



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Biologiques

## Thèse

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat ès sciences

Spécialité : Biochimie et analyse des bioproduits

### *Thème*

---

**Caractérisation et activités biologiques des extraits  
polysaccharidiques de deux espèces spontanées de la famille des  
Zygophyllaceae récoltées au Sahara algérien**

---

**Présentée par SEDDIKI Malika**

Soutenue publiquement le : 18/05/2025

**Devant le jury composé de :**

|                         |     |                                |              |
|-------------------------|-----|--------------------------------|--------------|
| M. BOUAL Zakaria        | Pr. | Univ. Kasdi-Merbah-Ouargla     | Président    |
| M. OULD ELHADJ Med Didi | Pr. | Univ. Kasdi-Merbah-Ouargla     | Promoteur    |
| M. MICHAUD Philippe     | Pr. | Univ. Clermont-Auvergne-France | Co-Promoteur |
| M. BELGUIDOUM Mahdi     | MCA | Univ. Ghardaïa                 | Examineur    |
| M. BENSALÉM Soufiane    | MCA | Univ. Kasdi-Merbah-Ouargla     | Examineur    |
| M. BENKHERARA Salah     | MCA | Univ. Ghardaïa                 | Examineur    |

**Année universitaire : 2024 / 2025**



# *Remerciements*

Avant tout, je remercie ALLAH, le Miséricordieux, de m'avoir donné la force, la patience et le courage tout au long de ce parcours.

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur OULD EL HADJ Mohamed Didi, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Kasdi Merbah Ouargla, directeur du laboratoire de Protection des Écosystèmes en Zones Arides et Semi Arides (ECOSYS), pour sa confiance, sa patience et sa disponibilité constante tout au long de ces années. Je vous adresse mes plus vifs remerciements pour les orientations méthodologiques, la guidance rigoureuse et les conseils avisés qui ont grandement enrichi le travail.

Je remercie très chaleureusement mon Co-encadreur, Monsieur MICHAUD Philippe, Professeur à l'Institut Pascal de l'Université Clermont-Auvergne, France, pour votre bienveillance, votre collaboration précieuse et votre expertise scientifique.

Je tiens à présenter également mes remerciements les plus sincères à BOUAL Zakaria, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Kasdi Merbah Ouargla, pour votre disponibilité, votre aide précieuse et vos orientations tout au long de la thèse. Je vous remercie également d'avoir accepté de présider le jury, témoignant ainsi de votre bienveillance et de l'intérêt que vous portez à ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à BENKHERARA Salah, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de Terre, Université de Ghardaïa, et à BENSALAM Soufiane, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Kasdi Merbah Ouargla, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer et de juger ce travail.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à BELGUIDOUM Mahdi, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de Terre à l'Université de Ghardaïa, pour votre aide précieuse, votre bienveillance et pour m'avoir fait l'honneur de juger ce travail.

Un grand merci à l'ensemble de l'équipe du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) de Ouargla, particulièrement au Dr BEKHALFA Hakim, directeur du laboratoire, de m'avoir accueilli avec accompagnement bienveillant, et au Dr MESSAI MOHAMMED Ahmed pour votre assistance technique précieuse, votre dévouement, et surtout la gentillesse et la disponibilité.

Je tiens à présenter également mes remerciements les plus sincères à M. BOUZGAG Ismail et au Dr KACI Safia, du laboratoire de Bioressources Sahariennes, Préservation et Valorisation,

pour leur bienveillance et leur assistance technique précieuse, et au Dr HASNI Sara pour son aide précieuse et ses conseils.

Je saurais oublier Mlle MAFLEH Sihem, Dr RAHMANI Youcef, Pr HADJADJ Soumia, Dr BENSEMAOUNE Youcef et Dr BELALEM Abdelkader Mohammed pour leur aide précieuse.

Ma gratitude va aussi à Hicham Benhammouda et Ali Moulay Omar du laboratoire pédagogique, Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre, Université de Ghardaïa, pour leur aide précieuse et leur gentillesse, et à tout le personnel technique du laboratoire pédagogique, de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Ouargla.

Enfin, je remercie ma famille et mes amies pour leurs constants encouragements.

## *Dédicace*

*À ma mère*

*À la mémoire de mon père*

*À la mémoire de mon frère Mohamed Omar*

*À la mémoire de ma grande mère*

*À mes sœurs : Amina et Meriem*

*À mes frères : Ahmed et Lahcene*

*À mes neveux : Yazid, Djouad et Riyad*

*À tous mes amis*

| Table de matières                                                                                                                      | Page |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Remerciements                                                                                                                          | I    |
| Dédicace                                                                                                                               | II   |
| Table de matières                                                                                                                      | III  |
| Liste des tableaux                                                                                                                     | VII  |
| Liste des figures                                                                                                                      | VIII |
| Liste des abréviations                                                                                                                 | XI   |
| Liste des photos                                                                                                                       | XI   |
| Introduction                                                                                                                           | 2    |
| <b>I.-Aperçu général sur les espèces étudiées de la famille des Zygophyllaceae et les polysaccharides chez les plantes supérieures</b> | 5    |
| I.1.- Famille de Zygophyllaceae                                                                                                        | 5    |
| I.1.1.- Genre Zygophyllum                                                                                                              | 5    |
| I.1.1.1.- <i>Zygophyllum album</i> L.                                                                                                  | 6    |
| I.1.1.1.1.- Répartition géographique                                                                                                   | 6    |
| I.1.1.1.2.- Position systématique                                                                                                      | 6    |
| I.1.1.1.3.- Description botanique                                                                                                      | 6    |
| I.1.1.1.4.- Etudes ethnobotanique et phytochimique                                                                                     | 7    |
| I.1.2.- Genre <i>Balanites</i>                                                                                                         | 9    |
| I.1.2.1.- <i>Balanites aegyptiaca</i> Del.                                                                                             | 10   |
| I.1.2.1.1.- Répartition géographique                                                                                                   | 10   |
| I.1.2.1.2.- Position systématique                                                                                                      | 10   |
| I.1.2.1.3.- Description botanique                                                                                                      | 11   |
| I.1.2.1.4.- Etudes ethnobotanique et phytochimique                                                                                     | 11   |
| I.2.- Polysaccharides de plantes supérieures                                                                                           | 15   |
| I.2.1.- Caractéristiques générales des polysaccharides                                                                                 | 16   |
| I.2.1.1.- Structure de base                                                                                                            | 16   |
| I.2.1.2.- Nomenclature                                                                                                                 | 18   |
| I.2.1.3.- Fonctions                                                                                                                    | 18   |
| I.2.1.4.- Propriétés physico-chimiques                                                                                                 | 18   |
| I.2.2.- Principaux polysaccharides de plantes supérieures                                                                              | 19   |
| I.2.2.1.- Amidon                                                                                                                       | 19   |
| I.2.2.2.- Fructanes                                                                                                                    | 20   |
| I.2.2.3.- Cellulose                                                                                                                    | 21   |
| I.2.2.4.- Hémicellulose                                                                                                                | 22   |
| I.2.2.4.1.- Xylanes                                                                                                                    | 23   |
| I.2.2.4.2.- Xyloglucanes                                                                                                               | 24   |
| I.2.2.4.3.- Mannanes                                                                                                                   | 25   |
| I.2.2.4.3.1.- Mannanes linéaires                                                                                                       | 26   |
| I.2.2.4.3.2.- Glucomannanes                                                                                                            | 26   |
| I.2.2.4.3.3.- Galactoglucomannanes                                                                                                     | 26   |
| I.2.2.4.3.4.- Galactomannanes                                                                                                          | 27   |
| I.2.2.4.4.- $\beta$ -D-glucanes à liaison mixte                                                                                        | 28   |
| I.2.2.5.- Pectines                                                                                                                     | 29   |
| I.2.2.5.1.- Homogalacturonanes                                                                                                         | 29   |
| I.2.2.5.2.- Rhamnogalacturonanes-I                                                                                                     | 30   |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.2.2.5.3.- Rhamnogalacturonanes-II                                                                             | 30 |
| I.2.2.5.4.- Xylogalacturonanes                                                                                  | 31 |
| I.2.2.5.5.- Arabinanes                                                                                          | 32 |
| I.2.2.5.6.- Arabinogalactanes                                                                                   | 32 |
| <b>Chapitre II.- Matériel et méthodes</b>                                                                       | 36 |
| II.1.- Principe adopté                                                                                          | 36 |
| II.2.- Matériel végétal                                                                                         | 36 |
| II.2.1.- Choix des espèces                                                                                      | 36 |
| II.2.2.- Récolte des échantillons                                                                               | 37 |
| II.3.- Méthodes d'analyses                                                                                      | 38 |
| II.3.1.- Séchage et broyage de la matière végétale                                                              | 38 |
| II.3.2.- Extraction des polysaccharides hydrosolubles                                                           | 38 |
| II.3.2.1.- Principe                                                                                             | 38 |
| II.3.2.2.- Matériel et réactifs                                                                                 | 39 |
| II.3.2.3.- Mode opératoire                                                                                      | 39 |
| II.3.2.3.1.- Extraction de polysaccharides des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> et des graines de <i>Z. album</i> | 39 |
| II.3.2.3.2.- Extraction de polysaccharides des feuilles de <i>Z. album</i>                                      | 41 |
| II.3.3.- Composition globale des polysaccharides extraits                                                       | 43 |
| II.3.3.1.- Dosage des oses totaux                                                                               | 43 |
| II.3.3.1.1.- Principe                                                                                           | 43 |
| II.3.3.1.2.- Matériel et réactifs                                                                               | 43 |
| II.3.3.1.3.- Mode opératoire                                                                                    | 43 |
| II.3.3.2.- Dosage des oses acides                                                                               | 43 |
| II.3.3.2.1.- Principe                                                                                           | 44 |
| II.3.3.2.2.- Matériel et réactifs                                                                               | 44 |
| II.3.3.2.3.- Mode opératoire                                                                                    | 44 |
| II.3.3.3.- Dosage des protéines                                                                                 | 44 |
| II.3.3.3.1.- Principe                                                                                           | 44 |
| II.3.3.3.2.- Matériel et réactifs                                                                               | 44 |
| II.3.3.3.3.- Mode opératoire                                                                                    | 45 |
| II.3.3.4.- Dosage des composés phénoliques                                                                      | 45 |
| II.3.3.4.1.- Principe                                                                                           | 45 |
| II.3.3.4.2.- Matériel et réactifs                                                                               | 45 |
| II.3.3.4.3.- Mode opératoire                                                                                    | 45 |
| II.3.4.- Analyse infrarouge                                                                                     | 45 |
| II.3.4.1- Principe                                                                                              | 45 |
| II.3.4.2- Matériel et réactifs                                                                                  | 46 |
| II.3.4.3- Mode opératoire                                                                                       | 46 |
| II.3.5.- Identification et dosage des monosaccharides constitutifs                                              | 46 |
| II.3.5.1.- Hydrolyse acide                                                                                      | 46 |
| II.3.5.1.1.- Principe                                                                                           | 46 |
| II.3.5.1.2.- Matériel et réactifs                                                                               | 46 |
| II.3.5.1.3.- Mode opératoire                                                                                    | 47 |
| II.3.5.2.- Analyse par chromatographie sur couche mince                                                         | 47 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.3.5.2.1.- Principe                                                        | 47 |
| II.3.5.2.2.- Matériel et réactifs                                            | 47 |
| II.3.5.2.3.- Mode opératoire                                                 | 48 |
| II.3.5.3.- Chromatographie liquide à haute performance                       | 48 |
| II.3.5.3.1.- Principe                                                        | 48 |
| II.3.5.3.2.- Matériel et réactifs                                            | 48 |
| II.3.5.3.3.- Mode opératoire                                                 | 48 |
| II.3.5.4.- Chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse | 49 |
| II.3.5.4.1.- Principe                                                        | 49 |
| II.3.5.4.2.- Matériel et réactifs                                            | 50 |
| II.3.5.4.3.- Mode opératoire                                                 | 50 |
| II.3.6.- Activités biologiques des polysaccharides                           | 50 |
| II.3.6.1- Activité antioxydante                                              | 50 |
| II.3.6.1.1- Test de piégeage du radical DPPH•                                | 51 |
| II.3.6.1.1.1- Principe                                                       | 51 |
| II.3.6.1.1.2- Matériel et réactifs                                           | 52 |
| II.3.6.1.1.3.- Mode opératoire                                               | 52 |
| II.3.6.1.2.- Test de piégeage du radical ABTS•+                              | 52 |
| II.3.6.1.2.1.- Principe                                                      | 52 |
| II.3.6.1.2.2.- Matériel et réactifs                                          | 52 |
| II.3.6.1.2.3.- Mode opératoire                                               | 53 |
| II.3.6.1.3.- Test de piégeage du radical OH•                                 | 53 |
| II.3.6.1.3.1.- Principe                                                      | 53 |
| II.3.6.1.3.2.- Matériel et réactifs                                          | 53 |
| II.3.6.1.3.3.- Mode opératoire                                               | 54 |
| II.3.6.1.4.- Pouvoir réducteur des ions ferriques                            | 54 |
| II.3.6.1.4.1.- Principe                                                      | 54 |
| II.3.6.1.4.2.- Matériel et réactifs                                          | 54 |
| II.3.6.1.4.3.- Mode opératoire                                               | 54 |
| II.3.6.1.5.- Capacité antioxydant totale                                     | 55 |
| II.3.6.1.5.1.- Principe                                                      | 55 |
| II.3.6.1.5.2.- Matériel et réactifs                                          | 55 |
| II.3.6.1.5.3.- Mode opératoire                                               | 55 |
| II.3.6.2.- Activité anti-hyperglycémiant                                     | 55 |
| II.3.6.2.1.- Activité inhibitrice de l'α-glucosidase                         | 56 |
| II.3.6.2.1.1.- Principe                                                      | 56 |
| II.3.6.2.1.2.- Matériel et réactifs                                          | 56 |
| II.3.6.2.1.3.- Mode opératoire                                               | 56 |
| II.3.6.2.2.- Activité inhibitrice de l'α-amylase                             | 57 |
| II.3.6.2.2.1.- Principe                                                      | 57 |
| II.3.6.2.2.2.- Matériel et réactifs                                          | 57 |
| II.3.6.2.2.3.- Mode opératoire                                               | 57 |
| II.3.6.3.- Activité anti-inflammatoire                                       | 58 |
| II.3.6.3.1.- Inhibition de la dénaturation de protéines                      | 58 |
| II.3.6.3.1.1.- Principe                                                      | 59 |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| II.3.6.3.1.2.-Matériel et réactifs                                                                                                   | 59  |
| II.3.6.3.1.3.- Mode opératoire                                                                                                       | 59  |
| II.3.6.3.2.- Stabilisation de la membrane des hématies                                                                               | 59  |
| II.3.6.3.2.1.- Principe                                                                                                              | 59  |
| II.3.6.3.2.2.- Matériel et réactifs                                                                                                  | 59  |
| II.3.6.3.2.3.- Mode opératoire                                                                                                       | 60  |
| II.4.- Exploitation des résultats                                                                                                    | 60  |
| <b>Chapitre III.- Résultats et discussion</b>                                                                                        | 62  |
| III.1.- Rendement d'extraction                                                                                                       | 62  |
| III.2.- Composition biochimique globale des extraits                                                                                 | 63  |
| III.3.- Analyse infrarouge                                                                                                           | 66  |
| III.4.- Composition en monosaccharides                                                                                               | 68  |
| III.4.1.- Analyse par chromatographie sur couche mince                                                                               | 68  |
| III.4.2.- Analyse par chromatographie liquide à haute performance                                                                    | 70  |
| III.4.3.- Analyse par chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse                                              | 73  |
| III.5.- Activités biologiques des polysaccharides                                                                                    | 75  |
| III.5.1.- Activité antioxydante                                                                                                      | 75  |
| III.5.1.1.- Test de piégeage du radical DPPH•                                                                                        | 76  |
| III.5.1.2.- Test de piégeage du radical ABTS•+                                                                                       | 78  |
| III.5.1.3.- Test de piégeage du radical OH•                                                                                          | 80  |
| III.5.1.4.- Pouvoir réducteur des ions ferriques                                                                                     | 83  |
| III.5.1.5.- Capacité antioxydante totale                                                                                             | 84  |
| III.5.1.6.- Corrélation entre l'activité antioxydante et la composition biochimique des extraits bruts                               | 86  |
| III.5.2.-Activité anti-hyperglycémiant                                                                                               | 88  |
| III.5.2.1.- Activité inhibitrice de l'α-amylase                                                                                      | 89  |
| III.5.2.2.- Activité inhibitrice de l'α-glucosidase                                                                                  | 91  |
| III.5.2.3.- Corrélation entre l'activité anti-hyperglycémiant et la composition biochimique des extraits bruts                       | 94  |
| III.5.3.- Activité anti-inflammatoire                                                                                                | 95  |
| III.5.3.1.-Stabilisation de la membrane des hématies                                                                                 | 96  |
| III.5.3.1.1.-Corrélation entre la stabilisation de la membrane des hématies et la composition biochimique des extraits bruts         | 97  |
| III.5.3.2.- Inhibition de la dénaturation des protéines                                                                              | 98  |
| III.5.3.2.1.- Corrélation entre l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines et la composition biochimique des extraits bruts | 100 |
| Conclusion                                                                                                                           | 103 |
| Références bibliographiques                                                                                                          | 106 |
| Annexes                                                                                                                              | 132 |
| Résumé                                                                                                                               | 134 |
| Abstract                                                                                                                             | 135 |
| ملخص                                                                                                                                 | 136 |

## Liste des tableaux

| N°                  | Titre                                                                                                                                                                                                                                                                        | Page |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Tableau I</b>    | Principaux métabolites secondaires isolés chez <i>Z. album</i>                                                                                                                                                                                                               | 8    |
| <b>Tableau II</b>   | Etude ethnobotanique sur <i>B. aegyptiaca</i>                                                                                                                                                                                                                                | 12   |
| <b>Tableau III</b>  | Métabolites secondaires isolés chez <i>B. aegyptiaca</i>                                                                                                                                                                                                                     | 13   |
| <b>Tableau IV</b>   | Composition biochimique des extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de <i>Z. album</i> et des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> (BA et BAEp)                                                                                      | 64   |
| <b>Tableau V</b>    | Bandes d'absorption caractéristiques des groupes fonctionnels de polysaccharides extraits des feuilles (ZF), des graines (ZG) de <i>Z. album</i> et des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> (BA)                                                                                  | 68   |
| <b>Tableau VI</b>   | Rapports frontaux des hydrolysats des polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de <i>Z. album</i> et des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> (BA et BAEp) obtenus par CCM                                                                              | 70   |
| <b>Tableau VII</b>  | Composition osidique de polysaccharides extraits des feuilles (ZF) et des graines de <i>Z. album</i> (ZG) et des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> (BA) obtenu par HPLC-RID                                                                                                     | 71   |
| <b>Tableau VIII</b> | Composition osidique de BA obtenu par GC/SM-EI                                                                                                                                                                                                                               | 74   |
| <b>Tableau IX</b>   | Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les IC <sub>50</sub> des tests antioxydants et la teneur en sucres totaux, en sucres acides, en protéines et en polyphénols dans les extraits bruts des polysaccharides de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i>          | 87   |
| <b>Tableau X</b>    | Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les IC <sub>50</sub> des tests de pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase et de l' $\alpha$ -glucosidase et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> | 94   |
| <b>Tableau XI</b>   | Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les IC <sub>50</sub> de test d'effet inhibiteur de la lyse membranaire et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i>                                      | 98   |
| <b>Tableau XII</b>  | Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les IC <sub>50</sub> des tests sur l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i>                      | 101  |

## Liste des figures

| N°               | Titre                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Page |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Figure 1</b>  | Structure des monosaccharides constitutifs des polysaccharides de la paroi cellulaire (FRY, 2010)                                                                                                                                                                                                     | 17   |
| <b>Figure 2</b>  | Structure d'amylose (MAJI, 2012)                                                                                                                                                                                                                                                                      | 19   |
| <b>Figure 3</b>  | Structure d'amylopectine (MAJI, 2012)                                                                                                                                                                                                                                                                 | 20   |
| <b>Figure 4</b>  | Structure des différents types de fructanes des plantes supérieures classées ; A : 1-kestose (inulines); B: 6-kestose (lévanes); C: néokestose (néoinulines ou néolévanes) (WANG et CHEONG, 2023)                                                                                                     | 21   |
| <b>Figure 5</b>  | Structure moléculaire des chaînes de cellulose (DESHAVATH <i>et al.</i> , 2019)                                                                                                                                                                                                                       | 22   |
| <b>Figure 6</b>  | Disposition spatiale de l'hémicellulose, de la cellulose et de la lignine dans la paroi cellulaire (BRANDT <i>et al.</i> , 2013)                                                                                                                                                                      | 23   |
| <b>Figure 7</b>  | Structure des arabinoxylanes (HEINZE <i>et al.</i> , 2012)                                                                                                                                                                                                                                            | 24   |
| <b>Figure 8</b>  | Structure des xyloglucanes (OCHOA-VILLARREAL, 2012)                                                                                                                                                                                                                                                   | 25   |
| <b>Figure 9</b>  | Structure des mannanes (KUMAR <i>et al.</i> , 2020)                                                                                                                                                                                                                                                   | 26   |
| <b>Figure 10</b> | Structure des glucomannanes (EBRINGEROVA <i>et al.</i> , 2005)                                                                                                                                                                                                                                        | 26   |
| <b>Figure 11</b> | Structure des galactoglucomannanes (BRANDT <i>et al.</i> , 2013)                                                                                                                                                                                                                                      | 27   |
| <b>Figure 12</b> | Structure moléculaire des galactomannanes (EBRINGEROVA <i>et al.</i> , 2005)                                                                                                                                                                                                                          | 28   |
| <b>Figure 13</b> | Structure primaire des $\beta$ -D-glucanes à liaison mixte (EBRINGEROVA <i>et al.</i> , 2005)                                                                                                                                                                                                         | 28   |
| <b>Figure 14</b> | Structure des rhamnogalacturonanes I (RG-I) (OCHOA-VILLARREAL, 2012)                                                                                                                                                                                                                                  | 30   |
| <b>Figure 15</b> | Structure des rhamnogalacturonanes II (RG-II) (OCHOA-VILLARREAL, 2012)                                                                                                                                                                                                                                | 31   |
| <b>Figure 16</b> | Structure des xylogalacturonanes (O'NEILL et YORK, 2003)                                                                                                                                                                                                                                              | 32   |
| <b>Figure 17</b> | Structure des arabinogalactanes (DESHAVATH <i>et al.</i> , 2019)                                                                                                                                                                                                                                      | 33   |
| <b>Figure 18</b> | Extraction des polysaccharides des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> et des graines de <i>Z. album</i> (SUN et KENNEDY, 2010; LIANG <i>et al.</i> , 2011; LI <i>et al.</i> , 2013; BOUAL <i>et al.</i> , 2013; PETERA <i>et al.</i> , 2015; BENAOUN <i>et al.</i> , 2017; CHOUANA <i>et al.</i> , 2017)  | 40   |
| <b>Figure 19</b> | Extraction des polysaccharides hydrosolubles de feuilles de <i>Z. album</i> (WU <i>et al.</i> , 2007; SUN et KENNEDY, 2010; LIANG <i>et al.</i> , 2011; LI <i>et al.</i> , 2013; BOUAL <i>et al.</i> , 2013; PETERA <i>et al.</i> , 2015; BENAOUN <i>et al.</i> , 2017; CHOUANA <i>et al.</i> , 2017) | 42   |
| <b>Figure 20</b> | Rendements obtenus pour les extraits de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de <i>Z. album</i> et des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> (BA et BAEp)                                                                                                                     | 62   |
| <b>Figure 21</b> | Spectre FT-IR de l'extrait ZF                                                                                                                                                                                                                                                                         | 67   |
| <b>Figure 22</b> | Spectre FT-IR de l'extrait ZG                                                                                                                                                                                                                                                                         | 67   |
| <b>Figure 23</b> | Spectre FT-IR de l'extrait BA                                                                                                                                                                                                                                                                         | 67   |
| <b>Figure 24</b> | Spectre FT-IR de l'extrait BAEp                                                                                                                                                                                                                                                                       | 67   |

|                  |                                                                                                                                                                                                           |    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 25</b> | (a) Chromatogramme des hydrolysats de ZF, ZG, BA et BAEP obtenus par CCM par le système d'élution 1, (b) Chromatogramme des hydrolysats de ZF, ZG, BA et BAEP, obtenus par CCM par le système d'élution 2 | 69 |
| <b>Figure 26</b> | Chromatogramme des étalons obtenu par HPLC-RID                                                                                                                                                            | 70 |
| <b>Figure 27</b> | Chromatogramme de ZF obtenu par HPLC-RID                                                                                                                                                                  | 71 |
| <b>Figure 28</b> | Chromatogramme de ZG obtenu par HPLC-RID                                                                                                                                                                  | 71 |
| <b>Figure 29</b> | Chromatogramme de BA obtenu par HPLC-RID                                                                                                                                                                  | 71 |
| <b>Figure 30</b> | Chromatogramme de BA obtenu par GC/SM-EI                                                                                                                                                                  | 73 |
| <b>Figure 31</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test de piégeage du radical DPPH•                                | 76 |
| <b>Figure 32</b> | Pouvoir d'inhibition du radical DPPH• des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT                                                             | 77 |
| <b>Figure 33</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT obtenus par le test de piégeage du radical ABTS•+                                | 79 |
| <b>Figure 34</b> | Pouvoir d'inhibition du radical ABTS•+ des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT                                                            | 80 |
| <b>Figure 35</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test de piégeage du radical OH•                                  | 81 |
| <b>Figure 36</b> | Pouvoir d'inhibition du radical OH• des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT                                                               | 82 |
| <b>Figure 37</b> | A <sub>0,5</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test du pouvoir réducteur des ions ferriques                     | 83 |
| <b>Figure 38</b> | Pouvoir réducteur des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de vitamine C et du BHT                                                                                    | 84 |
| <b>Figure 39</b> | A <sub>0,5</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de la vitamine C et du BHT obtenus pour le test de la capacité antioxydante totale                          | 85 |
| <b>Figure 40</b> | Capacité antioxydante totale des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> , de vitamine C et du BHT                                                                         | 86 |
| <b>Figure 41</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et de l'acarbose obtenus pour le test d'inhibition de l'α- amylase                                            | 89 |
| <b>Figure 42</b> | Pouvoir d'inhibition de l'α- amylase des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et de l'acarbose                                                                          | 90 |
| <b>Figure 43</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et de l'acarbose obtenus pour le test d'inhibition de l'α-glucosidase                                         | 91 |
| <b>Figure 44</b> | Pouvoir d'inhibition de l'α-glucosidase des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et de l'acarbose                                                                       | 92 |
| <b>Figure 45</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et du diclofenac obtenus pour le test d'inhibition de la lyse membranaire                                     | 96 |
| <b>Figure 46</b> | Pouvoir d'inhibition de la lyse membranaire des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et du diclofenac                                                                   | 97 |

|                  |                                                                                                                                                                                 |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 47</b> | IC <sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et du diclofenac obtenus dans le test d'inhibition de la dénaturation des protéines | 99  |
| <b>Figure 48</b> | Pouvoir d'inhibition de la dénaturation des protéines des extraits polysaccharidiques de <i>Z. album</i> et <i>B. aegyptiaca</i> et du diclofenac                               | 100 |

### Liste des abréviations

|      |                                                                                                                                                 |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BA   | Extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des fruits de <i>B. aegyptiaca</i>                                                                |
| BAEp | Extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> obtenu après une deuxième extraction dans les mêmes conditions |
| BHT  | Butylhydroxytoluène                                                                                                                             |
| ZF   | Extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de <i>Z. album</i>                                                                   |
| ZG   | Extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des graines de <i>Z. album</i>                                                                    |

### Liste des photos

|                 |                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Photo 01</b> | <i>Zygophyllum album</i> L. à El Bour, wilaya de Ouargla (Algérie)                                                                                                                                         |
| <b>Photo 02</b> | (a) <i>Balanites aegyptiaca</i> Del., wilaya de Tamanrasset (Algérie), (b) Fruits de <i>B. aegyptiaca</i> , (c) Parties des fruits de <i>B. aegyptiaca</i> utilisées pour l'extraction des polysaccharides |

---

# Introduction

---

Les polysaccharides constituent, avec les protéines, les lipides et les acides nucléiques, les principales macromolécules constitutives des cellules (MOHAMMED *et al.*, 2021). Ces polymères glucidiques jouent un rôle primordial dans le maintien de l'intégrité structurale des organismes et dans la mise en réserve de l'énergie (QUENTIN *et al.*, 2015). Ils participent à plusieurs processus biologiques, comme la croissance cellulaire, la communication entre les cellules, la réponse immunitaire et l'adhésion cellulaire (COLLIEC-JOUAULT *et al.*, 2004; VENUGOPAL, 2016; ZONG *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2015).

