$	$2,7 \times 10^5$	5,2	970	57,3
MU80	$1,32 \times 10^5$	$3,2 \times 10^4$	4,1	251	15
G1-80	$9,9 \times 10^5$	$3,8 \times 10^5$	2,6	709	44,3

R_h : Rayon hydrodynamique

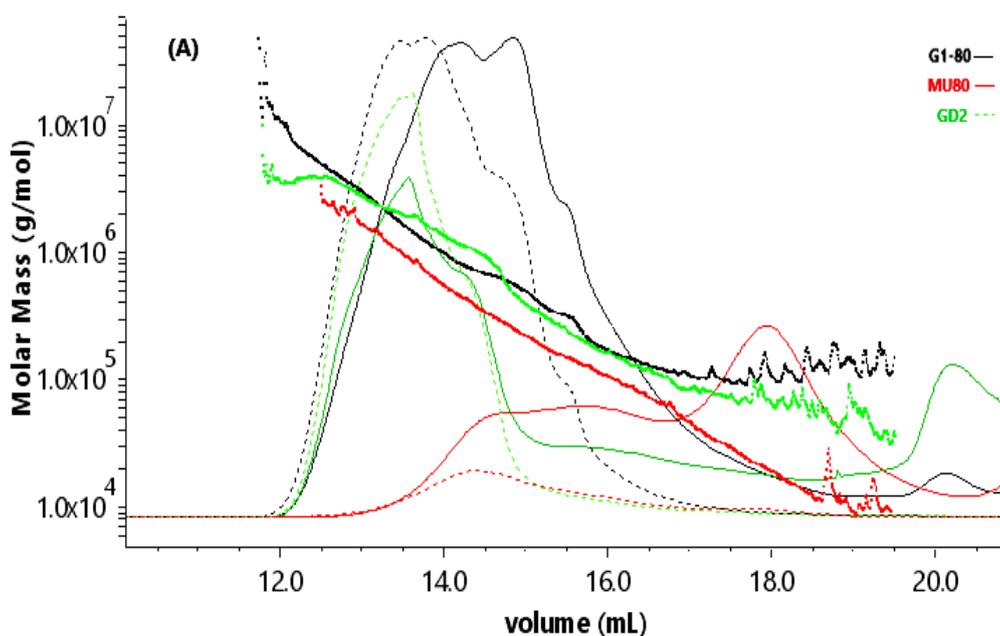
Les taux de récupération des échantillons de polysaccharides **GD2**, **MU80** et **G1-80** en sortie de colonne après filtration étaient de 42%, 32% et 75% respectivement des masses initiales d'échantillons avant filtration en raison de la rétention sur le filtre. Donc, les valeurs obtenues ne représentent pas totalement le polymère natif, qui possède probablement une taille moléculaire assez importante. Les valeurs des M_w et M_n de la fraction **GD2** estimées à $1,4 \times 10^6$ et $2,7 \times 10^5$ g/mol respectivement apparaissent élevées comparées avec les masses moléculaires moyennes des fractions **G1-80** ($M_w=9,9 \times 10^5$ g/mol) et **MU80** ($M_w=1,32 \times 10^5$ g/mol). Ces différences de masses moléculaires trouvent leur explication dans les processus de traitement et d'extraction des polysaccharides. Il est bien noté que le lavage des graines non broyées à 80°C a généré des polysaccharides (**MU80**) de plus faible masse moléculaire en comparaison avec la fraction G1-80 issue de même lot de graines (broyage et extraction à 80°C). Cette dernière extraction semble donc libérer des polymères de plus haute masse moléculaire ce qui est assez logique, le broyage les rendant plus accessibles et augmentant les surfaces d'échange. Le prétraitement alcoolique des graines avant d'être macérées à 80°C (**GD2**) a également facilité l'élimination des contaminants de différentes familles chimiques présents dans la matière végétale (pigments...) et l'extraction de polysaccharides de haute masse molaire. Kai et deOliveira (2010), ont examiné l'influence de différents temps d'extractions sur les propriétés physicochimiques des xyloglucanes obtenus à partir de cotylédones broyés et dégraissés de *Hymenaea courbaril*(*Fabaceae*) par extraction aqueuse à 25°C pendant 0,25, 0,5, 1, 5, 15, 24 et 48 h. Les résultats ont montré que les xyloglucanes obtenus avec des temps d'extraction plus longs (24 et 48h) avaient une masse molaire moyenne supérieure à $1,32 \times 10^6$ g/mol en comparaison avec ceux obtenus avec des temps plus courts. Selon Mathur (2012), le poids moléculaire des galactomannanes peut être très diversifié en fonction de paramètres tels que leur origine géographique et botanique, les

conditions de fractionnement et d'extraction (par exemple, le pH, la température, le type de solvants utilisés) et le degré de substitution ou de dépolymérisation des galactosyles. Ainsi, le volume hydrodynamique peut varier de manière significative avec le nombre, positions et longueurs des branches des chaînes polymères (Gaborieau et al., 2011).

Ces résultats sont cohérents avec les autres galactomannanes rapportés dans la littérature. Le galactomannane obtenu à partir des graines d'*Astragalus gombo* Bunge a une M_w de $1,1 \times 10^6$ et une M_n de $0,82 \times 10^5$ g/mol (Chouana et al., 2017). De plus, les M_w des galactomannanes de *Delonix regia* et *Caesalpinia gilliesii* sont respectivement de $7,23 \times 10^5$ et $1,17 \times 10^5$ g/mol et $1,17 \times 10^5$ g/mol (Nwokocha et al., 2018 ; Abdel-Megeed et al., 2019).

Une polydispersité (rapport M_w/M_n) élevée est observée avec les trois fractions, notamment la fraction GD2 (5,2). Ces valeurs sont supérieures à celles rapportées pour plusieurs espèces de légumineuses qui se situent plutôt dans la gamme de 1,23 à 2,79 (Nwokocha et al., 2018 ; Abdel-Megeed et al., 2019 ; Fidan et al., 2020 ; Boual et al., 2015) et indiquent une forte hétérogénéité de la distribution des masses moléculaires au sein de l'échantillon.

La viscosité intrinsèque exprimant le volume hydrodynamique occupé par les chaînes polysaccharidiques dans une solution diluée (Yin et al., 2015), a été estimée pour **GD2** à 970 mL/g suivie de 251 mL/g et 709 mL/g pour **MU80** et **G1-80** respectivement. Ces valeurs dépendent de la masse moléculaire, de la conformation des chaînes de polymères (linéaire ou ramifié, rigide ou flexible) ainsi que de la nature du solvant (Cui, 2005 ; Kalegowda et al., 2017).



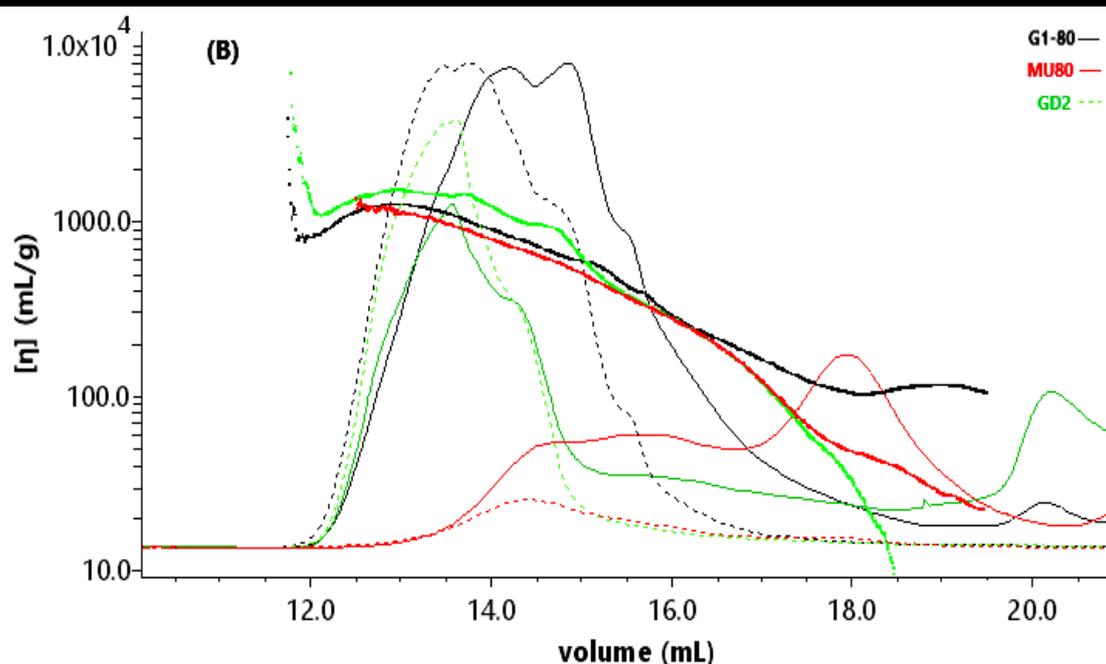


Figure 43. Evolution de la masse moléculaire (A) et de la viscosité intrinsèque (B) du galactomannane extrait des graines d'*Alhagi maurorum* Medik. (—): Détection réfractométrique; (...): signal de diffusion de la lumière.

III.4.2. Propriétés rhéologiques de GD2

III.4.2.1. Mode d'écoulement

Les propriétés d'écoulement des solutions de **GD2** extraits des graines *A. maurorum* Medik. de 0,1 à 2,5% (m/v) préparées dans de l'eau ultrapure ainsi que des solutions préparées dans le NaCl 0,5M (0,25 à 2,5% (m/s)) ont été mesurées à 5, 25 et 60°C pour des vitesses de cisaillement allant de 10^{-3} au 10^3 s^{-1} . A partir des rhéogrammes présentés dans la (figure 42), il est possible d'observer que la viscosité apparente des solutions polysaccharidiques augmente avec la diminution du taux de cisaillement quelle que soit la concentration testée à l'exception de la solution de concentration égale à 0,1% (m/v), qui est typique d'un fluide newtonien. La raison probable de ce comportement étant que dans les solutions de concentrations faibles, les chaînes de polysaccharides gardent une plus grande distance les unes des autres ce qui limite fortement leurs interactions.

Un plateau newtonien est observé pour des faibles taux de cisaillement où la viscosité apparente est constante. Cela peut être due à l'équilibre entre le taux de perturbation des interactions et leurs générations (Yin et *al.*, 2016).

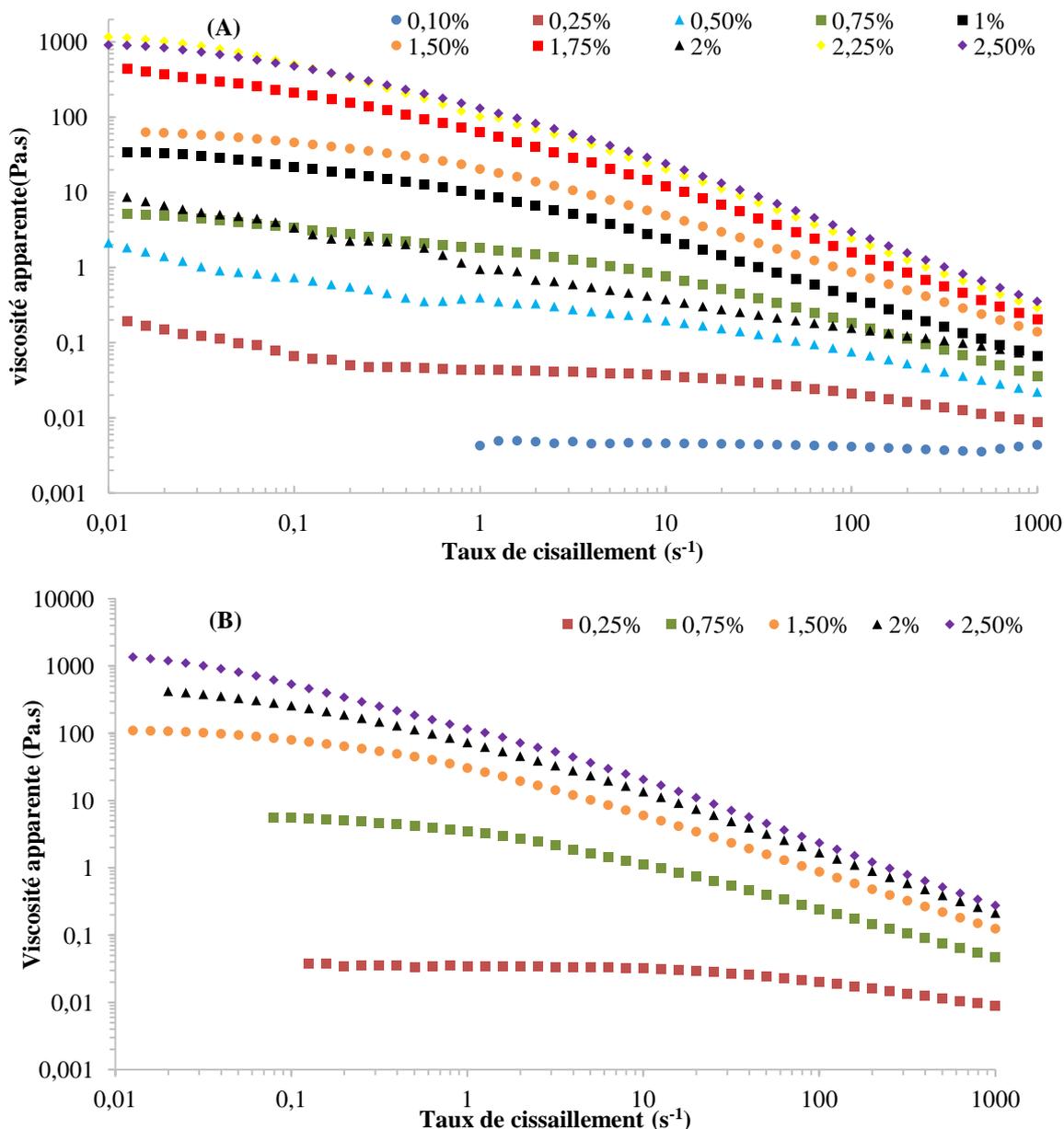
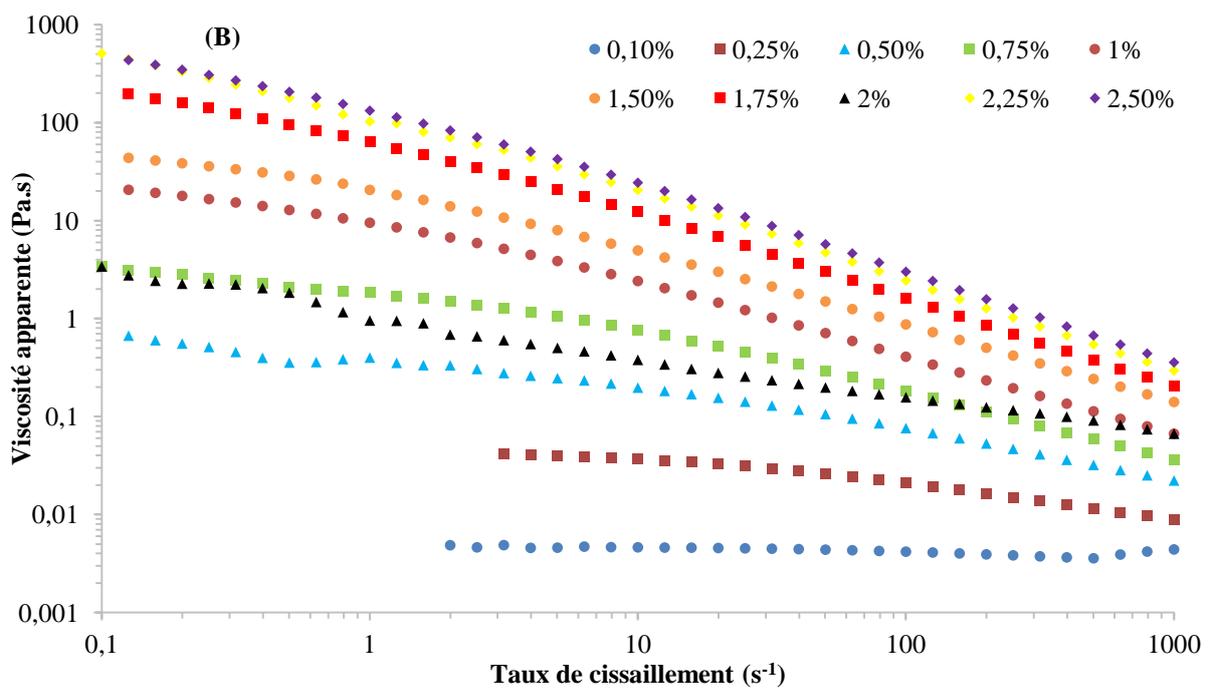
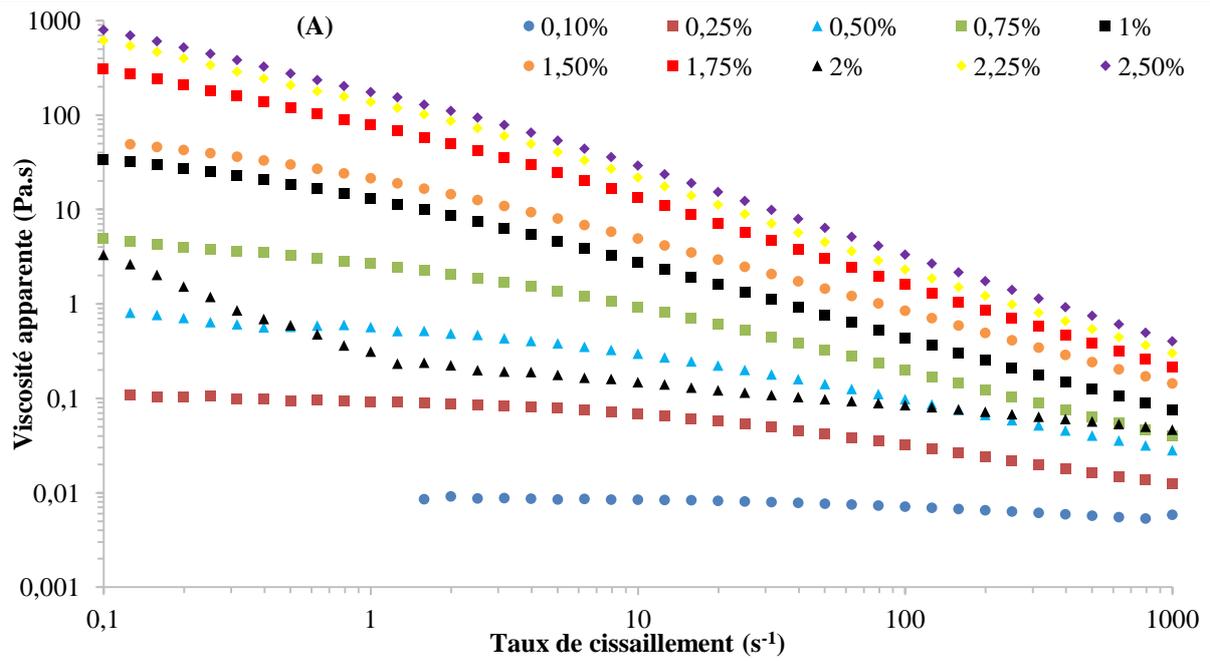


Figure 44. Influence des concentrations de polysaccharides **GD2** préparées dans l'eau ultrapure et le NaCl 0,5M sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement à 25°C. (A) solutions préparées dans de l'eau ultrapure et (B) solutions préparées dans le NaCl 0,5M.

Cependant, le comportement typique observé avec l'augmentation des concentrations est une diminution de la viscosité apparente avec l'augmentation du taux de cisaillement (figure 44). Ce comportement est typique d'un fluide pseudoplastique (rhéofluidifiant). En effet l'alignement des longues molécules de polymère positionnées de manière aléatoire dans la direction de l'écoulement diminue lorsque le taux de cisaillement augmente, ce qui entraîne moins d'interactions entre les chaînes de polymère adjacentes et donc une diminution de la

viscosité (Xu et *al.*, 2019). En outre, pour des régimes semi-dilués à concentrés, les chaînes de polymères commencent à s'enchevêtrer les unes les autres ce qui entraîne une interpénétration des chaînes et leurs chevauchements conduisant à la formation d'une structure enchevêtrée (Saidou, 2013). La viscosité apparente d'une solution est influencée par plusieurs paramètres, la masse moléculaire du polymère (Long et *al.*, 2019), ainsi que par d'autres paramètres, à savoir le pH, la concentration, la température et les charges électrostatiques, (Hosseini et *al.*, 2017). L'effet de ce dernier sur les propriétés rhéologiques des polysaccharides est observé notamment avec la présence des sels en contre-ionisant leurs charges, ce qu'ils vont diminuer les phénomènes de répulsions électrostatiques (Peters, 2016). La figure 44 présente la variation de la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement à 25°C, en absence (A) et en présence (B) de NaCl 0,5M. Il est noté que le NaCl 0,5M n'a que très légèrement abaissé la viscosité apparente du polysaccharide à 0,25% (m/v) du fait de caractère neutre de galactomannane **GD2**.

L'influence des températures à 5, 25 et 60°C sur la viscosité apparente des solutions de polysaccharides **GD2** préparées dans de l'eau ultrapure et le NaCl 0,5M en fonction du taux de cisaillement est présentée dans les figures 45 et 46 respectivement. La viscosité apparente des solutions aqueuses et salines diminue proportionnellement à l'augmentation de la température à concentration égale. Ce phénomène est dû à la diminution de l'enchevêtrement intermoléculaire du fait de l'énergie apportée par l'augmentation de la température. En outre, l'augmentation de la distance entre les molécules a également rendu la chaîne moléculaire facilement active (Wu et *al.*, 2015).



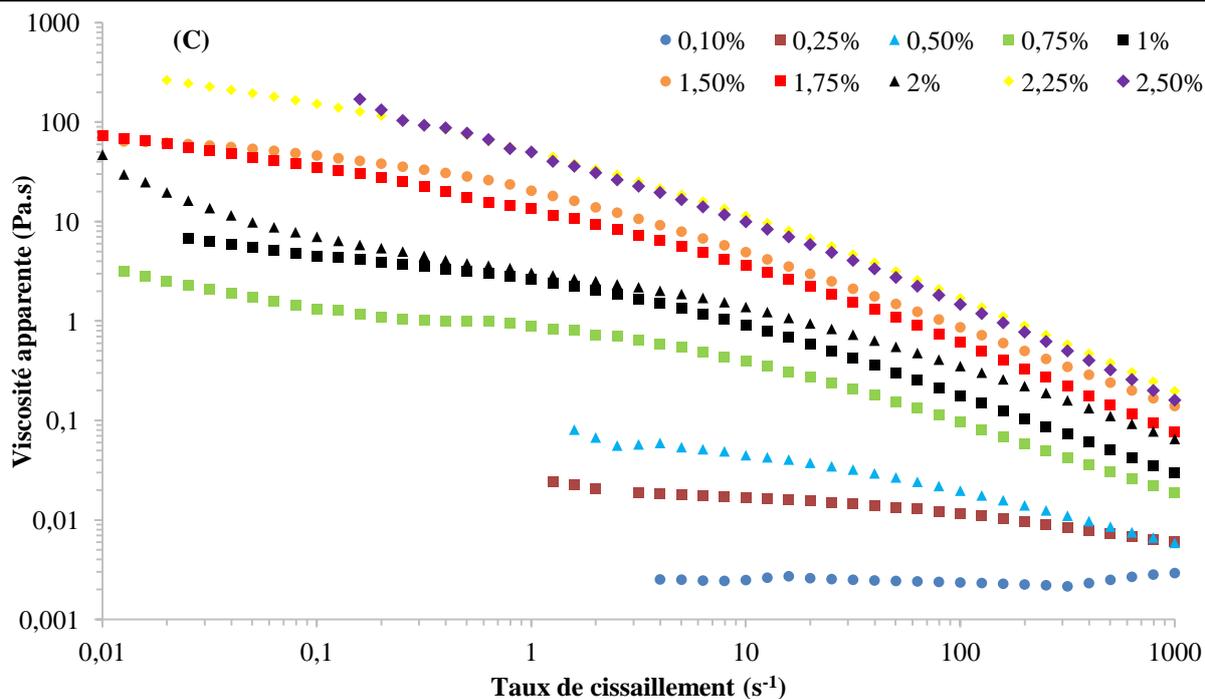
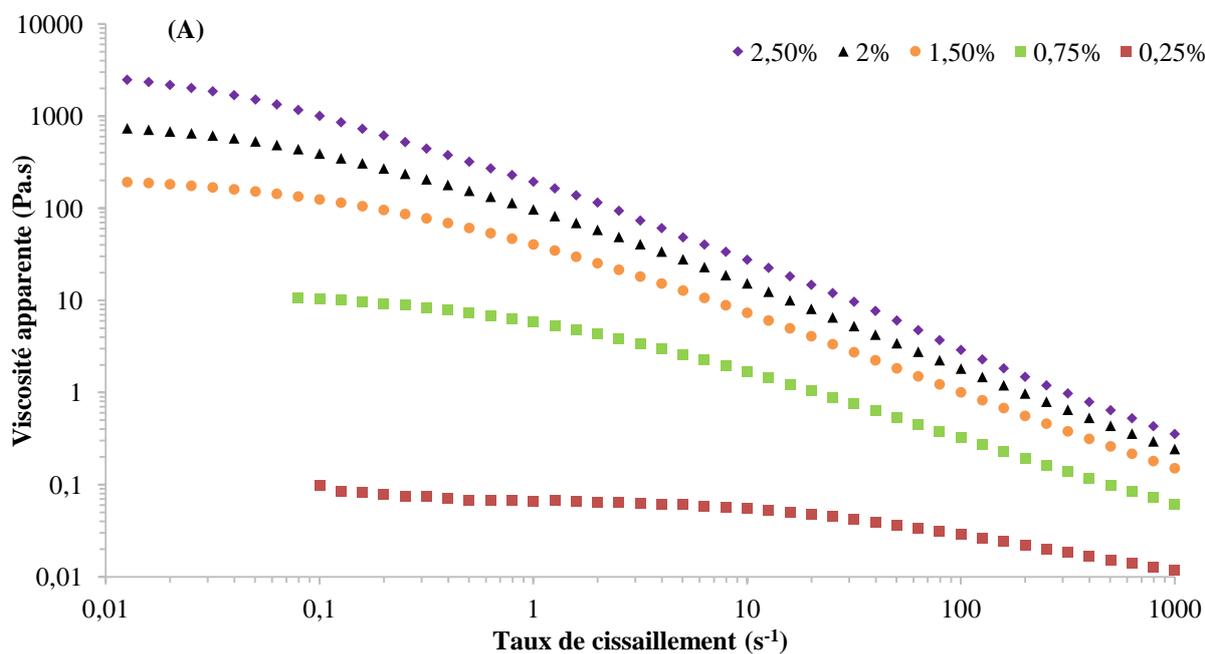


Figure 45. Influence des températures 5 (A), 25 (B) et 60°C (C) sur la viscosité apparente des solutions de polysaccharides **GD2** préparées dans de l'eau ultrapure.



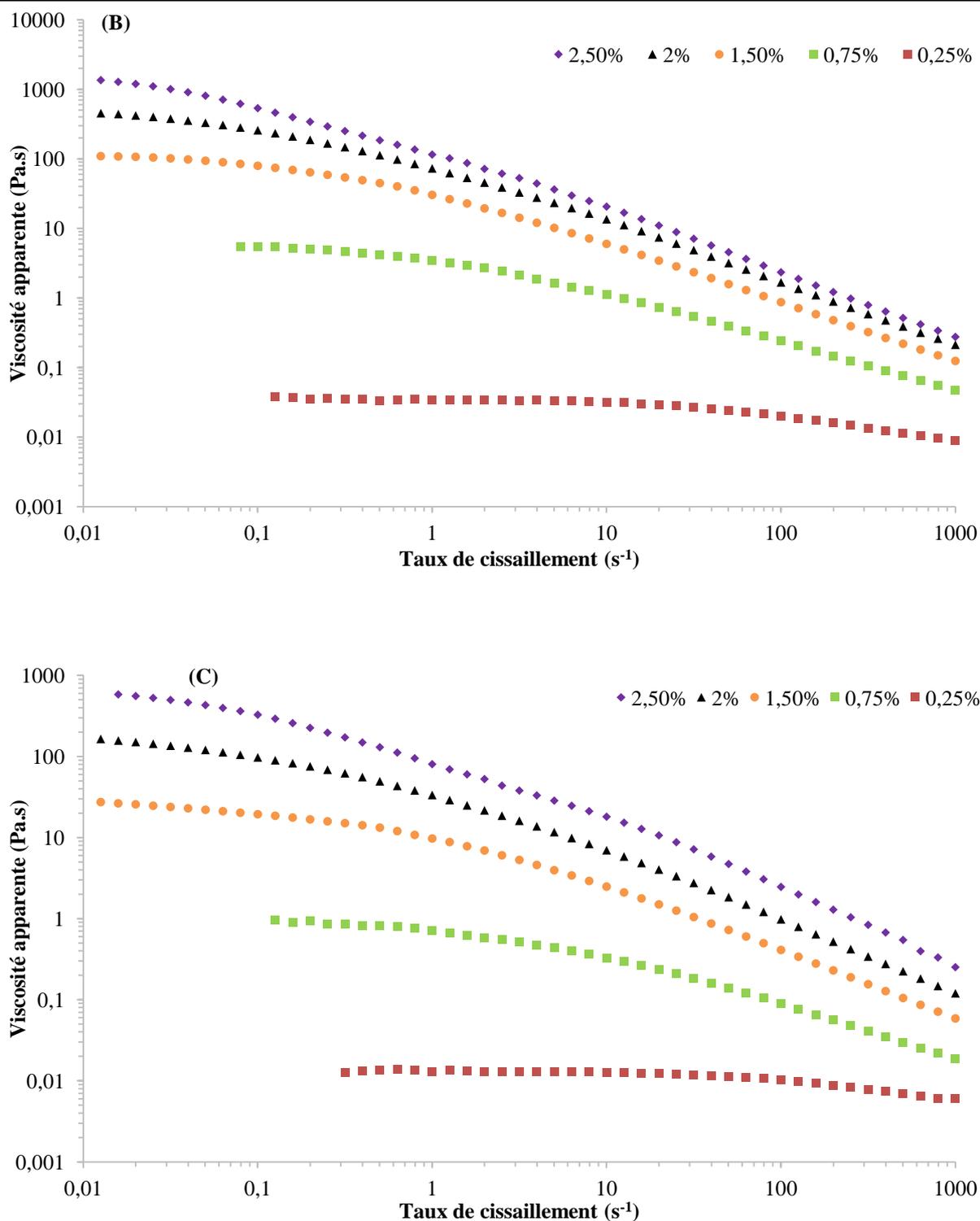


Figure 46. Influence des températures 5 (A), 25 (B) et 60°C (C) sur la viscosité apparente des solutions de polysaccharides **GD2** préparées dans le NaCl 0,5M.

La variation de la viscosité des solutions aqueuses et salines de **GD2** à 5, 25 et 60°C peut être décrite par la loi d'Arrhenius selon l'équation 19 (Haussonne et *al.*, 2005 ; Petera, 2016) :

$$\text{Equation (19)} \dots \eta = A \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \right]$$

Sachant que :

Ea : énergie d'activation ;

R : constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$) ;

A : constante pré-exponentielle d'Arrhenius ;

T : température absolue (Kelvin).

A la concentration 0,25% (m/v), le **GD2** enregistré une Ea de 0,20Kcal/mol plus faible en comparaison avec celles enregistrées pour les concentrations de 0,75, 1,5 et 2,5% soient 0,33, 1,82 et 11,51Kcal/mol respectivement (Tableau 10). Donc pour une concentration donnée en polysaccharides, une énergie d'activation Ea élevée indique de fortes interactions intra- et interchaînes de polysaccharides comme cela est observé avec la plupart des polysaccharides non ou peu ramifiés. Au contraire, une faible énergie d'activation d'écoulement indique de faibles interactions intra et interchaînes (Chouana, 2017).

Tableau 10. Calcul des énergies d'activation du galactomannane extraits des graines *A. maurorum* Medik. des températures de 5, 25 et 60°C, et à un taux de cisaillement fixe de $\gamma=100 \text{ s}^{-1}$.

Solution % (m/v)	Ea/R	Ea (Kcal/mol)
0,25	1705,8	0,20
0,75	2779,2	0,33
1,5	219,54	1,82
2,5	1384,8	11,51

En général, la viscosité des solutions de polysaccharides diminue avec l'augmentation de la température (figure 47). Cette diminution peut être liée à la transition de la solution d'un équilibre à un autre, à la dégradation des polysaccharides ou au changement de conformation des polysaccharides en solution (De Paula et Rodrigues, 1995).

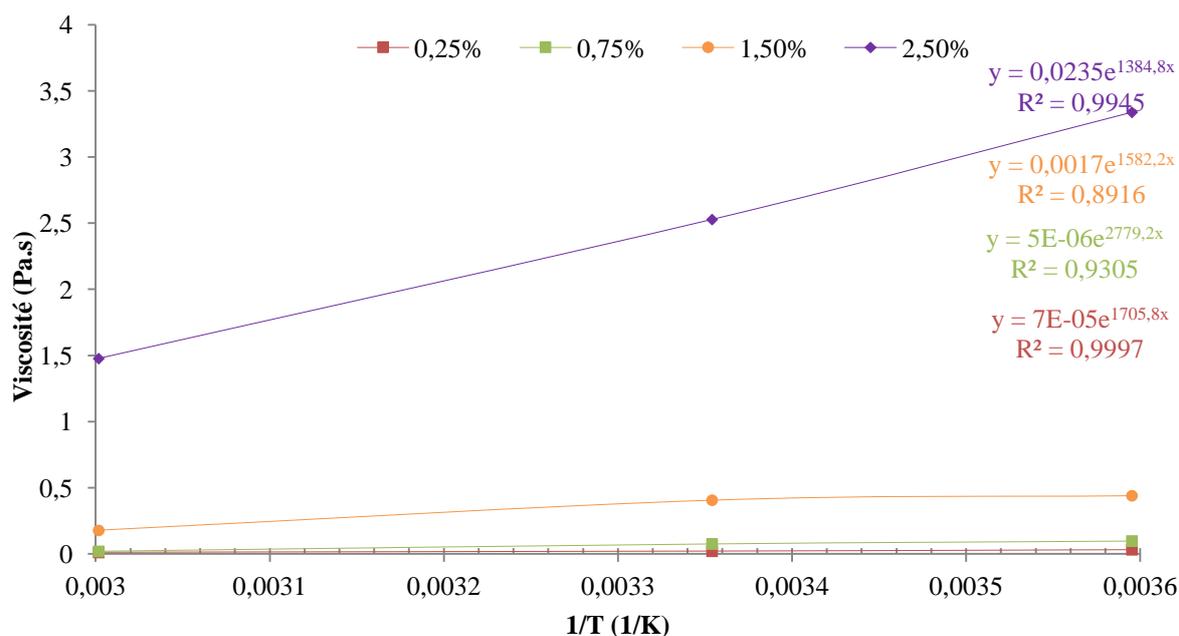


Figure 47. Effet de variation de la température sur la viscosité apparente à $\gamma=100s^{-1}$ des solutions aqueuses de 0,25, 0,75%, 1,5% et 2,5% (m/v) de **GD2**.

La concentration C^* est la concentration de transition entre le régime dilué et semi-dilué. Elle est déduite en traçant en échelle logarithmique l'évolution des viscosités spécifiques de solutions aqueuses de concentrations comprises entre 1 à 2,5% (m/v) à 25° (figure 48). Comme observé dans la figure 46, le point d'intersection des deux droites de régression correspond à la concentration C^* dénotant le début d'enchevêtrement des polysaccharides **GD2** à partir d'une concentration de 0,96g/L (0,096%). Cette valeur est cohérente avec celles rapportées pour les galactomannanes (Guar, caroube) de l'ordre de 0,1% et pour la gomme xanthane (0,05%). A noter que la masse moléculaire moyenne du polysaccharide **GD2** (Tableau 9) est assez importante (plus d'un million). En fait, Redgwell et *al.* (2005) expliquent que plus la masse moléculaire des polysaccharides est élevée plus la concentration critique de recouvrement est faible.

En outre, il est possible d'estimer la valeur de C^* en exploitant la viscosité intrinsèque déterminée dans la partie (II.6.1). Les auteurs (Graessley, 1974 ; Morris, Rees, Robinson et Young, 1980, Lapasin et Pricl, 1999 ; Doublier et Launay, 1981) donnent des coefficients différents dans la relation entre la C^* en fonction de la nature des polysaccharides étudiés tels que $C^* (0,77 \text{ à } 4)/[\eta]$. Avec $\eta=970\text{mL/g}$, la C^* du polysaccharide **GD2** est comprise entre 0,79 et 4,12g/L, ce qui est cohérent avec la valeur expérimentale de 0,96g/L et avec les

valeurs proposées par Chouana (2017) pour le galactomannane des graines d'*Astragalus gombo* avec des valeurs comprises entre 0,9 et 7,7 g/L.

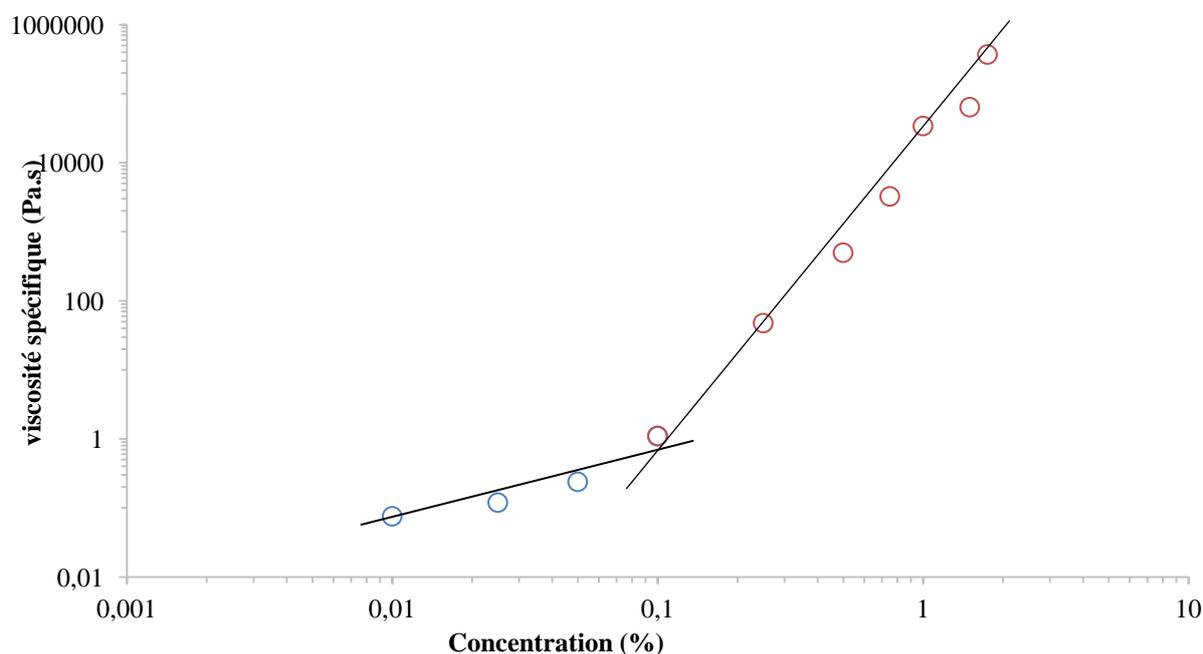


Figure 48. Détermination de la concentration critique de recouvrement du polysaccharide **GD2** extraits des graines *Alhagi maurorum* Medik à 25°C.

III.4.2.2. Mode oscillatoire

Les mesures en mode oscillatoire réalisées sur les solutions aqueuses et salines (NaCl 0,5M) de **GD2** (0,1 à 2,5% (m/v)) ont été déterminées afin d'évaluer leur viscoélasticité en suivant les variations des modules G' (module de conservation (Pa)) et G'' (module de perte (Pa)) en fonction de fréquences angulaires comprises entre 10^{-1} à 10Hz sont présentées dans les figures 49 et 50.

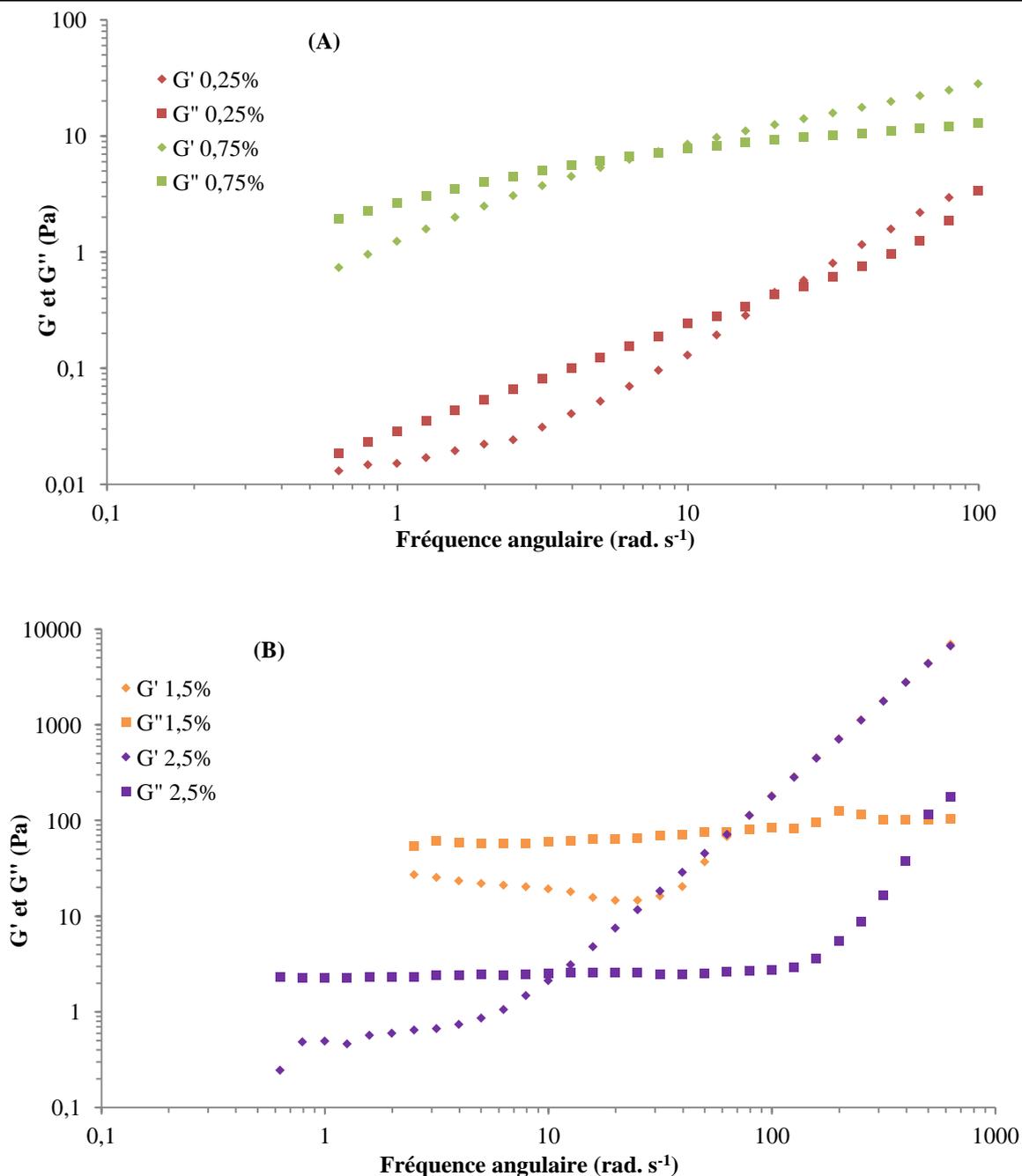
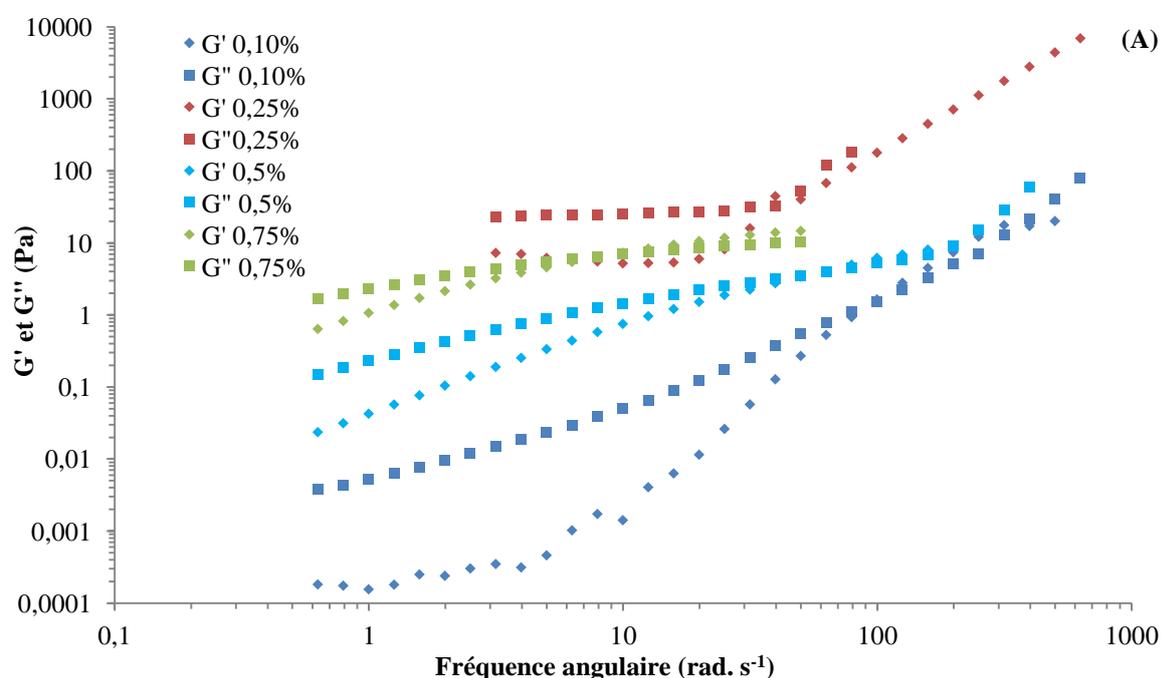


Figure 49. Représentation des modules complexes G' et G'' (A et B) en fonction de la déformation (%) des solutions salines de **GD2** extrait des graines d'*A. maurorum* Medik. à 25°C.