Les polysaccharides se caractérisent par leur abondance, leur biocompatibilité, leur biodégradabilité, leur non-toxicité et leur diversité structurale. Ils sont distincts par leur composition en monosaccharides (type et stéréo-isomérisation), le type de liaison osidique, la séquence osidique, le degré de polymérisation, le type et la position de ramification, la nature et la position des substitutions (LIU *et al.*, 2015; OGUTU *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016).

Dans leurs formes natives ou modifiées, les polysaccharides montrent des propriétés physico-chimiques intéressantes (MAJEE *et al.*, 2016). La structure moléculaire de ces macromolécules conditionne leurs propriétés fonctionnelles (ZONG *et al.*, 2012; KABIR *et al.*, 2022). Ils agissent comme des agents gélifiants, émulsifiants, épaississants et hydratants (SINGH *et al.*, 2021), des propriétés qui sont largement exploitées en agroalimentaire, cosmétique, textile et en pharmacie (LIU *et al.*, 2015; SINGH *et al.*, 2021; ALBUQUERQUE *et al.*, 2022; MUKHERJEE *et al.*, 2022). L'intérêt des polysaccharides n'est pas exclusivement dû à leurs propriétés rhéologiques, mais aussi à leurs activités biologiques (FERREIRA *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015), comme leurs activités antioxydantes, anti-inflammatoires, antidiabétiques, probiotiques, immunostimulantes et anticancéreuses (SCHEPETKIN et QUINN, 2006; ZONG *et al.*, 2012; LIU *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2020; YU *et al.*, 2022).

Les polysaccharides sont issus de diverses sources naturelles présentées par les végétaux, les animaux et les micro-organismes (BAUER *et al.*, 2010; POPA, 2011). Les polysaccharides extraits des plantes supérieures peuvent être une source intéressante de composés biologiquement actifs (ANGONE *et al.*, 2011), mais ils sont encore peu étudiés et inexplorés, notamment dans certaines familles botaniques (KUMAR *et al.*, 2020).

La famille des Zygophyllaceae se caractérise par sa diversité botanique et sa richesse en substances bioactives. Les espèces appartenant à cette famille sont reconnues pour leurs propriétés thérapeutiques et elles sont utilisées en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies et symptômes (AHMED *et al.*, 2020). De nombreux travaux ont été signalés sur l'identification de métabolites secondaires et l'évaluation des activités pharmacologiques des espèces de Zygophyllaceae. Toutefois, les études réalisées sur les polysaccharides de ces espèces restent encore limitées. Il serait donc intéressant d'identifier les polysaccharides issus de certaines de ces plantes à la recherche de nouvelles molécules ayant des propriétés spécifiques.

Face à ce constat, la présente étude vise la caractérisation partielle et l'étude des activités biologiques de polysaccharides hydrosolubles de deux espèces spontanées de la famille des Zygophyllaceae, qui sont bien représentées dans le Sahara algérien. Il s'agit de *Zygophyllum album*

L. et *Balanites aegyptiaca* Del. Les deux espèces ont fait l'objet de plusieurs études pour identifier leurs substances bioactives et tester leurs activités biologiques. Cependant, aucun travail n'a été signalé sur leurs polysaccharides hydrosolubles.

Le présent travail se divise en trois chapitres. Le premier chapitre est un aperçu général sur les espèces de *Z. album* et *B. aegyptiaca*. Il porte sur leur répartition géographique, leur description botanique, leur utilisation traditionnelle, leurs métabolites secondaires et leurs activités biologiques, mais aussi sur les polysaccharides des plantes supérieures (caractéristiques générales de polysaccharides, structures et fonctions des principaux polysaccharides extraits de plantes). Le deuxième chapitre présente les méthodes adoptées pour l'extraction, la détermination de la composition biochimique des polysaccharides extraits et l'évaluation de leur activité antioxydante, anti-hyperglycémiant et anti-inflammatoire *in vitro*. Le troisième chapitre est une analyse et une discussion des résultats d'étude des différents extraits des espèces investies. Le travail se termine par une conclusion qui synthétise les principaux résultats et suggère des perspectives de recherche.

---

# **Chapitre I**

**Aperçu général sur les espèces étudiées  
de la famille des Zygophyllaceae et les  
polysaccharides chez les plantes  
supérieures**

---

### I.1.- Famille de Zygophyllaceae

Zygophyllaceae est une famille d'environ 285 espèces d'arbres, d'arbustes et d'herbes, réparties dans les zones tropicales et subtropicales arides et semi-arides (HUSSEIN *et al.*, 2011; ELNUR *et al.*, 2015; ABD EL-AAL *et al.*, 2019). En Algérie, cette famille comprend trois genres principaux dont *Zygophyllum*, *Fagonia* et *Tribulus* (SOUDDI et BOUALLALA, 2023).

La famille des Zygophyllaceae présente une grande variabilité et nombreuses études ont été menées afin de préciser la position systématique de certains de ses membres (HUSSEIN *et al.*, 2011). Cette famille hétérogène doit son nom à la présence de feuilles opposées, toutefois les genres *Peganum*, *Nitraria* et *Balanites* font exception (OZENDA, 2004). Les feuilles stipulées sont très polymorphes. Les fleurs sont de 4 à 5 mères, isolées ou en inflorescence. La corolle est de 4 à 5 mères, parfois nulle. Les étamines (5-15) sont en général stipulées. L'ovaire est de 4 à 5 carpelles, à un à plusieurs ovules par loge. Le fruit est une capsule, parfois une baie ou une drupe (QUEZEL et SANTA, 1963 ; OZENDA, 2004). Les espèces de cette famille synthétisent diverses substances bioactives comme des dérivées triterpéniques, des alcaloïdes et une vaste gamme des composés phénoliques (FROHNE *et al.*, 2009).

#### I.1.1.- Genre *Zygophyllum*

*Zygophyllum* est numériquement le genre le plus important dans la famille de Zygophyllaceae avec 100 espèces (ABD EL-AAL *et al.*, 2019; SHAWKY *et al.*, 2019). Les espèces sont réparties dans les régions arides du bassin méditerranéen, dans le sud, le nord et le nord-est de l'Afrique (BOURGOU *et al.*, 2017). Quatre espèces sont représentées en Algérie, il s'agit de *Zygophyllum simplex* L., *Zygophyllum album* L., *Zygophyllum gaetulum* et *Zygophyllum cornutum* Coss. (SOUDDI et BOUALLALA, 2023).

Les espèces du *Zygophyllum* représentent un groupe de plantes succulentes résistantes à la sécheresse et/ou tolérantes à la salinité (HAMMAD et QARI, 2010). Une des mécanismes d'adaptation de ces espèces contre le stress hydrique et salin est l'augmentation d'expression des gènes responsables de la synthèse des osmoprotecteurs et des antioxydants. Ainsi, l'accumulation d'osmolytes solubles, comme la proline et les sucres solubles dans ces plantes, permet d'ajuster la diffusion et l'accumulation des enzymes d'ascorbate peroxydases et de superoxyde dismutase permet de lutter contre les espèces réactives de l'oxygène (MOHAMMEDI, 2020).

Les espèces appartenant au genre *Zygophyllum*, se caractérisent par leur richesse en métabolites secondaires, incluent les flavonoïdes, les saponines, les stérols, les triterpènes et les huiles essentielles (SHAWKY *et al.*, 2019; MOHAMMEDI, 2020). Beaucoup d'entre ces espèces sont utilisées en médecine traditionnelle, pour traiter plusieurs maladies (ABD EL-AAL *et al.*, 2019; ABDELHAMEED *et al.*, 2022), en particulier *Zygophyllum coccineum* utilisé pour le traitement du rhumatisme, de la goutte, du diabète et d'hypertension (MOHAMMED *et al.*, 2021), *Zygophyllum gaetulum* réputé pour son action antispasmodique, antidiabétique et anti-eczéma (JANAH, 2024), *Zygophyllum fabago* utilisé comme expectorant, antitussif et anti-inflammatoire (KHAN *et al.*, 2014), *Zygophyllum simplex* utilisé contre l'asthme et la goutte (ABDALLAH et

ESMAT, 2017), *Zygophyllum geslini* utilisé contre le diabète (SMATI *et al.*, 2004), et en l'occurrence *Zygophyllum album*.

#### I.1.1.1.- *Zygophyllum album* L.

*Zygophyllum album* L. est une espèce halophyte appartenant à la famille des Zygophyllaceae. Elle est répandue dans le Sahara algérien (MOHAMMEDI, 2020), où elle est communément appelée «Agga» ou «Aggaia». L'abondance de cette espèce peut être attribuée à sa forte capacité à tolérer les contraintes environnementales. Cette plante joue un rôle important dans la réhabilitation des sols dégradés (SOUDDI et BOUALLALA, 2023). Elle est utilisée en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies (PETROPOULOS *et al.*, 2018).

##### I.1.1.1.1.-Répartition géographique

L'espèce *Z. album* présente une large distribution géographique (BATANOUNY et EZZAT, 1971; SOUDDI et BOUALLALA, 2023). Elle se trouve dans tout le Sahara de l'Afrique du Nord, en Arabie et en Afrique tropicale de l'Est (EL HADIDI, 1978 ; MOHAMMEDI, 2020). Elle se rencontre dans les sols salés ou gypseux et dans les sebkha (QUEZEL et SANTA, 1963 ; KSOURI *et al.*, 2013). Les sols qui favorisent sa croissance sont riches en chlorures, en sodium et en sulfates (EL-GHANI *et al.*, 2014; SOUDDI et BOUALLALA, 2023).

##### I.1.1.1.2.-Position systématique

La position systématique de *Z. album* selon JUDD *et al.* (2002) est :

|                       |                             |
|-----------------------|-----------------------------|
| <b>Règne</b>          | Plantae                     |
| <b>Super-Division</b> | Spermatophyta               |
| <b>Division</b>       | Magnoliophyta               |
| <b>Classe</b>         | Magnoliopsida               |
| <b>Ordre</b>          | Zygophyllales               |
| <b>Famille</b>        | Zygophyllaceae              |
| <b>Genre</b>          | <i>Zygophyllum</i>          |
| <b>Espèce</b>         | <i>Zygophyllum album</i> L. |

##### I.1.1.1.3.-Description botanique

*Z. album* est un sous-arbrisseau vivace, des feuilles charnues, composées, à deux folioles, des fruits dilatés en lobes au sommet, mais non munis des cornes recourbées en crochets. Le fruit, au plus une fois et demi, est plus long que large, piriforme, régulièrement dilaté depuis la base jusqu'au sommet. Le pédoncule fructifère est bien plus court que le fruit. La partie libre des carpelles est sensiblement aussi longue que la partie soudée (OZENDA, 2004).

#### I.1.1.1.4.-Etudes ethnobotanique et phytochimique

En médecine traditionnelle, les feuilles et la partie aérienne de *Z. album* sont utilisées en décoction, poudre ou pommade pour le traitement de diabète, d'indigestion, de dermatose (OULD EL HADJ *et al.*, 2003; CHEHMA *et al.*, 2008; LAKHDARI *et al.*, 2016), de rhumatisme, de goutte, d'asthme, d'hypertension et de carie dentaire (TIGRINE-KORDJANI *et al.*, 2006; KCHAOU *et al.*, 2016a). Elle est utilisée aussi comme agent diurétique, antihistaminique et anesthésique local (TIGRINE-KORDJANI *et al.*, 2006; MNAFGUI *et al.*, 2012).

*Z. album* est une espèce succulente comestible, qui se caractérise par sa richesse en métabolites secondaires, notamment les flavonoïdes, les saponines, les stérols et les terpènes (MOUSTAFA *et al.*, 2007; MNAFGUI *et al.*, 2012; KSOURI *et al.*, 2013; SHAWKY *et al.*, 2019; ABDELHAMEED *et al.*, 2022). Le tableau I résume les principaux métabolites secondaires présents dans les feuilles et la partie aérienne de la plante.

L'espèce de *Z. album* a fait l'objet de plusieurs études pour évaluer les activités biologiques de ses extraits bruts et ses métabolites secondaires.

BELGUIDOUM *et al.* (2015) ont rapporté que l'extrait brut et la fraction butanolique de la partie aérienne de *Z. album* présentent un grand pouvoir réducteur de 11,26 et 30,17 mM respectivement, supérieur aux antioxydants synthétiques BHA (3-tertbutyl-4-hydroxyanisole) et BHT (3,5-di-tertbutyl-4-hydroxytoluène) et que la fraction chloroformique présente un pouvoir d'inhibition du radical DPPH meilleur que BHT ( $IC_{50} = 22,127 \mu\text{g/ml}$ ).

L'extrait éthanolique et de dichlorométhane des feuilles de *Z. album* ont montré une grande capacité antioxydante totale de l'ordre de 222,4 et 185,2 mg vitamine E/mg extrait respectivement, et une activité antioxydante significative contre le radical DPPH avec une  $IC_{50}$  de 0,2 mg/ml pour les deux extraits. Ils sont dotés d'une forte activité anti-acétylcholinestérase avec des  $IC_{50}$  de 58 et 40  $\mu\text{g/ml}$  pour l'extrait éthanolique et de dichlorométhane respectivement (KCHAOU *et al.*, 2016b).

KCHAOU *et al.* (2016a) ont rapporté que l'huile essentielle extrait des feuilles de *Z. album* est un puissant inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase pancréatique, avec une  $IC_{50}$  de 43,17  $\mu\text{g/ml}$ . Cet extrait présente aussi une bonne activité inhibitrice de la lipase pancréatique ( $IC_{50} = 85,95 \mu\text{g/ml}$ ). Ainsi, l'extrait éthanolique de la partie aérienne a montré un bon pouvoir inhibiteur de la lipase pancréatique avec une  $IC_{50}$  de 91,07  $\mu\text{g/ml}$  (MNAFGUI *et al.*, 2012).

GHOUL et BENATTIA (2014) ont étudié l'effet d'extrait aqueux de *Z. album* (100 et 300 mg/kg de poids corporel) sur les enzymes hépatiques des souris non diabétiques et des souris diabétiques induites par la streptozotocine pendant 15 jours. Les résultats obtenus ont montré que l'extrait entraîne une réduction significative des taux de la glucokinase hépatique et du glycogène chez les souris diabétiques et une augmentation significative de la phospho-fructokinase et la glucose-6-phosphate déshydrogénase chez les souris diabétiques.

**Tableau I.-** Principaux métabolites secondaires isolés chez *Z. album*

| <b>Métabolites</b> | <b>Composés identifiés</b>                                                                                              | <b>Références</b>                                                                         |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Flavonoïdes</b> | Isorhamnetin                                                                                                            | MOUSTAFA <i>et al.</i> , 2007                                                             |
|                    | Isorhamnetin-3-O- $\beta$ -glucopyranoside-7-O $\alpha$ -rhamnopyranoside                                               | MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012                                                              |
|                    | Isorhamnetin-3-O- $\beta$ -D-glucoside                                                                                  | MOUSTAFA <i>et al.</i> , 2007; HUSSEIN <i>et al.</i> , 2011; MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012 |
|                    | Isorhamnetin-3-O-rutinoside                                                                                             | HUSSEIN <i>et al.</i> , 2011; KSOURI <i>et al.</i> , 2013; BELMIMOUN <i>et al.</i> , 2017 |
|                    | Isorhamnetin-3-O robinoside                                                                                             | MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012                                                              |
|                    | Isorhamnetin-3-O- $\beta$ galactopyranoside                                                                             | HUSSEIN <i>et al.</i> , 2011; MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012                                |
|                    | Quercetin-3-O- $\beta$ -glucopyranoside                                                                                 | SHAWKY <i>et al.</i> , 2019                                                               |
|                    | Kaempferol                                                                                                              | MOUSTAFA <i>et al.</i> , 2007; ABDELHAMEED <i>et al.</i> , 2022                           |
|                    | Quercetin                                                                                                               | MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012; ABDELHAMEED <i>et al.</i> , 2022                            |
|                    | Quercetin-3,7-di-O- $\beta$ -glucopyranoside                                                                            | MNAFGUI <i>et al.</i> , 2012; BOURGOU <i>et al.</i> , 2017                                |
|                    | Quercetin-3-O rutinoside (Rutin)                                                                                        | HUSSEIN <i>et al.</i> , 2011; BOURGOU <i>et al.</i> , 2017                                |
| <b>Triterpènes</b> | Ursolicacid                                                                                                             | ABDELHAMEED <i>et al.</i> , 2022                                                          |
|                    | Oleanolicacid                                                                                                           | SHAWKY <i>et al.</i> , 2019                                                               |
| <b>Stérols</b>     | $\beta$ -sitosterol                                                                                                     | MOUSTAFA <i>et al.</i> , 2007; ABDELHAMEED <i>et al.</i> , 2022                           |
|                    | Stigmasterol                                                                                                            | MOUSTAFA <i>et al.</i> , 2007                                                             |
| <b>Saponines</b>   | Quinovic $\beta$ acid-3 $\beta$ -O- $\beta$ -D-quinovopyranosyl (3 $\rightarrow$ 1)- $\beta$ -D-xylopyranoside          | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1993                                                            |
|                    | 3 $\beta$ -O- $\beta$ -D-quinovopyranosyl-quinovic acid (28 $\rightarrow$ 1) quinovopyranosyl ester                     | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1993                                                            |
|                    | 3 $\beta$ -O- $\beta$ -D-quinovopyranosyl-quinovic acid (28 $\rightarrow$ 1) $\beta$ -D glucopyranosyl ester            | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1993                                                            |
|                    | Quinovic acid-3 $\beta$ -O- $\beta$ -D-quinovoside                                                                      | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1993                                                            |
|                    | Quinovic acid- O-(3 $\rightarrow$ 1)- $\alpha$ -L-rhamnopyranoside                                                      | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1989                                                            |
|                    | Quinovic acid-O-(3 $\rightarrow$ 1)- $\beta$ -D glucopyranoside                                                         | HASSANEAN <i>et al.</i> , 1989                                                            |
|                    | 3-O-[ $\beta$ -D-2-O sulphonylquinovopyranosyl] quinovic acid-27-O-[ $\beta$ -D glucopyranosyl] ester (Zygophyloside F) | ELGAMAL <i>et al.</i> , 1995; KSOURI <i>et al.</i> , 2013                                 |
|                    |                                                                                                                         |                                                                                           |
| <b>Alcaloïdes</b>  | Harmine ( $\beta$ -carboline alkaloid)                                                                                  | SHAWKY <i>et al.</i> , 2019                                                               |

L'administration de l'extrait éthanolique de la plante (100 et 300 mg/kg de poids corporel) à des souris diabétiques induites par la streptozotocine pendant 14 jours a entraîné une réduction significative du glucose plasmatique, du cholestérol, des triglycérides, des lipoprotéines LDL et VLDL, de la glucokinase hépatique et du glycogène (GHOUL *et al.*, 2012).

KSOURI *et al.* (2013) ont étudié l'activité anti-inflammatoire de différentes fractions de la partie aérienne de *Z. album* en utilisant des macrophages RAW 264.7 induits par lipopolysaccharide (LPS). Les résultats ont montré que l'extrait méthanolique présente le meilleur pouvoir d'inhibition de la libération de NO, avec un pourcentage d'inhibition de 84,8 % à la concentration de 160 µg/ml. MNAFGUI *et al.* (2014) ont rapporté que l'extrait de cette plante montre une activité anti-inflammatoire remarquable, qui se traduit par une diminution des niveaux sériques de protéine C-réactive (CRP) et de facteur de nécrose tumorale (TNF- $\alpha$ ) chez les rats diabétiques.

KSOURI *et al.* (2013) ont montré que l'extrait de dichlorométhane de la partie aérienne de *Z. album* présente une activité anticancéreuse notable, en particulier contre le carcinome pulmonaire humain (A-549) et les cellules d'adénocarcinome du côlon (DLD-1) avec des IC<sub>50</sub> de 37 et 48 µg/ml respectivement, et que cet extrait ne présente pas une cytotoxicité significative contre les lignées cellulaires de fibroblastes de peau humaine saine (WS1). L'étude d'EL-ATTAR *et al.* (2019) ont montré que le même type d'extrait présente une activité antagoniste des lignées cellulaires du cancer du foie humain (HepG2) avec une IC<sub>50</sub> de 27,74 µg/ml.

KCHAOU *et al.* (2016a) ont rapporté que l'huile essentielle des feuilles de *Z. album* exerce une forte activité antibactérienne contre les bactéries Gram positif.

### I.1.2.- Genre *Balanites*

*Balanites*, dont le nom a été mentionné pour la première fois par Alire DELILE en 1813, se réfère au fruit et provient du mot grec qui désigne un gland (ZEIN *et al.*, 2024).

L'appartenance du genre *Balanites* à la famille des Zygophyllaceae ou de celle des Balanitaceae est toujours controversée entre les chercheurs (ABDELAZIZ *et al.*, 2020). Toutefois, le Angiosperm Phylogeny Group (1998) a classé la *Balanites* dans la famille des Zygophyllaceae. Les travaux moléculaires de Sheahan et Chase (2000) ont montré aussi que *Balanites* est classé dans le clade Tribuloid, qui fait partie des Zygophyllaceae (BEENTJE, 2003).

Le genre *Balanites* comprend neuf espèces et onze taxons intra-spécifiques (SANDS, 2001; BEENTJE, 2003; AL-THOBAITI et ABU ZEID, 2018), représentés par *Balanites wilsoniana* (var. *wilsoniana*, var. *mayumbensis* and f. var. *glabripetata*) ; *Balanites maughamii* (subsp. *Maughamii* et subsp. *Acuta*) ; *Balanites aegyptiaca* (var. *aegyptiaca*, var. *ferox*, var. *pallida*, var. *quarrrei* et var. *tomentosa*) ; *Balanites pedicellaris* (subsp. *pedicellaris* et subsp. *somalensis*) ; *Balanites rotundifolia* (var. *rotundifolia*, var. *scillia* et var. *setulifera*) ; *Balanites angolensis* (subsp. *angolensis* et subsp. *welwitschii*) ; *Balanites roxburghii* ; *Balanites triflora* et *Balanites glabra* (AL-THOBAITI et ABU ZEID, 2018). Parmi ces espèces, deux sont réparties en Inde et en Myanmar, une espèce présente au Yémen et une autre en Arabie et dans la vallée du Jourdain. Les autres espèces sont réparties en une grande partie dans l'Afrique (BEENTJE, 2003).

Le *Balanites* est un arbre à usages multiples et les espèces de ce genre sont utilisés dans la nourriture de l'homme et les animaux et en médecine traditionnelle (AL-THOBAITI et ABU ZEID, 2018). Le fruit est la partie la plus utilisée. Cette partie de la plante présente une importance économique, puisqu'elle est comestible et produit une huile à forte valeur ajoutée (BEENTJE, 2003).

#### **I.1.2.1.- *Balanites aegyptiaca* Del.**

*B. aegyptiaca* est une plante médicinale appartenant à la famille de Zygophyllaceae. C'est un arbre très apprécié par la population locale pour son bois, ses fruits comestibles, ses graines contenant environ de 49% d'huile comestible et ses feuilles utilisés pour l'alimentation du bétail (ABDELAZIZ *et al.*, 2020; MURTHY *et al.*, 2021).

*B. aegyptiaca* est connu sous les noms vernaculaires de dattier du désert, myrobolan d'Égypte (nom français), Tabouarak (nom tamahaq), Zekkoum et Heglig (nom arabe). Cette espèce est riche en métabolites secondaires, ce qui justifie son utilisation traditionnelle (SANDS, 2013 ; DEY et SHAILI, 2023). Elle contribue aussi à la conservation des sols grâce à son système racinaire étendu (DEY et SHAILI, 2023).

##### **I.1.2.1.1.- Répartition géographique**

*B. aegyptiaca* est une espèce xérophyte des zones sahéliennes et soudano-sahéliennes d'Afrique, de Moyen Orient et de l'Inde (TESFAYE, 2015; ABDOULAYE *et al.*, 2017). Elle se développe dans tous les types de sol (sableux, argileux, argilo-limoneux, graveleux) et elle est très résistante à la sécheresse (SAGNA *et al.*, 2014; ABDOULAYE *et al.*, 2017), ce qui explique sa large distribution géographique (CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011; SAGNA *et al.*, 2014).

L'espèce de *B. aegyptiaca* est native d'Algérie, de Libye, du Maroc, d'Égypte, d'Arabie saoudite, du Yémen, d'Angola, du Bénin, du Burkina Faso, du Burundi, du Cameroun, du Congo, de Djibouti, d'Érythrée, d'Éthiopie, du Myanmar, du Nigeria, de Somalie, de Tanzanie, d'Ouganda, du Tchad, de la Zambie et du Zimbabwe (TESFAYE, 2015).

En Afrique, la zone de distribution de *B. aegyptiaca* s'étend de l'ouest à l'est, dans la bande Sahélienne de l'Océan Atlantique (Sénégal, Mauritanie) jusqu' à l'Erythrée. Son aire de répartition s'étend à travers le Sahara, en Algérie où sa frontière est située à 27° N (SAGNA *et al.*, 2014). Elle est fréquente au Sahara central, y compris les massifs montagneux, au-dessous de 1800 m (OZENDA, 2004).