Pour les solutions de **GD2** préparées dans des solutions de NaCl 0,5M, aux basses fréquences d'oscillation allant de 0,6 à 70rad/s, les valeurs de G' (module de conservation) sont inférieures aux valeurs du module de perte G'' . Ces valeurs augmentent avec la fréquence d'oscillation. Pour les solutions aqueuses (figure 48) et à des fréquences d'oscillations de 0,6 allant jusqu'à 100rad/s, les valeurs de G'' sont au-dessus des valeurs de G' à l'exception de la solution de concentration égale à 2,5% (m/v). Ce comportement, est typique de celui d'un

fluide visqueux car les enchevêtrements ont suffisamment de temps pour se dissocier et se reformer (Dakia et *al.*, 2010). Cependant, l'augmentation de la concentration de la solution aqueuse à 2,5% (m/v) a générée la transition d'un comportement visqueux vers un comportement élastique ($G' > G''$). Ce dernier est observé aussi avec d'autres galactomannanes comme celui de GM extrait des graines d'*Astragalus gombo* (Chouana, 2017) et la gomme de caroube (Gillet et *al.*, 2014). Selon Agemura et *al.* (1995), l'augmentation de la concentration favorise l'apparition d'un réseau interpénétré et enchevêtré, difficile à dissocier, et donc au comportement élastique.

Les résultats obtenus montrent une forte viscoélasticité même en faible concentration de galactomannane extrait de graines *A. maurorum* Medik. en formant des gels dans l'eau.



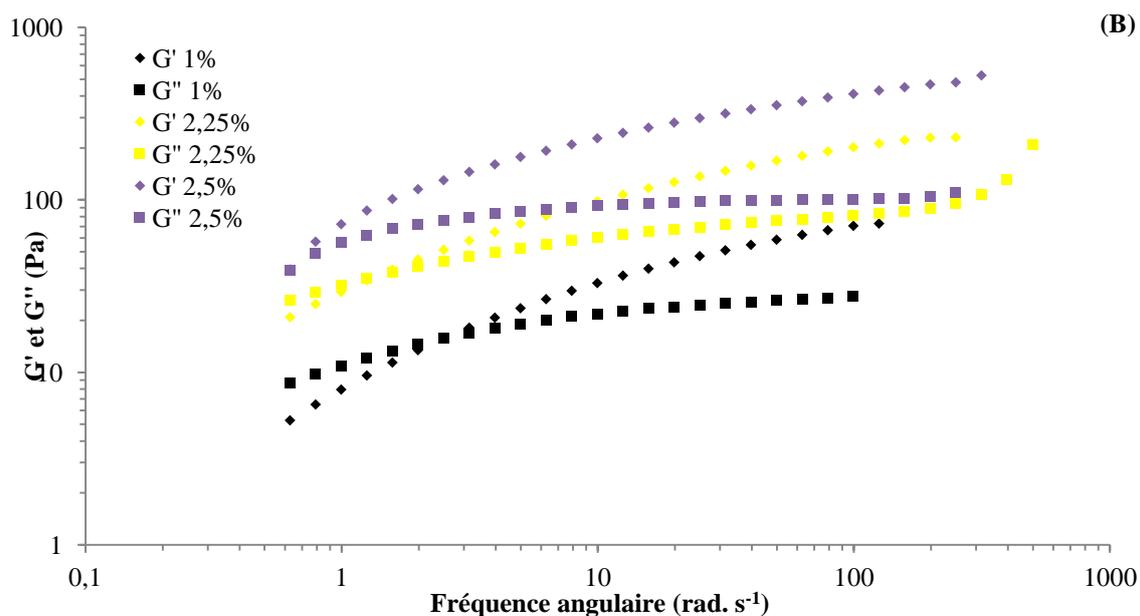


Figure 50. Représentation des modules complexes G' et G'' (A et B) en fonction de la déformation (%) des solutions aqueuses (0,1 à 2,5%) de **GD2** extrait des graines d'*A. maurorum* Medik. à 25°C.

III.5. Etude des activités biologiques

III.5.1. Activité anti-inflammatoire (inhibition de la dénaturation de la SBA)

L'inflammation est la première réponse du système immunitaire de l'organisme face aux infections, au stress et aux lésions. L'inflammation continue est étroitement liée à de nombreuses maladies, telles que l'arthrite, l'athérosclérose et le cancer (Hou et *al.*, 2020). D'après la littérature, la dénaturation des protéines causée par certaines enzymes lysosomales libérées pendant l'inflammation (Osman et *al.*, 2016 ; Rani et *al.*, 2014) est l'une des principales causes de la perte de fonction biologique des protéines (Anoop et Bindu, 2015).

La capacité de **GD2** et **G1P4-8** à inhiber la dénaturation thermique de la SBA par la chaleur à 70°C a été évaluée. Les résultats présentés dans la figure 51 révèlent que **GD2** à des concentrations comprises entre 1 et 10mg/mL a un effet inhibiteur plus élevé (14,89-86,23%) que l'Ibuprofène (22,78-79,46%) utilisé comme témoin positif aux mêmes concentrations des CI_{50} de 5,8 et 6,29mg/mL respectivement. Cependant, une activité inhibitrice trois fois plus faible a été observée pour **G1P4-8** (2,59-26,42%) pour la même gamme de concentrations.

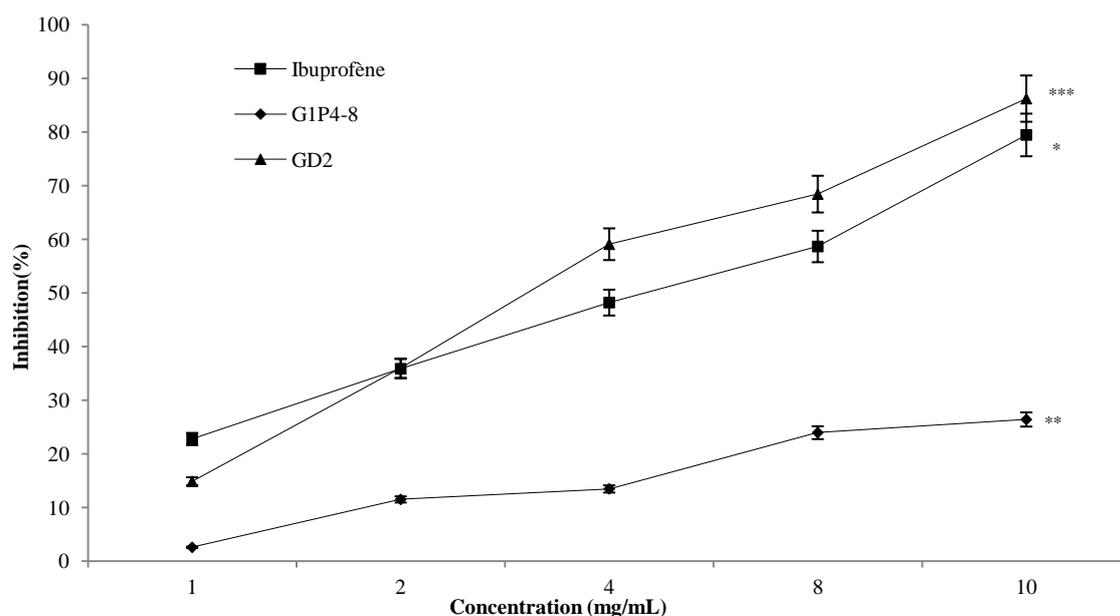


Figure 51. Effets inhibiteurs de **GD2**, **G1P4-8** et de l'Ibuprofène sur la dénaturation thermique de la SBA. * $p > 0,1$ et ** $p < 0,01$ par rapport à l'Ibuprofène. La corrélation entre l'effet inhibiteur des extraits de polysaccharides et le poids moléculaire a été exprimée avec *** $p < 0,001$.

Cette activité plus faible montre l'importance des étapes de dépigmentation et de délipidation avant l'extraction du galactomannane des graines d'*A. maurorum* Medik. En effet, Ibanoglu (2005) a rapporté que l'augmentation de l'enthalpie de dénaturation de la SBA en présence d'hydrocolloïdes est reconnue pour la protection des protéines globulaires contre l'agrégation par le blocage de leurs sites de liaisons hydrophobes par des polysaccharides de haute masse molaire. En outre, il est connu que les activités biologiques des polysaccharides sont nettement influencées par leur poids moléculaire, la composition en monosaccharides, les types de liaisons glycosidiques et les contenus non sucrés (Yang et Zhang, 2009).

III.5.2. Activité anti-hyperglycémiant

Les effets anti-hyperglycémiques *in vitro* des extraits polysaccharidiques **GD2**, **G1P4-8** et de l'hydrolysate **HG4-8** des graines d'*A. maurorum* Medik. ont été quantifiés et comparés avec l'acarbose utilisé comme contrôle positif. Pour ce faire, leur capacité à inhiber l' α -amylase a été évaluée (figure 52).

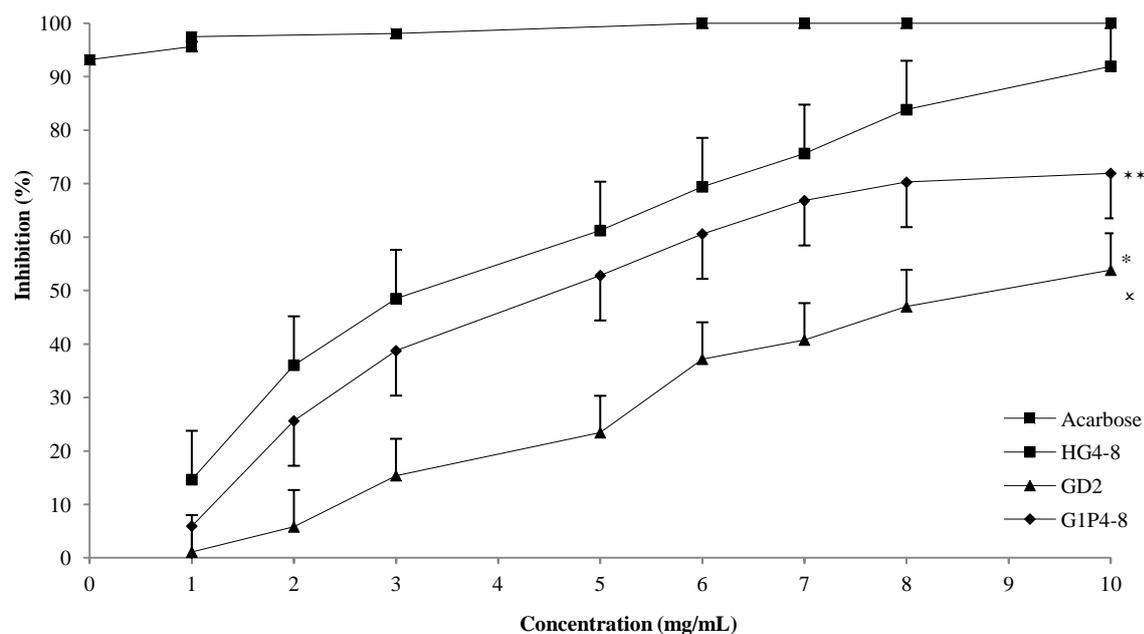


Figure 52. Activité anti-hyperglycémique des extraits **GD2**, **G1P4-8** et l'hydrolysate **HG4-8** sur l'inhibition de l'activité enzymatique de l' α -amylase. * $p < 0,001$, ** $p < 0,05$, *** $p < 0,1$ par rapport à l'acarbose (contrôle positif) ainsi qu'au poids moléculaire (* $p < 0,0001$).

Les résultats ont montré que **HG4-8** ($p < 0,1$) et **G1P4-8** ($p < 0,05$) ont un fort et significatif ($p < 0,0001$) effet inhibiteur sur l'activité de l' α -amylase avec des pourcentages d'inhibition mesurés respectivement à 91,96 et 71,92% à 10mg/mL et des valeurs de CI_{50} de 5,43 et 6,81mg/mL. Un potentiel inhibiteur significatif mais plus modéré a été attribué à **GD2** ($p < 0,001$) avec une valeur de 53,83% ($CI_{50} = 9,28$ mg/mL). Les 100% d'inhibition de l' α -amylase ont pu être obtenus avec l'acarbose à 6,45mg/mL ($CI_{50} = 3,81$ mg/mL).

Les effets inhibiteurs des galactomannanes des graines d'*Alhagi maurorum* Medik. apparaissent supérieurs à ceux des autres extraits de plantes testées pour leur activité antihyperglycémique et sont fortement corrélés au poids moléculaire ($p < 0,0001$). Selon Kabat et Bezer (1958), la plupart des polysaccharides ayant des propriétés médicinales sont des molécules de poids moléculaires élevés et supérieurs à 100kDa. De même, Zhu et al. (2016) ont rapporté un effet inhibiteur significatif de l' α -glucosidase par un polysaccharide (APS) extrait de *Radix Astragali* séché de poids moléculaire élevé (693kDa). D'autres polysaccharides obtenus à partir de *Cucurbita moschata* ont inhibé 41,3% de l'activité α -amylase à une concentration de 5 mg/mL (Wang et al., 2017). Un galactomannane extrait de l'endosperme des graines d'*Adenanthera pavonina* L. (GAP) a montré après 30 jours de traitement, à 1% et 2%, une diminution significative de la glycémie en comparaison avec le contrôle diabétique sur des souris diabétiques induites par la streptozotocine (Benjamin et al.,

2018). En outre, un galactomannane issu d'*Arenga Pinnata* Merr. a réduit de manière significative la glycémie après 90 minutes de traitement sans aucun effet secondaire chez des rats (Tarigan et al., 2020). Des études rapportent que la viscosité et la concentration des polysaccharides contribuent directement à leurs effets hypoglycémiques car elles limitent l'activité enzymatique digestive et l'absorption du glucose dans l'intestin (Srichamroen et al., 2009 ; Jenkins et al., 1978).

III.5.3. Activité gastroprotectrice (*in vivo*)

L'éthanol est largement utilisé comme agent ulcérogène pour étudier les lésions gastriques aiguës. C'est un agent nécrosant bien connu qui pénètre rapidement dans la muqueuse gastrique, entraînant une érosion hémorragique et la formation d'un ulcère par augmentation de la perméabilité vasculaire, lésions membranaires et réduction des facteurs de protection de la muqueuse tels que la barrière de mucus (Repetto et Llesuy, 2002 ; Siegmund, 2003).

Dans notre étude, le polysaccharide **GD2** isolé des graines d'*Alhagi maurorum* Medik. administré par voie orale à des doses de 100, 250 et 500mg/kg, a réduit ($r=0,147$) les ulcères gastriques induits par l'éthanol chez les rats (Tableau 11) de $86,42\pm 11,88\%$ (pH $4,08\pm 0,18$), $96,18\pm 2,73\%$ (pH $4,2\pm 0,43$) et $97,39\pm 2,70\%$ (pH $4,1\pm 0,65$) respectivement. Le Gaviscon (alginate de sodium 500mg/kg) utilisé comme contrôle positif, a réduit dans les mêmes conditions l'ulcération gastrique dans $98,70\pm 1,13\%$ (pH $4,21\pm 0,77$) par rapport au groupe véhicule (100%).

Tableau 11. Pourcentages d'ulcérations et d'inhibition de la formation d'ulcère gastrique induit par l'éthanol 96% chez les différents groupes de rats Wistar albinos

Traitement	Dose (mg/kg)	Ulcération (mm ²)	Surface non lésée (%)	pH de l'estomac
Véhicule (Eau distillée)	0	0	100	$3,14\pm 0,48$
Ethanol	96%	$59,44\pm 9,65$	$39,77\pm 9,78$	$1,43\pm 0,32$
Gaviscon	500	$1,29\pm 1,13$	$98,70\pm 1,13$	$4,21\pm 0,77$
GD2	100	$13,40\pm 11,72$	$86,42\pm 11,88$	$4,08\pm 0,18$
GD2	250	$3,76\pm 2,46$	$96,18\pm 2,73$	$4,2\pm 0,43$
GD2	500	$2,84\pm 2,58$	$97,39\pm 2,70$	$4,1\pm 0,65$

Des lésions hémorragiques au-dessus de 50% ($59,44\pm 9,65\%$) ainsi qu'à l'acidité notable des estomacs (pH= $1,43\pm 0,32$) ont été enregistrés avec le groupe des rats traités avec de l'éthanol 96% (figure 53) qui est du de l'épuisement des facteurs protecteurs de la paroi gastrique de

l'estomac comme le GSH et le mucus (Bhattacharyya et *al.*, 2014). Selon Afonso-Pereira et *al.* (2018), le pH de l'estomac chez les rats Wistar (femelles) est de 3,6, qui étant proche de pH des estomacs du groupe véhicule (pH=3,14±0,48). Ainsi, le traitement statistique des résultats montrent également une corrélation positive ($r=0,429$) des pH des estomacs des groupes traités aux trois concentrations administrées de l'extrait **GD2** ainsi que au contrôle positif. Cela nous laisse suggérer le mécanisme par lequel le polysaccharide **GD2** agit comme un revêtement protecteur de haute viscosité sur la paroi gastrique empêchant la pénétration de l'éthanol.

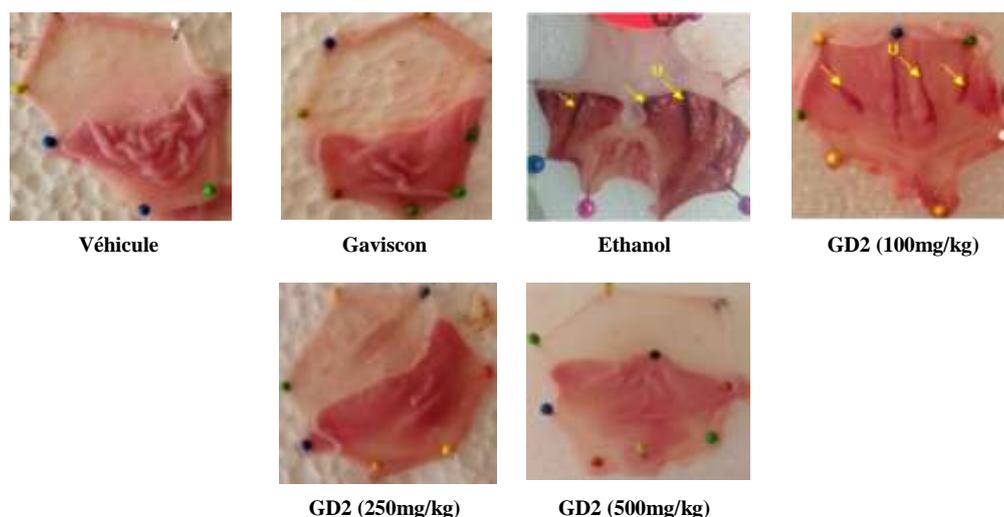


Figure 53. Effet protecteur de **GD2** et Gaviscon contre la formation d'ulcère gastrique chez des rats Wistar albinos. U; Ulcère

L'extrait aqueux d'*A. maurorum* a montré un effet significatif sur la diminution de l'acidité de l'acide gastrique et l'augmentation des valeurs de pH. Naseri et Mard (2007) suggèrent que l'extrait agit par le biais d'un mécanisme anticholinergique en bloquant la sécrétion de l'acide gastrique. En outre, l'extrait méthanolique de la plante a donné le blocage des canaux calciques sur le muscle lisse du tractus gastro-intestinal (Atta et Mounein, 2004).

Par ailleurs, le poids moléculaire de **GD2** ($1,4 \times 10^6$ Da) pourrait fortement contribuer comme un facteur inhibiteur de l'ulcère gastrique. En effet, Błaszczyk et *al.* (2015) ont prouvé que le β -glucans d'avoine à haut poids moléculaire peut réduire plus efficacement le stress oxydatif de la colite chez des souris atteintes de maladies inflammatoires de l'intestin induites par le LPS et plus efficacement en formant un gel visqueux.

Une étude antérieure a clairement démontré que, un galactomannane isolé des graines *Caesalpinia pulcherrima*, et à 10mg/kg a réduit (45,71%) une gastrite induite par

l'indométacine chez des souris femelles en augmentant l'infiltration des neutrophiles, la migration des leucocytes mésentériques (Marques et *al.*, 2019).

Conclusion et perspectives

Conclusions et perspectives

Ce travail de thèse en cotutelle entre les universités de Kasdi Merbah (laboratoire de protection des écosystèmes en zone arides et semi arides) et Clermont Auvergne (Axe Génie des Procédés Energétique et Biosystèmes de l'Institut Pascal, UMR CNRS 6602) s'inscrit dans le cadre du programme Hubert Curien Maghreb EXPLORE intitulé «Exploration de la flore du Maghreb (plantes et macro-algues marines) pour la découverte de polysaccharides biologiquement actifs». L'objectif associé à cette thèse dans le cadre de ce projet visait à identifier, caractériser et déterminer les propriétés rhéologiques et le potentiel biologique des polysaccharides hydrosolubles extraits des graines d'une plante spontanée, *Alhagi maurorum* Medik., récoltée dans le Sahara de l'Algérie (région d'Illizi). Ce travail a été initié par une étude ethnobotanique qui avait révélé l'importance de cette plante dans les usages traditionnels des populations d'Illizi (Algérie). Les graines de cette plante ont été soumises à une extraction aqueuse à chaud, qui a conduit à l'obtention de dix fractions de polysaccharides hydrosolubles. Ces derniers ont été partiellement purifiés par précipitation à l'isopropanol à 96%. Leurs caractéristiques structurales ont été déterminées par des méthodes colorimétriques, IR-TF, CEAHP-DAP, CG/SM-IE, et RMN (^1H et ^{13}C). Le meilleur rendement d'extraction obtenu a été de 11,87%. Du galactopyranose et du mannopyranose à un ratio molaire Mannose/ Galactose (M/G) de 2,22 ont été identifiés et quantifiés comme les monosaccharides constitutifs des polysaccharides extraits. Les analyses spectroscopiques ont permis de confirmer que les graines d'*A. maurorum* Medik. contiennent un galactomannane constitué d'une chaîne principale de résidus mannopyranoses (71%) liés en β -(1,4), sur laquelle se greffent des résidus D-galactopyranoses (29%). Ce galactomannane a une masse moléculaire (M_w) de $1,4 \times 10^6$ g/mol et une viscosité intrinsèque de 970 mL/g.

L'étude des propriétés d'écoulement en régime semi-dilué des solutions de ce galactomannane, a validé un comportement typique de fluide rhéofluidifiant avec une concentration critique de recouvrement (C^*) de 0,96 g/L. Un comportement viscoélastique a pu être aussi identifié après évaluation des modules de conservation (G') et de perte (G'') avec des solutions de concentrations comprises entre 0,10 et 2,25% (m/v).

La recherche *in vitro* et *in vivo* des effets biologiques des galactomannanes extraits des graines *A. maurorum* a été entreprise afin de valider les utilisations traditionnelles de la plante par la population d'Illizi notamment comme antidiabétique, antiulcéreux et anti-inflammatoire. Les galactomannanes testés ont montré un pouvoir inhibiteur significatif de la dénaturation thermique de l'albumine (CI50 compris entre 5,8 et 6,29 mg/mL) par comparaison avec celui de l'Ibuprofène utilisé comme témoin positif. Les mêmes fractions

ainsi qu'un hydrolysats ont été évaluées pour leur action anti-hyperglycémiant via l'inhibition de l' α -amylase. L'hydrolysats et une fraction issue des graines lavées à 40°C et extraites à 80°C, ont présenté des activités inhibitrices significative (CI50 compris entre 6,81 et 6,45mg/mL) comparées à celle de l'acarbose, d'CI50=5,43mg/mL. Cependant, un potentiel inhibiteur de l' α -amylase plus modéré (CI50=9,28mg/mL) a été constaté avec la fraction des graines prétraitées et extraites à 80°C. L'étude de la capacité gastroprotectrice de cette dernière fraction de galactomannane a révélé son potentiel à inhiber la formation d'ulcères gastriques induit par l'éthanol 96% chez des rates Wistar albinos. Les résultats ont montré une forte inhibition de la formation d'ulcères (>85%) proche du pouvoir protecteur du Gaviscon (contrôle positif à base d'alginate de sodium). Ces investigations justifient ainsi les utilisations thérapeutiques d'*Alhagi maurorum* Medik. par la population d'Illizi notamment comme agents anti-inflammatoire, anti-hyperglycémiant et antiulcéreux et valident la présence d'un galactomannane biologiquement actif dans les graines de cette plante. Du point de vue de l'inventaire des galactomannanes extraits des graines des *Fabaceae*, il ressort que ce galactomannane composant des graines *A. maurorum* est proche de galactomannanes documentés en termes de propriétés structurelles et physicochimiques, et qui pourrait être utilisé notamment comme un agent gélifiant.

Dans la poursuite des travaux déjà réalisés, des futurs travaux seront réalisés, comme la suite:

- Mieux investiguer dans l'activité anti-hyperglycémiant et faire des tests *in vivo* et *in vitro* avec l'enzyme d' α -glucosidase en déterminant le mécanisme d'inhibition des enzymes clés de la digestion des carbohydrates par les polysaccharides des graines *A. maurorum* Medik.;
- Faire des tests antidiabétiques (*in vitro*) en se basant sur la capacité des polysaccharides à régénérer le fonctionnement les cellules bêta-pancréatiques ;
- Voir l'effet postprandial du broyat des graines chez des sujets diabétiques type II;
- Compléter d'autres tests anti-inflammatoires comme celui basé sur la stabilisation de la membrane des globules rouges ;
- Evaluer l'effet curatif des polysaccharides *in vivo*

Références bibliographiques

1. A.N.D.I (Agence Nationale de Développement de l'Investissement), 2013. Les fêtes de la S'Beiba (Illizi).
2. Abdel-Megeed, R.M., Hamed, A.R., Matloub, A.A., Kadry, M.O. & Abdel-Hamid, A.H.Z. (2019). Regulation of apoptotic and inflammatory signaling pathways in hepatocellular carcinoma via Caesalpinia gilliesii galactomannan. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 451(1), pp.173-184.
3. Abdulbary, M. (2018). Detection about the Anti-Inflammatory Effect in Alcoholic Extract of Alhagi maurorum in vitro. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology (IJRASB)*, 5(5), 1-3.
4. Abdulbary, M. (2019). September. Study of some properties and antibacterial activity of (Alhagi maurorum Medik) collected from the desert of Al-Najaf. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1294 (6), p. 062081.
5. Abid, L. (2018). La couverture sanitaire de la wilaya d'Illizi.
6. Abrams, M.T., Koser, M.L., Seitzer, J., Williams, S.C., DiPietro, M.A., Wang, W., ... & Sepp-Lorenzino, L. (2010). Evaluation of efficacy, biodistribution, and inflammation for a potent siRNA nanoparticle: effect of dexamethasone co-treatment. *Molecular therapy*, 18(1), 171-180.
7. Adjanohoun, E. (1987). Médecine Traditionnelle et Pharmacopée: Contribution aux Études Ethnobotaniques et Floristiques au Togo. Agence de Coopération Culturelle et Technique, Paris, France.
8. Adler, S., Verdeil, J.L., Lartaud, M., Fock-Bastide, I., Joët, T., Conéjéro, G. & Noirot, M. (2014). Morphological and histological impacts of the laurina mutation on fructification and seed characteristics in Coffea arabica L. *Trees*, 28(2), pp.585-595.
9. Ahlawat, K.S., & Khatkar, B.S. (2011). Processing, food applications and safety of aloe vera products: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 48, 525– 533
10. Ahmad, N., Bibi, Y., Raza, I., Zahara, K., Idrees, S., Khalid, N., Bashir, T., Tabassum, S. & Mudrikah. (2015). Traditional uses and pharmacological properties of *Alhagi maurorum*. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 5(11): 856-861.
11. Ahmad, S., Alam, K., Wariss, H.M., Anjum, S., & Mukhtar, M. (2014). Ethnobotanical studies of plant resources of Cholistan desert, Pakistan. *Int J Sci Res*, 3(6), 1782-1788.
12. Ahmed, M.A. (2019). Protective effect of aqueous extract of Alhagi maurorum in spermatogenesis and antioxidant status of adult rats exposed to carbon tetrachloride. *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*, 33(1), 1-7.
13. Ai, L., Zhang, H., Guo, B., Chen, W., Wu, Z., & Wu, Y. (2008). Preparation, partial

characterization and bioactivity of exopolysaccharides from *Lactobacillus casei* LC2W. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 353-357.

14. Akerreta, S., Cavero, R.Y., & Calvo, M.I. (2007). First comprehensive contribution to medical ethnobotany of Western Pyrenees. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 3(1), 1-13.

15. Albaayit, S.F.A., Abba, Y., Abdullah, R., & Abdullah, N. (2016). Prophylactic effects of *Clausena excavata* Burum. f. leaf extract in ethanol-induced gastric ulcers. *Drug Design, Development and Therapy*, 10, 1973.

16. Albouchi, A., Sebe, b.H., Mezni, M.Y., & El Aouni, M.H. (2001). Influence de la durée d'acclimatation sur l'endurcissement à la sécheresse d'*Acacia cyanophylla* Lind l. *Ann. For. Sci.*, 58: 519-528.

17. Al-Douri, N.A. & Al-Essa, L.Y. (2010). A survey of plants used in Iraqi traditional medicine. *Jordan J Pharm Sci*, 3(2): 100-108.

18. Ali, S.I. (1977). *Flora of West Pakistan*. pp. 319-320.

19. Alimova, D.F. & Kulliev, Z.A. (2005). Phenolic Compounds of *Alhagi pseudoalhagi*, 1st International Symposium on Biomolecules and Related Compounds. Chemistry, Biology and Applications, Montpellier, France, p. 59.

20. Alimova, D.F., Eshbakova, K.A., Bobakulov, Kh.M. & Abdullaev, N.D. (2013). A new flavonol glycoside from the aerial part of *Alhagi pseudalhagi*. *Chemistry of Natural Compounds*, 49(3): 437-439.

21. Ali-Shtayeh, M.S., Yaniv, Z., & Mahajna, J. (2000). Ethnobotanical survey in the Palestinian area: a classification of the healing potential of medicinal plants. *Journal of Ethnopharmacology*, 73(1-2), 221-232.

22. Al-Kamel, M.L., & Al-Snafi, A.E. (2019). Antibacterial effect of the phenolic extract of *Alhagi maurorum*. *IOSR Journal of Pharmacy*, 9(9), 47-55.

23. Al-Saleem, M.S.M., Al-Wahaib, L.H., Abdel-Mageed, W.M., Gouda, Y.G. & Sayed, H.M. (2019). Antioxidant flavonoids from *Alhagi maurorum* with hepatoprotective effect. *Pharmacognosy Magazine*, 15(65), p.592.

24. Al-Snafi, A.E. (2015). *Alhagi maurorum* as a potential medicinal herb: An Overview. *International Journal of Pharmacy Review and Research*, 5(2), pp.130-136

25. Al-Snafi, A.E., Al-Kamel, M. L. & Esmael, M. E. (2019). Antifungal effect of *Alhagi maurorum* phenolic extract. *IOSR Journal of Pharmacy*, 9(8), 7-14.

26. Altmysheva, A.A. (1976). *Medicinal Wealth of Kirgizia* [in Russian], 2nd Ed., Frunze, Kyrgyzstan.

27. Al-yahya, M.A., Al-Meshal, I.A., Mossa, J.S., Al-Badr, A.A. & Tariq, M. (1990). Saudi Plants: A Phytochemical and Biological Approach. GDRGP, KACST, Riyadh, Saudi Arabia.
28. Amiri, M.S., Joharchi, M.R. & Taghavizadehyazdi, M.E. (2014). Ethno-medicinal plants used to cure jaundice by traditional healers of mashhad, iran. *Iran J Pharm Res.*, 13(1), pp.157-62.
29. Anand, B.S., & Katz, J. (2017). Peptic ulcer disease. *Gastroenterology*, 1, 23-35.
30. Anderberg, A. (1982).The genus *Anvillea* (Compositae). *Nordic Journal of Botany*, 2: 297-305.
31. Andrade, C.T., Azero, E.G., Luciano, L., & Gonçalves, M.P. (1999). Solution properties of the galactomannans extracted from the seeds of *Caesalpinia pulcherrima* and *Cassia javanica*: comparison with locust bean gum. *International journal of biological macromolecules*, 26(2-3), 181-185.
32. Angone, S.A., Bardor, M., Nguema-Ona, E., Rihouey, C., Ishii, T., Lerouge, P., & Driouich, A. (2009). Structural characterization of cell wall polysaccharides from two plant species endemic to central Africa, *Fleurya aestuans* and *Phragmenthera capitata*. *Carbohydrate polymers*, 75(1), 104-109.
33. Angone, S.A., Nguema-Ona, E., & Driouich, A. (2010). La thérapie par les plantes en Afrique: activités immunostimulantes des polysaccharides de la paroi végétale. *Phytothérapie*, 8(4), 223-230.
34. Anoop, M.V., & Bindu, A.R. (2015). In-vitro anti-inflammatory activity studies on *Syzygium zeylanicum* (L) DC leaves. *International Journal of pharma research & review*, 4(8), 18-27.
35. Anoop, M.V., & Bindu, A.R. (2015). In-vitro anti-inflammatory activity studies on *Syzygium zeylanicum* (L) DC leaves. *International Journal of pharma research & review*, 4(8), 18-27.
36. Ao, Z., & Jane, J.L. (2007). Characterization and modeling of the A-and B-granule starches of wheat, triticale, and barley. *Carbohydrate polymers*, 67(1), 46-55.
37. Asharuddin, S.M., Othman, N., Zin, N.S.M., Tajarudin, H.A., & Din, M.F.M. (2018). Performance assessment of cassava peel starch and alum as dual coagulant for turbidity removal in dam water. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(4).
38. Aswad, M., Rayan, M., Abu-Lafi, S., Falah, M., Raiyn, J., Abdallah, Z., & Rayan, A. (2018). Nature is the best source of anti-inflammatory drugs: Indexing natural products for their anti-inflammatory bioactivity. *Inflammation Research*, 67(1), 67-75.
39. Atta, A.H. & Mouneir, S.M. (2004). Anti-diarrhoeal activity of some Egyptian medicinal

plant extracts. *Ethnopharmacol*, 92 (2): 303-309.

40. Atta, A.H., Nasr, S.M., Mouneir, S.M., Alwabel, N.A. & Essawy, S.S. (2012). Evaluation of the diuretic effect of *Conyza dioscorides* and *Alhagi maurorum*. *Int J Pharmacy and Pharm Sci*, 2(3) :162-165.

41. Avakiantz, L. (2012). Etude des planches iconographiques de la Chaire de Pharmacognosie de la Faculté de Pharmacie de Paris Descartes. Thèse de doctorat en Pharmacie, Université Paris Descartes, 257 p.

42. Avat, F. (1993). Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300 C: transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris; Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).

43. Awaad Amani, A.S., Maitland, D.J., & Soliman, G.A. (2006). Antiulcerogenic activity of *Alhagi maurorum*. *Pharmaceutical biology*, 44(4), 292-296.

44. Awaad, A.S., El-Meligy, R.M., & Soliman, G.A. (2013). Natural products in treatment of ulcerative colitis and peptic ulcer. *Journal of Saudi chemical society*, 17(1), 101-124.

45. Bacete, L., Melida, H., Miedes, E., & Molina, A. (2018). Plant cell wall-mediated immunity: cell wall changes trigger disease resistance responses. *The Plant Journal*, 93(4), 614-636.

46. Baden-Powell, B.H. (1868). *Hand-book of the economic products of the Punjab: with a combined index and glossary of technical vernacular words* (Vol. 1). Thomason Civil Engineering College Press.

47. Bahmani, M., Baharvand-Ahmadi, B., Tajeddini, P., Rafieian-Kopaei, M., & Naghdi, N. (2016). Identification of medicinal plants for the treatment of kidney and urinary stones. *Journal of renal injury prevention*, 5(3), 129.

48. Bakka, C., Smara, O., Hadjadj, M., Dendougui, H., Mahdjar, S., Benzid, A. (2019). In vitro Anti-inflammatory activity of *Pistacia atlantica* Desf. extracts. *Asian J. Res. Chem.*, 12, 322-325.

49. Barak, S., & Mudgil, D. (2014). Locust bean gum: Processing, properties and food applications-A review. *International journal of biological macromolecules*, 66, 74-80.

50. Bartetzko, M.P., Schuhmacher, F., Hahm, H.S., Seeberger, P.H., & Pfrengle, F. (2015). Automated glycan assembly of oligosaccharides related to arabinogalactan proteins. *Organic letters*, 17(17), 4344-4347.

51. Bellakhdar, J. (1997). La pharmacopée marocaine traditionnelle. Médecine arabe ancienne et savoirs populaires. IBIS Press. 764 p.

52. Ben Azouz, K. (2010). Relation entre propriétés rhéologiques et structure microscopique de dispersions de particules d'argile dans des dispersions de polymères. Thèse de doctorat, Biochimie, Université de Strasbourg, 5, 39P.
53. Benaoun, F. (2017). Caractérisation structurale et potentiel biologique des polysaccharides issus de *Plantago notata Lagasca* (Plantaginaceae) et *Urginea noctiflora Batt. Trab* (Liliaceae) (Doctoral dissertation, Clermont Auvergne). 208p.
54. Benhamza, L. (2008). Effets biologiques de la petite centauree *Erythraea centaurium* (L.) Pers. Thèse de Doctorat d'Université Mentouri-Constantine, Algérie: 60-66p.
55. Bento, J. F., Mazzaro, I., de Almeida Silva, L.M., de Azevedo Moreira, R., Ferreira, M. L. C., Reicher, F., & de Oliveira Petkowicz, C.L. (2013). Diverse patterns of cell wall mannan/galactomannan occurrence in seeds of the Leguminosae. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 192-199.
56. Bento, J.F., Mazzaro, I., de Almeida Silva, L.M., de Azevedo Moreira, R., Ferreira, M.L.C., Reicher, F., & de Oliveira Petkowicz, C.L. (2013). Diverse patterns of cell wall mannan/galactomannan occurrence in seeds of the Leguminosae. *Carbohydrate Polymers*, 92(1), 192-199.
57. Bewley, J.D., Black, M., & Halmer, P. (Eds.). (2006). The encyclopedia of seeds: *science, technology and uses*. Cabi.
58. Bhandari, M. R., Jong-Anurakkun, N., Hong, G., & Kawabata, J. (2008). α -Glucosidase and α -amylase inhibitory activities of Nepalese medicinal herb Pakhanbhed (*Bergenia ciliata*, Haw.). *Food Chemistry*, 106(1), 247-252.
59. Bigendako-Polygenis, M.J., & Lejoly, J. (1990). La pharmacopée traditionnelle au Burundi. Pesticides et médicaments en santé animale. *Pres. Univ. Namur*, 45, 425-442.
60. Bisht, S., Kant, R., & Kumar, V. (2013). α -d-Glucosidase inhibitory activity of polysaccharide isolated from *Acacia tortilis* gum exudate. *International journal of biological macromolecules*, 59, 214-220.
61. Bjora, S.C., Wabuye, E., Grace, O., Nordal, I. & Newton, E. (2015). The uses of Kenyan aloes: an analysis of implications for names, distribution and conservation. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 11 (1), 82.
62. Black, P.H., & Garbutt, L.D. (2002). Stress, inflammation and cardiovascular disease. *Journal of psychosomatic research*, 52(1), 1-23.
63. Blumenkrantz, N. & Asboe-Hansen, G. (1973). New method for quantitative determination of uronic acids. *Analytical Biochemistry*, 54: 484-489.
64. Bolus L. (2000). Flora of Egypt. Al Hadara Publishing, Cairo, Egypt, pp. 449.

65. Boual, Z., Pierre, G., Delattre, C., Benaoun, F., Petit, E., Gardarin, C., ... & El Hadj, M.D.O. (2015). Mediterranean semi-arid plant *Astragalus armatus* as a source of bioactive galactomannan. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5(1), 10-18.
66. Bouallala, M., Bradai, L. & Abid M. (2014). Diversité et utilisation des plantes spontanées du Sahara septentrional algérien dans la pharmacopée saharienne. Cas de la région du Souf. *Revue ElWahat pour les recherches et les Etudes*, 7 (2):18-26.
67. Boukhari, H. (2016). Extraction, dosage et analyse des polysaccharides pariétaux des racines de *Retama raetam*. Thèse de doctorat en biotechnologie végétale, Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 73 p.
68. Boulus L. (1983). Medicinal Plants of North Africa. Publications Inc., Egypt, 368.
69. Boutaghane, N. (2013). Etude phytochimique et pharmacologique de plantes médicinales Algériennes *Genista ulicina* Spach (Fabaceae) et *Chrysanthemum macrocarpum* (Sch. Bip.) Coss. & Kralik ex Batt (Asteraceae). Thèse de doctorat, option chimie pharmaceutique, université de Constantine, Algérie, 270 p.
70. Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
71. Brown Jr, R. M. (2004). Cellulose structure and biosynthesis: what is in store for the 21st century?. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 42(3), 487-495.
72. Brown, D. (1995). Encyclopedia of Herbs and Their Uses. Dorling Indersley: London; 20.
73. Brudieux, V. (2007). Extraction, modification enzymatique et caractérisation chimique de nouvelles structures pectiques. Application de la relation structure/activité à la dermocosmétique. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 220p.
74. Buckeridge, M.S. (2010). Seed cell wall storage polysaccharides: models to understand cell wall biosynthesis and degradation. *Plant physiology*, 154(3), 1017-1023.
75. Buckeridge, M.S., Dietrich, S.M.C., & De Lima, D.U. (2000). Galactomannans as the reserve carbohydrate in legume seeds. In *Developments in crop science*, 26, pp. 283-316).
76. Buckeridge, M.S., dos Santos, H.P., & Tiné, M.A.S. (2000). Mobilisation of storage cell wall polysaccharides in seeds. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38(1-2), 141-156.
77. Buckeridge, M.S., Rocha, D.C., Reid, J.G., & Dietrich, S.M. (1992). Xyloglucan structure and post-germinative metabolism in seeds of *Copaifera langsdorfii* from savanna and forest populations. *Physiologia Plantarum*, 86(1), 145-151.
78. Burton, R.A. & Fincher, G.B. (2009). (1,3; 1,4)- β -D-Glucans in cell walls of the Poaceae,

- lower plants, and fungi: a tale of two linkages. *Molecular Plant*, 2(5), 873-882.
79. Carpita, N. (2000). The cell wall. *Biochemistry and molecular biology of plants*, 52-109.
80. Carpita, N.C. (1996). Structure and biogenesis of the cell walls of grasses. *Annual review of plant biology*, 47(1), 445-476.
81. Carpita, N.C. (2011). Update on mechanisms of plant cell wall biosynthesis: how plants make cellulose and other (1→4)-β-D-glycans. *Plant physiology*, 155(1), 171-184.
82. Carpita, N.C., & Shea, E.M. (1988). Linkage structure of carbohydrates by gas chromatography-mass spectrometry (gc-ms) of partially. *Analysis of Carbohydrates by GLC and MS*, 157.
83. Carpita, N.C., Defernez, M., Findlay, K., Wells, B., Shoue, D.A., Catchpole, G., ... & McCann, M.C. (2001). Cell wall architecture of the elongating maize coleoptile. *Plant physiology*, 127(2), 551-565.
84. Cefalu, W.T. (2006). Animal models of type 2 diabetes: clinical presentation and pathophysiological relevance to the human condition. *ILAR journal*, 47(3), 186-198.
85. Cerqueira, M.A., Pinheiro, A.C., Souza, B.W., Lima, Á.M., Ribeiro, C., Miranda, C., ... & Vicente, A.A. (2009). Extraction, purification and characterization of galactomannans from non-traditional sources. *Carbohydrate polymers*, 75(3), 408-414.
86. Chakrabarti, R., Singh, B., Vanchhawng, L., & Thirumurugan, K. (2014). Screening of nine herbal plants for in vitro α-amylase inhibition. *Screening*, 7(4), 84-89.
87. Chakravarty, H. (1976). *Plant Wealth of Iraq: A Dictionary of Economic Plants*. Botany Directorate, Ministry of Agriculture & Agrarian Reform.
88. Champetier, G., & Monnerie, L. (1969). *Introduction à la chimie macromoléculaire* (p. 570). Paris: Masson.
89. Chan, F.K.L., & Graham, D.Y. (2004). Prevention of non-steroidal anti-inflammatory drug gastrointestinal complications—review and recommendations based on risk assessment. *Alimentary pharmacology & therapeutics*, 19(10), 1051-1061.
90. Chan, S.Y., Choo, W.S., Young, D.J. & Loh, X.J. (2016). Pectin as a rheology modifier: Recent reports on its origin, structure, commercial production and gelling mechanism. In *Polymers for personal care products and cosmetics* (pp. 205-226).
91. Chan, S.Y., Choo, W.S., Young, D.J., & Loh, X.J. (2017). Pectin as a rheology modifier: Origin, structure, commercial production and rheology. *Carbohydrate polymers*, 161, 118-139.
92. Chandra, K., Jain, S. & Dwivedi, S. (2020). The Role of Herbal Plants for the Management of Diabetes Mellitus: A Review. *Cardiology Today*, 24(2), 74-81.