##### **I.1.2.1.2.- Position systématique**

La position systématique de *B. aegyptiaca* pour CHOTHANI et VAGHASIYA (2011) et TEFAYE (2015), est comme suit:

|                |                                  |
|----------------|----------------------------------|
| Règne          | Plantae                          |
| Super-Division | Spermatophyta                    |
| Division       | Magnoliophyta                    |
| Classe         | Magnoliopsida                    |
| Ordre          | Sapindales                       |
| Famille        | Zygophyllaceae                   |
| Genre          | <i>Balanites</i>                 |
| Espèce         | <i>Balanites aegyptiaca</i> Del. |

#### I.1.2.1.3.- Description botanique

*B. aegyptiaca* est un arbre très rameux de 7 à 8 m de hauteur (OZENDA, 2004), de tiges jeunes tomenteuses, de feuilles alternes composées bifoliolées de 1-7 cm de long, des épines droites disposées à l'aisselle des feuilles beiges verdâtres atteignant 8 à 10 cm de long, d'inflorescence en cyme de 5 à 8 fleurs sessiles, de fruits verts devenant jaunes à la maturité, constitués par une drupe charnue ovoïde de 5 × 2.5 cm (QUEZEL et SANTA, 1963; ARBONNIER, 2002; OZENDA, 2004).

Le fruit présente un épicarpe mince, un mésocarpe charnu et comestible et un endocarpe très épais (LIBOUGA *et al.*, 2006). L'endocarpe contient une graine oléagineuse (CHOPRA *et al.*, 1960; LIBOUGA *et al.*, 2006).

#### I.1.2.1.4.- Etudes ethnobotanique et phytochimique

Toutes les parties de la plante de *B. aegyptiaca* sont utilisées en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies et symptômes (ARBONNIER, 2002). L'enquête ethnobotanique réalisée par ABDOULAYE *et al.* (2017) au Tchad sur l'utilisation de *B. aegyptiaca* par la population locale, montre que les fruits sont les parties les plus utilisées, suivies par les feuilles (ABDOULAYE *et al.*, 2017). L'utilisation traditionnelle des différentes parties de la plante est résumée dans le tableau II.

Le fruit de *B. aegyptiaca* est comestible et la graine est oléagineuse (PARIS et AUBRAT, 1946). Ces fruits sont sucrés et consommés par l'homme et les animaux (LIBOUGA *et al.*, 2006).

Le fruit contient des glucides, des protéines, des acides gras, des sels minéraux et des vitamines (TESFAYE, 2015; GUPTA *et al.*, 2017; MONTASSER *et al.*, 2017; MURTHY *et al.*, 2021). Il est riche en glucides et cela justifie ainsi son nom de "datte du désert" (SAGNA *et al.*, 2014). Les sucres réducteurs sont majoritaires présentés par le glucose et le fructose (SAGNA *et al.*, 2014; SALIHU-LASISI *et al.*, 2014). Le fruit est également riche en minéraux, notamment en calcium, magnésium, phosphore, sodium et potassium (MURTHY *et al.*, 2021).

La graine de *B. aegyptiaca* est riche en lipides et en protéines (MEHANNI *et al.*, 2017; CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011; GUPTA *et al.*, 2017). Elle donne une huile comestible utilisée à des fins alimentaires (LIBOUGA *et al.*, 2006; MURTHY *et al.*, 2021). Les principaux acides gras contenus dans l'huile sont les acides linoléique, oléique, palmitique et stéarique (CHAPAGAIN *et al.*, 2009).

Les graines contiennent des minéraux tels que le potassium, le phosphore et le calcium qui

présentent en concentrations plus élevées (MURTHY *et al.*, 2021). Elle renferme aussi une saponine soluble dans l'eau, qui lui confère une amertume assez prononcée. Mais, elle pourrait être éliminée par traitement des graines à l'eau bouillante (CHOPRA *et al.*, 1960).

**Tableau II.-** Etude ethnobotanique sur *B. aegyptiaca*

| Parties utilisées | Indications et maladies traitées                                    | Mode d'utilisation  | Références                                                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fruits            | Diabète                                                             | /                   | MAHMOUD et GAIROLA, 2013 ; SABOO <i>et al.</i> , 2014 ; SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                               |
|                   | Ulcère gastrique                                                    | /                   | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Troubles d'estomac                                                  | Décoction aqueuse   | POUSSET, 1989                                                                                                                    |
|                   | Constipation                                                        | /                   | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Molluscicide                                                        | Décoction concentré | POUSSET, 1989 ; BAKHIET et ADAM, 1995                                                                                            |
|                   | Purgative                                                           | Décoction aqueuse   | POUSSET, 1989 ; BAKHIET et ADAM, 1995                                                                                            |
|                   | Anti-inflammatoire                                                  | Décoction concentré | POUSSET, 1989                                                                                                                    |
|                   | Spermicide                                                          | Extrait aqueux      | SABOO <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
| Graines           | Toux                                                                | Pommade             | GUPTA <i>et al.</i> , 2017                                                                                                       |
|                   | Asthme                                                              | Poudre              | ADESINA <i>et al.</i> , 2017                                                                                                     |
|                   | Sinusite                                                            | Pâte                | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Douleurs abdominales                                                | Pommade             | GUPTA <i>et al.</i> , 2017                                                                                                       |
|                   | Infections oculaires                                                | Huile               | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Expectorant                                                         | /                   | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; SABOO <i>et al.</i> , 2014 ; TESFAYE, 2015                                                         |
|                   | Antibactérien et antifongique                                       | /                   | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; SABOO <i>et al.</i> , 2014 ; TESFAYE, 2015                                                         |
|                   | Ictère                                                              | Macération          | POUSSET, 1989                                                                                                                    |
| Ecorces           | Syphilis                                                            | /                   | ARBONNIER, 2002 ; HAMMICHE et MAIZA, 2006 ; SAGNA <i>et al.</i> , 2014 ; SABOO <i>et al.</i> , 2014 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017 |
|                   | Morsure de serpent                                                  | Macération          | POUSSET, 1989 ; HAMMICHE et MAIZA, 2006                                                                                          |
|                   | Constipation forte                                                  | Clystères           | HAMMICHE et MAIZA, 2006                                                                                                          |
|                   | Hémorroïdes                                                         | Macération d'écorce | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Fièvre jaune                                                        | /                   | ARBONNIER, 2002 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017                                                                                     |
|                   | Blessures                                                           | /                   | ARBONNIER, 2002 ; HAMMICHE et MAIZA, 2006 ; SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                           |
|                   | Brûlures                                                            | /                   | ARBONNIER, 2002 ; HAMMICHE et MAIZA, 2006 ; SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                           |
|                   | Maladies mentales                                                   | /                   | ARBONNIER, 2002 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017                                                                                     |
| Feuilles          | Anti-spasmodique                                                    | /                   | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; SABOO <i>et al.</i> , 2014 ; TESFAYE, 2015                                                         |
|                   | Variole                                                             | Décoction           | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
| Racines           | Diabète, ictère, constipation, indigestion, hypertrophie de la rate | Décoction           | HAMMICHE et MAIZA, 2006                                                                                                          |
|                   | Douleurs abdominales                                                | /                   | HINES et ECKMAN, 1993 ; SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                               |
|                   | Fièvre jaune                                                        | Macération          | SAGNA <i>et al.</i> , 2014                                                                                                       |
|                   | Purgative                                                           | /                   | HINES et ECKMAN, 1993                                                                                                            |

Plusieurs classes des substances bioactives sont présentes dans l'espèce de *B. aegyptiaca*, en

citant les saponines, les flavonoïdes, les coumarines, les alcaloïdes et les stérols (DUBEY *et al.*, 2011 ; CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; GAJALAKSHMI *et al.*, 2013 ; SABOO *et al.*, 2014 ; TESFAYE, 2015). Toutefois, les saponines représentent les constituants les plus importants surtout au niveau de fruits (TESFAYE, 2015; OSMAN-BASHIR et ELHUSSEIN, 2017). Le tableau III résume les principaux métabolites secondaires présents dans les différentes parties de la plante.

**Tableau III.- Métabolites secondaires isolés chez *B. aegyptiaca***

| Métabolites secondaires | Composés identifiés                                | Parties étudiées | Références                                                                                            |
|-------------------------|----------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Flavonoïdes             | Quercetin-3-O-glucoside                            | Feuille          | DHARANI, 2016                                                                                         |
|                         |                                                    | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         | Quercetin-3-O-rutinoside                           | Feuille          | GUPTA <i>et al.</i> , 2017                                                                            |
|                         |                                                    | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         | Isorhamnetin-3-O-rutinoside                        | Feuille          | SABOO <i>et al.</i> , 2014                                                                            |
|                         |                                                    | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
|                         | Isorhamnetin-3-O-glucoside                         | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
|                         |                                                    | Feuille          | DUBEY <i>et al.</i> , 2011                                                                            |
|                         | Isorhamnetin-3,7-diglucoside                       | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         |                                                    | Feuille          | TESFAYE, 2015                                                                                         |
|                         | Isorhamnetin-3-O-rhamnogalactoside                 | Fruit            | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; DHARANI, 2016 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017                              |
|                         |                                                    | Feuille          | MEDA <i>et al.</i> , 2011                                                                             |
| Saponines               | Quercitrin                                         | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         |                                                    | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
|                         | Quercetin                                          | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         |                                                    | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
|                         | Isorhamnetin                                       | Graine           | SHAFIK <i>et al.</i> , 2016                                                                           |
|                         |                                                    | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
|                         | Balanitin 1, Balanitin 2, Balanitin 3              | Ecorce de tige   | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; DHARANI, 2016 ; MURTHY <i>et al.</i> , 2020                             |
|                         |                                                    | Racine           | DHARANI, 2016 ; MURTHY <i>et al.</i> , 2020                                                           |
|                         | Balanitin 3, Balanitin 6, Balanitin 7              | Fruit            | DHARANI, 2016                                                                                         |
|                         | Balanitin 4, Balanitin 5, Balanitin 6, Balanitin 7 | Graine           | DHARANI, 2016 ; MURTHY <i>et al.</i> , 2020                                                           |
| Coumarines              | Furanocoumarin bergapten                           | Ecorce           | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; DHARANI, 2016 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017; MURTHY <i>et al.</i> , 2020 |
|                         | D- marmesin                                        | Ecorce           | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; DHARANI, 2016 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017; MURTHY <i>et al.</i> , 2020 |
| Alcaloïdes              | N-trans-feruloyltyramine                           | Ecorce           | SARKER <i>et al.</i> , 2000                                                                           |
|                         | N-cis-feruloyltyramine                             | Ecorce           | SARKER <i>et al.</i> , 2000                                                                           |
|                         | Trigonelline                                       | Fruit            | FARAG <i>et al.</i> , 2015                                                                            |
| Stérols                 | Diosgenin                                          | Fruit            | CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; DHARANI, 2016 ; GUPTA <i>et al.</i> , 2017; MURTHY <i>et al.</i> , 2020 |

L'évaluation des activités biologiques de *B. aegyptiaca* a fait l'objet de plusieurs études. Les

études menées sur l'activité antioxydante des différentes parties de cette espèce ont rapporté que les composés phénoliques, les stérols et les saponines pourraient être responsables de l'activité antioxydante de cette espèce (CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; HASSAN *et al.*, 2016; MURTHY *et al.*, 2021).

L'étude de HASSAN *et al.* (2016) sur les différents extraits d'écorce de *B. aegyptiaca* a montré que l'extrait méthanolique présente la teneur la plus élevée en polyphénols et en flavonoïdes et l'activité anti-radicalaire la plus grande contre DPPH et ABTS, avec des IC<sub>50</sub> de 40 et 125,85 µg/ml respectivement. MAYBA *et al.* (2011) ont étudié l'effet antioxydant et hépatoprotecteur d'extrait éthanolique de la partie aérienne de *B. aegyptiaca* sur l'hépatotoxicité induite par le tétrachlorométhane chez les rats. Les résultats obtenus ont montré que l'extrait éthanolique augmente significativement le taux de superoxyde dismutase, de catalase, de glutathion peroxydase et de glutathion réductase.

Les extraits des fruits et des graines de *B. aegyptiaca* ont montré une activité anti-hyperglycémique et anti-hyperlipidémique intéressante chez les souris et les rats diabétiques induites par la streptozocine (MHYA *et al.*, 2018).

AL-MALKI *et al.* (2015) ont testé l'effet de l'extrait d'acétate d'éthyle des fruits sur des rats induits par la streptozotocine. Les résultats obtenus ont montré que l'extrait réduit le taux de glucose sanguin et d'hémoglobine glyquée (HbA1c). ZAAHKOUK *et al.* (2003) ont montré que l'extrait aqueux et éthanolique du fruit de *B. aegyptiaca* induisent une réduction significative dans la glycémie et dans le taux du cholestérol, de triglycérides et des transaminases chez les rats diabétiques.

ZAKY *et al.* (2022) ont montré que les extraits aqueux des fruits et des graines de *B. aegyptiaca* présentent des effets anti-hyperglycémiques et anti-hyperlipidémiques potentiels, traduits par l'augmentation des niveaux d'insuline sérique, la diminution de la résistance à l'insuline et l'amélioration du système de défense antioxydant chez les rats diabétiques induites par la streptozotocine.

GAUR *et al.* (2008) ont indiqué que l'extrait éthanolique et d'éther de pétrole des parties aériennes de *B. aegyptiaca* réduisent significativement l'œdème de la patte arrière induit par la carragénine chez les rats. Toutefois, l'effet de l'extrait éthanolique est plus important à celui de l'extrait d'éther de pétrole. SPERONI *et al.* (2005) ont rapporté que les extraits méthanoliques et butanoliques de l'écorce de *B. aegyptiaca* présentent une activité anti-inflammatoire notable sur l'œdème de la patte du rat par rapport aux témoins.

AHMED *et al.* (2015) ont rapporté que l'huile de la graine de *B. aegyptiaca* présente une activité anti-inflammatoire significative sur l'œdème de la patte induit par la carragénine et de l'œdème de l'oreille induit par l'acide arachidonique chez les rats. Les résultats obtenus par cette étude ont montré aussi que l'huile de la graine réduit l'expression de l'ARNm et les protéines du facteur de nécrose tumorale- $\alpha$  (TNF- $\alpha$ ) et de l'interleukine-6 (IL-6).

AL-MALKI *et al.* (2016) ont testés l'activité antitumorale de l'extrait d'acétate d'éthyle,

éthanolique et chloroformique des fruits de *B. aegyptiaca* contre les lignées cellulaires de cancer de la vessie (HCV29T), de leucémie humaine (HL-60), de carcinome du larynx (Hep-2) et d'adénocarcinome du sein (MCF7). Les résultats obtenus ont montré que l'extrait éthylacétique présente l'activité antiproliférative la plus puissante (40 µg/ml), suivi par l'extrait éthanolique (55 µg/ml) et l'extrait chloroformique (61 µg/ml).

Le spirostane (SAP-1016) ; saponine isolée de *B. aegyptiaca*, a montré une puissante activité antiproliférative contre les cellules cancéreuses mammaires (MCF-7) et les cellules cancéreuses du côlon (HT-29), avec des valeurs IC<sub>50</sub> de 2,4 et 3,3 µmol/l respectivement (BEIT-YANNAI *et al.*, 2011). Le mélange des saponines stéroïdiennes: balanitrine 6 et 7 isolés de la graine de *B. aegyptiaca* montre des effets anticancéreux appréciables sur des lignées cellulaires du cancer de poumon (A549) et du glioblastome (tumeur primitive de cerveau) (U373) avec des IC<sub>50</sub> de 0,3 et 0,5 µmol/l respectivement (GNOULA *et al.*, 2008).

AL ASHAAL *et al.* (2010) ont rapporté que l'huile de *B. aegyptiaca* présente une activité anticancéreuse contre les lignées cellulaires de carcinomes humains du poumon, du foie et du cerveau.

CHAPAGAIN *et al.* (2007) ont testés l'extrait riche en saponine du fruit de *B. aegyptiaca* contre cinq champignons phytopathogènes communs (*Pythium ultimum*, *Fusarium oxysporum*, *Alternaria solani*, *Colletotrichum coccodes* et *Verticillium dahliae*). L'extrait a montré des inhibitions de croissance élevées contre *P. ultimum* (81,1%) et modérées contre *A. solani* (34,7%) à la concentration de 4%. Toutefois, il a montré une faible inhibition de croissance contre les autres espèces.

RUNYORO *et al.* (2006) ont testé l'activité antifongique de 63 extraits de plantes tanzaniennes contre *Candida albicans* (ATCC 90028). Les résultats obtenus ont montré que les extraits d'écorces et de racines de *B. aegyptiaca* ont montré une forte activité antifongique.

## **I.2.- Polysaccharides de plantes supérieures**

Dans le métabolisme de plantes supérieures, les polysaccharides sont synthétisés pour servir comme des réserves énergétiques, pour conférer la rigidité et la stabilité à la paroi cellulaire et stimuler la croissance et la différenciation cellulaire (PEDROSA *et al.*, 2024). Ils se trouvent dans les parois cellulaires, les graines, les exsudats des tiges et les racines (MAJEE *et al.*, 2016).

En plus de leur rôle essentiel dans la structure et le métabolisme des plantes, les polysaccharides présentent des effets bénéfiques notables sur la santé humaine, notamment sur l'inflammation, le diabète et le stress oxydatif (PEDROSA *et al.*, 2024).

### **I.2.1.- Caractéristiques générales des polysaccharides**

Les polysaccharides sont des polymères de haut poids moléculaire. Ils sont présents dans tous les êtres vivants (bactéries, mycètes, algues, végétaux supérieurs et animaux) (BAUER *et al.*, 2010 ; POPA, 2011), et constituent avec les oligosaccharides les composés organiques les plus

abondants dans la nature (VENUGOPAL, 2011; OGUTU *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2015).

Les polysaccharides sont étroitement associés avec d'autres macromolécules comme les protéines, la lignine, les lipides et certaines substances minérales (LIU *et al.*, 2015).

#### **I.2.1.1.- Structure de base**

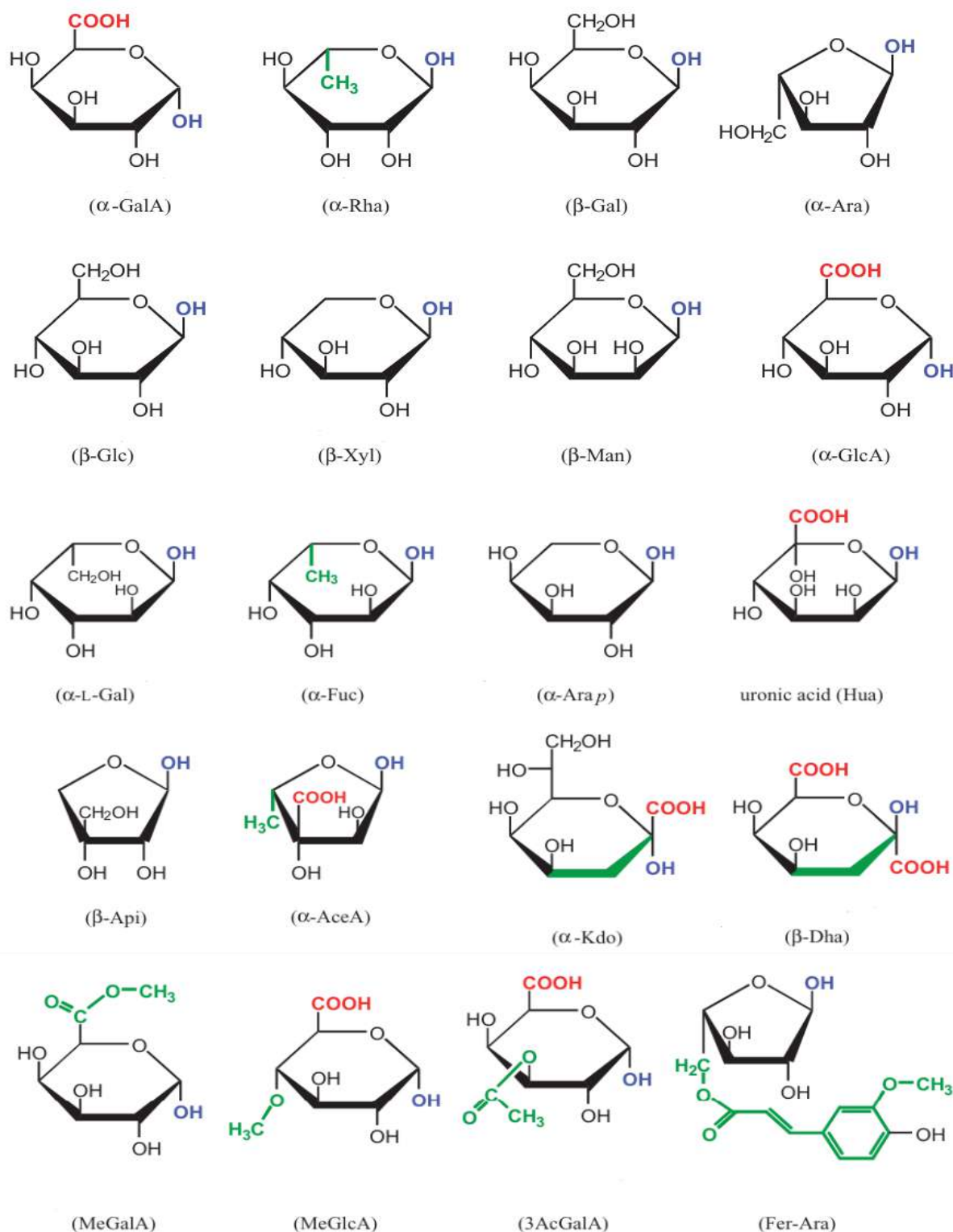
Les polysaccharides sont formés par condensation d'un grand nombre de molécules d'oses reliés par des liaisons osidiques. Cette association peut aller de 10 à plusieurs milliers de résidus glycosidiques (BRUNETON, 1999 ; BAUER *et al.*, 2010 ; WEIL, 2001 ; WANG *et al.*, 2016).

Les oses ou les monosaccharides sont des composés polyhydroxyaldéhydes (aldoses) ou polyhydroxyacétone (cétose) de 3 à 9 carbones. Ils peuvent former des cycles à 5 atomes (furanose) ou à 6 atomes (pyranose) (BAUER *et al.*, 2010; QUENTIN *et al.*, 2015). La figure 1 représente la structure des principaux monosaccharides constitutifs des polysaccharides.

Les oses peuvent avoir des configurations anomériques différentes et reliées par des liaisons glycosidiques différentes (BE MILLER, 2008). La liaison glycosidique se produit par la condensation du groupement OH porté par l'atome de carbone anomérique d'un ose avec le groupement OH de l'autre ose (WEINMAN, 2004). Des dérivés d'oses comme les acides uroniques, les osamines (glucosamine et galactosamine) et leurs dérivés (acide N-acétylneuraminique et acide N-acétylmuramique) peuvent constituer certains types des polysaccharides (VENUGOPAL, 2016). Des groupes du méthyle, du sulfate et d'acétate peuvent aussi être présents (BE MILLER, 2008).

Les polysaccharides peuvent être constitués d'un seul type d'ose ou de plusieurs types d'oses. La séquence des résidus osidiques peut être périodique (un seul motif se répète régulièrement) ou apériodique. Leur structure de base peut être linéaire ou ramifiée (BRUNETON, 1999 ; BAUER *et al.*, 2010). La longueur des chaînes latérales est variable et les ramifications peuvent être régulièrement ou irrégulièrement espacées (BAUER *et al.*, 2010; BE MILLER, 2008).

Le degré de polymérisation (DP) d'un polysaccharide correspond au nombre des unités glycosidiques. Les polysaccharides sont souvent poly-dispersés car ils peuvent contenir de molécules des DP différents et donc des poids moléculaires différents (BE MILLER, 2008 ; KABIR *et al.*, 2022).



**Figure 1.-** Structure des monosaccharides constitutifs des polysaccharides de la paroi cellulaire (FRY, 2010). Acide  $\alpha$ -D-galacturonique ( $\alpha$ -GalA),  $\alpha$ -L-rhamnose ( $\alpha$ -Rha),  $\beta$ -D-galactose ( $\beta$ -Gal),  $\alpha$ -L-arabinose ( $\alpha$ -Ara),  $\beta$ -D-glucose ( $\beta$ -Glc),  $\beta$ -D-xylose ( $\beta$ -Xyl),  $\beta$ -D-mannose ( $\beta$ -Man), acide  $\alpha$ -D-glucuronique ( $\alpha$ -GlcA),  $\alpha$ -L-galactose ( $\alpha$ -L-Gal),  $\alpha$ -L-fucose ( $\alpha$ -Fuc),  $\alpha$ -L-arabinopyranose ( $\alpha$ -Arap), acide uronique de D-lyxo-5-hexosulose (Hua),  $\beta$ -D-apiose ( $\beta$ -Api),  $\alpha$ -L-acide acérique ( $\alpha$ -AceA), acide 2-céto-3-déoxy- $\alpha$ -D-manno-2-octulosonique ( $\alpha$ -Kdo), acide 3-déoxy- $\beta$ -D-lyxo-2-heptulosarique ( $\beta$ -Dha), méthyl  $\alpha$ -D-galacturonate (MeGalA), acide 4-O-méthyl- $\alpha$ -D-glucuronique (MeGlcA), acide 3-O-acétyl- $\alpha$ -D-galacturonique (3AcGalA),  $\alpha$ -L-arabinose 5-O-feruloylé (Fer-Ara).

### I.2.1.2.- Nomenclature

Les noms courants de polysaccharides sont conservés tels que l'amidon, la cellulose et la chitine (HEINZE *et al.*, 2012). Toutefois, la nomenclature systématique recommandée par la commission de l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) est utilisée pour décrire précisément la structure d'un polysaccharide. Ces polymères sont nommés d'après les types des oses constitutifs. Dans le cas des polysaccharides constitués d'un seul type du monosaccharide, on remplace la terminaison « -ose » du nom du monosaccharide par « -ane » (glucane, fructane, mannane, xylane, galactane, etc..). Le nom inclut la configuration d'ose (D ou L), l'anomérisie ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) et le type de liaison glycosidique entre les oses, par exemple : (1 $\rightarrow$ 4)- $\alpha$ -D-glucane (amylose) (MC NAUGHT, 1996).

Les polysaccharides hétérogènes sont constitués de deux ou plusieurs monosaccharides. Dans ce cas, lorsque le polysaccharide a une chaîne principale constituée d'un seul type de résidu d'ose, ce résidu doit être cité en dernier en tant que terme «glycane», et les autres types de résidus doivent être cités en tant que préfixes « glyco- » dans l'ordre alphabétique. Néanmoins, lorsqu'aucun type de résidu d'ose ne constitue la chaîne principale, tous les résidus d'oses doivent être cités par ordre alphabétique en tant que préfixes « glyco- » et le nom doit se terminer par le suffixe «- glycane» (MC NAUGHT, 1996).

### I.2.1.3.- Fonctions

Les polysaccharides assurent diverses fonctions structurales (résistance mécanique et rigidité de paroi cellulaire) et métaboliques (réserves énergétiques) (BRUNETON, 1999 ; BAUER *et al.*, 2010 ; ZONG *et al.*, 2012). Ils participent aussi dans plusieurs processus biologiques, comme le contrôle de l'activité cellulaire (prolifération, différenciation, adhésion et migration), la reconnaissance du signal, la communication entre les cellules, l'immunité cellulaire (COLLIEC-JOUAULT *et al.*, 2004 ; VENUGOPAL, 2016 ; ZONG *et al.*, 2012 ; LIU *et al.*, 2015 ; REN *et al.*, 2019) et la protection des tissus contre le dessèchement (BRUNETON, 1999).