93. Charalambous, G. (1994). Spices, herbs and edible fungi, Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science
94. Chaubey, M., & Kapoor, V.P. (2001). Structure of a galactomannan from the seeds of *Cassia angustifolia* Vahl. *Carbohydrate Research*, 332(4), 439-444.
95. Chaudhury, A., Duvoor, C., Reddy Dendi, V.S., Kraleti, S., Chada, A., Ravilla, R., ... & Mirza, W. (2017). Clinical review of antidiabetic drugs: implications for type 2 diabetes mellitus management. *Frontiers in endocrinology*, 8, 6.
96. Chavez Montes, R.A. (2008). Caractérisation de mutants et transformants d'alpha-L arabinofuranosidase chez *Arabidopsis thaliana* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier), 167.
97. Chawla, A., Chawla, R. & Jaggi, S. (2016). Microvascular and macrovascular complications in diabetes mellitus: distinct or continuum?. *Indian Journal of Eendocrinology and Metabolism* 20 (4), 546
98. Chen, C., You, L.J., Abbasi, A.M., Fu, X., Liu, R.H., & Li, C. (2016). Characterization of polysaccharide fractions in mulberry fruit and assessment of their antioxidant and hypoglycemic activities in vitro. *Food & function*, 7(1), 530-539.
99. Chen, H., Sun, J., Liu, J., Gou, Y., Zhang, X., Wu, X., Sun, R., Tang, S., Kan, J., Qian, C., Zhang, N., Jin, C. (2019). Structural characterization and anti-inflammatory activity of alkalisoluble polysaccharides from purple sweet potato, *Int. J. Biol. Macromol.* 131, 484-494.
100. Chen, X., Lin, Z., Ye, Y., Zhang, R., Yin, J., Jiang, Y., & Wan, H. (2010). Suppression of diabetes in non-obese diabetic (NOD) mice by oral administration of water-soluble and alkali-soluble polysaccharide conjugates prepared from green tea. *Carbohydrate polymers*, 82(1), 28-33.
101. Chen, Y., Xie, M.Y., Nie, S.P., Li, C. & Wang, Y.X. (2008). Purification, composition analysis and antioxidant activity of a polysaccharide from the fruiting bodies of *Ganoderma atrum*. *Food Chemistry*, 107(1): 231-241.
102. Cheng, H., Feng S., Jia X., Li Q., Zhou Y. & Ding C. (2013). Structural Characterization And Antioxidant Activities Of Polysaccharides Extracted From *Epimedium Acuminatum*. *Carbohydrate Polymers*, 92(1): 63-68.
103. Cheng, J.J., Chao, C.H., Chang, P.C., & Lu, M.K. (2016). Studies on anti-inflammatory activity of sulfated polysaccharides from cultivated fungi *Antrodia cinnamomea*. *Food Hydrocolloids*, 53, 37-45.
104. Cheng, Y., Jia G., Jiang-Sheng Z. & Shao-Ping L. (2010). Use of HPTLC to

Differentiate Among the Crude Polysaccharides in Six Traditional Chinese Medicines. *Journal of Planar Chromatography*, 23: 46-49.

105. Chhabra, R.P., & Richardson, J.F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. 1-55, Butterworth-Heinemann.

106. Choi, S. & Chung, M. (2003). A review on the relationship between *Aloe vera* components and their biologic effects. *Semin. Integr. Med.*, 1, 53-62.

107. Chouana, T. Caractérisation Structurale et Activités Biologiques Des Polysaccharides D'*Astragalus Gombo* Bunge. Ph.D. Thesis, Université Clermont Auvergne, Clermont Ferrand, France, 2017.

108. Chung, W. S. F., Meijerink, M., Zeuner, B., Holck, J., Louis, P., Meyer, A. S., & Duncan, S. H. (2017). Prebiotic potential of pectin and pectic oligosaccharides to promote anti-inflammatory commensal bacteria in the human colon. *FEMS microbiology ecology*, 93 (11), fix127.

109. Cipriani, T.R., Mellinger, C.G., de Souza, L.M., Baggio, C.H., Freitas, C.S., Marques, M.C. A., ... & Iacomini, M. (2009). Polygalacturonic acid: Another anti-ulcer polysaccharide from the medicinal plant *Maytenus ilicifolia*. *Carbohydrate Polymers*, 78(2), 361-363.

110. Clair, B. (2001). Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse (Doctoral dissertation, ENGREF (AgroParisTech)).

111. Cooper, G.M. (1999). La cellule: une approche moléculaire. De Boeck Supérieur, 503.

112. Cosgrove, D.J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature reviews molecular cell biology*, 6(11), 850-861.

113. Couarraze, G., & Grossiord, J.L. (2000). Initiation à la rhéologie, 3è éd. *Editions TEC & DOC, Paris, France*.

114. Courtois, J. (2009). Oligosaccharides from land plants and algae: production and applications in therapeutics and biotechnology. *Current Opinion in Microbiology*, 12(3), 261-273.

115. Cui, S. W. (2005). *Food carbohydrates: chemistry, physical properties, and applications*. CRC press., 432.

116. Dagne, E., Bisrat, D., Viljoen, A., & Van Wyk, B.E. (2000). Chemistry of *Aloe* species. *Current organic chemistry*, 4(10), 1055-1078.

117. Daher, F.B., & Braybrook, S.A. (2015). How to let go: pectin and plant cell adhesion. *Frontiers in plant science*, 6, 523.

118. Dakia, P.A., Wathelet, B., & Paquot, M. (2010). Influence de la teneur en galactose sur les interactions moléculaires et sur les propriétés physico-chimiques des galactomannanes en solution. *BASE*.
119. Damirov, I.A., Primenko, L.I., Shukyurov, D.Z., & Kerimov, Y.B. (1982). Medicinal Plants of Azerbaidzhan, 319.
120. Danne, C., Ryzhakov, G., Martínez-López, M., Ilott, N.E., Franchini, F., Cuskin, F., ... & Powrie, F. (2017). A large polysaccharide produced by *Helicobacter hepaticus* induces an anti-inflammatory gene signature in macrophages. *Cell host & microbe*, 22(6), 733-745.
121. De Cherisey, H. (2015). Etat de l'art sur la production de molécules chimiques issues du bois en France. *ADEME, Étude 1401C0052*.
122. De Oliveira, A.F., da Luz, B.B., de Paula Werner, M.F., Iacomini, M., Cordeiro, L.M., & Cipriani, T.R. (2018). Gastroprotective activity of a pectic polysaccharide fraction obtained from infusion of *Sedum dendroideum* leaves. *Phytomedicine*, 41, 7-12.
123. De Paula R.C.M., & Rodrigues J.F. (1995). Composition and rheological properties of cashew gum tree, the exudate polysaccharide from *Anacardium occidentale* L. *Carbohydrate Polymers*, 26, 177-181.
124. de Sousa, F.D., da Silva Mendes, F.R., Bermudez-Sierra, J.J., da Silva, A.F.B., da Silveira Vasconcelos, M., de Souza, T.D.F.G., ... & de Oliveira Monteiro-Moreira, A.C. (2019). Plant Macromolecules as Biomaterials for Wound Healing. In *Wound Healing*. IntechOpen.
125. Dendougui, H., Jay, M., Benayache, F., & Benayache, S. (2006). Flavonoids from *Anvillea radiata* Coss. & Dur.(Asteraceae). *Biochemical systematics and Ecology*, 9(34), 718-720.
126. Deveswaran, R., Abraham, S., Bharath, S., Basavaraj, B.V., Furtado, S., & Madhavan, V. (2009). Design and characterization of diclofenac sodium tablets containing tamarind seed polysaccharide as release retardant. *International Journal of PharmTech Research*, 1(2), 191-195.
127. Diallo, D., Paulsen, B.S., Liljebäck, T.H., & Michaelsen, T.E. (2003). The malian medicinal plant *Trichilia emetica*; studies on polysaccharides with complement fixing ability. *Journal of Ethnopharmacology*, 84(2-3), 279-287.
128. Diallo, D., Sanogo, R., Yasambou, H., Traoré, A., Coulibaly, K., & Maïga, A. (2004). Étude des constituants des feuilles de *Ziziphus mauritiana* Lam.(Rhamnaceae), utilisées traditionnellement dans le traitement du diabète au Mali. *Comptes Rendus Chimie*, 7(10-11), 1073-1080.

129. Diao, Y.L., Jiang, W., Zhu, T., Meng, D.L., & Shan, J.J. (2011). Antidiabetic activities of natural plant polysaccharides and their advances. *J Int Pharm Res*, 38, 275-279.
130. Doat, J. (1974). Application de la chromatographie sur couche mince à l'analyse des gommes et des bois tropicaux. 156, 63-74.
131. Doblin, M.S., Kurek, I., Jacob-Wilk, D., & Delmer, D.P. (2002). Cellulose biosynthesis in plants: from genes to rosettes. *Plant and cell physiology*, 43(12), 1407-1420.
132. Du, B., Lin, C., Bian, Z., & Xu, B. (2015). An insight into anti-inflammatory effects of fungal beta-glucans. *Trends in Food Science & Technology*, 41(1), 49-59.
133. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry*, 28(3), 350-356.
134. Dupont, F. & Guignard, J.L. (2007). Abrégé de Botanique 14^{ème} édition. Editions Masson, Paris, 285.
135. Ebringerová, A., & Heinze, T. (2000). Xylan and xylan derivatives—biopolymers with valuable properties, 1. Naturally occurring xylans structures, isolation procedures and properties. *Macromolecular rapid communications*, 21(9), 542-556.
136. Ebringerova, A., Hromadkova, Z., & Heinze, T. (2005). Hemicellulose Polysaccharides i (pp. 1-67).
137. Ebringerova, A., Kardošová, A., Hromádková, Z., & Hříbalová, V. (2003). Mitogenic and comitogenic activities of polysaccharides from some European herbaceous plants. *Fitoterapia*, 74(1-2), 52-61.
138. Eddouks, M., Ouahidi, M. L., Farid, O., Moufid, A., Khalidi, A., & Lemhadri, A. (2007). L'utilisation des plantes médicinales dans le traitement du diabète au Maroc. *Phytothérapie*, 5(4), 194-203.
139. Edwards, M., Dea, I., Bulpin, P.V., & Reid, J.S. (1985). Xyloglucan (amyloid) mobilisation in the cotyledons of *Tropaeolum majus* L. seeds following germination. *Planta*, 163(1), 133-140.
140. Edwards, M., Scott, C., Gidley, M.J., & Reid, J.S. (1992). Control of mannose/galactose ratio during galactomannan formation in developing legume seeds. *Planta*, 187(1), 67-74.
141. Eikani, M.H., Golmohammad, F., & Homami, S.S. (2012). Extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil using superheated hexane. *Food and Bioproducts Processing*, 90(1), 32-36.
142. El Blidi, L. (2006). *Synthèse chimioenzymatique et évaluation d'inhibiteurs potentiels de*

glycosidases, analogues de la valioline (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).

143. El-Shabasy, A. (2016). Survey on medicinal plants in the flora of Jizan Region, Saudi Arabia. *Int. J. Bot. Stud*, 2(1), 38-59.

144. Eskalieva, B.K., & Burasheva, G.S. (2002). Flavonoids of *Alhagi persarum*. *Chemistry of natural compounds*, 38(1), 102-103.

145. Fakhfakh, N., Abdelhedi, O., Jdir, H., Nasri, M., & Zouari, N. (2017). Isolation of polysaccharides from *Malva aegyptiaca* and evaluation of their antioxidant and antibacterial properties. *International journal of biological macromolecules*, 105, 1519-1525.

146. Fakhri, K.P., Adelzadeh, P., & Ghanimat, P. (2012). Studying the statue of organization in Holy Quran. *J Appl Environ Biol Sci*, 2, 162-7.

147. Fashner, J., & Gitu, A.C. (2015). Diagnosis and treatment of peptic ulcer disease and *H. pylori* infection. *American family physician*, 91(4), 236-242.

148. Feng, L., Yin, J., Nie, S., Wan, Y., & Xie, M. (2016). Fractionation, physicochemical property and immunological activity of polysaccharides from *Cassia obtusifolia*. *International journal of biological macromolecules*, 91, 946-953.

149. Fidan, H., Stankov, S., Petkova, N., Petkova, Z., Iliev, A., Stoyanova, M., ... & Ercisli, S. (2020). Evaluation of chemical composition, antioxidant potential and functional properties of carob (*Ceratonia siliqua* L.) seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 57(7), 2404-2413.

150. Figueroa, D.B., López, M.Q., Durazo, A.R., & Lerma, M.S. (2017). Hydrothermal technique for isolation of galactomannan from seeds of sonoran mezquite (*Prosopis* spp.). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(2), 457-465.

151. Fry, S.C. (1992). Xyloglucan A Metabolically Dynamic Polysaccharide. *Trends in Glycoscience and Glycotechnology*, 4(17), 279-289.

152. G.M.P.N.F.A (Guide to Medicinal Plants in North Africa), 2005. IUCN Centre for Mediterranean Cooperation, Malaga (Spain), 193.

153. Gaborieau, M., & Castignolles, P. (2011). Size-exclusion chromatography (SEC) of branched polymers and polysaccharides. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 399(4), 1413-1423.

154. Gargoum, H.M., Muftah, S.S., Al Shalmani, S., Mohammed, H.A., Alzoki, A.N., Debani, A.H., ... & Abdellatif, A.G. (2013). Phytochemical screening and investigation of the effect of *Alhagi maurorum* (camel thorn) on carbon tetrachloride, acetaminophen and adriamycin induced toxicity in experimental animals. *J. Sci. Innov. Res*, 2, 1023-1033.

155. Garon, D., & Guéguen, J.C. (2014). Biodiversité et évolution du monde végétal. EDP Sciences, 156.
156. Garon-Lardière, S. (2004). Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge *Asparagopsis armata* (Bonnemaisoniales) (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Occidentale).
157. Ghassan M.S. (2013). Antimicrobial and cytotoxic activities of methanol extract of *Alhagi maurorum*. *African Journal of Microbiology Research*, 7(16), 1548-1557.
158. Gholamhoseinian A. & Razmi Z. (2012). Screening the methanolic extracts of some plants for tyrosinase inhibitory activity. *Toxicol. Environ. Chemi.*, 94(2), 310-318.
159. Gidley, M.J., & Reid, J.G. (2006). Galactomannans and other cell wall storage polysaccharides in seeds. *Food polysaccharides and their applications*, 26, 181-215.
160. Gillet, S., Blecker, C., Paquot, M., & Richel, A. (2014). La relation structure chimique-propriétés physiques des galactomannanes extraits de la caroube. *Comptes Rendus Chimie*, 17(4), 386-401.
161. Githens T.S. (1979). Drug Plants of Africa. University of Pennsylvania Press, Philadelphia, Pennsylvania.
162. Glicksman, M. (2020). Functional properties of hydrocolloids. In *Food hydrocolloids* (pp. 47-99). CRC Press.
163. Grace, M.O., Klopper, R.R., Figueiredo, E., Smith, G.F. (2011). The aloe names book. Strelitza 28. South African National Biodiversity Institute, Pretoria and the Royal Botanic Gardens, Kew, 232.
164. Grant Reid, J.S., & Derek Bewley, J. (1979). A dual role for the endosperm and its galactomannan reserves in the germinative physiology of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.), an endospermic leguminous seed. *Planta*, 147(2), 145-150.
165. Grant, N.H., Alburn, H.E., & Kryzanasuskas, C. (1970). Stabilization of serum albumin by anti-inflammatory drugs. *Biochemical pharmacology*, 19(3), 715-722.
166. Guo, M.Q., Hu, X., Wang, C., & Ai, L. (2017). Polysaccharides: structure and solubility. *Solubility of polysaccharides*, 2, 8-21.
167. Gurbanov, I.A., Krylov, I.L. & Tikhonova, V.L. (1976). Wild Useful Plants of the USSR [in Russian], Moscow.
168. Gutfinger, T. (1981). Polyphenols in olive oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 58(11), 966-968.
169. Ha, T.J., Lee, J.H., Lee, M.H., Lee, B.W., Kwon, H.S., Park, C.H., ... & Jang, D.S. (2012). Isolation and identification of phenolic compounds from the seeds of *Perilla*

- frutescens (L.) and their inhibitory activities against α -glucosidase and aldose reductase. *Food Chemistry*, 135(3), 1397-1403.
170. Ha, X., Peng, J., Zhao, H., Deng, Z., Dong, J., Fan, H., ... & Yang, Z. (2017). Enhancement of gastric ulcer healing and angiogenesis by hepatocyte growth factor gene mediated by attenuated salmonella in rats. *Journal of Korean Medical Science*, 32(2), 186-194.
171. Habibi, Y., Mahrouz, M., Marais, M.F. & Vignon, M.R. (2004). An arabinogalactan from the skin of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate Research*, 339(6), 1201-1205.
172. Hadj-Seyd, A., Kemassi, A., Hadj Kouider, Y., Harma, A. (2015). Infertility Treatment: Spontaneous Plants of Northern Sahara. *Ethnopharmacologie*, 2-5.
173. Hadrich, A. (2019). *Nouveaux hydrogels à base de polysaccharide obtenus par voie biomimétique ou par photoréticulation* (Doctoral dissertation, Normandie Université).
174. Hamada, D. & Ladjel, S. (2015). Chemical Composition, In-Vitro Anti-microbial and Antioxidant Activities of the Methanolic Extract of *Anvillea Radiata* Asteraceae. *Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 6 (2), 1367-1373.
175. Hamed, A., Perrone, A., Mahalel, U., Oleszek, W., Stochmal, A., Piacente, S. (2012). Oleanane glycosides from the roots of *Alhagi maurorum*. *Phytochem Lett.*, 5, 782–787.
176. Hammiche, V., & Maiza, K. (2006). Traditional medicine in Central Sahara: pharmacopoeia of Tassili N'ajjer. *Journal of ethnopharmacology*, 105(3), 358-367.
177. Han, N.S. & Robyt, J.F. (1998). Separation and detection of sugars and alditols on thin layer chromatograms. *Carbohydrate Research*, 313, 135-137.
178. Harrigan, R.A., Nathan, M.S., & Beattie, P. (2001). Oral agents for the treatment of type 2 diabetes mellitus: pharmacology, toxicity, and treatment. *Annals of emergency medicine*, 38(1), 68-78.
179. Haussonne, J.M., Barton, J.L., Bowen, P., & Carry, C.P. (2005). Céramiques et verres : principes et techniques d'élaboration. Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes, 815p.
180. Hayashi, T. (1989). Xyloglucans in the primary cell wall. *Annual review of plant biology*, 40(1), 139-168.
181. Hayaza, S., Wahyuningsih, S.P.A., Kuncoroningrat, R.J., Susilo, A.A.P., Husen, S.A., Winarni, D., Punnapayak, H. & Darmanto, W. (2019). Anticancer activity of okra raw polysaccharides extracts against human liver cancer cells. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 18(8), 1667-1672.

182. Hedhly, A., Vogler, H., Schmid, M. W., Pazmino, D., Gagliardini, V., Santelia, D., & Grossniklaus, U. (2016). Starch turnover and metabolism during flower and early embryo development. *Plant physiology*, 172(4), 2388-2402.
183. Hellal, M. (2007). *Phtalazinones et 2, 3-benzodiazépinones dérivées de l'azélastine: Synthèses et activités anti-cytokine* (Doctoral dissertation, Strasbourg 1).
184. Hellebois, T., Soukoulis, C., Xu, X., Hausman, J.F., Shaplov, A., Taoukis, P.S. & Gaiani, C. (2021). Structure conformational and rheological characterisation of alfalfa seed (*Medicago sativa* L.) galactomannan. *Carbohydrate Polymers*, 256, p.117394.
185. Hernández, V., Mora, F. & Meléndez, P. (2012). A study of medicinal plant species and their ethnomedicinal values in Caparo Barinas, Venezuela. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 24(2), 128-132.
186. Hoch, G. (2007). Cell wall hemicelluloses as mobile carbon stores in non-reproductive plant tissues. *Functional Ecology*, 21(5), pp.823-834.
187. Hollander, P. (1992). Safety profile of acarbose, an α -glucosidase inhibitor. *Drugs*, 44(3), 47-53.
188. Hong, G., Yi, H., Bo, G. & Jun, K. (2008). *Bioscience Biotechnology Biochemistry*, 72, 601-603.
189. Hopf, H. & Kandler, O. (1977). Characterization of the “reserve cellulose” of the endosperm of *Carum carvi* as a b-(1–4)-mannan, *Phytochemistry*, 16, 1715.
190. Hostettmann, K. (1999). Strategy for the biological and chemical evaluation of plant extracts. *Pure Appl. Chem*, 70(11), 1-9.
191. Hoton-Dorge, M. (1976). Séparation des aldoses et des polysaccharides par chromatographie sur couche mince de cellulose et nouveau réactif de pulvérisation permettant leur révélation sensible. *Chromatography*, 116, 417-423.
192. Hou, C., Chen, L., Yang, L., & Ji, X. (2020). An insight into anti-inflammatory effects of natural polysaccharides. *International journal of biological macromolecules*, 153, 248-255.
193. Hu, J.L., Nie, S.P., & Xie, M.Y. (2018). Antidiabetic mechanism of dietary polysaccharides based on their gastrointestinal functions. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66 (19), 4781-4786.
194. Huang, M., Wang, F., Zhou, X., Yang, H., & Wang, Y. (2015). Hypoglycemic and hypolipidemic properties of polysaccharides from *Enterobacter cloacae* Z0206 in KKAY mice. *Carbohydrate Polymers*, 117, 91-98.
195. Ibanoglu, E. (2005). Effect of hydrocolloids on the thermal denaturation of proteins. *Food chemistry*, 90(4), 621-626.