### I.2.1.4.- Propriétés physico-chimiques

La structure de base des polysaccharides, notamment la composition en monosaccharides, les types de liaisons glycosidiques, le degré de ramification, la polydispersité et la charge, conditionne leurs propriétés physico-chimiques comme la solubilité, la gélification et les propriétés de surface (ZONG *et al.*, 2012 ; KABIR *et al.*, 2022).

Par exemple, les polysaccharides homogènes non ramifiés et non substitués avec un seul type de liaison généralement de (1 $\rightarrow$ 3) ou (1 $\rightarrow$ 4), comme la cellulose, le mannane et l'amylose sont insolubles dans l'eau à des températures inférieures à 100°C. Cela est dû à l'association des molécules de polysaccharides par des liaisons d'hydrogène intra- et intermoléculaires, ce qui empêche la pénétration de l'eau (BE MILLER, 2008 ; BAUER *et al.*, 2010). Par ailleurs, les polymères ramifiés sont plus solubles que les polymères linéaires et sont plus aptes à former des gels, puisque les interactions intermoléculaires sont relativement faibles (BAUER *et al.*, 2010).

Les polysaccharides chargés sont solubles dans l'eau. La solubilité augmente à cause de la répulsion intermoléculaire entre les molécules de la même charge et de l'affinité des groupes chargés avec l'eau (KABIR *et al.*, 2022).

La solubilité est aussi étroitement liée au degré de polymérisation et les polysaccharides de poids moléculaire élevé sont moins solubles dans l'eau (KABIR *et al.*, 2022).

### I.2.2.- Principaux polysaccharides de plantes supérieures

De nombreux polysaccharides extraits des plantes supérieures ont été analysés pour déterminer leurs structures et leurs fonctions (PEDROSA *et al.*, 2024).

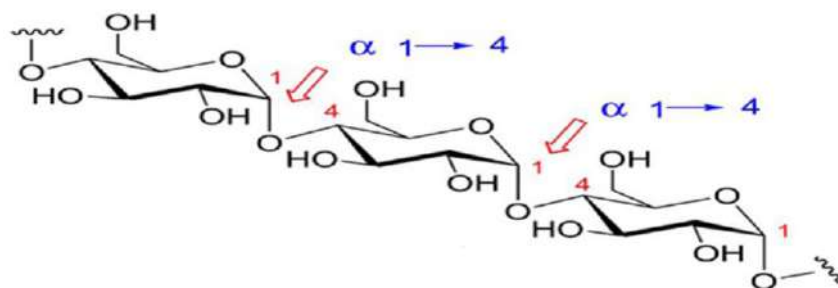
#### I.2.2.1.- Amidon

L'amidon est la principale réserve énergétique chez les végétaux (BRUNETON, 1999). Il représente 30 à 60 % de poids sec des cellules végétales (AUDIGIE et ZONSZAIN, 1999).

L'amidon est présent dans tous les tissus végétaux (BRUNETON, 1999 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009), notamment dans les organes des réserves (MAROUF et TREMBLIN, 2009). Il est abondant dans les graines de céréales (40 à 90 % du poids sec des graines), dans les tubercules (65 à 85 % du poids sec) et dans les légumineuses (30 à 70 % du poids sec) (BAUER *et al.*, 2010).

L'amidon est un homopolysaccharide composé de deux constituants : amylose et amylopectine.

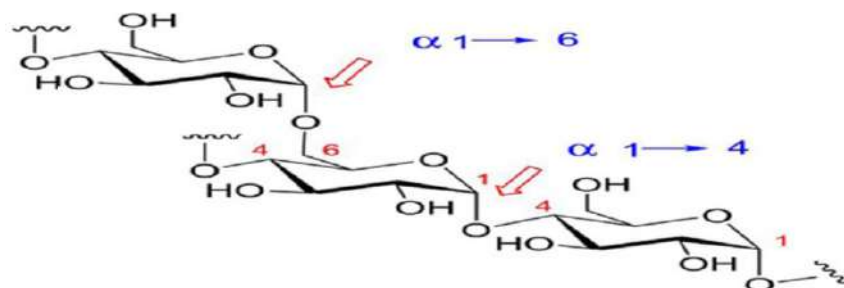
L'amylose est un polymère linéaire constitué des unités de glucose, reliés entre elles par des liaisons de type  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) (fig. 2) (LEVEQUE *et al.*, 2004; BAUER *et al.*, 2010). Sa structure est hélicoïdale (BAUER *et al.*, 2010). Ces chaînes sont de longueur variable et forment des structures assez compactes (WEIL, 2001). Le poids moléculaire d'amylose varie entre 150 et 600 kDa (LEVEQUE *et al.*, 2004; BAUER *et al.*, 2010).



**Figure 2.-** Structure d'amylose (MAJI, 2012)

L'amylopectine est un polymère de glucose ramifié en grappe (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; BAUER *et al.*, 2010). Les chaînes latérales ayant la même structure de la chaîne principale et ils sont constitués des unités de glucose reliés entre elles par des liaisons de type  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4). Les liaisons de type  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) forment les ramifications (fig. 3) (WEIL, 2001; LEVEQUE *et al.*, 2004).

La longueur de ramification varie entre 20 à 25 unités de glucose (WEIL, 2001). Le taux de ramification diffère selon l'espèce végétale. Le poids moléculaire de l'amylopectine est beaucoup plus important que celui de l'amylose (10000-500000 kDa) (BAUER *et al.*, 2010).



**Figure 3.-** Structure d'amylopectine (MAJI, 2012)

Les proportions de l'amylose et de l'amylopectine dans l'amidon sont relatives et varient selon l'espèce végétale (WEIL, 2001 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009). Toutefois, l'amylopectine est généralement le polymère le plus dominant. Par exemple, l'amidon de blé et de pomme de terre contiennent 70 à 80% d'amylopectine. Les amidons cireux du riz, de l'orge et du sorgho sont constitués de 94% d'amylopectine (AUDIGIE et ZONSZAIN, 1999).

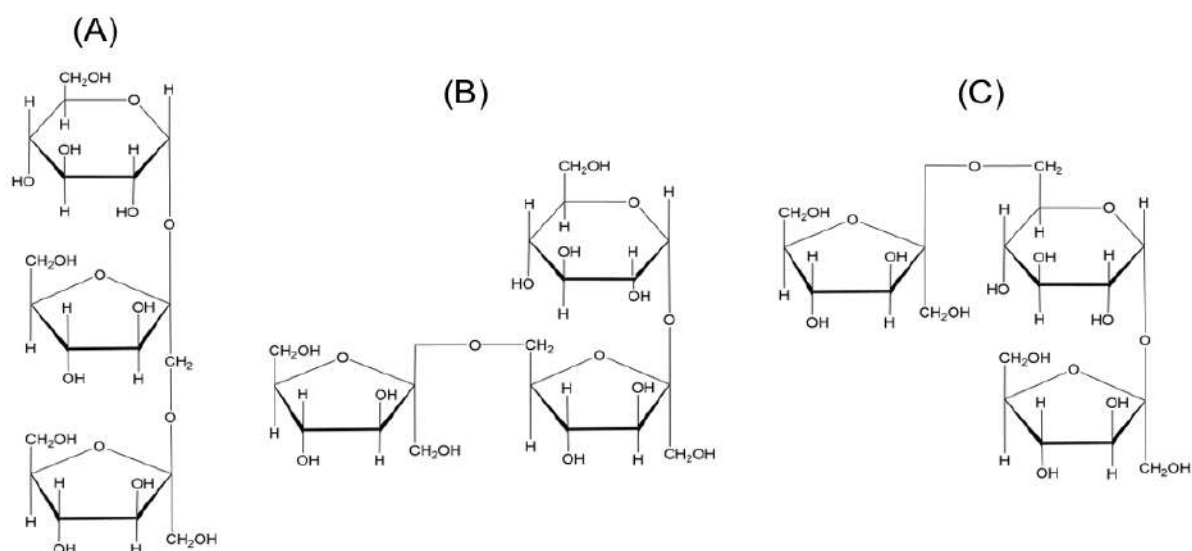
#### I.2.2.2.- Fructanes

Les fructanes représentent 15 % des réserves glucidiques des plantes à fleurs (LIVINGSTON *et al.*, 2009; VERMA *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2023). Ils se retrouvent dans les tiges, les feuilles, les inflorescences, les organes souterrains et les graines (LIVINGSTON *et al.*, 2009; WANG et CHEONG, 2023).

Les fructanes sont des polymères linéaires ou ramifiés, composés du fructose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 2) ou  $\beta$ -(2 $\rightarrow$ 6) avec un glucose terminal (fig. 4) (BAUER *et al.*, 2010; VERMA *et al.*, 2021; WANG et CHEONG, 2023).

En fonction de leur structure, il se distingue cinq classes de fructanes chez les plantes supérieures : inulines, inulines néoséries (néoinulines), lévanes (phléines), lévanes mixtes (graminées) et lévanes néoséries (néolévanes) (LIVINGSTON *et al.*, 2009; PESHEV et VAN DEN ENDE, 2014; WANG et CHEONG, 2023).

Les fructanes de type inuline se trouvent dans les dicotylédones, notamment dans la famille des Asteraceae (chicorée, dahlia, topinambour), des Boraginaceae et des Campanulaceae. En revanche, les phléines et lévanes mixtes prédominent chez les monocotylédones, surtout dans la famille des Poaceae (blé) et des Liliaceae (BRUNETON, 1999).



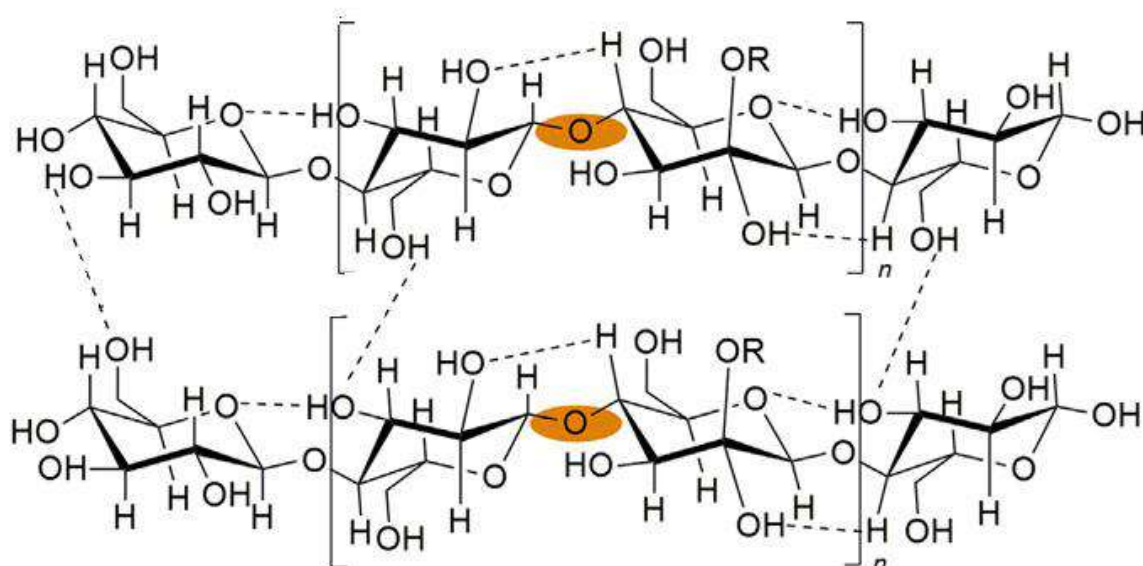
**Figure 4.-** Structure des différents types de fructanes des plantes supérieures classées ; A: 1-kestose (inulines); B: 6-kestose (lévanes); C: néokestose (néoinulines ou néolévanes) (WANG et CHEONG, 2023)

Les fructanes sont stockés dans les vacuoles (VERMA *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2023). Leur taux d'accumulation est plus élevé que celui de l'amidon (VERMA *et al.*, 2021). Ils permettent à la plante de survivre dans des conditions environnementales difficiles, notamment dans des climats froids et secs, grâce à leur association avec les membranes cellulaires. Ils jouent un rôle important dans la repousse après défoliation et dans la germination (SHI *et al.*, 2023).

### I.2.2.3.- Cellulose

La cellulose est le composé organique le plus abondant sur la terre et le principal constituant structurel des parois végétales (GUIGNARD, 2000 ; BAUER *et al.*, 2010 ; VOET et VOET, 2016). C'est un homoglycane linéaire constitué de longues chaînes, formés d'unités de glucose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (fig. 5). Ces chaînes s'associent étroitement les unes aux autres par des liaisons d'hydrogène ou de type Vander Waals et forment des structures fibrillaires très condensées (WEIL, 2001 ; GUIGNARD, 2000 ; BAUER *et al.*, 2010). Le degré de polymérisation de la cellulose peut aller jusqu'à 15000 (BRUNETON, 1999 ; BAUER *et al.*, 2010 ; VOET et VOET, 2016).

La différence entre les propriétés structurales de cellulose et d'amidon résulte principalement de la configuration  $\alpha$  ou  $\beta$  du glucose engagé dans la liaison glycosidique (AUDIGIE et ZONSZAIN, 1999 ; VOET et VOET, 2016). Les liaisons  $\beta$ -glycosidiques dans la cellulose confèrent à chaque résidu de glucose successif à faire un angle de 180° par rapport au résidu précédent, ce qui donne au polymère une conformation homogène en pleine extension. Tandis que, les liaisons  $\alpha$ -glycosidiques dans l'amidon lui confèrent une conformation d'hélice irrégulière (VOET et VOET, 2016).



**Figure 5.-** Structure moléculaire des chaînes de cellulose (DESHAVATH *et al.*, 2019)

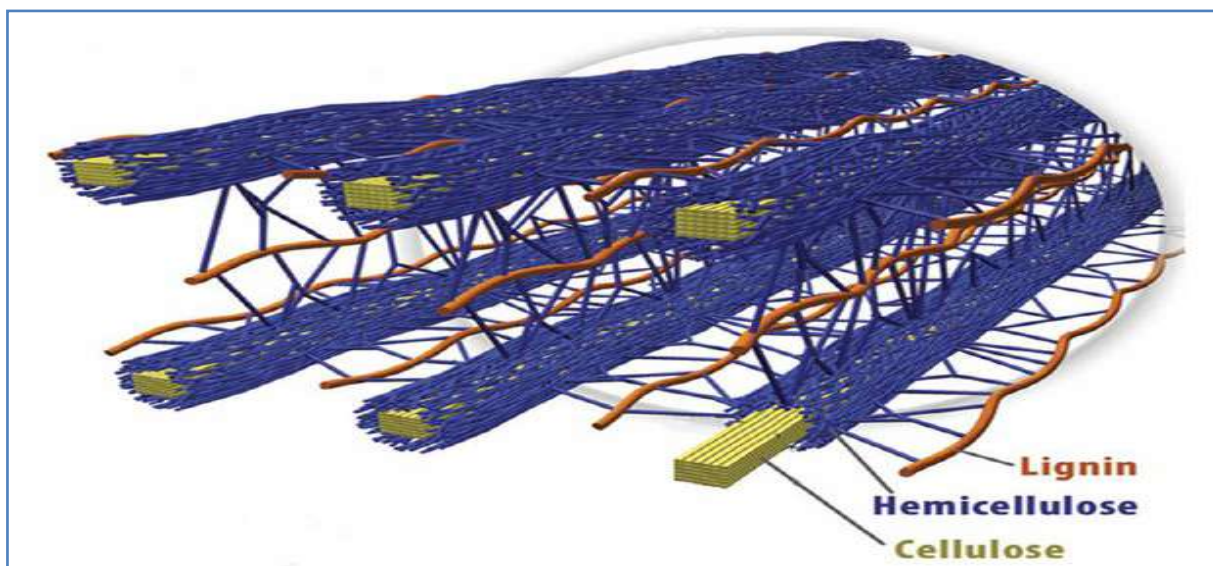
Malgré son caractère hydrophile (due à sa richesse en groupement  $-OH$ ), la cellulose est insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants. Cette résistance exceptionnelle aux attaques chimiques est expliquée par sa structure fibrillaire très cohésive et riche en liaisons d'hydrogène et par sa masse moléculaire très élevée (VOET et VOET, 2016 ; GUIGNARD, 2000 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009). Cette résistance mécanique est la base de l'utilisation industrielle de la cellulose (fibres de papier, textiles) (WEIL, 2001 ; GUIGNARD, 2000).

#### I.2.2.4.- Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides abondants dans la nature (POPA, 2011). Leur abondance varie largement entre les espèces et les différents types de cellules (SCHELLER et ULVSKOV, 2010). Elles représentent 20 à 30% du poids sec du bois de conifères (bois tendres) et 27% à 40% de celle du bois des feuillus (bois durs) (MAROUF et TREMBLIN, 2009).

Les hémicelluloses sont des polysaccharides de faible poids moléculaire associés à la paroi cellulaire végétale avec la lignine et la cellulose (fig. 6) (MAROUF et TREMBLIN, 2009; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

Les hémicelluloses se différencient de la cellulose par le fait qu'elles sont solubles dans les solutions alcalines. Elles doivent cette solubilité aux chaînes moléculaires plus courtes qui les constituent (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; GUIGNARD, 2000), avec un degré de polymérisation inférieur à 200 (GUIGNARD, 2000 ; MOINE, 2005 ; MOREIRA et FILHO, 2008).



**Figure 6.-** Disposition spatiale de l'hémicellulose, de la cellulose et de la lignine dans la paroi cellulaire (BRANDT *et al.*, 2013)

Les hémicelluloses se caractérisent par sa composition osidique hétérogène. Leur hydrolyse donne du D-glucose, du D-mannose, du D-galactose, du D-xylose, de L-arabinose et en plus faible proportion du L-rhamnose, du L-fucose et d'acide D-glucuronique (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; POPA, 2011). Les oses de la chaîne principale sont liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (MOREIRA et FILHO, 2008 ; SCHELLER et ULVSKOV, 2010 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012) avec une configuration équatoriale (SCHELLER et ULVSKOV, 2010 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

Le principal rôle des hémicelluloses est le renforcement de la paroi cellulaire par leur interaction avec la cellulose et dans certains cas avec la lignine. Néanmoins, elles peuvent jouer le rôle de stockage dans les graines (SCHELLER et ULVSKOV, 2010).

Selon la nature de l'ose constitutif, il se distingue plusieurs types des hémicelluloses, qui peuvent être homopolysaccharides, mais le plus souvent hétéropolysaccharides (MAROUF et TREMBLIN, 2009). Elles sont subdivisées en quatre classes, présentées par les xylanes, les mannanes, les xyloglucanes et les  $\beta$ -glucanes à liaisons mixtes (EBRINGEROVA *et al.* 2005; SCHELLER et ULVSKOV, 2010).

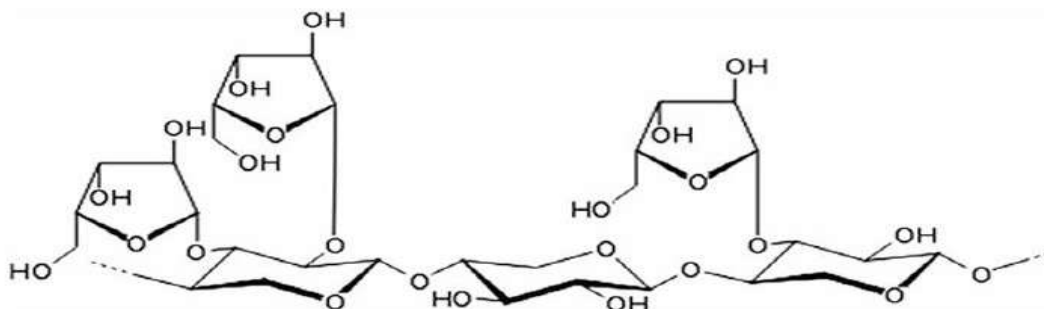
#### I.2.2.4.1.- Xylanes

Les xylanes sont les principaux composés des parois secondaires végétales (GUIGNARD, 2000). Ce type des hémicelluloses représente 20 à 25% des bois durs, 7 à 12% des bois tendres et jusqu'à 50% de certains tissus des graminées et des céréales (EBRINGEROVA *et al.*, 2005; MAROUF et TREMBLIN, 2009).

Leur chaîne principale est formée d'unités de D-xylose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), avec des chaînes latérales d'acide glucuronique ou d'acide 4-O-méthyl-glucuronique liés en  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 2) de L-arabinose (GUIGNARD, 2000 ; EBRINGEROVA *et al.*, 2005 ; SCHELLER et ULVSKOV, 2010 ; OCHOA-

VILLARREAL *et al.*, 2012), avec ou non de divers oligosaccharides composés de D-xylose, L-arabinose, D- ou L-galactose et D-glucose (EBRINGEROVA *et al.*, 2005).

Les xylanes peuvent être divisés en homoxylanes et hétéroxylanes présentés principalement par les arabinoxylanes (fig. 7), les glucuronoxylanes, les (arabino) glucuronoxylanes, les (glucurono) arabinoxylanes et les hétéroxylanes complexes (EBRINGEROVA *et al.*, 2005; CAFFALL *et al.*, 2009 ; SILVA *et al.*, 2012).



**Figure 7.-** Structure des arabinoxylanes (HEINZE *et al.*, 2012)

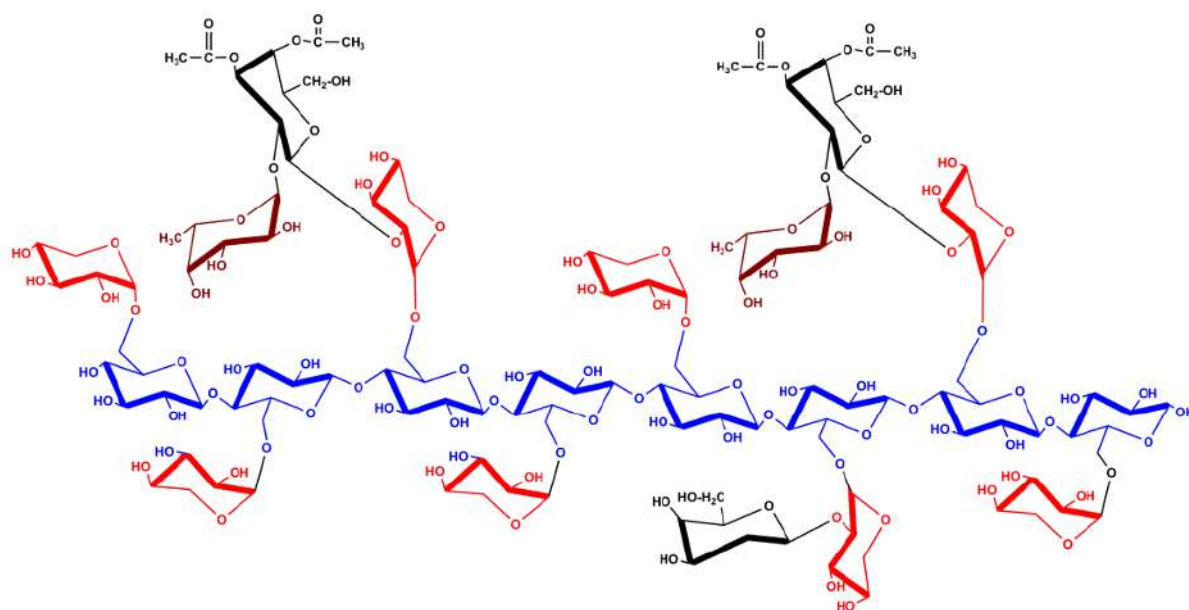
#### I.2.2.4.2.- Xyloglucanes

Les xyloglucanes sont les hémicelluloses les plus abondantes dans les parois primaires de la plupart des plantes vasculaires. (HOFFMAN *et al.*, 2005; NISHINARI *et al.*, 2007; ECKARDT, 2008), mais leur abondance varie considérablement entre les dicotylédones et les monocotylédones (PARK et COSGROVE, 2015) par le fait qu'ils soient présents en quantités beaucoup plus importantes dans les parois des dicotylédones (environ de 20% du poids sec) (PAULY *et al.*, 2013; PARK et COSGROVE, 2015) que celles des monocotylédones (5 à 10% du poids sec) (PARK et COSGROVE, 2015).

Les xyloglucanes jouent un rôle structurel dans les parois cellulaires des plantes, en assurant la cohésion entre la cellulose et les autres constituants de la paroi par les liaisons d'hydrogène (GUIGNARD, 2000) et en empêchant l'agrégation des microfibrilles de la cellulose (N EIL *et al.*, 1984; ECKARDT, 2008 ; PAULY *et al.*, 2013 ; PARK et COSGROVE, 2015). Cependant, ils peuvent jouer aussi un rôle de stockage dans les graines (MULIMANI et PRASHANTH, 2002 ; NISHINARI *et al.*, 2007 ; PAULY *et al.*, 2013).

Les xyloglucanes sont constitués d'une chaîne principale de D-glucose liés en  $\beta$ -(1→4), (comme dans la cellulose), substitué de manière quasi-régulière par de courtes séquences d'unités de D-xylose liés au glucose par la position C-6 (GUIGNARD, 2000 ; HOFFMAN *et al.*, 2005 ; NISHINARI *et al.*, 2007 ; PARK et COSGROVE, 2015). Des résidus supplémentaires sont parfois attachés à la xylose, en fonction de la source de xyloglucane (fig. 8) (GUIGNARD, 2000; NISHINARI *et al.*, 2007). Ces polysaccharides sont hautement ramifiés (HOFFMAN *et al.*, 2005). Dans la plupart des cas, trois résidus de glucose sur quatre sont substitués par l' $\alpha$ -D-xylose à la position C-6 (HOFFMAN *et al.*, 2005; NISHINARI *et al.*, 2007; PARK et COSGROVE, 2015). La ramification des xyloglucanes a une signification à la fois fonctionnelle et taxonomique

(SCHELLER et ULVSKOV, 2010).



**Figure 8.-** Structure des xyloglucanes. La chaîne principale de β-D-glucane est représentée en bleu. Les résidus de α-D-xylose, α-D-galactose et α-L-fucose sont représentés en rouge, noir et brun respectivement (OCHOA-VILLARREAL, 2012)

Les xyloglucanes de stockage et celle de la paroi primaire ont des structures similaires. Ils ont des ramifications régulières avec des résidus de xylose liés en α-(1→6), qui peuvent être ramifiés davantage avec des résidus de galactose liés en β-(1→2). Cependant, les xyloglucanes de stockage ne sont pas fucosylés (BUCKERIDGE, 2010).

#### I.2.2.4.3.- Mannanes

Les mannanes sont des composants structurellement importants de la paroi cellulaire, ainsi qu'une source principale des polysaccharides de stockage (CAFFALL *et al.*, 2009).

Les glucomannanes et les galactomannanes constituent les hémicelluloses majeures des parois secondaires dans les bois tendres mais mineurs dans les bois durs (MAROUF et TREMBLIN, 2009). Ces polymères glucidiques présentent un squelette de base contenant du mannose ou une combinaison de glucose et de mannose liés en β-(1→4). Sur cette chaîne principale, des chaînes latérales contenant des résidus de galactose liés en α-(1→6) sont greffées (MOREIRA et FILHO, 2008).