196. Inngjerdingen, K.T., Coulibaly, A., Diallo, D., Michaelsen, T.E., & Paulsen, B.S. (2006). A complement fixing polysaccharide from *Biophytum petersianum* Klotzsch, a medicinal plant from Mali, west Africa. *Biomacromolecules*, 7(1), 48-53.
197. Inngjerdingen, K.T., Meskini, S., Austarheim, I., Ballo, N., Inngjerdingen, M., Michaelsen, T.E., Diallo, D. & Paulsen, B.S. (2012). Chemical and biological characterization of polysaccharides from wild and cultivated roots of *Vernonia kotschyana*. *Journal of ethnopharmacology*, 139(2), 350-358.
198. ITDG, I. (1996). Ethnoveterinary medicine in Kenya: A field manual of traditional animal health care practices. *Intermediate Technology Development Group and International Institute of Rural Reconstruction, Nairobi, Kenya*, 226.
199. Izydorczyk, M., Cui, S. W., & Wang, Q. (2005). Polysaccharide gums: structures, functional properties, and applications. *Food carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications*, 293, 299.
200. Jane, J.L., Kasemsuwan, T., Leas, S., Zobel, H., & Robyt, J.F. (1994). Anthology of starch granule morphology by scanning electron microscopy. *Starch-Stärke*, 46(4), 121-129.
201. Jarrige, R., & Ruckebusch, Y. (1995). *Nutrition des ruminants domestiques: ingestion et digestion*. Editions Quae.
202. Jean, V., & Jiri, S. (1983). Plantes médicinales. 250 illustrations en couleurs. *Larousse, Paris*, 319.
203. Jenkins, D.J., Wolever, T.M., Nineham, R., Taylor, R., Metz, G.L., Bacon, S., & Hockaday, T.D. (1978). Guar crispbread in the diabetic diet. *Br Med J*, 2(6154), 1744-1746.
204. Jeon, J. S., Ryoo, N., Hahn, T. R., Walia, H., & Nakamura, Y. (2010). Starch biosynthesis in cereal endosperm. *Plant physiology and Biochemistry*, 48(6), 383-392.
205. Jiang, S., Du, P., An, L., Yuan, G., & Sun, Z. (2013). Anti-diabetic effect of *Coptis Chinensis* polysaccharide in high-fat diet with STZ-induced diabetic mice. *International Journal of Biological Macromolecules*, 55, 118-122.
206. Jin, M., Lu, Z., Huang, M., Wang, Y., & Wang, Y. (2011). Sulfated modification and antioxidant activity of exopolysaccharides produced by *Enterobacter cloacae* Z0206. *International Journal of Biological Macromolecules*, 48(4), 607-612.
207. Johansson, L., Virkki, L., Anttila, H., Esselstrom, H., Tuomainen, P. & Sontag-Strohm T. (2006). Hydrolysis of β -glucan. *Food Chemistry*, 97, 71-79.
208. Kabat, E.A., & Bezer, A.E. (1958). The effect of variation in molecular weight on the antigenicity of dextran in man. *Archives of biochemistry and biophysics*, 78(2), 306-318.
209. Kai, K. C., & de Oliveira Petkowicz, C. L. (2010). Influence of extraction conditions on

- properties of seed xyloglucan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46(2), 223-228.
210. Kajaria, D., Tripathi, J., Tripathi, Y.B., Tiwari, S. (2013). In-vitro α -amylase and glycosidase inhibitory effect of ethanolic extract of antiasthmatic drug-Shirishadi. *J. Adv. Pharm. Technol. Res.*, 4, 206-209.
211. Kalegowda, P., Chauhan, A.S., & Urs, S.M.N. (2017). *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw cladode mucilage: Physico-chemical, rheological and functional behavior. *Carbohydrate Polymers*, 157, 1057-1064.
212. Kameyama, K., & Itoh, K. (2014). Intestinal colonization by a Lachnospiraceae bacterium contributes to the development of diabetes in obese mice. *Microbes and environments*, 14054.
213. Karin, M., & Ben-Neriah, Y. (2000). Phosphorylation meets ubiquitination: the control of NF-(kappa) B activity. *Annual review of immunology*, 18, 621.
214. Karp, G. (2010). *Biologie cellulaire et moléculaire: Concepts and experiments*. De Boeck Supérieur, 273.
215. Kawase, K., & Kanno, I. (1983). Soils of China their use and improve ment, nature of fertility and soil properties, and genesis, classification and distribution. *Hakuyusha. Tokyo*, 854-888.
216. Kemassi A., Darem, S., Cherif, R., Boual Z., Sadine, S.E., Aggoune, M.S., Ould El Hadj-Khelil, A. & Ould Elhadj, M.D., 2014. Recherche et identification de quelques plantes médicinales à caractère hypoglycémiant de la pharmacopée traditionnelle des communautés de la vallée du M'Zab (Sahara septentrional Est Algérien). *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, 1(1), 1-5.
217. Khalifa, H.A., Shalaby, S.I., & Abdelaziz, A.S. (2020). Alhagi maurorum aqueous extract protects against norfloxacin-induced hepato-nephrotoxicity in rats. *Chinese Herbal Medicines*, 12 (2), 156-162.
218. Khan, F.M. (2009). Ethno-veterinary medicinal usage of flora of greater Cholistan desert (Pakistan). *Pak Vet*, 29 (2): 75-80.
219. Kheder, F. (2007). Production et purification d'acide férulique estérases. Application à la synthèse d'esters phénoliques (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
220. Klemm, D. & Heublein, B. (2005). HP.Fink, A.Bohn, Angrew.Chem, Int.Edit,44, 3358.
221. Klutts, J.S., Hatanaka, K., Pan, Y.T., & Elbein, A.D. (2002). Biosynthesis of d-Arabinose in Mycobacterium smegmatis: specific Labeling from d-Glucose. *Archives of*

Biochemistry and Biophysics, 398(2), 229-239.

222. Kodiralieva, F.A. & Rakhmanberdyeva, R.K. (2011). Polysaccharides from seeds of plants of the family Fabaceae. *Chemistry of Natural Compounds*, 47, 268-269.

223. Kokwaro, J.O. (1993). Medicinal plants of East Africa.: Published and printed by Kenya literature bureau. *Nairobi Kenya*, 62(2), 176-177.

224. Kontogiorgos, V. (2017). Galactomannans (Guar, Locust Bean, Fenugreek, Tara). In *Encyclopedia of Food Chemistry*. Amsterdam: Elsevier

225. Kumar, A., Lakshman, K., Jayaveera, K., Shekar, S., Swamy, N., Khan, S. & Velumuruga, C. (2011). In vitro α -amylase inhibition and antioxidant activities of methanolic extract of *Amaranthus caudatus* Linn. *Oman Med. J.*, 26, 166-170.

226. Kumirska, J., Czerwicka, M., Kaczyński, Z., Bychowska, A., Brzozowski, K., Thöming, J., & Stepnowski, P. (2010). Application of spectroscopic methods for structural analysis of chitin and chitosan. *Marine drugs*, 8(5), 1567-1636.

227. Laghari, A. H., Ali Memon, A., Memon, S., Nelofar, A., Khan, K.M., & Yasmin, A. (2012). Determination of free phenolic acids and antioxidant capacity of methanolic extracts obtained from leaves and flowers of camel thorn (*Alhagi maurorum*). *Natural product research*, 26(2), 173-176.

228. Laghari, A.H, Memon, S., Nelofar, A., Khan, K.M. (2012b). Antifungal ursene-type triterpene from the roots of *Alhagi camelorum*. *Helv. Chim. Acta.*, 95 (9), 1556-1560.

229. Lakhdar, M., Meriem, K.H., Larbi, B., Amina, R., & Aicha, S. (2013). Phytochemical analysis and antifungal activity of *Anvillea radiata*. *World Applied Sciences Journal*, 26(2), 165-171.

230. Larskaya, I.A. & Gorshkova, T.A. (2015). Plant oligosaccharides-outsiders among elicitors?. *Biochemistry (Moscow)*, 80 (7), 881-900.

231. Lawrence, T. (2009). The nuclear factor B pathway in inflammation. Inflammation biology group. *Cold Spring Harbor Laboratory Press*, 1(6), 1-10.

232. Lemma, C., Tubia, P. & Dotto, M. (2010). Dynamic Materia Medica of *Aloe socotrina*. *Homeopathic*, 23(1): 44-51

233. Lemos, M., Santin, J.R., Mizuno, C.S., Boeing, T., Sousa, J.P.B.D., Nanayakkara, D., ... & Andrade, S.F.D. (2015). *Copaifera langsdorffii*: evaluation of potential gastroprotective of extract and isolated compounds obtained from leaves. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 25, 238-245.

234. Lerouxel, O, Cavalier, DM, Liepman, AH & Keegstra, K. (2006). Biosynthesis of plant cell wall polysaccharides- a complex Process. *Cur Op in Plant Biol* ,9, 621-30.

235. Levy-Ontman, O., Huleihel, M., Hamias, R., Wolak, T., & Paran, E. (2017). An anti-inflammatory effect of red microalga polysaccharides in coronary artery endothelial cells. *Atherosclerosis*, 264, 11-18.
236. Li, N., Zhang, G., Xiong, Y., Makhabel, B., Li, X., & Jia, X. (2010). New isoflavonolignan with quinone reductase inducing activity from *Alhagi pseudalhagi* (MB). *Fitoterapia*, 81(8), 1058-1061.
237. Li, S., & Shah, N.P. (2016a). Characterization, antioxidative and bifidogenic effects of polysaccharides from *Pleurotus eryngii* after heat treatments. *Food Chemistry*, 197, 240-249.
238. Li, S., & Shah, N.P. (2016b). Anti-inflammatory and anti-proliferative activities of natural and sulphonated polysaccharides from *Pleurotus eryngii*. *Journal of Functional Foods*, 23, 80-86.
239. Li, Y.G., Ji, D.F., Zhong, S., Lv, Z.Q., Lin, T.B., Chen, S., & Hu, G.Y. (2011). Hybrid of 1-deoxynojirimycin and polysaccharide from mulberry leaves treat diabetes mellitus by activating PDX-1/insulin-1 signaling pathway and regulating the expression of glucokinase, phosphoenolpyruvate carboxykinase and glucose-6-phosphatase in alloxan-induced diabetic mice. *Journal of Ethnopharmacology*, 134(3), 961-970.
240. Libby, P. (2008). Role of inflammation in atherosclerosis associated with rheumatoid arthritis. *The American journal of medicine*, 121(10), S21-S31.
241. Liener, I. (Ed.). (2012). *The lectins: properties, functions, and applications in biology and medicine*. Elsevier, London.
242. Liu, J., Wen, X.Y., Zhang, X., Q., Pu, H.M., Kan, J. & Jin, C.H. (2015). Extraction, characterization and in vitro antioxidant activity of polysaccharides from black soybean. *Int. J. Biol. Macromol*, 72, 1182-1190.
243. Liu, J., Willfo, S. & Xu, C. (2015). A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5, 31-61.
244. Liu, X., & Adilla, R. (1991). The *Alhagi* resources and its utilization in Xinjiang. *Xinjiang Bot Res Lett*, 195, 202.
245. Liu, X., Chen, Y., Wu, L., Wu, X., Huang, Y., & Liu, B. (2017). Optimization of polysaccharides extraction from *Dictyophora indusiata* and determination of its antioxidant activity. *International journal of biological macromolecules*, 103, 175-181.
246. Liu, Y., Ahmed, S., Sameen, D.E., Wang, Y., Lu, R., Dai, J., ... & Qin, W. (2021). A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 532-546.

247. Lloyd, J.R., & Kossmann, J. (2015). Transitory and storage starch metabolism: two sides of the same coin?. *Current opinion in biotechnology*, 32, 143-148.
248. Lohmann, J. (2009). *Copolymères à blocs «hybrides» à base de xyloglucane et de polymère vinylique en combinant modification chimio-enzymatique et polymérisation radicalaire contrôlée* (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
249. Loizzo, M.R., Rashed, K., Said, A., Bonesi, M., Menichini, F., & Tundis, R. (2014). Antiproliferative and antioxidant properties of Alhagi maurorum Boiss (Leguminosae) aerial parts. *Industrial Crops and Products*, 53, 289-295.
250. Long, X., Yan, Q., Peng, L., Liu, X., & Luo, X. (2019). Effect of various temperatures on *Bletillae rhizoma* polysaccharide extraction and physicochemical properties. *Applied Science*, 9, 116-128.
251. Lucini, L., Pellizzoni, M., Pellegrino, R., Molinari, G.P., & Colla, G. (2015). Phytochemical constituents and in vitro radical scavenging activity of different Aloe species. *Food chemistry*, 170, 501-507.
252. Lukova, P., Nikolova, M., Petit, E., Elboutachfaiti, R., Vasileva, T., Katsarov, P., ... & Delattre, C. (2020). Prebiotic activity of poly-and oligosaccharides obtained from *Plantago major* L. leaves. *Applied Sciences*, 10(8), 2648.
253. Luo, B., Dong, L.M., Xu, Q.L., Zhang, Q., Liu, W.B., Wei, X.Y., ... & Tan, J.W. (2018). Characterization and immunological activity of polysaccharides from *Ixeris polycephala*. *International journal of biological macromolecules*, 113, 804-812.
254. Lupi, R., Del Guerra, S., Mancarella, R., Novelli, M., Valgimigli, L., Pedulli, G.F., et al. (2007). Insulin secretion defects of human type 2 diabetic islets are corrected in vitro by a new reactive oxygen species scavenger. *Diabetes and Metabolism*, 33(5), 340-345.
255. Ma, H.T., Hsieh, J.F., & Chen, S.T. (2015). Anti-diabetic effects of *Ganoderma lucidum*. *Phytochemistry*, 114, 109-113.
256. Ma, L., Liu, T.W., Wallig, M.A., Dobrucki, I.T., Dobrucki, L.W., Nelson, E.R., ... & Smith, A.M. (2016). Efficient targeting of adipose tissue macrophages in obesity with polysaccharide nanocarriers. *ACS nano*, 10(7), 6952-6962.
257. MacNeill, G.J., Mehrpouyan, S., Minow, M.A., Patterson, J.A., Tetlow, I.J., Emes, M.J., & Raines, C. (2017). Starch as a source, starch as a sink: the bifunctional role of starch in carbon allocation. *Journal of Experimental Botany*, 68(16), 4433-4453.
258. Maiza, K., De La Perriere, R.B., & Hammiche, V. (1993). Pharmacopée traditionnelle saharienne: Sahara septentrional. Actes du 2e colloque européen d'ethnopharmacologie et de

- la 11e Conférence Internationale d'Ethnomédecine, Heidelberg. *Mars*, 24-27.
259. Majee, S.B., Avlani, D., Ghosh, P., & Biswas, G.R. (2018). Therapeutic and pharmaceutical benefits of native and modified plant pectin. *Journal of Medicinal Plants Research*, 12(1), 1-6.
260. Malik, A., Kuliev, Z.A., Akhmedov, U.A., Vdovin, A.D., & Abdullaev, N.D. (1997). Catechins and proanthocyanidins of *Alhagi sparsifolia*. I. *Chemistry of natural compounds*, 33(2), 174-178.
261. Marashdah, M.S., & Farraj, A.I. (2010). Pharmacological activity of 2% aqueous acetic acid extract of *Alhagi maurorum* roots. *Journal of Saudi Chemical Society*, 14(3), 247-250.
262. Mathur, N.K. (2012). *Industrial galactomannan polysaccharides* (p. 187). Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL: CRC Press.
263. Mayer, A. M., & Poljakoff-Mayber, A. (1982). *The Germination of Seeds: Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies*. Elsevier.
264. McDougall, G.J., & Stewart, D. (2005). The inhibitory effects of berry polyphenols on digestive enzymes. *Biofactors*, 23(4), 189-195.
265. Mechaala, S., Bouatrous, Y., & Adouane, S. (2021). Traditional knowledge and diversity of wild medicinal plants in El Kantara's area (Algerian Sahara gate): An ethnobotany survey. *Acta Ecologica Sinica*.
266. Meier, H., & Reid, J.S.G. (1982). Reserve polysaccharides other than starch in higher plants. In *Plant carbohydrates I* (pp. 418-471). Springer, Berlin, Heidelberg.
267. Miao, M., Bai, A., Jiang, B., Song, Y., Cui, S.W., & Zhang, T. (2014). Characterisation of a novel water-soluble polysaccharide from *Leuconostoc citreum* SK24. 002. *Food Hydrocolloids*, 36, 265-272.
268. Miara, M.D., Teixidor-Toneu, I., Sahnoun, T., Bendif, H., & Hammou, M.A. (2019). Herbal remedies and traditional knowledge of the Tuareg community in the region of Illizi (Algerian Sahara). *Journal of Arid Environments*, 167, 65-73.
269. Mikaili, P., Shayegh, J., & Asghari, M.H. (2012). Review on the indigenous use and ethnopharmacology of hot and cold natures of phytomedicines in the Iranian traditional medicine. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(2), S1189-S1193.
270. Mikkonen, K.S., Tenkanen, M., Cooke, P., Xu, C., Rita, H., Willför, S., ... & Yadav, M.P. (2009). Mannans as stabilizers of oil-in-water beverage emulsions. *LWT-Food Science and Technology*, 42(4), 849-855.
271. Millet, A. (2014). Rôle pro-inflammatoire et immunomodulateur de la protéinase 3 membranaire exprimée au cours de l'apoptose: implications dans la granulomatose avec

- polyangéite (Doctoral dissertation, Université René Descartes-Paris V).
272. Ministère de L'Aménagement du Territoire et de L'Environnement (M.A.T.E) (2003). Rapport de synthèse en: Évaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité importante pour l'agriculture, 93
273. Miwa, H., Sakaki, N., Sugano, K., Sekine, H., Higuchi, K., Uemura, N., ... & Sugiyama, T. (2004). Recurrent peptic ulcers in patients following successful *Helicobacter pylori* eradication: a multicenter study of 4940 patients. *Helicobacter*, 9(1), 9-16.
274. Mizushima, Y. (1966). Screening test for antirheumatic drugs. *The Lancet*, 288(7460), 443.
275. Moine, C. (2005). *Extraction, caractérisation structurale et valorisation d'une famille d'hemicelluloses du bois: Obtention de matériaux plastiques par modification des xylanes* (Doctoral dissertation, Limoges).
276. Monsigny, M., Petit, C., & Roche, A.C. (1988). Colorimetric determination of neutral sugars by a resorcinol sulfuric acid micromethod. *Analytical biochemistry*, 175(2), 525-530.
277. Morel A., Lecoq G. & Menninger D.J. (2012). Evaluation de la prise en charge du diabète Tome1. Membres de l'Inspection générale des affaires sociales, France, 249.
278. Morel, S. (2011). *Etude phytochimique et évaluation biologique de Derris ferruginea Benth.(Fabaceae)* (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
279. Morot-Gaudry, J.F. (2016). Les végétaux, un nouveau pétrole?. *Les végétaux, un nouveau pétrole?*, 1-160.
280. Morrison, F., Shubina, M., & Turchin, A. (2011). Encounter frequency and serum glucose level, blood pressure, and cholesterol level control in patients with diabetes mellitus. *Archives of internal medicine*, 171(17), 1542-1550.
281. Morrison, I.M. (1988). Hydrolysis of plant cell walls with trifluoroacetic acid. *Phytochemistry*, 27(4), 1097-1100.
282. Mosihuzzman, M., Naheed, S., Hareem, S., Talib, S., Abbas, G., Khan, S.N., ... & Israr, M. (2013). Studies on α -glucosidase inhibition and anti-glycation potential of *Iris loczyi* and *Iris unguicularis*. *Life sciences*, 92(3), 187-192.
283. Muchlisyam, J.S., & Harahap, U. (2016). Hemicellulose: isolation and its application in pharmacy. *Handbook of sustainable polymers: Processing and applications*, 305-339.
284. Mudgil, D., Barak, S., & Khatkar, B.S. (2014). Guar gum: processing, properties and food applications—a review. *Journal of food science and technology*, 51(3), 409-418.
285. Mueller, M., Hobiger, S., & Jungbauer, A. (2010). Anti-inflammatory activity of extracts

- from fruits, herbs and spices. *Food chemistry*, 122(4), 987-996.
286. Mueller, S.C., & Brown Jr, R.M. (1980). Evidence for an intramembrane component associated with a cellulose microfibril-synthesizing complex in higher plants. *The Journal of cell biology*, 84(2), 315-326.
287. Muhammad, G., Hussain, M.A., Anwar, F., Ashraf, M., & Gilani, A.H. (2015). Alhagi: a plant genus rich in bioactives for pharmaceuticals. *Phytotherapy research*, 29(1), 1-13.
288. Murrell W., 1871. *The Chemist and Druggist*, 884.
289. Naoumkina, M., Torres-Jerez, I., Allen, S., He, J., Zhao, P.X., Dixon, R.A., & May, G.D. (2007). Analysis of cDNA libraries from developing seeds of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub). *BMC Plant Biology*, 7(1), 1-12.
290. Nascimento, A.M., de Souza, L.M., Baggio, C.H., Werner, M.F.D.P., Maria-Ferreira, D., da Silva, L.M., ... & Cipriani, T.R. (2013). Gastroprotective effect and structure of a rhamnogalacturonan from *Acemella oleracea*. *Phytochemistry*, 85, 137-142.
291. National Agency for Investment Development Invest in Algeria (N.A.I.D), (2013) Celebrations of S'Beiba (Illizi).. on line. <http://www.andi.dz/PDF/monographies/Illizi.pdf>
292. Naukaet L., 1987. Flowering Plants, Their Chemical Composition and Use [in Russian]. 3, 326.
293. Neamah, N.F. (2012). A pharmacological evaluation of aqueous extract of *Alhagi maurorum*. *Glob J Pharmacol*, 6(1), 41-6.
294. Nergard, C.S., Diallo, D., Inngjerdigen, K., Michaelsen, T.E., Matsumoto, T., Kiyohara, H., ... & Paulsen, B.S. (2005). Medicinal use of *Cochlospermum tinctorium* in Mali: anti-ulcer-, radical scavenging-and immunomodulating activities of polymers in the aqueous extract of the roots. *Journal of ethnopharmacology*, 96(1-2), 255-269.
295. Nešić, A., Cabrera-Barjas, G., Dimitrijević-Branković, S., Davidović, S., Radovanović, N., & Delattre, C. (2019). Prospect of polysaccharide-based materials as advanced food packaging. *Molecules*, 25(1), 135.
296. Newton, L.E. (2011). *Illustrated handbook of succulent plants: monocotyledons*. Springer, Berlin Heidelberg New York, 103-186.
297. Nguema-Ona, E., Andème-Onzighi, C., Aboughe-Angone, S., Bardor, M., Ishii, T., Lerouge, P., & Driouich, A. (2006). The reb1-1 mutation of *Arabidopsis*. Effect on the structure and localization of galactose-containing cell wall polysaccharides. *Plant Physiology*, 140(4), 1406-1417.
298. Nguyen, H.H., Nguyen, H.V., & Savage, G.P. (2019). Properties of pectin extracted from Vietnamese mango peels. *Foods*, 8(12), 629.

299. Ni, W., Gao, T., Wang, H., Du, Y., Li, J., Li, C., ... & Bi, H. (2013). Anti-fatigue activity of polysaccharides from the fruits of four Tibetan plateau indigenous medicinal plants. *Journal of ethnopharmacology*, 150(2), 529-535.
300. Ni, Y., & Tizard, I.R. (2004). Analytical methodology: the gel-analysis of aloe pulp and its derivatives. In *Aloes* (pp. 129-144). CRC Press.
301. Nie, S., Cui, S. W., Xie, M. (2017). Bioactive polysaccharides.
302. Nishanbaev, S., Shamyayov, Sh. & Sagdullaev, Sh. (2019a). Specificity of metabolism of plants of the genus *Alhagi*. Biological activity and adaptive role. XIII International Symposium on the Chemistry of Natural Compounds, Institute of Chemistry of Plant Substances, Uzbekistan
303. Nishanbaev, S., Bobakulov, K., Okhudedayev, B., Sasmakov, S., Yusupova, E., Azimova, S., & Abdullaev, N. (2019). Component composition of the extracts and essential oils from the *Alhagi canescens*, growing in Uzbekistan and their antimicrobial activity. *Natural product research*, 33(23), 3417-3420.
304. Nishanbaev, S.Z., Bobakulov, K.M., Narbutayeva, D.A., Aripova, S.F., Khushbaktova, Z.A., & Abdullaev, N.D. (2020). Flavonoids from the aerial part of *Alhagi persarum* of the flora of Uzbekistan and their biological activity. *Chemistry of Natural Compounds*, 56(4), 729-731.
305. Niu, J., Pi, Z., Yue, H., Wang, Y., Yu, Q., & Liu, S. (2012). Effect of ginseng polysaccharide on the urinary excretion of type 2 diabetic rats studied by liquid chromatography–mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*, 907, 7-12.
306. Nwokocha, L.M., Williams, P.A., & Yadav, M.P. (2018). Physicochemical characterisation of the galactomannan from *Delonix regia* seed. *Food Hydrocolloids*, 78, 132-139.
307. Okorie, O. & Nwachukwu, N. (2011). Evaluation of the suspending properties of *Aloe barbadensis* (aloe vera) gum in pharmaceutical suspension. *Research Article*, 6(2), 14-17.
308. Olennikov, D.N. & Rokhin, A.V. (2010). Fabaceae Polysaccharides: galactomannan from *Astragalus cicer* seeds. *Chemistry of Natural Compounds*, 46(2), 165-168.
309. Osman, N.I., Sidik, N.J., Awal, A., Adam, N.A.M., & Rezali, N.I. (2016). In vitro xanthine oxidase and albumin denaturation inhibition assay of *Barringtonia racemosa* L. and total phenolic content analysis for potential anti-inflammatory use in gouty arthritis. *Journal of Intercultural Ethnopharmacology*, 5(4), 343.
310. Ould El Hadj, M., Hadj-Mahammed, M., & Zabeirou, H. (2003). Place des plantes spontanées dans la médecine traditionnelle de la région de Ouargla (Sahara septentrional est).