Les mannanes jouent un rôle dans la rigidité de la paroi cellulaire. Ils constituent aussi des réserves énergétiques dans les graines (MOREIRA et FILHO, 2008 ; BUCKERIDGE, 2010; PAULY *et al.*, 2013). D'autres rôles physiologiques peuvent être également attribués aux mannanes, comme la signalisation, la croissance et la différenciation tissulaire (MOREIRA et FILHO, 2008 ; PAULY *et al.*, 2013). Ils peuvent être divisés en quatre classes : mannanes linéaires, glucomannanes, galactomannanes et galactoglucomannanes (MOREIRA et FILHO, 2008).

#### I.2.2.4.3.1.- Mannanes linéaires

Les mannanes linéaires sont structurellement apparentés aux galactomannanes (BUCKERIDGE *et al.*, 2000), mais contrairement à celles-ci sont insolubles dans l'eau (BRUNETON, 1999 ; BUCKERIDGE *et al.*, 2000), par le fait qu'elles présentent moins de ramification des résidus de galactosyle (BUCKERIDGE *et al.*, 2000).

Les mannanes sont présents dans les graines de *Phoenix dactylifera* (Arecaceae) et de *Coffea arabica* (Rubiaceae). Ils constituent les composés majoritaires des graines de *Phytelephas macrocarpa* (Arecaceae). Ces glycanes sont constitués d'une chaîne linéaire de résidus de D-mannose liées en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (fig. 9), substitué en 5 à 10 % des cas par des résidus de D-galactose liées en  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6) (BUCKERIDGE *et al.*, 2000 ; MOREIRA et FILHO, 2008).

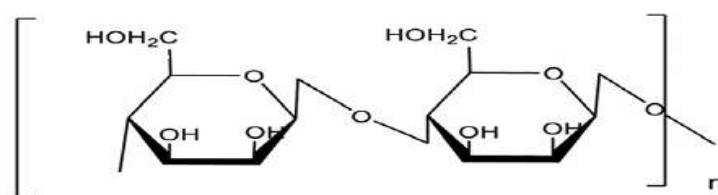


Figure 9.- Structure des mannanes (KUMAR *et al.*, 2020)

#### I.2.2.4.3.2.- Glucomannanes

Les glucomannanes constituent avec les xylanes les principales hémicelluloses du bois (POPA, 2011). Ces polymères pariétaux sont plus abondants dans les gymnospermes que dans les angiospermes. Ils sont fréquents dans les organes souterrains de diverses monocotylédones comme les tubercules de l'*Amorphophallus konjac* (Araceae). Le squelette de base des glucomannanes est constitué en général des unités de D-mannose et de D-glucose, dans un rapport de 3: 1 et reliés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) (fig. 10) (GUIGNARD, 2000 ; MOREIRA et FILHO, 2008). Ces polymères, ayants un degré de polymérisation de 100 à 5000, se dissolvent dans l'eau et forment des solutions très visqueuses (BRUNETON, 1999).

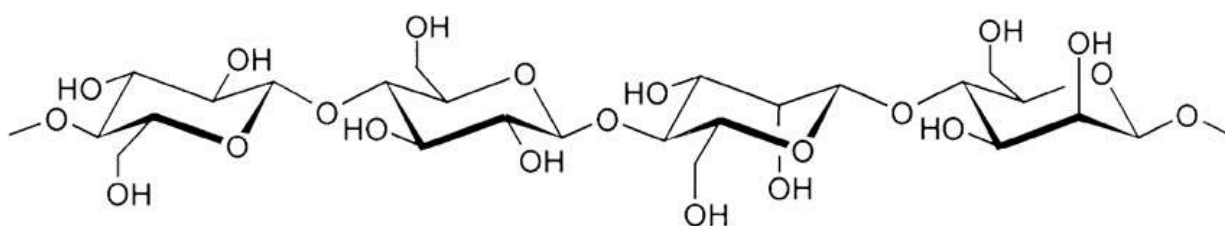
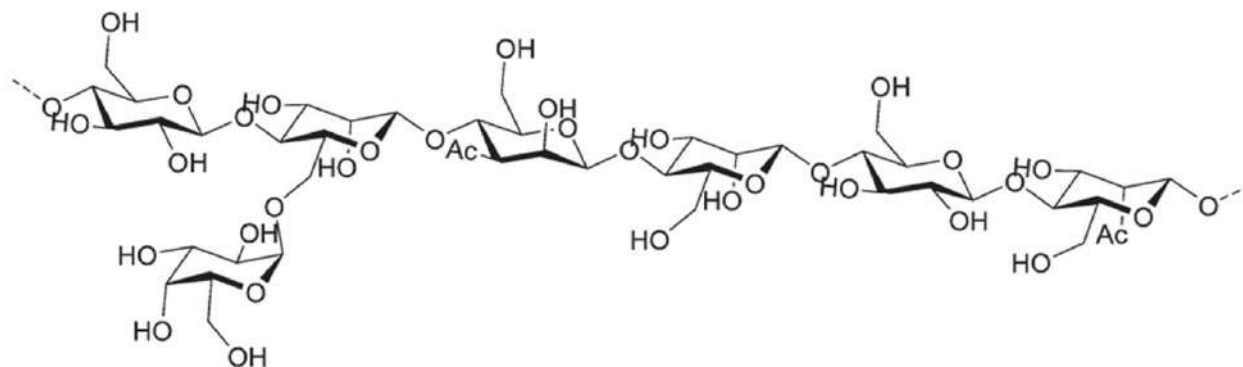


Figure 10.- Structure des glucomannanes (EBRINGEROVA *et al.*, 2005)

#### I.2.2.4.3.3.- Galactoglucomannanes

Les galactoglucomannanes sont des glucomannanes substitués par des résidus de D-galactose attachés à la fois aux unités de D-glucose et D-mannose par des liaisons de type  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 6). (BRUNETON, 1999; MOREIRA et FILHO, 2008). Certaines unités de mannose sont acétylées en C-2 ou C-3 (fig. 11) (MOREIRA et FILHO, 2008 ; PAULY *et al.*, 2013).



**Figure 11.-** Structure des galactoglucomannanes (BRANDT *et al.*, 2013)

Chez les gymnospermes, les galactoglucomannanes sont des composants majeurs des parois secondaires (MOREIRA et FILHO, 2008 ; SCHELLER et ULVSKOV, 2010). Ils s'accumulent parfois dans les graines des monocotylédones, où ils se présentent en tant que substances de réserve (BRUNETON, 1999 ; POPA, 2011).

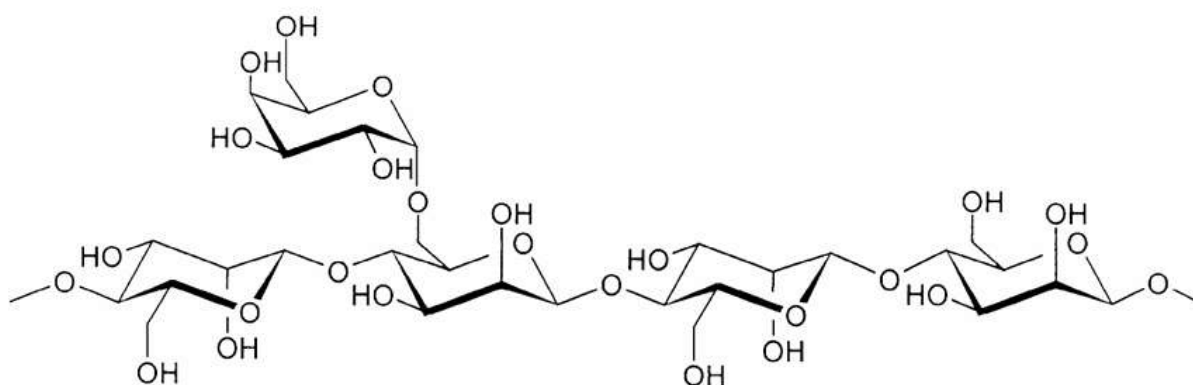
Les galactoglucomannanes sont partiellement solubles dans l'eau en raison de leur degré de ramification élevé (MOREIRA et FILHO, 2008 ; PAULY *et al.*, 2013), ce qui empêche les polymères de s'aligner et former des liaisons d'hydrogène fortes (MOREIRA et FILHO, 2008).

#### I.2.2.4.3.4.- Galactomannanes

Les galactomannanes constituent le deuxième groupe des polysaccharides de stockage les plus abondants dans les plantes (SILVEIRA et BRESOLIN, 2011).

Les galactomannanes se trouvent principalement dans l'endosperme des graines des légumineuses (MULIMANI et PRASHANTH, 2002 ; MOREIRA et FILHO, 2008 ; CERQUEIRA *et al.*, 2009 ; SALVALAGGIO *et al.*, 2014), dont ils peuvent représenter jusqu'à 40% de la masse, comme dans le cas des graines de caroubier (BRUNETON, 1999 ; MULIMANI et PRASHANTH, 2002). Mais, ils peuvent être présents dans les graines des autres familles tels que la famille d'Annonaceae, de Convolvulaceae, d'Ebenaceae, de Loganiaceae et de Palmae (MULIMANI et PRASHANTH, 2002 ; MOREIRA et FILHO, 2008).

Les galactomannanes sont constitués d'un squelette des résidus de D-mannose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), substitués en C-6 par des unités simples de  $\alpha$ -D-galactose (fig. 12) (MULIMANI et PRASHANTH, 2002 ; NISHINARI *et al.*, 2007 ; MOREIRA et FILHO, 2008 ; CERQUEIRA *et al.*, 2009).



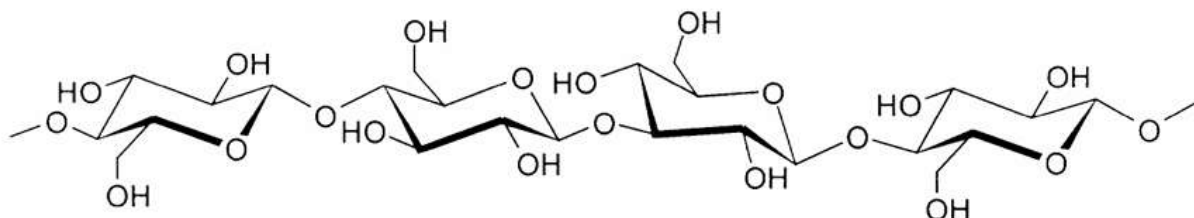
**Figure 12.-** Structure moléculaire des galactomannanes (EBRINGEROVA *et al.*, 2005)

Le taux de substitution des galactomannanes varie selon l'espèce végétale (BRUNETON, 1999 ; MULIMANI et PRASHANTH, 2002 ; SILVEIRA et BRESOLIN, 2011) et influence fortement leur solubilité (EBRINGEROVA *et al.* 2005 ; MOREIRA et FILHO, 2008 ; SILVEIRA et BRESOLIN, 2011). Cette solubilité augmente avec le taux de substitution. Une teneur en galactose inférieure à 10% rend ces polymères insolubles dans l'eau (SILVEIRA et BRESOLIN, 2011).

Les galactomannanes présentent un intérêt industriel considérable en raison de leurs propriétés physico-chimiques différentes (NISHINARI *et al.*, 2007). Toutefois, seuls les galactomannanes du guar, de la caroube et du tara sont fabriqués à grande échelle et utilisés dans diverses applications alimentaires et pharmaceutiques (CERQUEIRA *et al.*, 2009; SILVEIRA et BRESOLIN, 2011; SALVALAGGIO *et al.*, 2014).

#### I.2.2.4.4.- $\beta$ -D-glucanes à liaison mixte

Les  $\beta$ -D-glucanes sont des polysaccharides linéaires de  $\beta$ -D-glucopyranosyl reliés en (1 $\rightarrow$ 4) (70%) et (1 $\rightarrow$ 3) (30%) (fig. 13) (BAUER *et al.*, 2010). Les  $\beta$ -glucanes sont propres à l'ordre des Poales (EBRINGEROVA *et al.* 2005 ; SCHELLER et ULVSKOV, 2010). Ils sont présents dans les céréales, particulièrement dans l'orge et l'avoine (EBRINGEROVA *et al.* 2005 ; BAUER *et al.*, 2010). Ces types d'hémicelluloses sont solubles et forment des solutions très visqueuses (BAUER *et al.*, 2010).



**Figure 13.-** Structure primaire des  $\beta$ -D-glucanes à liaison mixte (EBRINGEROVA *et al.*, 2005)

Les  $\beta$ -glucanes sont associés aux microfibrilles de cellulose lors de la croissance cellulaire (EBRINGEROVA *et al.* 2005) et jouent un rôle dans l'expansion cellulaire. Son abondance dépend fortement le stade de croissance (SCHELLER et ULVSKOV, 2010).

### I.2.2.5.- Pectines

Les pectines sont structurellement et fonctionnellement les polysaccharides les plus complexes dans la paroi cellulaire des plantes (MOHNEN, 2008). Elles forment les polysaccharides typiques de lamelle moyenne, mais elles sont également abondantes dans la paroi cellulaire primaire de la plupart des plantes (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; WILLATS *et al.*, 2001 ; PAULSEN et BARSETT, 2005). Elles représentent 35% des parois primaires des dicotylédones et des monocotylédones non graminées, de 2-10% des parois primaires des graminées et environ de 5% des tissus ligneux (MOHNEN, 2008 ; VORAGEN *et al.*, 2009 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

Les pectines interviennent dans des fonctions physiologiques importantes chez la plante, comme la croissance et l'expansion cellulaire, l'adhésion cellulaire, la morphogenèse, la signalisation, la régulation du transport ionique et la porosité de la paroi (WILLATS *et al.*, 2001 ; MOHNEN, 2008 ; VORAGEN *et al.*, 2009 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

Les substances pectiques englobent un groupe des hétéropolysaccharides à teneur élevée en acide  $\alpha$ -D-galacturonique ( $\alpha$ -D-GalpA) (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; WILLATS *et al.*, 2001), ayants des domaines structuraux distincts (PEREZ *et al.*, 2003), présentés par les homogalacturonanes, les rhamnogalacturonanes-I et les rhamnogalacturonanes-II (WILLATS *et al.*, 2001). Ces domaines de polysaccharides sont associés entre eux par des liaisons covalentes pour former un réseau pectique tridimensionnel dans la paroi cellulaire (WILLATS *et al.*, 2001 ; VORAGEN *et al.*, 2009).

Toutefois, d'autres types de pectines, à savoir les xylogalacturonanes, les apiogalacturonanes les arabinanes et les arabinogalactanes, sont également présents dans les parois végétales (MOHNEN, 2008 ; VORAGEN *et al.*, 2009 ; YAPO, 2011).

#### I.2.2.5.1.- Homogalacturonanes

Les homogalacturonanes (HG) sont les substances pectiques les plus abondantes, elles représentent environ de 60% des pectines de la paroi végétale (WILLATS *et al.*, 2001 ; O'NEILL et YORK, 2003 ; MOHNEN, 2008 ; CAFFALL et MOHNEN, 2009 ; VORAGEN *et al.*, 2009). Ce sont des polymères linéaires constitués des résidus de D-GalpA liées en  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4), peuvent être méthylés en C-6 et / ou estérifiés en C-2 ou C-3 par l'acide acétique (RIDLEY *et al.*, 2001; O'NEILL et YORK, 2003 ; MOHNEN, 2008 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; VORAGEN *et al.*, 2009).

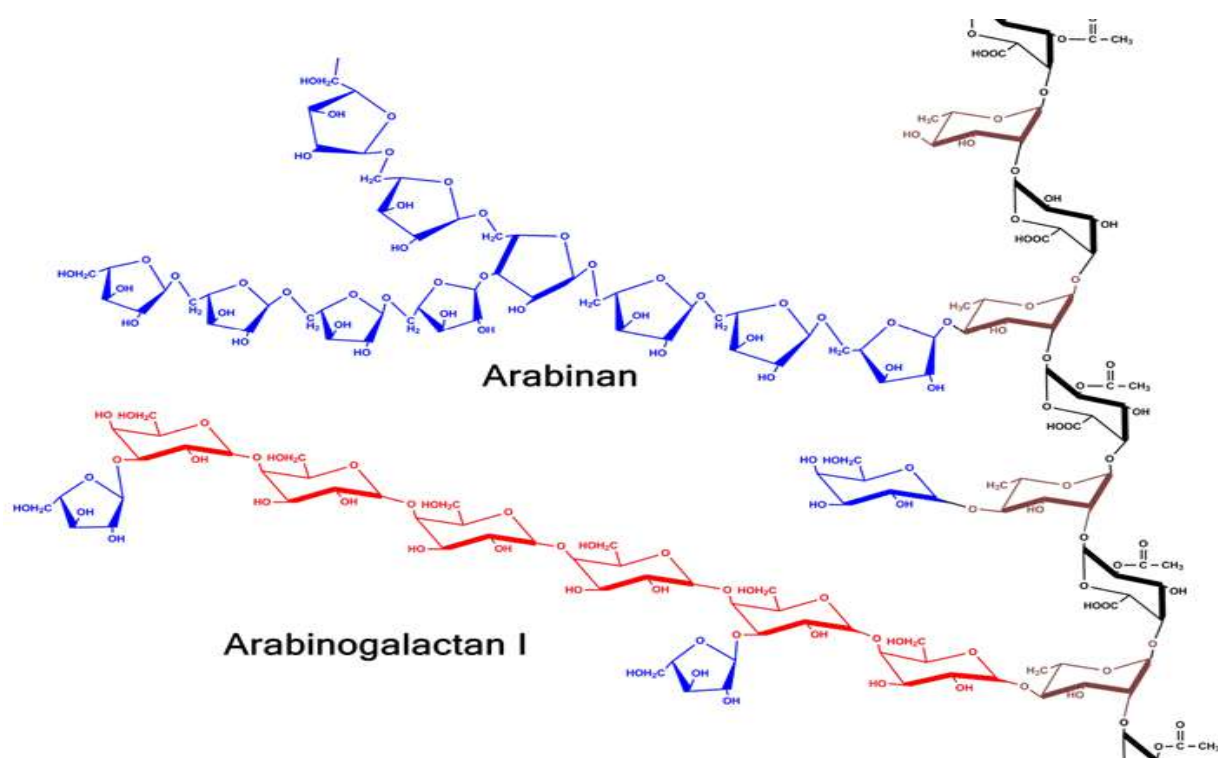
Les HG ayant un degré de méthylation élevé (>50) sont appelés «acides pectiniques», alors que les HG avec un degré de méthylation faible ou nulle (<50) sont appelés «acides pectiques» (BRUNETON, 1999 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009). Le degré de méthylation a une influence directe sur la capacité de gélification des pectines (MAROUF et TREMBLIN, 2009 ; GUIGNARD, 2000; O'NEILL et YORK, 2003). En effet, les HG fortement méthylés ne gélifient pas en présence de  $\text{Ca}^{2+}$ , bien qu'elles se gélifient à faible pH en présence de fortes concentrations de saccharose

(O'NEILL et YORK, 2003).

#### I.2.2.5.2.- Rhamnogalacturonanes-I

Les rhamnogalacturonanes type I (RG-I) représentent 20 à 35% des pectines (MOHNEN, 2008 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

Leur chaîne principale est constituée des unités répétitives de  $[\rightarrow 4) -\alpha D\text{-GalpA-}(1\rightarrow 2) -\alpha L\text{-Rhap-}(1\rightarrow)]$  (BRUNETON, 1999 ; RIDLEY *et al.*, 2001 ; O'NEILL et YORK, 2003 ; MOHNEN, 2008 ; MAROUF et TREMBLIN, 2009). Dans la plupart des cas, 20 à 80% des résidus de rhamnose sont substitués en C-4 par des oligosaccharides neutres et acides (RIDLEY *et al.*, 2001 ; WILLATS *et al.*, 2001 ; O'NEILL et YORK, 2003). Ces chaînes latérales sont principalement composées de galactose et d'arabinose (fig. 14) (O'NEILL et YORK, 2003 ; VORAGEN *et al.*, 2009), ainsi que d'autres types d'oses peuvent être présents comme  $\alpha$ -L-fucose, l'acide  $\beta$ -D-glucuronique et l'acide 4-O-méthyl- $\beta$ -D-glucuronique (RIDLEY *et al.*, 2001 ; O'NEILL et YORK, 2003 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

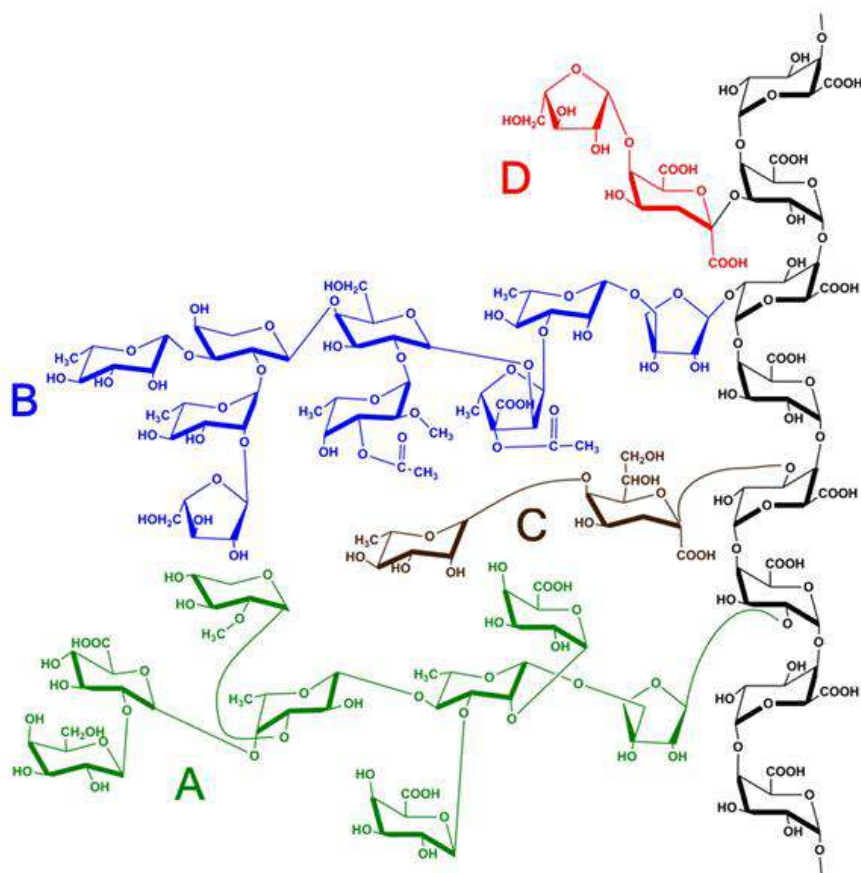


**Figure 14.-** Structure des rhamnogalacturonanes I (RG-I). Les chaînes latérales sont composées principalement de résidus  $\alpha$ -L-arabinose et/ou  $\beta$ -D-galactose représentées en bleu et en rouge respectivement (OCHOA-VILLARREAL, 2012)

#### I.2.2.5.3.- Rhamnogalacturonanes-II

Les rhamnogalacturonanes type II (RG-II) représentent les pectines les plus complexes (PAULSEN et BARSETT, 2005 ; YAPO, 2011 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012) et mineurs dans la paroi végétale (PAULSEN et BARSETT, 2005). Elles sont quasiment absentes dans la lamelle moyenne (YAPO, 2011) et présentes dans la paroi primaire de la plupart des plantes

(RIDLEY *et al.*, 2001; PAULSEN et BARSETT, 2005; YAPO, 2011). Leur structure est très conservée dans le règne végétal (MOHNEN, 2008 ; VORAGEN *et al.*, 2009; YAPO, 2011), en termes de composition osidique et d'organisation structurale (YAPO, 2011). La figure 15 représente la structure de RG-II.



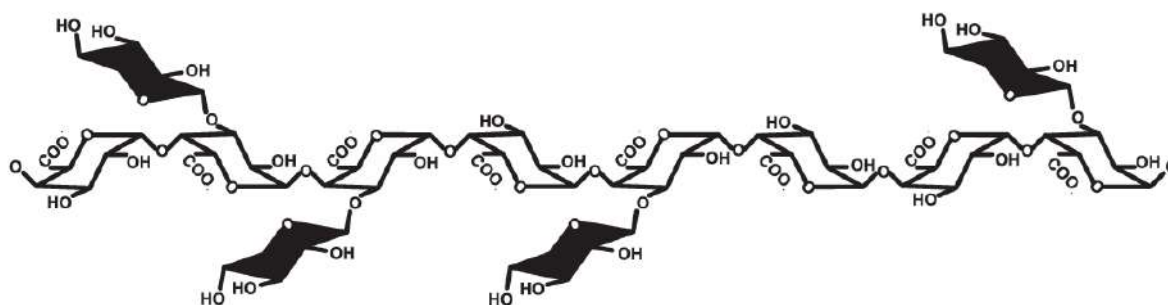
**Figure 15.-** Structure des rhamnogalacturonanes II (RG-II). Les quatre chaînes latérales liées à la chaîne principale de RG-II sont représentées en différentes couleurs (A, B, C et D) (OCHOA-VILLARREAL, 2012)

Les rhamnogalacturonanes II sont constituées d'une chaîne principale contenant environ de sept à neuf résidus d'acide galacturonique, dont certains d'entre-deux sont estérifiés par un groupe méthyle (PEREZ *et al.*, 2003 ; VORAGEN *et al.*, 2009 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012). Sur cette chaîne principale, quatre types des chaînes latérales bien différenciées sont greffées (VORAGEN *et al.*, 2009 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012). Ces chaînes renferment environ de 11 à 12 résidus glucidiques différents, interconnectés par plus de 20 liaisons (YAPO, 2011 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012). Toutefois, la partie la plus caractéristique dans ces substituants est la présence de sucres particuliers comme l'apiose, l'acide acérique, le 2-O-méthylfucose, le 2-O-méthylxylose, l'acide 3-déoxy-D-lyxo-2-heptulosarique (DHA) et l'acide 2-céto-3-déoxy-D-manno-2-octulosonique (KDO) (PAULSEN et BARSETT, 2005 ; VORAGEN *et al.*, 2009 ; YAPO, 2011 ; OCHOA-VILLARREAL *et al.*, 2012).

#### I.2.2.5.4.- Xylogalacturonanes

Les xylogalacturonanes sont des galacturonanes ramifiées. Leur chaîne principale est

constituée de résidus d'acide galacturonique liés en  $\alpha$ -(1→4) et substituée par  $\beta$ -D-xylose attaché en position C-3 du squelette (fig. 16) (O'NEILL et YORK, 2003 ; VORAGEN *et al.*, 2009). Leur degré de ramification varie entre 25 à 75 % en fonction de l'espèce végétale. Les résidus de D-GalpA peuvent être méthyl-estérifiées (VORAGEN *et al.*, 2009).



**Figure 16.-** Structure des xylogalacturonanes (O'NEILL et YORK, 2003)

Les xylogalacturonanes sont principalement identifiés dans les tissus reproducteurs et les tissus de stockage (O'NEILL et YORK, 2003 ; ZANDLEVEN *et al.*, 2007; VORAGEN *et al.*, 2009). Ils se trouvent dans les graines de soja, de pois et de coton, dans les fruits de pastèques, pommes et de poires, dans des oignons et des pommes de terre, ainsi que dans les pollens de pin. Ils se présentent aussi dans la gomme adragante de l'espèce *Astragalus* (ZANDLEVEN *et al.*, 2007).

#### I.2.2.5.5.- Arabinanes

Les arabinanes sont des constituants de la paroi cellulaire primaire des fruits, des graines et des racines de plantes. Ils se rencontrent dans les graines de *Cajanus cajan* (Fabaceae), *Gleditsia triacanthos* (Fabaceae), *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae), *Caesalpinia bonduc* (Caesalpinaceae) et *Chenopodium quinoa* (Chenopodiaceae), dans la pulpe de betterave à sucre et d'olive et dans les racines d'*Echinacea pallida* (Asteraceae) (SHAKHMATOV *et al.*, 2014).

Les arabinanes sont des polysaccharides ramifiés, dont la chaîne principale est constituée de résidus d'arabinose liés en  $\alpha$ -(1→5) et les chaînes latérales sont constituées d'arabinoses liés en  $\alpha$ -(1→2) et/ou en  $\alpha$ -(1→3), qui peuvent également être ramifiés (VORAGEN *et al.*, 2009 ; SHAKHMATOV *et al.*, 2014).

Les arabinanes sont rarement purs. Ils sont souvent liés aux galactanes et contenus dans les régions ramifiées des pectines. Ils sont libérés soit par une hydrolyse acide faible ou hydrolyse enzymatique au cours d'extraction (PAULSEN et BARSETT, 2005 ; SHAKHMATOV *et al.*, 2014).

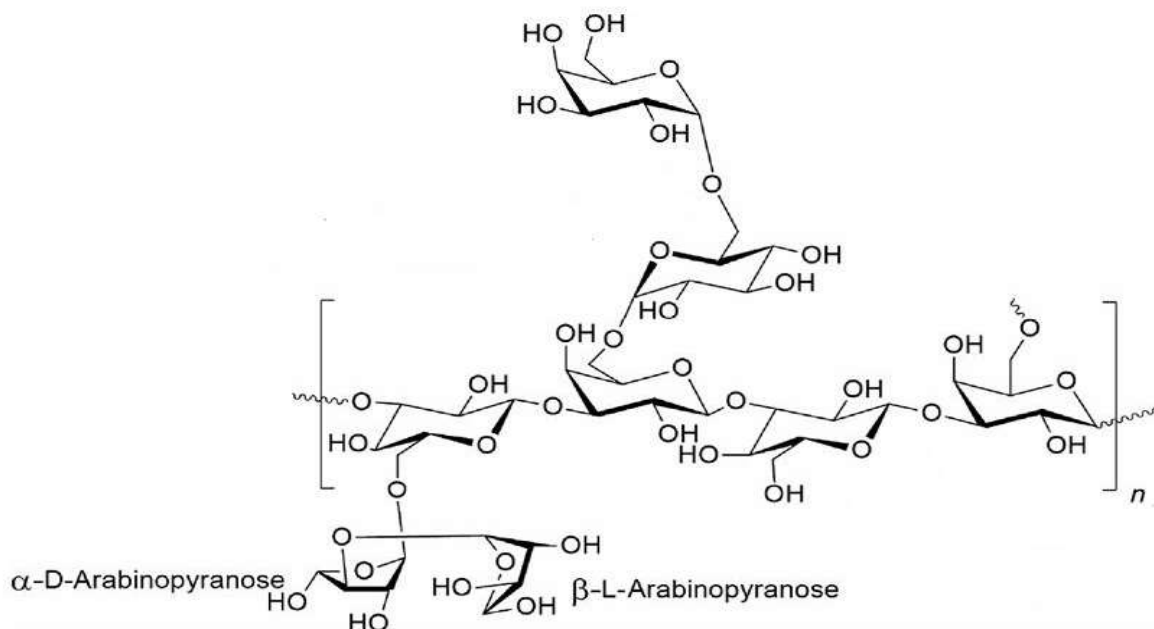
#### I.2.2.5.6.-Arabinogalactanes

Les arabinogalactanes (AG) sont largement répandus dans la paroi cellulaire des plantes (CIPRIANI *et al.*, 2006; SAEIDY *et al.*, 2021). Ils sont présents dans différentes parties de la plante (fruit, graine, feuille, tige, racine, tubercule, etc.). Les arabinogalactanes sont généralement associés à des peptides formant des arabinogalactanes-protéines (AGP), qui se trouvent dans les exsudats de gomme comme la gomme ghatti et la gomme arabique (SAEIDY *et al.*, 2021).

Les arabinogalactanes-protéines jouent un rôle physiologique dans le développement de la plante, y compris la division et la différenciation cellulaire, la signalisation hormonale et la réponse au stress abiotique (SAEIDY *et al.*, 2021).

Les arabinogalactanes sont des polymères hautement ramifiés de poids moléculaire élevé (SAEIDY *et al.*, 2021). La figure 17 représente la structure de base des arabinogalactanes. Ils peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur structure ; arabinogalactanes I (arabino-4-galactanes) et arabinogalactanes II (arabino-3,6-galactanes) (PIERRE *et al.*, 2014).

Pour les arabinogalactanes I (AGI), la chaîne principale est constituée de résidus de galactose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), auquel de courtes chaînes latérales d'arabinose liés en  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 5) sont attachées en position C-3 des unités de galactose (PAULSEN et BARSETT, 2005 ; DELATTRE *et al.*, 2011; SAEIDY *et al.*, 2021). D'autres résidus comme rhamnose, xylose, acide galacturonique ou acide férulique peuvent également être présents (SAEIDY *et al.*, 2021).



**Figure 17.-** Structure des arabinogalactanes (DESHAVATH *et al.*, 2019)

Les arabinogalactanes I sont des constituants des rhamnogalacturonanes I du complexe pectique (PAULSEN et BARSETT, 2005 ; CIPRIANI *et al.*, 2006; SAEIDY *et al.*, 2021). Ils peuvent être extraits de diverses parois primaires des dicotylédones, y compris des nombreux fruits (PIERRE *et al.*, 2014).

Les arabinogalactanes II sont des polysaccharides très complexes et souvent associés à des peptides riches en hydroxyproline, alanine, serine et thréonine (VORAGEN *et al.*, 2009; DELATTRE *et al.*, 2011). Leur chaîne principale est constituée de résidus de galactose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) et  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6), auquel des courtes chaînes latérales de galactose liés en  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 6) sont présents. Les résidus galactosyl de la chaîne latérale sont souvent substitués par des arabinoses terminaux attachés en position C-3 ou C-6 (DELATTRE *et al.*, 2011). Des résidus d'acide glucuronique, acide

galacturonique, rhamnose, glucose et de mannose peuvent également être présentes en petites quantités dans les AGII (SAEIDY *et al.*, 2021).

Les arabinogalactanes II et les pectines sont souvent co-extraits et sont difficiles à séparer l'un de l'autre (VORAGEN *et al.*, 2009). les AGII sont probablement liés de manière covalente aux rhamnogalacturonanes (DELATTRE *et al.*, 2011).

---

# Chapitre II

## Matériel et méthodes

---

Le chapitre présente le principe adopté, le matériel végétal et les différentes méthodes utilisés pour l'analyse des polysaccharides extraits et l'évaluation de leurs activités biologiques.

## II.1.- Principe adopté

Des millénaires jadis, les plantes médicinales ont été utilisées pour traiter plusieurs maladies et épidémies (SINGH, 2015). Elles renferment différents composés bioactifs, comme les composés phénoliques, les alcaloïdes, les terpènes, les saponines, les coumarines et en l'occurrence les polysaccharides possédant diverses activités biologiques (CHEVALLIER, 2001).

Les polysaccharides sont des polymères glucidiques, qui se caractérisent par leur poids moléculaire élevé et leur diversité structurale énorme. Ils présentent diverses activités biologiques et propriétés physico-chimiques (POPA, 2011 ; MAYAKRISHNAN *et al.*, 2013 ; LIU *et al.*, 2015; KUMAR *et al.*, 2020).

Les Zygophyllaceae représentent une famille botanique qui se caractérise par sa richesse en métabolites secondaires. Plusieurs espèces appartenant à cette famille pour leurs propriétés thérapeutiques, sont utilisées en médecine traditionnelle. Elles font l'objet de nombreuses études phytochimiques. Toutefois les polysaccharides de ces dernières sont très peu étudiés.

Face à ce constat, la présente étude vise à caractériser et à étudier quelques activités biologiques de polysaccharides hydrosolubles issus de deux espèces végétales spontanées de la famille de Zygophyllaceae, récoltées au Sahara algérien.

## II.2.- Matériel végétal

Deux espèces spontanées ont été choisies comme matériel végétal pour l'étude de leurs polysaccharides, il s'agit de *Zygophyllum album* L., et de *Balanites aegyptiaca* Del.

### II.2.1.- Choix des espèces

Le choix des espèces végétales est orienté par :

- Les nombreuses études phyto-chimiques réalisés sur les extraits bruts de l'espèce de *Z. album* et leurs activités biologiques comme l'activité antioxydante (GHOUL *et al.*, 2012 ; KSOURI *et al.*, 2013; BELGUIDOUM *et al.*, 2015), l'activité anti-cancéreuse (KSOURI *et al.*, 2013), l'activité antibactérienne (BELMIMOUN *et al.*, 2016; KCHAOU *et al.*, 2016b), l'activité anti-inflammatoire (KSOURI *et al.*, 2013), l'activité anti-hyperglycémiant (GHOUL *et al.*, 2012 ; GHOUL et BEN-ATTIA, 2014 ; KCHAOU *et al.*, 2016b), l'activité anti-hyper-lipidémique (GHOUL *et al.*, 2012 ; MNAFGUI *et al.*, 2012) et l'activité anti-acétyle cholinestérase (KCHAOU *et al.*, 2016a) ;
- Les nombreuses études phyto-chimiques réalisés sur les extraits bruts de l'espèce de *B. aegyptiaca* (DUBEY *et al.*, 2011 ; CHOTHANI et VAGHASIYA, 2011 ; GAJALAKSHMI *et al.*, 2013; SABOO *et al.*, 2014 ; TESFAYE, 2015);
- L'utilisation des deux espèces en médecine traditionnelle pour traiter plusieurs maladies et symptômes (OULD EL HADJ *et al.*, 2003 ; TIGRINE-KORDJANI *et al.*, 2006 ; SPERONI *et*

*al.*,2005 ; HAMMICHE et MAIZA, 2006 ; DUBEY *et al.*,2011; GAJALAKSHMI *et al.*, 2013 ; SABOO *et al.*, 2014 ; SAGNA *et al.*,2014 ; GUPTA *et al.*, 2017 ; ABDOULAYE *et al.*, 2017).

En effet, les activités biologiques attribuées aux extraits bruts de ces plantes incitent à isoler leurs polysaccharides et à tester leurs activités biologiques.

### II.2.2.- Récolte des échantillons

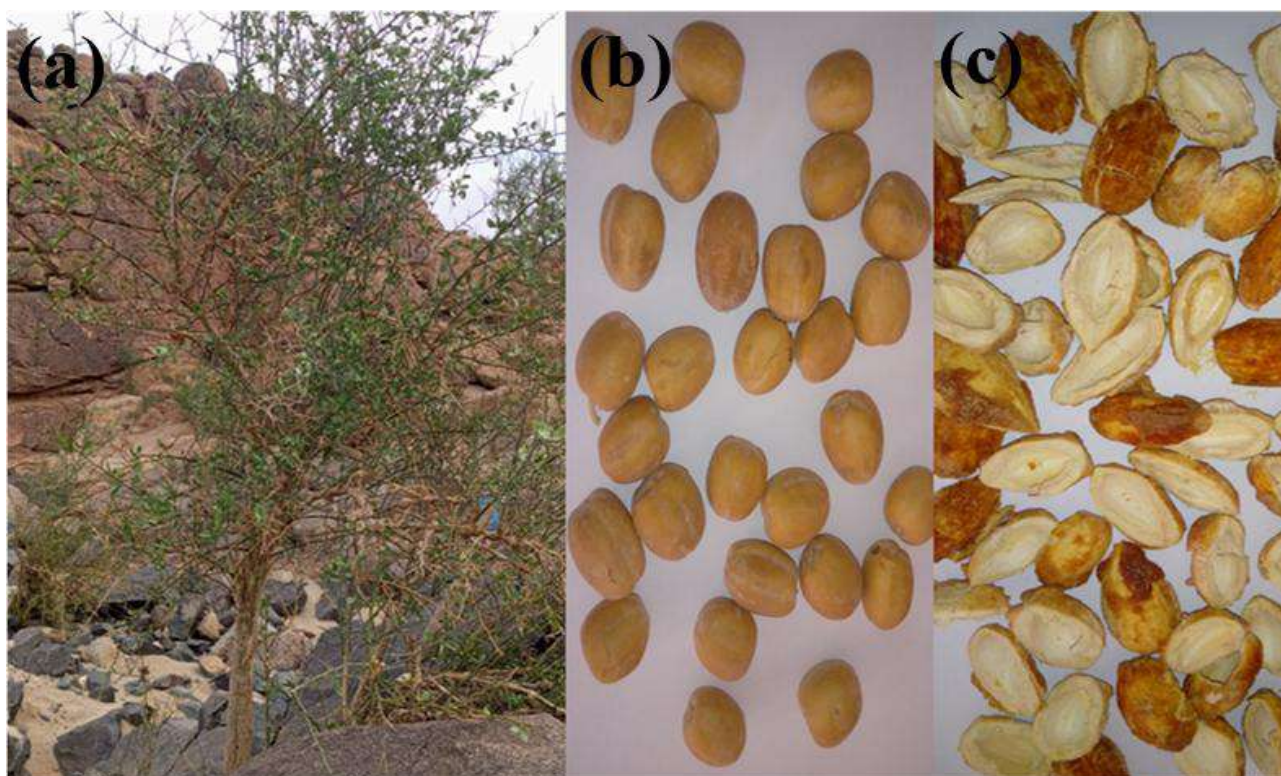
Les échantillons de plantes sont cueillis pendant le matin, dans de conditions climatiques propices, au moment de leur pleine maturité pour assurer une teneur plus ou moins élevée en ses composants actifs.

Les feuilles et les graines de *Z. album* (photo 1) ont été récoltées en Mars et en Novembre 2019, respectivement, dans la localité d'El Bour située dans la ville de Ouargla, a une latitude de 32° 5' 32,87" Nord et une longitude de 5° 17' 51,43" Est. Les parties récoltées ont été identifiées par le botaniste EDDOUD Amar (faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, université de Ouargla, Algérie).



**Photo 01.-** *Zygophyllum album* L. à El Bour, wilaya de Ouargla (Algérie)

Les fruits de *B. aegyptiaca* (photo 2) ont été récoltés dans la ville de Tamanrasset, en janvier 2019, a une latitude de 22° 53' 51" Nord et une longitude de 5° 24' 14" Est. Les parties récoltées ont été identifiées par le Dr Mohammed Abdelkader Belalem (faculté des Sciences et technologies, université de Tamanrasset, Algérie).



**Photo 02.-** (a) *Balanites aegyptiaca* Del., wilaya de Tamanrasset (Algérie), (b) Fruits de *B. aegyptiaca*, (c) Parties des fruits de *B. aegyptiaca* utilisées pour l'extraction des polysaccharides

### II.3.- Méthodes d'analyses

Différents protocoles sont adoptés pour l'extraction, la caractérisation préliminaire des polysaccharides hydrosolubles et l'étude de leurs activités biologiques.

#### II.3.1.- Séchage et broyage de la matière végétale

Les parties de plantes récoltées sont séchées à la température ambiante durant un mois, dans un endroit ombré, sec et aéré, puis broyées à l'aide d'un broyeur (RETSH, SM 100) en poudre fine. La poudre, prête à être utilisée, est mise dans des bocaux hermétiques en verre et conservées au sec à la température ambiante jusqu'à utilisation.

#### II.3.2.- Extraction des polysaccharides hydrosolubles

Le protocole adapté pour l'extraction des polysaccharides hydrosolubles est décrit par BENAOUN *et al.* (2017) et CHOUANA *et al.* (2017).

##### II.3.2.1.- Principe

La méthode utilisée pour l'extraction des polysaccharides des espèces étudiées est la macération dans l'eau distillée à une température de 60°C. L'extraction par l'eau chaude présente l'avantage de minimiser l'altération de la structure des polysaccharides et de préserver au maximum leurs activités biologiques (LIU *et al.*, 2015).

L'extraction est toujours suivie d'une étape de purification afin d'éliminer les substances liées aux polysaccharides extraits (GOMEZ *et al.*, 2003 ; GODIN *et al.*, 2011 ; LIU *et al.*, 2015). Les protéines, les composés phénoliques particulièrement la lignine, les tannins, les lipides et les sels minéraux sont les principaux composés contaminants les polysaccharides (GOMEZ *et al.*, 2003 ; GODIN *et al.*, 2011 ; LIU *et al.*, 2015). La purification permet d'optimiser les conditions de l'analyse en éliminant des sources d'inférences aux dosages (GOMEZ *et al.*, 2003). Cette étape est choisie en fonction de la composition de l'extrait et nécessite une série d'actions (SAEIDY *et al.*, 2021). L'élimination des protéines est obtenue par l'acide trichloroacétique (TCA), qui peut lier les cations protéiques pour former des sels insolubles (YI *et al.*, 2020). L'élimination des oligosaccharides et des pigments est réalisée par des lavages successifs par l'éthanol et l'acétone (BRUNETON, 1999 ; SAEIDY *et al.*, 2021). Il est préconisé de répéter l'extraction afin d'épuiser au maximum le résidu de ses polysaccharides solubles (GOMEZ *et al.*, 2003).

### II.3.2.2.- Matériel et réactifs

L'extraction et la purification des polysaccharides hydrosolubles nécessitent l'utilisation des solvants et des réactifs suivants : l'éthanol (96%), l'acétone, l'acide trichloroacétique (TCA) et l'hydroxyde de sodium.

Le matériel et les appareils utilisés se composent d'agitateur à pales (Faithful), de centrifugeuse (Sigma 6-15, 121048), de pH-mètre (Adwa, AD1030), d'étuve sèche (J.P.SELECTA), de centrifugeuse (Sigma 4-15, 10730), de système à reflux, de système de filtration sous vide et des verres frittés de porosité 1, 2 et 3.

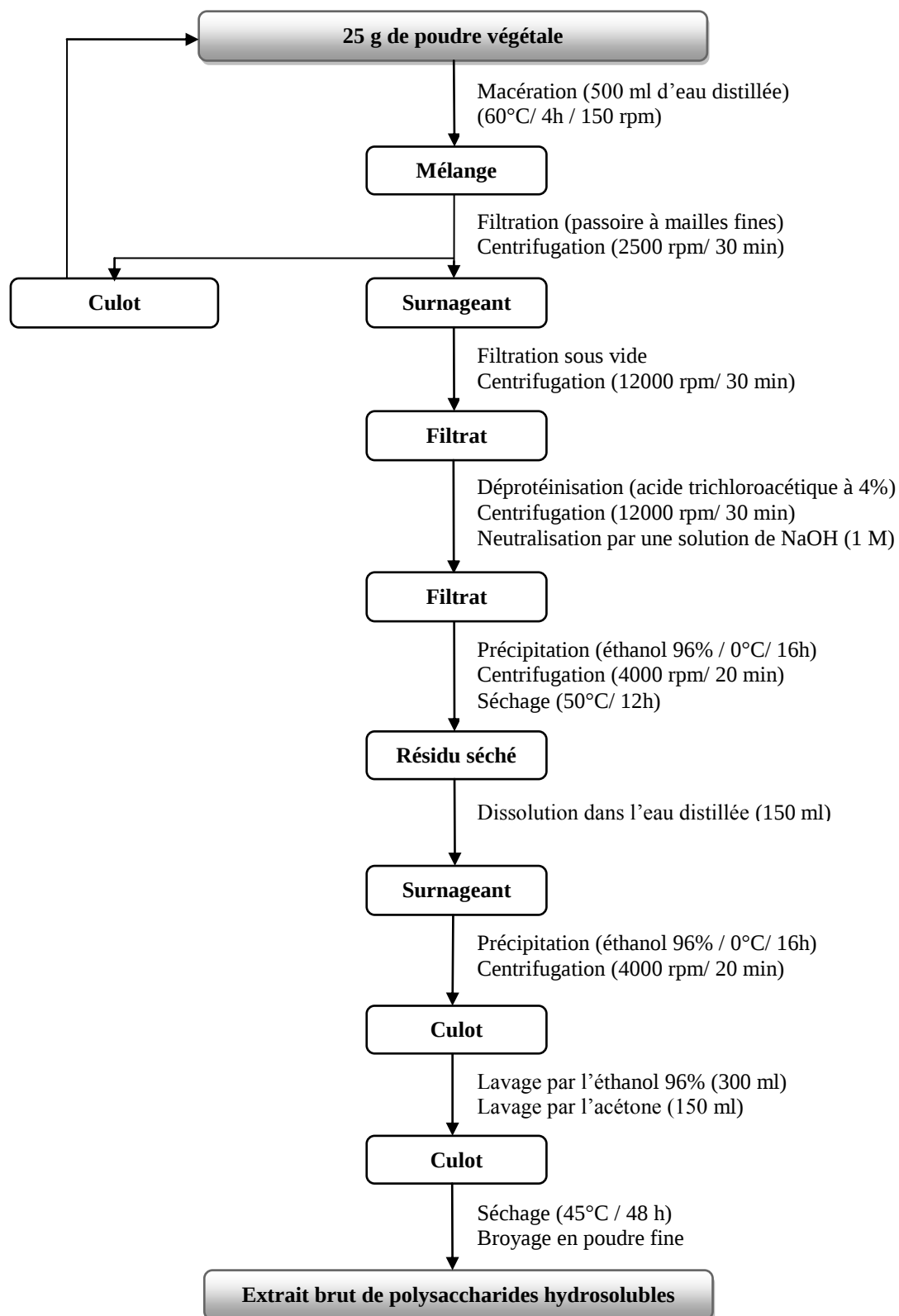
### II.3.2.3.- Mode opératoire

Pour l'extraction des polysaccharides hydrosolubles des espèces investies, deux protocoles ont été adoptés, le premier pour l'extraction de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* et des graines de *Z. album*, et le second pour l'extraction de polysaccharides des feuilles de *Z. album*.

#### II.3.2.3.1.- Extraction de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* et des graines de *Z. album*

Les différentes étapes d'extraction de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* et des graines de *Z. album* sont présentées sur la figure 18.

Vingt-cinq grammes (25 g) de poudre végétale des fruits de *B. aegyptiaca* ou des graines de *Z. album* sont macérés dans 500 ml d'eau distillée ultrapure à 60°C pendant 4 h sous agitation à l'aide d'un agitateur à pales. Le mélange obtenu a été filtré à travers d'une passoire à mailles fines pour retirer les débris insolubles. Le surnageant de macération a été centrifugé à 4000 rpm pendant 20 min, puis filtré successivement sous vide à l'aide de verres frittés de porosité 1, 2 et 3 (PETERA *et al.*, 2015 ; BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUPANA *et al.*, 2017).



**Figure 18.**-Extraction des polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* et des graines de *Z. album* (SUN et KENNEDY, 2010 ; LIANG *et al.*, 2011 ; LI *et al.*, 2013, BOUAL *et al.*, 2013 ; PETERA *et al.*, 2015 ; BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUANA *et al.*, 2017)

Les protéines ont été précipitées par l'addition d'acide trichloroacétique à 4% sous agitation, puis éliminées par centrifugation (12000 rpm / 30 min). Le surnageant obtenu a été neutralisé par une solution de NaOH (1 M), puis centrifugé de novo à 12000 rpm pendant 30 min (CHOUANA *et al.*, 2017). Ensuite, le surnageant a été précipité par 3 volumes d'éthanol (96%) à 0°C pendant 16 h, et le culot a été récupéré par centrifugation (4000 rpm / 20 min). La précipitation alcoolique a été suivie d'une étape de dessalage. Ainsi, le culot obtenu a été dissous dans l'eau distillée, puis précipité par l'éthanol (0°C /16 h) (BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUANA, 2017).

L'extrait de polysaccharides obtenu a été lavé à l'éthanol (96%) (300 ml) et à l'acétone (150 ml) successivement (SUN et KENNEDY, 2010 ; LIANG *et al.*, 2011 ; LI *et al.*, 2013 ; BOUAL *et al.*, 2013). Après séchage à 45°C pendant 48 h (LI *et al.*, 2013), le culot a été broyé en poudre fine. La poudre obtenue représente l'extrait brut des polysaccharides hydrosolubles.

Le culot obtenu après la macération a subi les mêmes étapes citées précédemment afin d'épuiser au maximum le résidu de polysaccharides solubles (PETERA, 2016).

#### II.3.2.3.2.- Extraction de polysaccharides des feuilles de *Z. album*

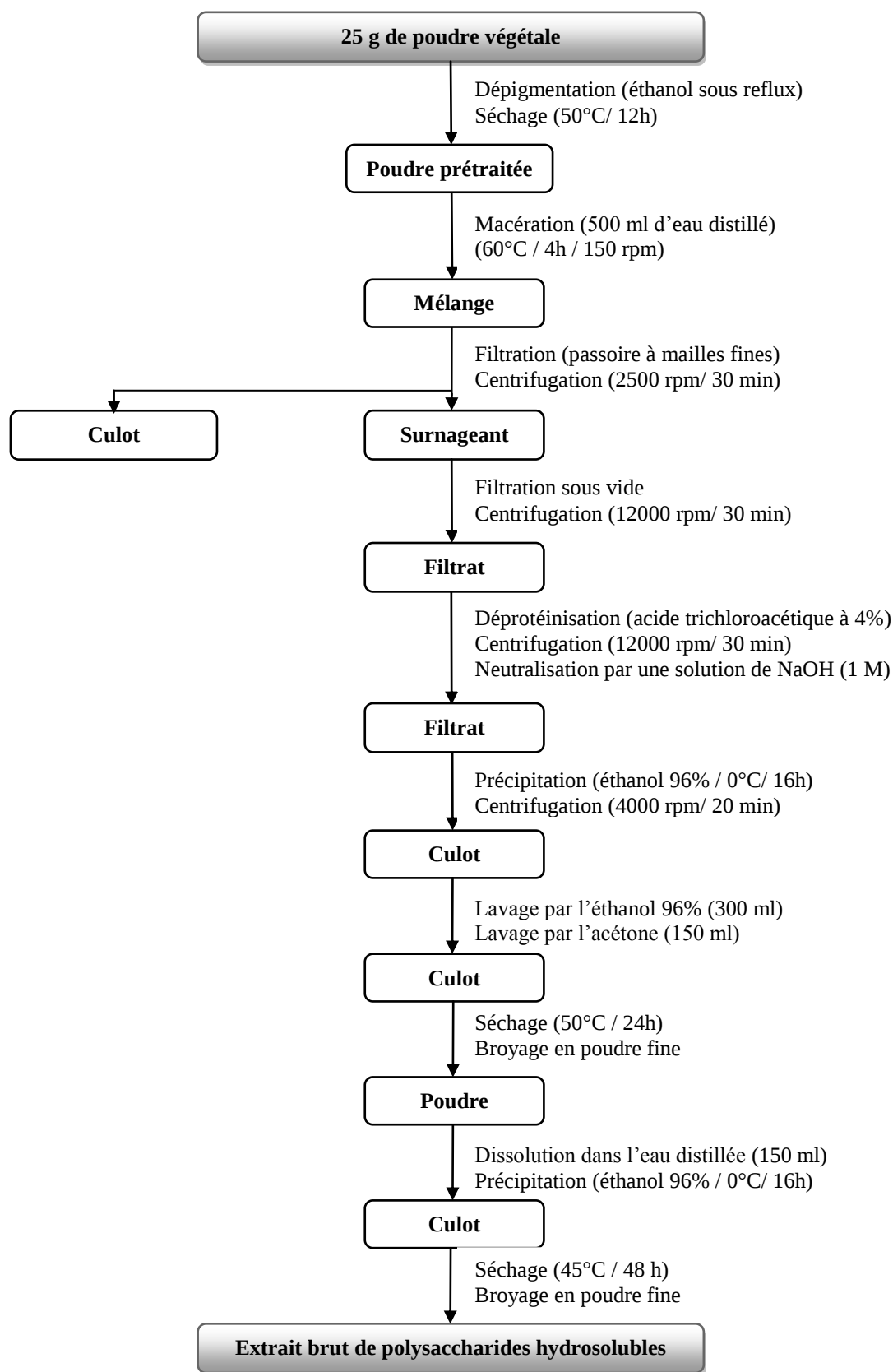
Les différentes étapes d'extraction des polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Z. album* sont présentées sur la figure 19.