311. Ozenda, P. (2004). Flore et végétation du Sahara. Troisième édition, CNRS, Paris
312. Palici, I.F. (2016). *Valorisation des Activités biologiques de certaines espèces végétales sahariennes Nord-africaines* (Doctoral dissertation, Bordeaux).
313. Panda, P., Gour, G., Saraf, S., Tiwari, A., Verma, A., Jain, A., & Jain, S., 2019. Application Potential of Pectin in Drug Delivery. *Natural Polymers for Pharmaceutical Applications: Volume 1: Plant-Derived Polymers*, Page 87-114, Publisher CRC Press
314. Paramita, D., Biswanath, S.A., Sabyasachi, M. (2011). *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3, 4-7.
315. Park, H.J. (2014). Immune stimulatory activity of BRP-4, an acidic polysaccharide from an edible plant, *Basella rubra* L. *Asian Pacific journal of tropical medicine*, 7(11), 849-853.
316. Parvathy, K.S., Susheelamma, N.S., Tharanathan, R.N., & Gaonkar, A.K. (2005). A simple non-aqueous method for carboxymethylation of galactomannans. *Carbohydrate Polymers*, 62(2), 137-141.
317. Patel, M.K., Tanna, B., Mishra, A., & Jha, B. (2018). Physicochemical characterization, antioxidant and anti-proliferative activities of a polysaccharide extracted from psyllium (*P. ovata*) leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 976-987.
318. Paulsen, B.S., Olafsdóttir, E.S., & Ingólfssdóttir, K. (2002). Chromatography and electrophoresis in separation and characterization of polysaccharides from lichens. *Journal of chromatography*, 967(1), 163-171.
319. Peña, M.J., Tuomivaara, S.T., Urbanowicz, B.R., O'Neill, M.A., & York, W.S. (2012). Methods for structural characterization of the products of cellulose- and xyloglucan hydrolyzing enzymes. *Methods in Enzymology*, 510, 121-139.
320. Perez, S., & Samain, D. (2010). Structure and engineering of celluloses. *Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry*, 64, 25-116.
321. Pervaiz, M.H., Dickinson, M.G., & Yamani, M. (2006). Is digoxin a drug of the past?. *Cleveland Clinic journal of medicine*, 73(9), 821-4.
322. Petera, B. (2016). Extraction et caractérisations (structurale et physico-chimique) de polysaccharides hydrosolubles issus de cladoces de *Cereus triangularis* (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
323. Petkowicz, C.L.O., Reicher, F., & Mazeau, K. (1998). Conformational analysis of galactomannans: from oligomeric segments to polymeric chains. *Carbohydrate Polymers*, 37(1), 25-39.
324. Picout, D.R., Ross-Murphy, S.B., Jumel, K., & Harding, S.E. (2002). Pressure cell

- assisted solution characterization of polysaccharides. 2. Locust bean gum and tara gum. *Biomacromolecules*, 3(4), 761-767.
325. Pierre, G., Delattre, C., Benaoun, F., Boual, Z., Gardarin, C., Vial, C., ... & Michaud, P. (2017, November). Caractérisation structurale et étude des propriétés physico-chimiques et biologiques de deux polysaccharides extraits des plantes africaines, *Plantago notata* et *Astragalus armatus*. In *Séminaire International POLYSAC 2017*.
326. Poletto, M., Ornaghi, H.L. & Zattera, A.J. (2014). Native cellulose: structure, characterization and thermal properties. *Materials*, 7(9), 6105-6119.
327. Pousset, J.L. (2004). Plantes médicinales d'Afrique (Comment les reconnaître). Édisud, La Calade, 25-26.
328. Prajapati, V.D., Jani, G.K., Moradiya, N.G., Randeria, N.P., Nagar, B.J., Naikwadi, N.N., & Variya, B.C. (2013). Galactomannan: a versatile biodegradable seed polysaccharide. *International journal of biological macromolecules*, 60, 83-92.
329. Quezel, P., & Santa, S. (1962). New flora of Algeria and southern desert regions. *New flora of Algeria and southern desert regions*.
330. Quezel, P., & Santa, S. (1963). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales (No. 581.965 Q8).
331. Rahar, S., Swami, G., Nagpal, N., Nagpal, M.A. & Singh, G.S. (2011). Preparation, characterization, and biological properties of β -glucans. *Journal of advanced pharmaceutical technology & research*, 2(2), 94-103.
332. Rahman, S.M.A., Abd-Ellatif, S.A., Deraz, S.F., & Khalil, A.A. (2011). Antibacterial activity of some wild medicinal plants collected from western Mediterranean coast, Egypt: Natural alternatives for infectious disease treatment. *African Journal of Biotechnology*, 10(52), 10733-10743.
333. Rains, J.L., & Jain, S.K. (2011). Oxidative stress, insulin signaling, and diabetes. *Free Radical Biology & Medicine*, 50(5), 567-575.
334. Rakhimov, D.A. & Dzhumamuratova, A. (1993). Polysaccharides of *Alhagi persarum*. *Chemistry of Natural Compounds*, 29 (5), 674-675.
335. Ramsay, P.T., & Carr, A. (2011). Gastric acid and digestive physiology. *Surgical Clinics*, 91(5), 977-982.
336. Rani, A.A., Punitha, S.M.J., & Rema, M. (2014). Anti-inflammatory activity of flower extract of *Cassia auriculata*-an in-vitro study. *International Research Journal of Pharmaceutical and Applied Sciences*, 4(1), 57-60.
337. Ratner, B.D. (1996). Surface modification of polymers for biomedical applications:

chemical, biological, and surface analytical challenges. In *Surface modification of polymeric biomaterials* (pp. 1-9). Springer, Boston, MA.

338. Reid, J.G. (1985). Cell wall storage carbohydrates in seeds-biochemistry of the seed “gums” and “hemicelluloses”. In *Advances in Botanical Research* (Vol. 11, pp. 125-155). Academic Press.

339. Reis, D., Vian, B., Darzens, D., & Roland, J.C. (1987). Sequential patterns of intramural digestion of galactoxyloglucan in tamarind seedlings. *Planta*, 170(1), 60-73.

340. Ren, D., Zhao, Y., Nie, Y., Yang, N., & Yang, X. (2014). Hypoglycemic and hepatoprotective effects of polysaccharides from *Artemisia sphaerocephala* Krasch seeds. *International journal of biological macromolecules*, 69, 296-306.

341. Ren, Y., Bai, Y., Zhang, Z., Cai, W., & Del Rio Flores, A. (2019). The preparation and structure analysis methods of natural polysaccharides of plants and fungi: A review of recent development. *Molecules*, 24(17), 3122.

342. Ren, Y.Y., Zhu, Z.Y., Sun, H.Q., & Chen, L.J. (2017). Structural characterization and inhibition on α -glucosidase activity of acidic polysaccharide from *Annona squamosa*. *Carbohydrate polymers*, 174, 1-12.

343. Repetto, M.G., & Llesuy, S.F. (2002). Antioxidant properties of natural compounds used in popular medicine for gastric ulcers. *Brazilian journal of medical and biological research*, 35, 523-534.

344. Rinaudo, M. (2008). Main properties and current applications of some polysaccharides as biomaterials. *Polymer International*, 57(3), 397-430.

345. Rjeibi, I., Hentati, F., Feriani, A., Hfaiedh, N., Delattre, C., Michaud, P., & Pierre, G. (2019). Novel antioxidant, anti- α -amylase, anti-inflammatory and antinociceptive water-soluble polysaccharides from the aerial part of *Nitraria retusa*. *Foods*, 9(1), 28.

346. Robert, A., Nezamis, J.E., Lancaster, C., & Hauchar, A.J. (1979). Cytoprotection by prostaglandins in rats: Prevention of gastric necrosis produced by alcohol, HCl, NaOH, hypertonic NaCl, and thermal injury. *Gastroenterology*, 77, 433-443.

347. Rochette, L., Zeller, M., Cottin, Y., & Vergely, C. (2014). Diabetes, oxidative stress and therapeutic strategies. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1840(9), 2709-2729.

348. Rodrigues, C.F., Faria, L. & Andrade, J.C. (2015). Pectin. *Encyclopedia of Biomedical Polymers and Polymeric Biomaterials*, 1st Edition (Taylor & Francis), 5881-5891.

349. Roger, O. (2002). Etude d'oligosaccharides bioactifs issus d'exopolysaccharides bactériens: obtention, caractérisation et relation structure/fonction (Doctoral dissertation, Paris 13).

350. Roland, J. (1980). Visualisation des polysaccharides au niveau ultrastructural. Les Polymères Végétaux-Polymères "Pariétaux et Alimentaires non Azotéz". Costes C. et Monties B., Paris, Francia, 30-45.
351. Roods, B. (2008). Uit die Veldapteek, 2nd edition. Protea Boekhuis, Pretoria, South Africa.
352. Ruiz, G. (2005). Extraction, détermination structurale et valorisation chimique de phycocolloïdes d'algues rouges (Doctoral dissertation, Limoges).
353. Saeidy, S., Petera, B., Pierre, G., Fenoradosoa, T.A., Djomdi, D., Michaud, P., & Delattre, C. (2021). Plants arabinogalactans: From structures to physico-chemical and biological properties. *Biotechnology Advances*, 53, 107771.
354. Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, E., (2004). *Opuntia* spp. Mucilages : A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environment*, 57, 275-290.
355. Saffer, A.M. (2018). Expanding roles for pectins in plant development. *Journal of integrative plant biology*, 60(10), 910-923.
356. Saidou, C. (2012). Propriétés physico-chimiques et fonctionnelles des gommés hydrocolloïdes des écorces de *Triumfetta cordifolia* et *Bridelia thermifolia* (Doctoral dissertation, Grenoble).
357. Sakaki-Yumoto, M., Katsuno, Y., & Derynck, R. (2013). TGF- β family signaling in stem cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1830(2), 2280-2296.
358. Salama, S.M., Gwaram, N.S., AlRashdi, A.S., Khalifa, S.A., Abdulla, M.A., Ali, H.M., & El-Seedi, H.R. (2016). A zinc morpholine complex prevents HCl/ethanol-induced gastric ulcers in a rat model. *Scientific Reports*, 6(1), 1-15.
359. Sanjeeva, K.A., Fernando, I.P.S., Kim, S.Y., Kim, H.S., Ahn, G., Jee, Y., & Jeon, Y.J. (2018). In vitro and in vivo anti-inflammatory activities of high molecular weight sulfated polysaccharide; containing fucose separated from *Sargassum horneri*. *International journal of biological macromolecules*, 107, 803-807.
360. Santos, H.P., & Buckeridge, M.S. (2004). The role of the storage carbon of cotyledons in the establishment of seedlings of *Hymenaea courbaril* under different light conditions. *Annals of Botany*, 94(6), 819-830.
361. Saulnier, L., Sado, P.E., Branlard, G., Charmet, G., & Guillon, F. (2007). Wheat arabinoxylans: exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *Journal of Cereal Science*, 46(3), 261-281.
362. Saxena, I.M., & Brown Jr, R.M. (2005). Cellulose biosynthesis: current views and evolving concepts. *Annals of botany*, 96(1), 9-21.

363. Scalbert, A., Johnson, I.T., & Saltmarsh, M. (2005). Polyphenols: antioxidants and beyond. *The American journal of clinical nutrition*, 81(1), 215S-217S.
364. Scheller, H.V. & Ulvskov, P. (2010). Hemicelluloses. In S Merchant, WR Briggs, D Ort, eds, Annual Review of Plant Biology, Vol 61, Vol 61. Annual Reviews, Palo Alto, 263-289
365. Schepetkin I.A. And Quinn M. T., 2006. Botanical polysaccharides: Macrophage immunomodulation and therapeutic potential. *International Immunopharmacology*, vol. 6: 317-333.
366. Scofield, G.N., Ruuska, S.A., Aoki, N., Lewis, D.C., Tabe, L.M., & Jenkins, C.L. (2009). Starch storage in the stems of wheat plants: localization and temporal changes. *Annals of botany*, 103(6), 859-868.
367. Seregin R.M. & Sokolov S.D., (1978). Medicinal Plants and Their Use [in Russian], Stavropolskoe Knizhnoe Izd., Stavropol.
368. Shabani, H., Askari, G., Jahanbin, K., & Khodaeian, F. (2016). Evaluation of physicochemical characteristics and antioxidant property of *Prunus avium* gum exudates. *International journal of biological macromolecules*, 93, 436-441.
369. Sharma, B.R., Dhuldhoya, N.C. & Merchant, S.N. (2008). Science and Technology Entrepreneurship, 3: 1-10
370. Sharma, P., Sharma, S., Ramakrishna, G., Srivastava, H., & Gaikwad, K. (2021). A comprehensive review on leguminous galactomannans: structural analysis, functional properties, biosynthesis process and industrial applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(2), 443-465.
371. Sherwood, E.R., & Toliver-Kinsky, T. (2004). Mechanisms of the inflammatory response. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 18(3), 385-405.
372. Shi, Z., Chen, Y.L., Chen, Y.S., Lin, Y.R., Liu, S.W., Ge, X.J., ... & Yang, Q.E. (2011). *Flora of China*, 20/21, 822.
373. Shih, S.C., Tseng, K.W., Lin, S.C., Kao, C.R., Chou, S.Y., Wang, H.Y., ... & Chien, C.L. (2005). Expression patterns of transforming growth factor-beta and its receptors in gastric mucosa of patients with refractory gastric ulcer. *World Journal of Gastroenterology: WJG*, 11(1), 136.
374. Siegmund, S., Haas, S., Schneider, A., & Singer, M.V. (2003). Animal models in gastrointestinal alcohol research—a short appraisal of the different models and their results. *Best Practice & Research Clinical Gastroenterology*, 17(4), 519-542.
375. Silva, H.C.H., Caraciolo, R.L.F., Marangon, L.C., Ramos, M.A., Santos, L.L., &

- Albuquerque, U.P. (2014). Evaluating different methods used in ethnobotanical and ecological studies to record plant biodiversity. *Journal of ethnobiology and ethnomedicine*, 10(1), 1-11.
376. Simas-Tosin, F.F., Barraza, R.R., Maria-Ferreira, D., Werner, M.F.D.P., Baggio, C.H., Wagner, R., ... & Gorin, P.A. (2014). Glucuronoarabinoxylan from coconut palm gum exudate: Chemical structure and gastroprotective effect. *Carbohydrate polymers*, 107, 65-71.
377. Simon, J., Müller, H.P., Koch, R. & Müller, V. (1998). Thermoplastic and biodegradable polymers of cellulose. *Polymer degradation and stability*, 59(1-3), 107-115.
378. Sinelnikov, N.A. (1965). Medicinal Plant Yantak or Camel grass Alhagi Adans and Its Medicinal Use [in Russian], Ashkhabad, 219.
379. Singab, B., El-Hefnawy, H.M., Esmat, A., Gad, A.H., Nazeam, J.A. (2015). A Systemic Review on Aloe arborescens Pharmacological Profile: Biological Activitie and Pilot Clinical Trials. *Phytother. Res.*, 29, 1858-1867.
380. Sittikijyothin, W., Torres, D., & Gonçalves, M.P. (2005). Modelling the rheological behaviour of galactomannan aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 59(3), 339-350.
381. Sjöström, E., & Westermark, U. (1999). Chemical composition of wood and pulps: basic constituents and their distribution. In *Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking* (pp. 1-19). Springer, Berlin, Heidelberg.
382. Smith, N.D. (1996). Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Analyst*, 121, 83N.
383. Souza, R.O., Assreuy, A.M., Madeira, J.C., Chagas, F.D., Parreiras, L.A., Santos, G.R., ... & Pereira, M.G. (2015). Purified polysaccharides of Geoffroea spinosa barks have anticoagulant and antithrombotic activities devoid of hemorrhagic risks. *Carbohydrate Polymers*, 124, 208-215.
384. Spichiger, R.E., Savolainen, V.V., Figeat, M., & Jeanmonod, D. (2002). Botanique systématique des plantes à fleurs. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Francia*.
385. Spik, G. et Montreuil, J. (1964). Deux causes d'erreur dans les dosages colorimétriques des oses neutres totaux. *Bulletin de la Societe de Chimie Biologique*, 46(5-6), 739.
386. Srichamroen, A., Thomson, A.B., Field, C.J., & Basu, T.K. (2009). In vitro intestinal glucose uptake is inhibited by galactomannan from Canadian fenugreek seed (*Trigonella foenum graecum* L) in genetically lean and obese rats. *Nutrition Research*, 29(1), 49-54.
387. Srivastava, B., Sharma, H., Dey, Y.N., Wanjari, M.M., & Jadhav, A.D. (2014). Alhagi pseudalhagi: a review of its phyto-chemistry, pharmacology, folklore claims and Ayurvedic studies. *International journal of herbal medicine*, 2(2), 47-51.

388. Srivastava, M., & Kapoor, V.P. (2005). Seed galactomannans: an overview. *Chemistry & Biodiversity*, 2(3), 295-317.
389. Stark, G. (2005). Functional consequences of oxidative membrane damage. *Journal of Membrane Biology*, 205(1), 1-16.
390. Stephen, A.M. (1983). Other plant polysaccharides. In *The polysaccharides* (pp. 97-193). Academic Press.
391. Stevens, R.J., Douglas, K.M., Saratzis, A.N., & Kitas, G.D. (2005). Inflammation and atherosclerosis in rheumatoid arthritis. *Expert reviews in molecular medicine*, 7(7), 1-24.
392. Stewart, M.J. (2007). Medicinal applications and toxicological activities of aloe products. *Pharm. Biol.*, 45(5), 411-420.
393. Stockmayer, W.H. (1950). Light scattering in multi-component systems. *The Journal of Chemical Physics*, 18(1), 58-61.
394. Stuart, B. (2000). Infrared spectroscopy. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 14
395. Sukalingam, K., Ganesan, K., & Ponnusamy, K. (2015). Evaluation of antidiabetic activity of polyherbal formulations on type 2 diabetic patients: A single blinded randomized study. *Int. J. Intg. Med. Sci*, 2, 90-98.
396. Sultan, A., Moohammadnor, M., & Eshbakova, K.A. (2011). Chemical constituents of *Alhagi pseudalhagi*. *Chemistry of Natural Compounds*, 47(1), 140-141.
397. Sun, C., Chen, Y., Li, X., Tai, G., Fan, Y., & Zhou, Y. (2014). Anti-hyperglycemic and anti-oxidative activities of ginseng polysaccharides in STZ-induced diabetic mice. *Food & Function*, 5(5), 845-848.
398. Sung, J.J., Tsoi, K.K., Ma, T.K., Yung, M.Y., Lau, J.Y., & Chiu, P.W. (2010). Causes of mortality in patients with peptic ulcer bleeding: a prospective cohort study of 10,428 cases. *Official journal of the American College of Gastroenterology/ ACG*, 105(1), 84-89.
399. Suthar, P. (2016). Traditional uses, phytochemistry, pharmacological properties of plant *Alhagi maurorum* (MEDIK.): A review.
400. Suthari, S., Kota, S., Kanneboyena, O., Gul, M.Z., & Abbagani, S. (2021). Ethnobotanical perspectives in the treatment of communicable and noncommunicable diseases. In *Phytomedicine* (pp. 251-289). Academic Press.
401. Suty, L. (2014). *Les végétaux: évolution, développement et reproduction*. Quae.
402. Talmadge, J., Chavez, J., Jacobs, L., Munger, C., Chinnah, T., Chow, J. T., ... & Yates, K. (2004). Fractionation of *Aloe vera* L. inner gel, purification and molecular profiling of activity. *International Immunopharmacology*, 4(14), 1757-1773.

403. Tamaki, Y., Teruya, T., & Tako, M. (2010). The chemical structure of galactomannan isolated from seeds of *Delonix regia*. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 74(5), 1110-1112.
404. Tarigan, J.B., Barus, D.A., Dalimunthe, A., Perangin-Angin, S., & Nguyen, T.T. (2020). Physicochemical properties of *Arenga pinnata* Merr. endosperm and its antidiabetic activity for nutraceutical application. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 11(1), 1.
405. Tarigan, J.B., Dalimunthe, A., & Perangin-angin, S. (2020). The Effect of *Arenga Pinnata* Merr. Polysaccharide Extract on Blood Glucose Level. *Proceedings of the International Conference of Science, Technology, Engineering, Environmental and Ramification Researches (ICOSTEERR)*, Science and Technology Publications: Medan, Indonesia, 964-968.
406. Tayeb, A. H., Amini, E., Ghasemi, S., & Tajvidi, M. (2018). Cellulose nanomaterials—Binding properties and applications: A review. *Molecules*, 23(10), 2684.
407. Thombare, N., Jha, U., Mishra, S., & Siddiqui, M.Z. (2016). Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review. *International journal of biological macromolecules*, 88, 361-372.
408. Thomson, P., Medina, D.A., Ortúzar, V., Gotteland, M., & Garrido, D. (2018). Anti-inflammatory effect of microbial consortia during the utilization of dietary polysaccharides. *Food Research International*, 109, 14-23.
409. Tong, H., Liang, Z., & Wang, G. (2008). Structural characterization and hypoglycemic activity of a polysaccharide isolated from the fruit of *Physalis alkekengi* L. *Carbohydrate polymers*, 71(2), 316-323.
410. Triplitt, C.L., Reasner, C.A., Isley, W.L., in: J.T. Dipiro (Ed.), *Pharmacotherapy: A Pathophysiologic Approach*, sixth ed., McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2005, pp. 1334-1336.
411. Tsyganova, A.V. & Tsyganov, V.E. (2019). Plant cell wall in symbiotic interactions. pectins. *Biology Agricultural*, 3 (54), 446-457.
412. Turgumbayeva, A.A., Ustenova, G.O., Stabayeva, G.C., & Ross, S. A. (2014). Phytochemical Screening and Biological Activities of the Camel Thorn (*Alhagi kirghisorum*) and Safflower Flowers (*Carthamus tinctorius* L.) Grown in Kazakhstan. *American-Eurasian J Agric Environ Sci*, 14(12), 1487-91.
413. Twentyman L.R. et FFHom M.B., 1984. The Liliaceae. 73(3).
414. Tzianabos A.O. (2000). Polysaccharide Immunomodulators as Therapeutic Agents:

- Structural Aspects and Biologic Function. *Clinical Microbiology Reviews*, 13, 523-533.
415. Urakawa, H., Mimura, M., & Kajiwara, K. (2002). Diversity and versatility of plant seed xyloglucan. *Trends in Glycoscience and Glycotechnology*, 14(80), 355-376.
416. Van den Eynden V., Vernemmen P., Van Damme P. (1992). The Ethnobotany of the Topnaar. Universiteit Gent, Gent, Belgium.
417. Vane, J.R., & Botting, R.M. (1995). New insights into the mode of action of anti-inflammatory drugs. *Inflammation research*, 44(1), 1-10.
418. Varindra J., Diviya S., Joginder S. & Gosal S., 2011. Biochemical studies of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel of the field grown and micropropagated plants at different developmental stages. *Plant Biochem. Biotechnol.*, 20(2), 283-287
419. Vieira, I.G.P., Mendes, F.N.P., da Silva, S.C., Paim, R.T.T., da Silva, B.B., Benjamin, S.R., ... & Guedes, M.I.F. (2018). Antidiabetic effects of galactomannans from *Adenantha pavonina* L. in streptozotocin-induced diabetic mice. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 11(2), 116.
420. Vilaplana, F., Zou, W., & Gilbert, R.G. (2018). Starch and plant storage polysaccharides. *Bioinspired Materials Science and Engineering*, 149-165.
421. Vilaró, P., Bennadji, Z., Budelli, E., Moyna, G., Panizzolo, L., & Ferreira, F. (2018). Isolation and characterization of galactomannans from *Prosopis affinis* as potential gum substitutes. *Food Hydrocolloids*, 77, 711-719.
422. Wagay N.A., Yattoo G. M. & Khan N.A., 2018. Phytochemical evaluation and identification of bioactive compounds in camel thorn *Alhagi pseudalhagi*. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 7 (4), 300-311.
423. Wang P., Li S., Zhou T., Gan R-Y., Zhang P. & Li H-B. (2016). Resources and Bioactivities of Polysaccharides. *International Journal of Traditional and Natural Medicines*, 6 (1), 1-8.
424. Wang, J., Zhang, Q., Zhang, Z., & Li, Z. (2008). Antioxidant activity of sulfated polysaccharide fractions extracted from *Laminaria japonica*. *International journal of biological macromolecules*, 42(2), 127-132.
425. Wang, L., Liu, F., Wang, A., Yu, Z., Xu, Y., & Yang, Y. (2017). Purification, characterization and bioactivity determination of a novel polysaccharide from pumpkin (*Cucurbita moschata*) seeds. *Food Hydrocolloids*, 66, 357-364.
426. Wang, P.C., Zhao, S., Yang, B.Y., Wang, Q.H. & Kuang, H.X. (2016). Anti-diabetic polysaccharides from natural sources: A review. *Carbohydrate polymers*, 148, pp.86-97.
427. Wang, X., Wang, X., Sun, H., Wang, P., Zhang, P., Lou, Q., ... & Zhang, M. (2015). The

rheological properties of polysaccharides from rapeseed. *Current Topics in Nutraceutical Research*, 13(4).