L'extraction a été précédée d'une étape de dépigmentation afin d'éliminer les substances contaminants les polysaccharides à extraire. En effet, 25 g de poudre séché et broyé des feuilles de *Z. album* ont été prétraité par 500 ml d'éthanol sous reflux à l'aide de l'appareil de Soxhlet (SUN et KENNEDY, 2010 ; LI *et al.*, 2013). Ensuite, la poudre prétraitée a été séché à l'étuve à 50°C pendant 12 h.

L'extraction proprement dite des polysaccharides hydrosolubles a été effectuée par la macération dans l'eau distillée à température de 60°C pendant 4 h sous agitation à l'aide d'un agitateur à pales. Le mélange obtenu a été filtré à travers d'une passoire à mailles fines pour retirer les débris insolubles et le surnageant de macération a été centrifugé à 4000 rpm pendant 20 min, puis filtré successivement sous vide à l'aide des verres frittés de porosité décroissante (PETERA *et al.*, 2015 ; BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUANA *et al.*, 2017).

L'élimination des protéines du filtrat obtenu est réalisée par l'acide trichloroacétique. Cette étape de déprotéinisation a été suivie par une précipitation alcoolique des polysaccharides extraits. Après centrifugation, le précipité obtenu a été lavé par l'éthanol et l'acétone successivement (SUN et KENNEDY, 2010 ; LIANG *et al.*, 2011 ; LI *et al.*, 2013 ; BOUAL *et al.*, 2013), puis séché à l'étuve à 50 °C pendant 24 h (LI *et al.*, 2013), puis broyé en poudre fine.

Une étape de dessalage a été réalisée. L'extrait a été dissous dans l'eau distillée, puis a été précipité par l'éthanol (0°C /16 h) (BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUANA, 2017). Après centrifugation, le culot a été séché à l'étuve à 45 °C pendant 48 h, puis broyé en poudre fine. La poudre obtenue représente l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Z. album*.



**Figure 19.-** Extraction des polysaccharides hydrosolubles de feuilles de *Z. album* (WU *et al.*, 2007 ; SUN et KENNEDY, 2010 ; LIANG *et al.*, 2011 ; LI *et al.*, 2013 ; BOUAL *et al.*, 2013 ; PETERA *et al.*, 2015 ; BENAOUN *et al.*, 2017 ; CHOUANA *et al.*, 2017)

Le rendement d'extraction des polysaccharides est calculé selon la formule suivante :

Rendement de l'extraction (%) =  $\frac{\text{poids de l'extrait des polysaccharides (g)}}{\text{poids de la poudre sèche de plante (g)}} \times 100$  (YUAN *et al.*, 2015)

### II.3.3.- Composition globale des polysaccharides extraits

La composition globale des polysaccharides extraits est déterminée par les dosages colorimétriques ; à savoir le dosage des oses totaux, des oses acides, des protéines et des composés phénoliques (SARRAF *et al.*, 2021).

#### II.3.3.1.- Dosage des oses totaux

La quantification des oses totaux présents dans les polysaccharides extraits a été réalisée par la méthode modifiée de DUBOIS *et al.* (1956).

##### II.3.3.1.1.- Principe

Le dosage des sucres par la méthode de DUBOIS *et al.* (1956) repose sur leur capacité à se complexer avec le phénol, en milieu acide fort et à chaud, pour former un chromophore absorbant dans le visible. L'absorbance est proportionnelle à la quantité des sucres présents (DUBOIS *et al.*, 1956 ; GOMEZ *et al.*, 2003 ; WROLSTAD *et al.*, 2004).

##### II.3.3.1.2.- Matériel et réactifs

Le dosage nécessite l'utilisation de phénol, d'acide sulfurique concentré (95%) et de glucose comme standard. Les appareils utilisés sont un spectrophotomètre (SHIMADZU, UV mini-1240), un bain-marie (Memmert, WB7) et un vortex (STUART, SA8).

##### II.3.3.1.3.- Mode opératoire

- A 200 µl de solution à doser, ajouter 200 µl d'une solution aqueuse de phénol à 5% ;
- Homogénéiser le mélange au vortex ;
- Introduire rapidement 1 ml d'acide sulfurique concentré dans le milieu réactionnel, sans toucher les parois des tubes ;
- Après homogénéisation, porter le mélange au bain-marie à 95°C durant 5 min ;
- Placer les tubes à essai dans un bain de glace, puis mettre à l'obscurité à la température ambiante, après 30 min, mesurer l'absorbance à 483 nm.

#### II.3.3.2.- Dosage des oses acides

La teneur en acides uroniques est déterminée par la méthode modifiée de BLUMENKRANTZ et ASBOE HANSEN (1973).

### II.3.3.2.1.- Principe

En présence d'acide sulfurique concentré et de tétraborate de sodium, les acides uroniques réagissent avec le *mé*ta-hydroxydiphényle pour former un chromophore de couleur rose (BLUMENKRANTZ et ASBOE-HANSEN, 1973).

Les sucres neutres et leurs produits de dégradation issus de l'hydrolyse acide peuvent interférer dans le dosage colorimétrique des acides uroniques (BLUMENKRANTZ et ASBOEHANSEN, 1973 ; FILISETTI-COZZI et CARPITA, 1991 ; WROLSTAD *et al.*, 2004).

### II.3.3.2.2.- Matériel et réactifs

Les réactifs utilisés pour le dosage sont le tétraborate de sodium, l'acide sulfurique concentré (95%), le *mé*ta-hydroxydiphényle (*m*-HDP), NaOH et l'acide galacturonique comme standard. Les appareils utilisés sont un spectrophotomètre (SHIMADZU, UV mini-1240), un bain-marie (Memmert, WB7) et un vortex (STUART, SA8).

### II.3.3.2.3.- Mode opératoire

- A 200 µl de solution à doser, ajouter 1,2 ml d'une solution de tétraborate de sodium (0,0125 M dans l'acide sulfurique concentré) ;
- Agiter les tubes au vortex, puis porter au bain-marie bouillant pendant 5 min ;
- Après refroidissement dans un bain de glace, ajouter 20 µl de la solution de *m*-HDP (0,15% dans NaOH à 0,5%) ;
- Agiter les tubes, laisser à l'obscurité pendant 30 min ;
- L'absorbance est mesurée à 520 nm (BLUMENKRANTZ et ASBOE-HANSEN, 1973).

### II.3.3.3.- Dosage des protéines

Le dosage des protéines est effectué avec la méthode modifiée de BRADFORD (1976).

#### II.3.3.3.1.- Principe

La méthode de Bradford est basée sur la liaison du colorant bleu de Coomassie aux protéines. La réaction provoque un déplacement maximum d'absorption du colorant de 465 à 595 nm (BRADFORD, 1976). Le bleu de Coomassie se lie principalement aux acides aminés basiques et hydrophobes (SAPAN *et al.*, 1999 ; KRUGER, 2009 ; OLSON et MARKWELL, 2007).

#### II.3.3.3.2.- Matériel et réactifs

Pour le dosage, il est nécessaire de préparer le réactif de Bradford à partir de l'éthanol à 95%, de bleu de Coomassie G.250 et d'acide phosphorique à 85% (KRUGER, 2009 ; OLSON et MARKWELL, 2007). Le sérum albumine bovine (BSA) est utilisé comme standard. Les appareils utilisés dans ce dosage sont un spectrophotomètre (SHIMADZU, UV mini-1240) et un vortex (STUART, SA8).

### II.3.3.3.3.- Mode opératoire

- Pour 800 µl de réactif Bradford, ajouter 200 µl de solution à doser ;
- Mélanger chaque tube au vortex ;
- Incuber le mélange pendant 30 min à l'obscurité ;
- Mesurer l'absorbance à 595 nm (OLSON et MARKWELL, 2007).

### II.3.3.4.- Dosage des composés phénoliques

Le dosage des composés phénoliques est effectué avec le réactif de Folin-Ciocalteu en utilisant la méthode adaptée par SINGLETON *et al.* (1999).

#### II.3.3.4.1.- Principe

La méthode de dosage des composés phénoliques repose sur l'oxydation des groupes phénoliques par le réactif de Folin-Ciocalteu (mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique) pour donner un produit de couleur bleu (oxydes de tungstène et de molybdène), qui présente une absorbance maximale à 750 nm (WROLSTAD *et al.*, 2004 ; VERMERRIS et NICHOLSON, 2007 ; CICCIO *et al.*, 2009).

#### II.3.3.4.2.- Matériel et réactifs

Le dosage nécessite l'utilisation du réactif de Folin-Ciocalteu, le carbonate de sodium et l'acide gallique comme standard. Les appareils utilisés pour le dosage sont un spectrophotomètre (SHIMADZU, UV mini-1240) et un vortex (STUART, SA8).

#### II.3.3.4.3.- Mode opératoire

- Pour 100 µl de solution à doser, ajouter 500 µl du réactif de Folin-Ciocalteu (dilué 10 fois) ;
- Mélanger chaque tube au vortex, et laisser reposer 5 min ;
- Rajouter 2 ml de la solution de carbonate de sodium à 20% ;
- Agiter les tubes, et laisser à l'obscurité pendant 30 min ;
- L'absorbance est lue à 765 nm.

### II.3.4.- Analyse infrarouge

L'analyse infrarouge des polysaccharides extraits est réalisée selon la méthode adoptée par GARON-LARDIERE (2004).

#### II.3.4.1- Principe

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une méthode physique largement utilisée pour caractériser et identifier la structure moléculaire des composés organiques, y compris les groupes fonctionnels, la ramification, la configuration et la conformation (SALMEN *et*

*al.*, 2005 ; OJEDA et DITTRICH, 2012). Cette technique est basée sur la transition d'énergie et la vibration ou la rotation qui se produisant dans les différentes liaisons chimiques. Ces dernières absorbent la lumière infrarouge à différentes longueurs d'onde (PERSSON *et al.*, 2011).

#### II.3.4.2- Matériel et réactifs

L'analyse infrarouge des extraits est effectuée sur un spectrophotomètre FTIR (Agilent Technologies Cary 600, 660 FTIR).

#### II.3.4.3- Mode opératoire

Les échantillons ont été analysés sous forme de pastilles obtenues par broyage et compression des polysaccharides avec de bromure de potassium (KBr) (5 mg de polysaccharides sont mélangés à 100 mg de KBr sec) (GARON-LARDIERE, 2004). Les spectres FTIR ont été enregistrés à une température ambiante (référéncé contre l'air, 32 scans) sur la plage de 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ .

#### II.3.5.- Identification et dosage des monosaccharides constitutifs

Afin de déterminer la composition des polysaccharides extraits en monomères constitutifs, une hydrolyse acide est réalisée suivie par l'analyse de monosaccharides obtenus par différentes techniques chromatographiques (SARRAF *et al.*, 2021), dont la chromatographie sur couche mince, la chromatographie liquide à haute performance et la chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.

##### II.3.5.1.- Hydrolyse acide

L'identification et le dosage de monosaccharides constitutifs se fait après l'hydrolyse acide des polysaccharides extraits.

##### II.3.5.1.1.- Principe

L'hydrolyse acide des polysaccharides permet le clivage des liaisons glycosidiques. La concentration d'acide, la température et la durée de réaction nécessaires pour l'hydrolyse varient en fonction de la structure du polysaccharide (SEVIOUR *et al.*, 2011), notamment leur composition en monosaccharides (type, configuration et conformation), et leur type de liaison osidique (BEMILLER, 1967). En effet, étant donné que les aldopentoses et les désoxyoses sont plus sensibles à l'hydrolyse acide que les aldohexoses, tandis que les acides uroniques ou les osamines sont beaucoup plus résistants à l'hydrolyse (BIERMANN *et al.*, 1988). De plus, les différents types de liaisons glycosidiques présentent un taux d'hydrolyse variable, par exemple les liaisons de type (1→6) sont clivées plus facilement que les liaisons de type (1→4) (BEMILLER, 1967).

##### II.3.5.1.2.- Matériel et réactifs

L'acide trifluoroacétique (TFA) et méthanol sont nécessaires comme réactifs pour cette

étape. Les appareils utilisés sont une étuve (J.P. SELECTA) et une centrifugeuse (Sigma 1-15, 90247).

### II.3.5.1.3.- Mode opératoire

Ajouter à 10 mg de l'extrait brut de polysaccharides, 1 ml d'acide trifluoroacétique de 2 M (MORRISON, 1988). Incuber le mélange à l'étuve à 110°C pendant 4 h. Après refroidissement, centrifuger l'hydrolysate à 10000 g pendant 10 min, puis récupérer le surnageant dans des boîtes de Pétri. Ajouter quelques gouttes de méthanol. Après évaporation et séchage total de l'hydrolysate, ajouter 1 ml de l'eau distillée et récupérer les hydrolysats dans des Eppendorfs de 1,5 ml (BOUAL, 2014).

### II.3.5.2.- Analyse par chromatographie sur couche mince

L'identification de monosaccharides constitutifs des polysaccharides testés, obtenus après hydrolyse, est déterminée par la chromatographie sur couche mince, en comparant les rapports frontaux de l'échantillon avec ceux des étalons.

#### II.3.5.2.1.- Principe

La Chromatographie sur Couche Mince (CCM) est une technique largement utilisée au laboratoire pour la séparation et l'identification des constituants d'un mélange. Cette technique simple et peu coûteuse permet d'analyser plusieurs échantillons à la fois et offrent des possibilités de détection variées (HOTON-DORGE, 1976 ; KALASZ *et al.*, 2000 ; ROUESSAC *et al.*, 2004). Le principe est basé sur les différences d'affinités des substances à analyser à l'égard de deux phases ; stationnaire et mobile. La séparation des constituants est généralement réalisée sur une couche mince de gel de silice fixé sur un support solide, et la phase mobile migre par capillarité à travers la phase stationnaire sèche, entraînant à des vitesses différentes les constituants à séparer (ROUESSAC *et al.*, 2004).

#### II.3.5.2.2.- Matériel et réactifs

Il s'agit d'une plaque CCM de type silica gel 60 F<sub>254</sub>. Les étalons utilisés sont de l'acide D-galacturonique, de l'acide D-glucuronique, du L-arabinose, du D-galactose, du D-glucose, du D-mannose, du L-rhamnose et du D-xylose.

Deux systèmes de solvants sont utilisés comme phase mobile :

Système 1 : Acétate d'éthyle : pyridine : eau : n-butanol : acide acétique en proportions de 5 : 4 : 4 : 10 : 2 respectivement (HOTON-DORGE, 1976) ;

Système 2 : Chloroforme : n-butanol : méthanol : acide acétique : eau en proportions de 4,5 : 12,5 : 5 : 1,5 : 1,5 respectivement (YANG *et al.*, 2010).

Le révélateur utilisé est le réactif de Nigrum, qui est constitué de diphénylamine, d'acétone, d'aniline et d'acide ortho-phosphorique 85% (GHEBREGZABHER *et al.*, 1976).

### II.3.5.2.3.- Mode opératoire

- A l'aide d'un applicateur, déposer 3 µl d'échantillons dans leurs marques respectives sur la plaque de silice ;
- Placer la plaque verticalement dans la cuve saturée par l'éluant ;
- Récupérer la plaque après élution et la sécher dans l'étuve à 100°C pendant quelques minutes ;
- La révélation des spots est effectuée après pulvérisation du réactif de Nigrum et séchage à l'étuve à 100°C pendant 10 min.

Le rapport frontal  $R_f$  de chaque échantillon est déterminé par la relation suivante :

$R_f$  = distance parcourue par l'échantillon / distance parcourue par l'éluant (ROUESSAC *et al.*, 2004).

### II.3.5.3.- Chromatographie liquide à haute performance

L'analyse de la composition des monosaccharides par HPLC-RID (High Performance Liquid Chromatography-Refractive Index Detection) est réalisée selon la méthode modifiée de XU *et al.* (2014).

#### II.3.5.3.1.- Principe

La chromatographie liquide à haute performance (HPLC) est une méthode fréquemment utilisée pour l'analyse des monosaccharides constitutifs des polysaccharides. Par comparaison avec des standards, la composition en monosaccharides peut être déterminée (REN *et al.*, 2019). Un détecteur approprié doit être sélectionné en fonction des propriétés de la phase mobile et des échantillons à analyser (YAN, 2014). Le détecteur utilisée dans cette méthode est de type RID (Refractive Index Detector), qui comporte un réfractomètre différentiel, permettant de mesurer en continu la différence d'indice de réfraction entre la phase mobile et l'effluent de la colonne (ROUESSAC *et al.*, 2004 ; YAN, 2014). Si le composant élué a le même indice de réfraction que la phase mobile, il sera indétectable (YAN, 2014).

#### II.3.5.3.2.- Matériel et réactifs

L'analyse des monosaccharides issus d'hydrolysats des polysaccharides est effectuée sur une HPLC (SHIMADZU), équipée d'une colonne Shim-pack GIST NH2 (5 µm, 250 x 4.6 mm), d'une pompe de type LC-20ADXR, d'un auto-sampler automatique SIL-20ACXR et d'un détecteur de type RID-20A. La phase mobile utilisée est constituée d'acétonitrile et d'eau ultrapure (80 : 20).

Une gamme d'étalonnage permet d'estimer qualitativement et quantitativement la composition en monosaccharides des hydrolysats de polysaccharides. La gamme d'étalons se compose de L-arabinose, D-galactose, D-glucose, D-mannose, L-rhamnose et D-xylose.

#### II.3.5.3.3.- Mode opératoire

L'hydrolysat de polysaccharides est filtré sur 0,45 µm, puis analyser par HPLC-RID. La

séparation chromatographique est réalisée en mode isocratique à un débit de 1 ml /min (AGBLEVOR *et al.*, 2007). Le volume d'injection était de 10 µl. La température de la colonne et du détecteur RID est fixée à 35°C. La colonne a été lavée à la fin de chaque expérience (après 30 min) avec la phase mobile. Après détection, les différents monosaccharides ont été identifiés par leur temps de rétention spécifique et quantifiés après intégration du signal par comparaison avec des courbes d'étalonnage établies avec les monosaccharides de référence (XU *et al.*, 2014 ; ASHOUSH *et al.*, 2022).

#### II.3.5.4.- Chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

L'analyse de la composition des monosaccharides par chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse est réalisée selon la méthode de PIERRE *et al.* (2012).

##### II.3.5.4.1.- Principe

La chromatographie en phase gazeuse est une technique très largement utilisée (BOUCHONNET et LIBONG, 2004). Elle est constituée d'un injecteur, une colonne capillaire située dans un four et un détecteur. Il existe différents types de détecteurs, mais le spectromètre de masse est le seul à fournir des informations structurales assez complètes sur les composés séparés par chromatographie. Ce spectre de masse lui aussi constitué d'une source, un analyseur et un détecteur (BOUCHONNET et LIBONG, 2004 ; RUIZ-MATUTE *et al.*, 2011).

Pour l'identification et la quantification des monosaccharides constitutives des extraits, la méthode utilisée est GC/SM-EI (Gas Chromatography/Mass Spectrometry-Electron Ionization). Les composés élués arrivent au spectromètre de masse (SM) à l'état gazeux. La source utilisée est à ionisation électronique (EI ou Electron Ionization). L'ionisation électronique consiste à bombarder les molécules par un faisceau d'électrons de haute énergie (BOUCHONNET et LIBONG, 2004).

L'analyse des polysaccharides par GC/SM-EI débute par leur hydrolyse suivie par la dérivatisation des résidus monosaccharidiques libérés. Plusieurs études sont axées à la préparation de ces dérivés glucidiques, qui visent principalement à simplifier le processus de dérivation et de réduire le nombre de pics dans le chromatogramme (RUIZ-MATUTE *et al.*, 2011).

Les méthodes de dérivatisation sont nombreuses, les plus courantes sont la silylation, la méthylation, l'estérification et l'acétylation (BOUCHONNET, 2009 ; DELATTRE *et al.*, 2016). Toutefois, la silylation est la procédure de dérivation la plus adoptée aujourd'hui, surtout pour les sucres. La réaction consiste à remplacer un hydrogène échangeable par un silicium substitué (BOUCHONNET, 2009).

A cause de leur bonne volatilité et stabilité, les dérivés de triméthylsilyle (TMS) sont les plus utilisés (RUIZ-MATUTE *et al.*, 2011). Différents agents de dérivatisation peuvent être utilisés, tels que le N,O-Bis-(triméthylsilyl)trifluoroacétamide (BSTFA), le N-méthyl-N-triméthylsilyl-trifluoroacétamide (MSTFA), le N-triméthylsilylimidazole (TMSI) ou le triméthylchlorosilane (TMCS) (BOUCHONNET, 2009; DELATTRE *et al.*, 2016).

Les dérivés triméthylsilylés sont obtenus dans la présente étude selon la méthode de KAMERLING *et al.* (1975) modifiée par MONTREUIL *et al.* (1986), par réaction des O-méthylglycosides avec du BSTFA (N,O-bis-(triméthylsilyl) trifluoroacétamide) 99% stabilisé par du TMCS (triméthylchlorosilane) 1% dans de la pyridine anhydre.

#### II.3.5.4.2.- Matériel et réactifs

L'analyse des méthylglycosides-O-triméthylsilylés obtenus après dérivatisation des monosaccharides issus d'hydrolysats des polysaccharides est réalisée sur chromatographie phase gaz (Système GC-6890 Agilent) couplée d'un spectrophotomètre de masse (Agilent 5973 Network Mass Selective Detector). La colonne est de type OPTIMA-1 MS, de 30 m de longueur, de 0,32 mm de diamètre et dont l'épaisseur du film de la phase stationnaire est de 0,25  $\mu\text{m}$  (Macherey-Nagel). Le gaz vecteur est l'hélium à un débit de 2,3 ml/min. La pyridine anhydre, le réactif de Sylon constitué de triméthylsilyl-trifluoroacétamide et triméthylchlorosilane (BSTFA : TMCS ; 99 : 1) et le dichlorométhane sont utilisés pour la dérivatisation.

La gamme d'étalonnage utilisée est constituée de l'acide D-galacturonique, de l'acide D-glucuronique, du L-arabinose, du D-galactose, du D-glucose, du D-mannose, du L-rhamnose et du D-xylose.

#### II.3.5.4.3.- Mode opératoire

L'hydrolyse acide des extraits de polysaccharides est réalisée par l'acide trifluoroacétique de 2 M à 120°C pendant 90 min dans un bain sec. La solution est ensuite co-évaporée avec du méthanol sous un courant d'azote afin d'éliminer les traces d'acide en excès. Les résidus glycosidiques sont ensuite triméthylsilylés afin de les rendre volatils. En effet, les échantillons sont dissouts dans 50  $\mu\text{l}$  de pyridine et incubés 2 h à température ambiante avec 50  $\mu\text{l}$  de sylon (BSTFA : TMCS. 99 : 1). Après évaporation des réactifs en excès sous jet d'azote, les méthylglycosides-O-triméthylsilylés sont repris par 500  $\mu\text{l}$  de dichlorométhane, puis injectés en GC/SM-EI. La pression d'hélium est fixée à 8,8 psi et le split ratio à 50 : 1. Le programme de montée en température est le suivant : gradient de 8°C/min jusqu'à 100°C et maintenue pendant 3 min, suivi d'un gradient de 8°C/min jusqu'à 200°C et maintenue pendant 1 min et terminer par un gradient de 5°C/min jusqu'à 215°C est enregistrée. L'ionisation est réalisée par Impact Electronique (EI, 70 eV). L'ion cible est fixé entre 40 et 800 m/z, la température à la trappe est réglée à 150°C, et la température de l'injecteur est fixée à 250°C (PIERRE *et al.*, 2012 ; PIERRE *et al.*, 2014).

#### II.3.6.- Activités biologiques des polysaccharides

Différentes méthodes sont adaptés pour l'étude du potentiel antioxydant, anti-hyperglycémiant et anti-inflammatoire des polysaccharides extraits.

##### II.3.6.1- Activité antioxydante

L'activité antioxydante d'un composé correspond à sa capacité à résister l'oxydation

(POPOVICI *et al.*, 2009). La mesure de cette activité est abordée en déterminant des produits résultants de l'oxydation ou en évaluant l'aptitude à piéger des radicaux de modèles réactionnels (MARC *et al.*, 2004).

Les radicaux libres sont piégés par les antioxydants par deux mécanismes ; soit la libération de l'atome d'hydrogène du groupement hydroxyle ou la libération d'un électron (POPOVICI *et al.*, 2009) et le potentiel oxydant de l'échantillon testé est donc évalué en mesurant son efficacité à piéger d'un radical libre spécifique, en le comparant avec un antioxydant de référence (MARC *et al.*, 2004 ; HYARDIN *et al.*, 2009).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour évaluer l'activité antioxydante *in vitro*. Toutefois, il faut combiner plusieurs techniques pour estimer l'activité de l'échantillon à tester (POPOVICI *et al.*, 2009 ; CAROCHO et FERREIRA, 2013 ; THANGARAJ, 2016). L'estimation de l'activité antioxydante des polysaccharides extraits dans la présente étude se fait par la combinaison de cinq techniques présentées par le test de piégeage du radical DPPH•, le test de piégeage du radical ABTS•+, le test de piégeage du radical OH•, la capacité antioxydante totale et le pouvoir réducteur des ions ferriques. Les antioxydants de référence utilisés sont l'acide ascorbique (vitamine C) et le butylhydroxytoluène (BHT).

L'aptitude de piégeage des radicaux DPPH•, ABTS•+ et OH• est exprimée par la concentration inhibitrice à 50% (IC<sub>50</sub>). A cette concentration, le pourcentage de piégeage du radical atteint est de 50 %. L'activité antioxydante de l'extrait est d'autant plus élevée que sa IC<sub>50</sub> est petite (POPOVICI *et al.*, 2009). Tandis que la capacité antioxydante totale et le pouvoir réducteur de l'extrait sont exprimés par A<sub>0,5</sub> (mg/ml) correspondant à la concentration indiquant une intensité d'absorption de 0,5.