428. Wang, X.Y., Yin, J.Y., Zhao, M.M., Liu, S.Y., Nie, S.P., & Xie, M.Y. (2018). Gastroprotective activity of polysaccharide from *Hericium erinaceus* against ethanol-induced gastric mucosal lesion and pylorus ligation-induced gastric ulcer, and its antioxidant activities. *Carbohydrate Polymers*, 186, 100-109.

429. Wang, Y., Zhang, N., Kan, J., Zhang, X., Wu, X., Sun, R., & Jin, C. (2019). Structural characterization of water-soluble polysaccharide from *Arctium lappa* and its effects on colitis mice. *Carbohydrate polymers*, 213, 89-99.

430. Wang, Y.H., & Zeng, K.W. (2019). Natural products as a crucial source of anti-inflammatory drugs: recent trends and advancements. *Traditional Medicine Research*, 4(5), 257-268.

431. Warrand, J. (2004). *Etude structurale et propriétés en solution des polysaccharides constitutifs du mucilage de lin (Linum Usitatissimum L.)* (Doctoral dissertation, Amiens).

432. Weber, D.J., Ansari, R., Gul, B., & Khan, M.A. (2007). Potential of halophytes as source of edible oil. *Journal of Arid Environments*, 68(2), 315-321.

433. Wehr, J.B., Menzies, N.W., & Blamey, F.P.C. (2004). Alkali hydroxide-induced gelation of pectin. *Food Hydrocolloids*, 18(3), 375-378.

434. Wei, X., Wang, Y., Li, J., Wang, F., Chang, G., Fu, T., & Zhou, W. (2018). Effects of temperature on cellulose hydrogen bonds during dissolution in ionic liquid. *Carbohydrate polymers*, 201, 387-391.

435. Wojciechowski, M.F., Lavin, M., & Sanderson, M.J. (2004). A phylogeny of legumes (Leguminosae) based on analysis of the plastid matK gene resolves many well-supported subclades within the family. *American journal of botany*, 91(11), 1846-1862.

436. Wu, G.J., Shiu, S.M., Hsieh, M.C., & Tsai, G.J. (2016). Anti-inflammatory activity of a sulfated polysaccharide from the brown alga *Sargassum cristaefolium*. *Food Hydrocolloids*, 53, 16-23.

437. Wu, J., Shi, S., Wang, H., & Wang, S. (2016). Mechanisms underlying the effect of polysaccharides in the treatment of type 2 diabetes: A review. *Carbohydrate polymers*, 144, 474-494.

438. Wu, Y., Ding, W., Jia, L., & He, Q. (2015). The rheological properties of tara gum (*Caesalpinia spinosa*). *Food chemistry*, 168, 366-371.

439. Wu, Y.S., Ho, S.Y., Nan, F.H., & Chen, S.N. (2016). *Ganoderma lucidum* beta 1, 3/1, 6 glucan as an immunomodulator in inflammation induced by a high-cholesterol diet. *BMC*

complementary and alternative medicine, 16(1), 1-11.

440. Xiu, A., Zhou, M., Zhu, B., Wang, S., & Zhang, J. (2011). Rheological properties of Salecan as a new source of thickening agent. *Food Hydrocolloids*, 25(7), 1719-1725.

441. Xu, G.Y., Liao, A.M., Huang, J.H., Zhang, J.G., Thakur, K., & Wei, Z.J., 2019. The rheological properties of differentially extracted polysaccharides from potatoes peels. *International journal of biological macromolecules*, 137, 1-7.

442. Xu, H.S., Wu, Y.W., Xu, S.F., Sun, H.X., Chen, F.Y., & Yao, L. (2009). Antitumor and immunomodulatory activity of polysaccharides from the roots of *Actinidia eriantha*. *Journal of ethnopharmacology*, 125(2), 310-317.

443. Xu, J., Li, Z., Cao, M., Zhang, H., Sun, J., Zhao, J. & Yang, L. (2012). Synergetic effect of *Andrographis paniculata* polysaccharide on diabetic nephropathy with andrographolide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 51(5), 738-742.

444. Xue, W., Li, X.Y., Zhu, J.T., & Lin, L.S. (2012). Effects of temperature and irradiance on photosystem activity during *Alhagi sparsifolia* leaf senescence. *Biologia plantarum*, 56(4), 785-788.

445. Yadav, J.K., & Prakash, V. (2011). Stabilization of α -amylase, the key enzyme in carbohydrates properties alterations, at low pH. *International Journal of Food Properties*, 14, 1182-1196.

446. Yadav, M.P., Johnston, D.B., & Hicks, K.B. (2007). Structural characterization of corn fiber gums from coarse and fine fiber and a study of their emulsifying properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(15), 6366-6371.

447. Yamada, H. (1994). Pectic polysaccharides from Chinese herbs: structure and biological activity. *Carbohydrate Polymers*, 25(4), 269-276.

448. Yang, L., & Zhang, L.M. (2009). Chemical structural and chain conformational characterization of some bioactive polysaccharides isolated from natural sources. *Carbohydrate polymers*, 76(3), 349-361.

449. Yin, J.Y., Nie, S.P., Guo, Q.B., Wang, Q., Cui, S.W., & Xie, M.Y. (2015). Effect of calcium on solution and conformational characteristics of polysaccharide from seeds of *Plantago asiatica* L. *Carbohydrate Polymers*, 124, 331-336.

450. You, X., Xie, C., Liu, K. & Gu Z. (2010). Isolation of non-starch polysaccharides from bulb of tiger lily (*Lilium lancifolium* Thunb.) with fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*. *Carbohydrate Polymers*, 81, 35-40.

451. Yu, H., Mei, S., Zhao, L., Zhao, M., Wang, Y., Zhu, H., ... & Peng, S. (2015). RGD-peptides modifying dexamethasone: to enhance the anti-inflammatory efficacy and limit the

risk of osteoporosis. *MedChemComm*, 6(7), 1345-1351.

452. Zarei, A., Ashtiyani, S.C., & Vaezi, G.H. (2014). A study on the effects of the hydroalcoholic extract of the aerial parts of *Alhagi camelorum* on prolactin and pituitary-gonadal activity in rats with hypercholesterolemia. *Archivio Italiano di urología e andrologia*, 86(3), 188-192.

453. Zavyalov, A.V., Rykov, S.V., Lunina, N.A., Sushkova, V.I., Yarotsky, S.V., & Berezina, O.V. (2019). Plant Polysaccharide Xyloglucan and Enzymes That Hydrolyze It. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 45(7), 845-859.

454. Zhang, B., Leung, W.K., Zou, Y., Mabusela, W., Johnson, Q., Michaelsen, T.E., & Paulsen, B.S. (2014). Immunomodulating polysaccharides from *Lessertia frutescens* leaves: isolation, characterization and structure activity relationship. *Journal of ethnopharmacology*, 152(2), 340-348.

455. Zhang, K., Liu, Y., Zhao, X., Tang, Q., Dervedde, J., Zhang, J., & Fan, H. (2018). Anti-inflammatory properties of GLPss58, a sulfated polysaccharide from *Ganoderma lucidum*. *International journal of biological macromolecules*, 107, 486-493.

456. Zhang, S., & Li, X. Z. (2015). Inhibition of α -glucosidase by polysaccharides from the fruit hull of *Camellia oleifera* Abel. *Carbohydrate polymers*, 115, 38-43

457. Zhang, W., Xu, P., & Zhang, H. (2015). Pectin in cancer therapy: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 44(2), 258-271.

458. Zhang, X.J., Chen, G.Z., Ke, M., Han, H., Lu, Z.W., Wang, T.J., Sun F.H. & Yu H.Y. (2011). A study on *Astragalus mongholicus* heterosaccharides affecting contractions of isolated bladder detrusor strips. *Carbohydrate Polymers*, 85, 312-317.

459. Zhang, Z., Kong, F., Ni, H., Mo, Z., Wan, J. B., Hua, D., & Yan, C. (2016). Structural characterization, α -glucosidase inhibitory and DPPH scavenging activities of polysaccharides from guava. *Carbohydrate Polymers*, 144, 106-114.

460. Zhou, J., Xu, G., Yan, J., Li, K., Bai, Z., Cheng, W., & Huang, K. (2015). *Rehmannia glutinosa* (Gaertn.) DC. polysaccharide ameliorates hyperglycemia, hyperlipemia and vascular inflammation in streptozotocin-induced diabetic mice. *Journal of ethnopharmacology*, 164, 229-238.

461. Zhou, M. X., Classen, B., Agneessens, R., Godin, B., & Lutts, S. (2020). Salinity improves zinc resistance in *Kosteletzkya Pentacarpos* in relation to a modification in mucilage and polysaccharides composition. *International Journal of Environmental Research*, 14(3), 323-333.

462. Zhu, F., Du, B., & Xu, B. (2018). Anti-inflammatory effects of phytochemicals from

- fruits, vegetables, and food legumes: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58(8), 1260-1270.
463. Zhu, Z. Y., Luo, Y., Dong, G. L., Ren, Y. Y., Chen, L. J., Guo, M. Z., ... & Zhang, Y. (2016). Effects of the ultra-high pressure on structure and α -glucosidase inhibition of polysaccharide from Astragalus. *International journal of biological macromolecules*, 87, 570-576.
464. Ziani, B.E., Calhelha, R.C., Barreira, J.C., Barros, L., Hazzit, M., & Ferreira, I.C. (2015). Bioactive properties of medicinal plants from the Algerian flora: Selecting the species with the highest potential in view of application purposes. *Industrial Crops and Products*, 77, 582-589.
465. Zimdahl, R.L. (2018). *Fundamentals of weed science*. Academic press.
466. Zinatizadeh, M.R., Schock, B., Chalbatani, G.M., Zarandi, P.K., Jalali, S.A., & Miri, S.R. (2021). The Nuclear Factor Kappa B (NF-kB) signaling in cancer development and immune diseases. *Genes & diseases*, 8(3), 287-297.
467. Zippel, J., Wells, T., & Hensel, A. (2010). Arabinogalactan protein from *Jatropha curcas* L. seeds as TGF β 1-mediated inductor of keratinocyte in vitro differentiation and stimulation of GM-CSF, HGF, KGF and in organotypic skin equivalents. *Fitoterapia*, 81(7), 772-778.
468. Zou, G.A., Mansur, S., Hu, S.C., Aisa, H.A., & Shakhidoyatov, K.M. (2012). Pyrrole alkaloids from *Alhagi sparsifolia*. *Chemistry of natural compounds*, 48(4), 635-637.
469. Zou, S., Zhang, X., Yao, W., Niu, Y., & Gao, X. (2010). Structure characterization and hypoglycemic activity of a polysaccharide isolated from the fruit of *Lycium barbarum* L. *Carbohydrate Polymers*, 80(4), 1161-1167.

Production scientifique

1-Communications affichées:

-CHAKOU Fatma Zohra, Zakaria BOUAL, Messaoud HACHEMI, Zainab El Alaoui-Talibi, Cherkaoui El Modafar, Imen FENDRI, Slim Abdelkafi, Mohamed Didi OULD EL HADJ, Pascal DUBESSAY, Cédric DELATTRE, Guillaume PIERRE and Philippe MICHAUD,, 2021. Enquête ethnobotanique d'utilisations traditionnelles d'*Alhagi maurorum* Medik. dans le sud algérien (Wilaya d'Illizi). 2nd International Conférence Polysac 2021, 11 et 13 Décembre 2021, Sfax, Tunisie.

-CHAKOU Fatma Zohra, Zakaria BOUAL, Messaoud HACHEMI, Zainab El Alaoui-Talibi, Cherkaoui El Modafar, FENDRI Imen, Slim Abdelkafi, Mohamed Didi OULD EL HADJ, Pascal DUBESSAY, Cédric DELATTRE, Guillaume PIERRE and Philippe MICHAUD, 2022. Activité anti-inflammatoire d'un galactomannane extrait d'*Alhagi maurorum* Medik. 1^{er} séminaire national sur la Biodiversité, Biotechnologie et Développement Durable (BB & DD 2022), 16 Avril 2022, Ghardaia, Algérie.

-CHAKOU Fatma Zohra, Zakaria BOUAL, Messaoud HACHEMI, Karima GUEHAZ, Ghania BOUZIANE, Zainab El Alaoui-Talibi, Cherkaoui El Modafar, Slim Abdelkafi, Mohamed Didi OULD EL HADJ, Pascal DUBESSAY, Cédric DELATTRE, Guillaume PIERRE and Philippe MICHAUD, 2020. Gastroprotective activity of polysaccharides from *Alhagi maurorum* Boiss gum against ethanol induced gastric ulcer. The third international symposium of medicinal plants and material, 25-27 February 2020, Tebessa, Algeria.

-CHAKOU Fatma Zohra et BOUAL Zakaria, 2017. Méthodes d'extraction et les activités biologiques des polysaccharides de quelques plantes spontanées à caractère médicinale. Séminaire national sur la valorisation des produits de sources naturelles, université d'El oued, Algérie, les 11 et 12 Octobre.

2-Communications orales:

-CHAKOU Fatma Zohra, BOUAL Zakaria, MEHELLOU Zineb, ADDOUN Noura et OULD EL HADJ Mohamed Didi, 2017. Caractérisation partielle des polysaccharides hydrosolubles issus de graines d'*Alhagi maurorum* Boiss. Séminaire international sur les polysaccharides de plantes de milieux arides, Université Kasdi Merbah- Ouargla, Algérie, les 21 et 22 Novembre: 70-77.

-ADDOUN Noura, BOUAL Zakaria, ADDAOUD Seddik, MEHELLOU Zineb, CHAKOU Fatma Zohra et OULD El HADJ Mohamed Didi, 2017. Extraction and preliminary characterization of alkali-soluble polysaccharides from *Plantago cliata* desf.seeds. Séminaire international sur les polysaccharides de plantes de milieux arides, Université Kasdi Merbah-

Ouargla, Algérie, les 21 et 22 Novembre: 37-43.

-MEHELLOU Zineb, BOUAL Zakaria, ADDOUN Noura, CHAKOU Fatma Zohra, MICHAUD Philippe et OULD EL HADJ Mohamed Didi, 2017. Activité antidiabétique des polysaccharides hydrosolubles des feuilles d'Oudneya Africana R. BR. Récoltées au Sahara Septentrional Est algérien. Séminaire international sur les polysaccharides de plantes de milieux arides, Université Kasdi Merbah- Ouargla, Algérie, les 21 et 22 Novembre: 145-154.

-BOUAL Zakaria, PIERRE Guillaume, BRADAI Liès, BEZZIOU Nour Elhouda, KHELFAOUI Khaoula, DELATTRE Cédric, MICHAUD, CHAKOU Fatma Zohra, CHOUANA Toufik, MICHAUD Philippe et OULD EL HADJ Mohamed Didi, 2019. Chemical properties and biological potential of water-soluble polysaccharides of *Terfezia arenaria* from Algerian arid zone. Eurocarb June 2019, Leiden, Netherlands.

3-Publications:

1-Chakou F.Z., Boual Z., Ould El Hadj M.D., Badreddine A., El Alaoui-Talibi Z., El Modafar C., Fendri I., Abdelkafi S., Dubessay P., Gardarin C., Delattre C., Pierre G., Michaud P. (2021). Ethnobotanical utilization of *Alhagi maurorum* Medik. in traditional recipes of Algerian Sahara Illizi Wilaya. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*. 6: 1-8.

2-Chakou F.Z., Boual Z., Ould El Hadj M.D., Belkhalifa H., Bachari K., El Alaoui-Talibi Z., El Modafar C., Hadjkacem F., Fendri I., Abdelkafi S., Traïkia M., Le cerf D., Dubessay P., Delattre C., Pierre G., Michaud P. (2021). Pharmacological investigations in traditional utilization of *Alhagi maurorum* Medik. in Saharan Algeria: *in vitro* study of anti-inflammatory and antihyperglycemic activities of water-soluble polysaccharides extracted from the seeds. *Plants* 10: 2658.

Résumés

Résumé

Alhagi maurorum Medik. (*Fabaceae*) est une plante spontanée à caractère médicinal, connue sous le nom "Atjer". Une étude ethnobotanique menée préalablement dans le Sud-Est de l'Algérie (wilaya d'Illizi) a mis en évidence son utilisation traditionnelle et notamment par les personnes analphabètes de 55ans dans le traitement de troubles gastro-intestinaux (26,08%) et de la fièvre (28,99%). Ce travail de thèse visait à développer des procédés d'extraction et de purification des polysaccharides hydrosolubles des graines d'*Alhagi maurorum* collectées dans le Sahara algérien afin d'identifier leurs structures. Dans un second temps les caractéristiques physico-chimiques des macromolécules isolées ont été déterminées en régimes dilué et semi dilué et leur potentiel biologique comme agents antihyperglycémiant, gastroprotecteur et anti-inflammatoire a été quantifié *in vitro* afin de valider les utilisations traditionnelles de cette plante. Ce travail a conduit à détecter la présence d'un galactomannane dans les graines d'*Alhagi maurorum*. Ce galactomannane est de haute masse moléculaire ($1,4 \times 10^6$ Da) et est constitué d'une chaîne principale de β -(1,4)-D-mannane ramifiée en α -(1,6) par des résidus D-galactopyranoses avec un rapport M/G de 2,2. La caractérisation de ses propriétés rhéologiques a révélé un comportement typique pseudoplastique et des propriétés viscoélastiques. L'étude des activités biologiques associées à ce biopolymère a révélé son potentiel comme un fort agent anti-hyperglycémiant, anti-inflammatoire et gastroprotecteur.

Mots clés: Polysaccharides, *Alhagi*, galactomannane, potentiel biologique

Abstract

Alhagi maurorum Medik. (Fabaceae) is a spontaneous plant with medicinal character, called "Atjer". An ethnobotanical study previously conducted in the South-East of Algeria (wilaya of Illizi) has highlighted its traditional use and notably by illiterate interviewed persons in over 55 years old and to treat various ailments such as fever (28.99%) and gastrointestinal disorders (26.08%). This thesis aimed at developing extraction and purification processes of water-soluble polysaccharides (hydrocolloids) from *Alhagi maurorum* seeds collected in Algerian Sahara in order to identify their structures. In a second step, the physicochemical characteristics of the isolated macromolecules were determined in diluted and semi-diluted regimes and their biological potential as antihyperglycemic, gastroprotective and anti-inflammatory agents was quantified *in vitro* in order to validate the traditional uses of this plant. This work led to the detection of the presence of a galactomannan in the seeds of *Alhagi maurorum*. This galactomannan has a high molecular weight (1.4×10^6 Da) and consists of a main chain of β -(1,4)-D-mannan branched into α -(1,6) by D-galactopyranose residues with an M/G ratio of 2.2. Characterization of its rheological properties revealed typical pseudoplastic behavior and viscoelastic properties. The study of the biological activities associated with this biopolymer revealed its biological potential as anti-hyperglycemic, anti-inflammatory and gastroprotective agent.

Keywords: Polysaccharides, *Alhagi*, galactomannan, biological potential

ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة التركيبية الكيميائية و الخصائص الفيزيو-كيميائية وكذلك الأنشطة البيولوجية لمتعدد السكريات المستخلص من بذور شجيرة برية المنبت (*Alhagi maurorum Medik.*) المنتمية إلى عائلة البقوليات، والتي تم جمعها من ولاية إليزي شمال شرق صحراء الجزائر أين تعرف بتسميتها الشائعة "أتجر". أجريت دراسة عرقية في ذات المنطقة (ولاية إليزي) حيث تم الكشف عن التسميات المحلية للنبته و جرد مختلف إستخداماتها التقليدية خاصة لعلاج الحمى (28,99%) والإضطرابات الهضمية (26,08%) من قبل الفئة الأمية لأهل المنطقة المتجاوز عمرها 55 سنة.

تمكنت الدراسة من خلال نقع بذور أتجر في ماء عالي النقاوة من إستخلاص متعدد السكريات القابلة للذوبان في الماء و تحديد تركيبها الكيميائية و خصائصها الفيزيو-كيميائية للجزيئات الكبيرة المحضرة في محاليل مائية و ملحية بتراكيز مخففة ونصف مخففة ونشاطاتها البيولوجية بدراسات أجريت في المختبر مثل مضاد لإرتفاع مستوى السكري في الدم و مضاد للإتهاب، وكعامل وافي للمعدة لدى جردان التجارب العلمية، و ذلك من أجل التحقق من صحة الإستخدامات التقليدية لهذا النبات.

بينت دراسة التركيبية الكيميائية لمتعدد السكريات القابلة للذوبان في الماء المكونة لبذور أتجر وجود نوع جالاكتومانان لهيمنة سكر الجالاكتوز و المانوز، نو كتلة جزيئية عالية ($1,4 \times 10^6$ دالتن) و سلسلة رئيسية متكونة من-D-(1,4)- β mannane، و متفرعة عند α -(1,6) بواسطة D-galactopyranose مع نسبة M/G توافق 2,2. الخصائص الريولوجية لهذا الجالاكتومانان كشفت عن سلوك نموذجي لشبه البلاستيك وخصائص لزجة-مرنة. كذلك، دراسة الأنشطة البيولوجية المرتبطة بهذا الجزئي الحيوي عن إمكاناته كعامل قوي مضاد لإرتفاع السكر في الدم ومضاد للإتهابات وواقي للمعدة.

كلمات مفتاحية: متعدد السكريات، الحاجي، جالاكتومانان، النشاط البيولوجي