#### II.3.6.1.1- Test de piégeage du radical DPPH•

Le pouvoir d'inhibition du radical DPPH• par les extraits testés est déterminé selon la méthode adopté par DUAN et YU (2019), CHEN *et al.* (2020) et JI *et al.* (2020).

##### II.3.6.1.1.1.- Principe

DPPH• (1,1-Diphényle-2-Picryl Hydrazyle) est un radical de couleur violet intense (ROLLAND, 2004). Il possède un électron non apparié sur un atome du pont d'azote (POPOVICI *et al.*, 2009). L'évaluation de l'activité antioxydante se fait en mesurant la diminution de la coloration, due à une recombinaison des radicaux DPPH•, en présence d'un antioxydant donneur d'hydrogène (ROLLAND, 2004 ; POPOVICI *et al.*, 2009).

Le DPPH• est un radical stable absorbant à 518 nm (POPOVICI *et al.*, 2009; NIMSE et PAL, 2015). Ce test est largement utilisé et facile à réaliser (BONDET *et al.*, 1997). Toutefois, plusieurs facteurs peuvent influencer l'évaluation du potentiel antioxydant de l'échantillon à tester, notamment les conditions de la réaction (temps, rapport antioxydant/DPPH•, type de solvants, pH) (POPOVICI *et al.*, 2009).

### II.3.6.1.1.2.- Matériel et réactifs

Le test nécessite l'utilisation du réactif de DPPH•, le méthanol, la vitamine C et le BHT.

Les appareils utilisés sont un spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis) et un vortex.

### II.3.6.1.1.3.- Mode opératoire

- Ajouter 1 ml de solution de DPPH• (0.1 mM dans le méthanol), à 1 ml d'extrait testé ;
- Vortexer le mélange ;
- Incuber le mélange à 25°C pendant 30 min à l'obscurité ;
- Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 517 nm (DUAN et YU, 2019 ; CHEN *et al.*, 2020 ; JI *et al.*, 2020).

L'aptitude de l'extrait à piéger du radical DPPH• est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle] × 100 (POPOVICI *et al.*, 2009).

Le contrôle représente le mélange réactionnel sans extrait.

### II.3.6.1.2.- Test de piégeage du radical ABTS•+

Le pouvoir d'inhibition du radical ABTS•+ par les extraits testés est déterminé selon la méthode adopté par LI *et al.* (2015).

#### II.3.6.1.2.1.- Principe

Le test de piégeage du radical ABTS•+ est basé sur la capacité de l'extrait testé à piéger le radical ABTS•+, comparativement à un antioxydant de référence. Ce radical est obtenu à partir de sel d'ammonium de l'acide 2,2'-azinobis-(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) (ARTS *et al.*, 2003 ; MARC *et al.*, 2004).

Le radical ABTS•+ est obtenu par le contact de l'ABTS avec une enzyme de peroxydation (peroxydase méthyoglobine) en présence de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ou d'un oxydant (persulfate de potassium ou dioxyde de manganèse) (VAN DEN BERG *et al.*, 1999 ; MARC *et al.*, 2004).

En présence d'un donneur de H•, le passage de radical ABTS•+ à la forme non radicalaire ABTS+, s'accompagne de la disparition de couleur bleu-vert. Le degré de cette décoloration peut être déterminée par spectrophotométrie à 734 nm (ARTS *et al.*, 2003 ; MARC *et al.*, 2004).

### II.3.6.1.2.2.- Matériel et réactifs

Le test nécessite l'utilisation des réactifs suivants : ABTS, persulfate de potassium, éthanol,

vitamine C et BHT.

Les appareils utilisés sont un spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis) et un vortex.

#### II.3.6.1.2.3.- Mode opératoire

- Ajouter 2,7 ml de solution d'ABTS, à 0,3 ml d'extrait testé ;
- Incuber le mélange à 25°C pendant 20 min à l'obscurité ;
- Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 734 nm (LI *et al.*, 2015).

L'aptitude de l'extrait à piéger du radical ABTS•<sup>+</sup> est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle] × 100 (POPOVICI *et al.*, 2009).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait.

#### II.3.6.1.3.- Test de piégeage du radical OH•

Le pouvoir d'inhibition du radical OH• par les extraits testés est déterminé selon la méthode adapté par CHEN *et al.* (2019) et QIAN *et al.* (2020).

##### II.3.6.1.3.1.-Principe

Le radical hydroxyle OH• est un oxydant très puissant (LI *et al.*, 2015), qui peut réagir avec des macromolécules et induire des graves dommages cellulaires (LI *et al.*, 2015 ; JI *et al.*, 2020). Il favorise ainsi la génération des autres espèces réactives de l'oxygène (JI *et al.*, 2020).

Le test est basé sur la capacité de l'extrait à tester de piéger le radical OH•, obtenu par la réaction de peroxyde d'hydrogène avec les ions Fe<sup>2+</sup> (DUAN et YU, 2019). Les radicaux hydroxyles obtenus réagissent avec l'acide salicylique pour former l'acide 2,3-dihydroxybenzoïque et l'acide 2, 5-dihydroxybenzoïque (CHEN *et al.*, 2019), qui présentent une absorbance à 510 nm (CHEN *et al.*, 2019 ; DUAN et YU, 2019).

##### II.3.6.1.3.2.- Matériel et réactifs

Pour le test, il est nécessaire d'utiliser des réactifs suivants : acide salicylique, FeSO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, vitamine C et BHT.

Les appareils utilisés sont les suivants : vortex, bain-marie (Memmert, WB7) et spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

### II.3.6.1.3.3.- Mode opératoire

- Ajouter à 1 ml de l'extrait testé, 1 ml de solution de  $\text{FeSO}_4$  (9 mM) et 1 ml de solution d'acide salicylique (9 mM dans l'éthanol) ;
- Après homogénéisation, ajouter 1 ml de solution de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (9 mM) ;
- Vortexer le mélange ;
- Incuber le mélange à 37°C pendant 30 min à l'obscurité ;
- Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 510 nm (CHEN *et al.*, 2019 ; QIAN *et al.*, 2020).

L'aptitude de l'extrait à piéger du radical  $\text{OH}\cdot$  est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle]  $\times$  100 (CHEN *et al.*, 2019 ; QIAN *et al.*, 2020).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait

### II.3.6.1.4.- Pouvoir réducteur des ions ferriques

La pouvoir réducteur des extrais testés est évaluée par la méthode de OYAIKU (1986).

#### II.3.6.1.4.1.-Principe

La méthode est basée sur le pouvoir de l'antioxydant à réduire le fer (III) présent dans le complexe ferrocyanure de potassium en fer (II) (SHAHIDI et ZHONG, 2015 ; MUNTEANU et APETREI, 2021). La réaction se traduit par le virage de couleur jaune en couleur vert pâle et au bleu en fonction de la concentration de l'antioxydant (VIJAYALAKSHMI et RUCKMANI, 2016). Le changement de couleur est mesuré à 700 nm, et l'augmentation de l'absorbance indique une augmentation de l'activité antioxydante (JOSEPH *et al.*, 2010 ; ALAM *et al.*, 2013).

#### II.3.6.1.4.2.-Matériel et réactifs

Le test nécessite l'utilisation des réactifs de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , ferricyanure de potassium, acide trichloroacétique, chlorure ferrique, vitamine C et BHT.

Les appareils utilisés sont les suivants : vortex, centrifugeuse (Sigma 1-15, 90247), bain-marie (Mettler, WB7), spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

#### II.3.6.1.4.3.-Mode opératoire

- Ajouter 2,5 ml de tampon phosphate (0,2 M, pH 6,6) et 2,5 ml de ferricyanure de potassium (1%), à 1 ml d'extrait testé ;
- Vortexer bien le mélange ;
- Incuber le mélange à 50°C pendant 20 min ;
- Ajouter 2,5 ml d'acide trichloroacétique (10%) ;
- Centrifuger à 3000 rpm pendant 10 min ;

- Mélanger le surnageant obtenu avec 2,5 ml d'eau distillée et 0,5 ml de chlorure ferrique (0,1%) ;
- Après 10 min d'incubation, mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 700 nm (OYAIKU, 1986).

#### II.3.6.1.5.-Capacité antioxydante totale

La capacité antioxydante totale des extraits testés est évaluée par la méthode de phosphomolybdène de PRIETO *et al.* (1999).

##### II.3.6.1.5.1.-Principe

La technique est basée sur la réduction de molybdène Mo (VI) à molybdène Mo (V) en présence de l'extrait, pour former un complexe de phosphomolybdène de couleur vert à pH acide (PRIETO *et al.*, 1999; JOSEPH *et al.*, 2010; SELVAKUMAR *et al.*, 2011; THANGARAJ, 2016).

##### II.3.6.1.5.2.-Matériel et réactifs

Le test nécessite l'utilisation des réactifs suivants :  $\text{Na}_3\text{HPO}_4$ , molybdate d'ammonium, acide sulfurique, vitamine C et BHT.

Les appareils utilisés sont les suivants : vortex, bain-marie (Memmert, WB7) et spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

##### II.3.6.1.5.3.-Mode opératoire

- Ajouter 1 ml de solution du réactif (0,6 M acide sulfurique, 28 mM phosphate de sodium et 4 mM molybdate d'ammonium), à 0,1 ml d'extrait testé ;
- Vortexer et bien fermer les tubes ;
- Incuber le mélange à 95°C pendant 90 min ;
- Après refroidissement, mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 695 nm (PRIETO *et al.*, 1999).

#### II.3.6.2.- Activité anti-hyperglycémiant

Une des principales méthodes adaptées pour l'évaluation de l'activité anti-hyperglycémiant *in vitro* est l'étude du pouvoir d'inhibition des enzymes du système digestif (KUMAR *et al.*, 2011 ; BELLIEN et CRACOWSKI, 2016 ; LI *et al.*, 2018a).

Les  $\alpha$ -amylases pancréatiques et les  $\alpha$ -glucosidases intestinales sont des enzymes clés de la digestion des glucides dans le système digestif (TADERA *et al.*, 2006 ; SALEHI *et al.*, 2013). Les  $\alpha$ -amylases catalysent l'hydrolyse des liaisons glycosidiques de type  $\alpha$ -(1→4) et produisent du maltose et du glucose à partir de l'amidon, tandis que les  $\alpha$ -glucosidases catalysent la dernière étape du processus digestif des glucides, en agissant sur les liaisons glycosidiques de type  $\alpha$ -(1→4) et en donnant comme résultat le glucose (KIM *et al.*, 2014 ; ISHNAVA et MOTISARIYA, 2018).

Les inhibiteurs des  $\alpha$ -glucosidases actuellement utilisés sont l'acarbose, le miglitol et le voglibose (BELLIEN et CRACOWSKI, 2016 ; LAOUFI *et al.*, 2017 ; SUBRAMONIAM, 2016). Ces médicaments inhibent l'hydrolyse enzymatique des glucides dans l'intestin et réduisent ainsi la libération du glucose dans le sang (SUBRAMONIAM, 2016). Cependant, ces inhibiteurs ayant des effets secondaires, présentés par des troubles digestifs de type météorismes, flatulences ou diarrhées. Ces effets résultent de la fermentation bactérienne anormale de glucides non digérés dans le côlon (BLICKLE *et al.*, 1999 ; SALEHI *et al.*, 2013), qui semblent être causés par l'inhibition excessive de l' $\alpha$ -amylase pancréatique (SALEHI *et al.*, 2013).

L'utilisation des substances naturelles ayants d'une faible activité d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et une forte activité d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase, semble être efficace dans la réduction d'hyperglycémie postprandiale et donc la meilleure gestion du diabète (SALEHI *et al.*, 2013).

En effet, l'activité anti-hyperglycémiant des extraits polysaccharidiques est évaluée par l'étude de leur pouvoir d'inhibition d'activité enzymatique de l' $\alpha$ -glucosidase et de l' $\alpha$ -amylase. L'activité inhibitrice d'un extrait est décrite par la concentration inhibitrice IC<sub>50</sub>. La valeur IC<sub>50</sub> dépend de la compétition entre l'inhibiteur et le substrat pour le site actif de l'enzyme et elle dépend donc non seulement de la concentration de l'inhibiteur, mais également de la concentration du substrat (SUN *et al.*, 2019).

#### **II.3.6.2.1.- Activité inhibitrice de l' $\alpha$ -glucosidase**

L'activité inhibitrice d' $\alpha$ -glucosidase est déterminée selon la méthode de DENG *et al.* (2020).

##### **II.3.6.2.1.1.- Principe**

Le pouvoir d'inhibition d' $\alpha$ -glucosidase par l'extrait testé est déterminé par l'inhibition de la réaction catalysée par cette enzyme. L' $\alpha$ -glucosidase hydrolyse *p*-nitrophényl- $\alpha$ -D-glucopyranoside (*p*-NPG) en  $\alpha$ -D-glucopyranose et *p*-nitrophénol (*p*-NP). Ce dernier est un produit coloré qui présente une absorbance à 405 nm et sa libération est proportionnelle à l'activité  $\alpha$ -glucosidase (THANGARAJ, 2016).

##### **II.3.6.2.1.2.- Matériel et réactifs**

L'utilisation de réactifs dont  $\alpha$ -glucosidase, *p*-nitrophényl- $\alpha$ -D-glucopyranoside (*p*-NPG), Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, acarbose comme standard, s'avère nécessaire pour le test.

Les appareils utilisés sont de pH mètre (Adwa, AD 1030), d'incubateur-agitateur (KS 3000 - i control, Germany) et de spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

##### **II.3.6.2.1.3.- Mode opératoire**

- Ajouter 20  $\mu$ l d' $\alpha$ -glucosidase (0,5 U/ml), à 20  $\mu$ l d'extrait testé et 120  $\mu$ l du tampon phosphate (0,1 mM, pH 6,8) ;

- Incuber le mélange à 37°C pendant 10 min ;
- Ajouter 20 µl de substrat de *p*-NPG (2,5 mM) ;
- Incuber le mélange à 37°C pendant 10 min ;
- Arrêter la réaction en ajoutant 80 µl de carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) à 0,2 M ;
- Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 400 nm (DENG *et al.*, 2020).

L'aptitude de l'extrait à inhiber  $\alpha$ -glucosidase est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle] × 100 (SONG *et al.*, 2019).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait

#### II.3.6.2.2.- Activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase

L'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase est déterminée selon la méthode d'APOSTOLIDIS *et al.* (2007).

##### II.3.6.2.2.1.- Principe

L'évaluation de l'activité enzymatique implique l'incubation de l' $\alpha$ -amylase avec son substrat ; l'amidon. La réaction entraîne la libération du maltose, qui peut être quantifié par l'addition d'acide 3,5-dinitrosalicylique. Ce dernier est réduit en acide 3-amino-5-nitrosalicylique, un produit rougeâtre détectable à 540 nm. La présence d'un inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase du mélange réactionnel réduit la quantité du maltose libérée (SUBRAMONIAM, 2016).

##### II.3.6.2.2.2.- Matériel et réactifs

Des réactifs comme  $\alpha$ -amylase, amidon, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaCl, acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS), acarbose comme standard, sont nécessaires pour le test.

Les appareils utilisés sont les suivants : pH mètre (Adwa, AD 1030), incubateur-agitateur (KS 3000 - i control, Germany), spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

##### II.3.6.2.2.3.- Mode opératoire

- Ajouter 500 µl de l'extrait testé, à 500 µl de tampon phosphate salin (0,02 M, pH 6,9, 6 mM de NaCl) contenant de l' $\alpha$ -amylase (0,5 mg/ml) ;
- Incuber le mélange à 25°C pendant 10 min ;
- Ajouter 500 µL de solution d'amidon (1%) ;
- Incuber le mélange à 25°C pendant 10 min ;
- Arrêter la réaction en ajoutant 1 ml de la solution de DNS ;
- Porter le mélange à 100 °C pendant 5 min, puis refroidir à température ambiante ;
- Diluer le mélange avec 10 ml d'eau distillée ;
- Mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 540 nm (APOSTOLIDIS *et al.*, 2007 ; DENG *et*

*al.*, 2020 ; LI *et al.*, 2020).

L'aptitude de l'extrait à inhiber  $\alpha$ -amylase est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle]  $\times$  100 (APOSTOLIDIS *et al.*, 2007).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait

### II.3.6.3.- Activité anti-inflammatoire

L'inflammation est un processus biologique complexe (PUNCHARD *et al.*, 2004 ; IWALEWA *et al.*, 2007 ; RATHEE *et al.*, 2009). Elle constitue une réponse normale du système immunitaire aux lésions tissulaires et aux infections (PUNCHARD *et al.*, 2004 ; IWALEWA *et al.*, 2007 ; RATHEE *et al.*, 2009 ; OGUNTIBEJU, 2018 ; ELGORASHI et MCGAW, 2019). Les signes cliniques de ce processus sont la rougeur, le gonflement, la chaleur, la douleur et l'altération de la fonction de l'organe touché (PUNCHARD *et al.*, 2004 ; IWALEWA *et al.*, 2007). Plusieurs types de cellules du système immunitaire sont impliqués dans la réponse immunitaire y compris les neutrophiles, les basophiles, les mastocytes, les lymphocytes T et les lymphocytes B (PUNCHARD *et al.*, 2004 ; RATHEE *et al.*, 2009).

La réponse inflammatoire se caractérise, au niveau tissulaire, par l'augmentation de la perméabilité vasculaire, l'augmentation de la dénaturation des protéines et l'altération des membranes cellulaires. La dénaturation des protéines est une des causes des maladies inflammatoires, notamment la polyarthrite rhumatoïde (DEY *et al.*, 2011 ; IFFATH et CAROLINE, 2018). Les agents qui peuvent empêcher la dénaturation des protéines sont donc intéressants dans le traitement des maladies inflammatoires (DEY *et al.*, 2011 ; SARVESWARAN *et al.*, 2017 ; BAILEY-SHAW *et al.*, 2017).

Pendant l'inflammation, une lyse de la membrane lysosomale peut se produire et engendrer la libération des enzymes lysosomales (SARVESWARAN *et al.*, 2017), ce qui provoque la lésion des tissus, l'endommagement des macromolécules et la peroxydation lipidique des membranes (CHIPPADA *et al.*, 2011). Les anti-inflammatoires non stéroïdiens agissent soit en inhibant ces enzymes lysosomales, ou en stabilisant la membrane lysosomale (BHATNAGAR *et al.*, 2012 ; SARASWATHY *et al.*, 2017).

De ce fait, l'activité anti-inflammatoire *in vitro* des extraits polysaccharidiques est évaluée par l'étude de leur pouvoir d'inhibition de la dénaturation des protéines et de leur pouvoir de stabilisation de la membrane des hématies contre la lyse membranaire.

#### II.3.6.3.1.- Inhibition de la dénaturation de protéines

L'activité inhibitrice de la dénaturation de protéines est déterminée selon la méthode modifiée de DRAGAN *et al.* (2016).

### II.3.6.3.1.1.- Principe

Pour l'essai, l'albumine sérique bovine (BSA) est utilisée comme source de protéine. La dénaturation est induite par chaleur, en maintenant le mélange dans un bain-marie à température de 70 °C (THANGARAJ, 2016).

### II.3.6.3.1.2.-Matériel et réactifs

Le test nécessite l'utilisation des réactifs suivants : sérum d'albumine bovin, Tris, Tris-HCl, diclofenac sodique comme standard.

Les appareils utilisés sont les suivants : pH mètre (Adwa, AD 1030), bain-marie (Memmert, WB7), spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

### II.3.6.3.1.3.- Mode opératoire

- Ajouter à 0,5 ml de l'extrait testé (ou du standard), 0,5 ml de sérum d'albumine bovine (0,2 %) préparé dans le tampon Tris-HCl (0,05 M, pH 6,6) ;
- Incuber le mélange au bain-marie à 37 °C pendant 20 min, puis chauffer à 70 °C pendant 5 min ;
- Après refroidissement, mesurer l'absorbance par spectrophotométrie à 660 nm (DRAGAN *et al.*, 2016).

L'aptitude de l'extrait à inhiber la dénaturation de protéines est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle] × 100 (WILLIAMS *et al.*, 2008).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait.

### II.3.6.3.2.- Stabilisation de la membrane des hématies

La stabilisation de la membrane des hématies est déterminée selon la méthode de THANGARAJ (2016).

### II.3.6.3.2.1.- Principe

Le principe adopté dans cette étude est la stabilisation de la membrane des hématies contre la lyse membranaire et l'estimation de taux d'hémoglobine contenu dans le surnageant par spectrophotométrie. L'hémolyse est induite par hypotonicité et par chaleur en utilisant des érythrocytes humains. La solution hypotonique provoque l'accumulation excessive du liquide dans les globules rouges, ce qui conduit à la rupture de leur membrane (SARVESWARAN *et al.*, 2017).

### II.3.6.3.2.2.- Matériel et réactifs

Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, NaCl, KCl, sang humain, diclofenac sodique comme standard, sont

nécessaire comme réactifs.

Les appareils utilisés sont les suivants : pH mètre (Adwa, AD 1030), centrifugeuse (Sigma 1-15, 90247), bain-marie (Memmert, WB7), spectrophotomètre (Agilent Technologies, Cary 100 UV-Vis).

#### **II.3.6.3.2.3.- Mode opératoire**

- Ajouter à 1 ml de tampon phosphate (0,15 mM, pH-7.4), 2 ml d' hyposaline (0,45%) et 1 ml de l'extrait testé (ou du standard) ;
- Incuber le mélange à 37 °C pendant 20 min ;
- Ajouter 0,5 ml de suspension érythrocytaire à 10% ;
- Incuber le mélange dans un bain-marie à 56 °C pendant 30 min ;
- Refroidir le mélange dans un bain de glace ;
- Centrifuger le mélange à 3000 rpm pendant 20 min ;
- Estimer la teneur en hémoglobine dans le surnageant par spectrophotométrie à 560 nm (THANGARAJ, 2016).

L'aptitude de l'extrait à inhiber la lyse membranaire induite est déterminée en mesurant son pourcentage d'inhibition, selon la formule suivante :

Pourcentage d'inhibition = [(Absorbance du contrôle - Absorbance de l'extrait testé) / Absorbance du contrôle] × 100 (THANGARAJ, 2016).

Contrôle : le mélange réactionnel sans extrait.

#### **II.4.- Exploitation des résultats**

Chaque expérience est réalisée triplicata, et les résultats sont exprimés en moyenne ± écart-type. Les valeurs d'IC<sub>50</sub> des différents tests biologiques sont calculées par la régression linéaire de la courbe. Les graphes et les histogrammes sont tracés à l'aide de logiciel Origin 2024b.

L'analyse statistique des données est réalisée à l'aide du logiciel SPSS Statistics version 29. Le test Shapiro-Wilk est utilisé pour vérifier si les données suivent une distribution normale. Les comparaisons multiples et la détermination des taux de signification sont réalisées par le test ANOVA univarié. La corrélation entre les activités biologiques et la composition biochimique d'extraits polysaccharidiques bruts est analysée par le test de Pearson.

La différence est considérée statistiquement comme non significative si la valeur de probabilité  $P > 0,05$ , significative si  $P \leq 0,05$ , hautement significative si  $P \leq 0,01$  et très hautement significative si  $P \leq 0,001$ .

---

## **Chapitre III**

# **Résultats et discussion**

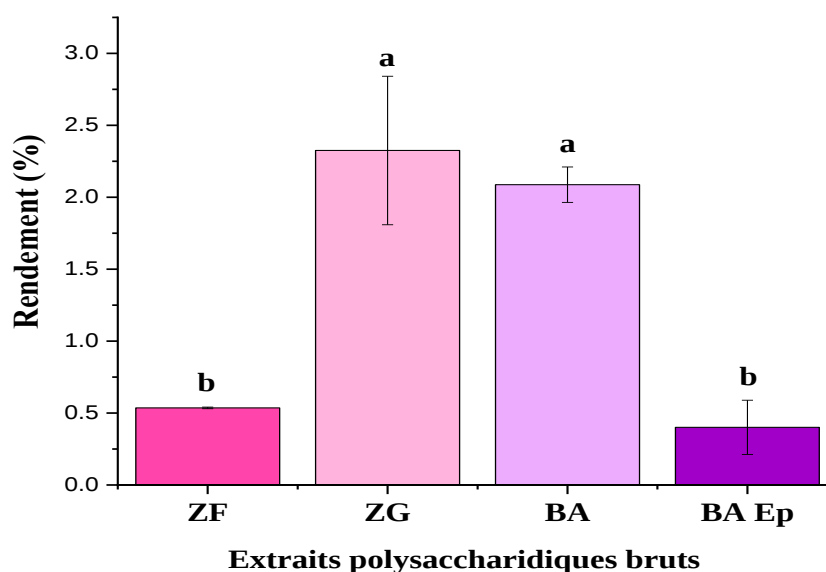
---

Le chapitre présente et analyse les résultats de la caractérisation préliminaire et d'activités biologiques des extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles, obtenus à partir des feuilles et des graines de *Zygophyllum album* L. et des fruits de *Balanites aegyptiaca* Del.

### III.1.- Rendement d'extraction

Les extractions de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Z. album* donnent des rendements de l'ordre de  $0,53 \pm 0,04\%$  et  $2,33 \pm 0,52\%$  respectivement. Le rendement obtenu par l'extraction de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* (BA) est de  $2,09 \pm 0,12\%$ , et celui obtenu après une deuxième extraction dans les mêmes conditions pour l'épuisement de la matière première (BAEp) est de  $0,40 \pm 0,18\%$ .

La macération dans de l'eau distillée à  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  est la méthode utilisée pour l'extraction de polysaccharides des espèces investies. Il est à noter que les rendements obtenus en polysaccharides extraits de *Z. album* et de *B. aegyptiaca* par la méthode restent faibles. Toutefois, la méthode présente l'avantage de préserver l'intégrité structurale et la bioactivité des polysaccharides extraits (LIU *et al.*, 2015 ; MIRZADEH *et al.*, 2020).



**Figure 20.-** Rendements obtenus pour les extraits de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA et BAEp). Les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ ) sont présentés en a et b

Le rendement obtenu pour ZG est supérieur à celui obtenu pour ZF, avec une différence très hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,001$ ). BOUAL *et al.* (2015) ont rapporté un rendement d'extraction égal 3,7%, pour l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Zizyphus lotus* (Rhamnaceae), obtenu par le même protocole utilisé pour l'extrait ZF. Un rendement d'extraction de 4,03% a été signalé pour l'extrait WPL de polysaccharides des feuilles d'*Allium roseum* (Amaryllidaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (TEKA *et al.*, 2022). FU *et al.* (2019) ont noté des rendements d'extraction variant entre 3,62 et 5,29% pour les

polysaccharides des feuilles de différents cultivars d'*Eriobotrya japonica* (Rosaceae), obtenus par macération dans l'eau distillée à 95 °C. Ces rendements semblent supérieurs à ceux obtenus pour les extraits des polysaccharides hydrosolubles de *Z. album*.

Le rendement d'extraction de BA est supérieur celui de BAEp, avec une différence très hautement significative entre le rendement des deux extraits ( $P < 0,001$ ). HUANG *et al.* (2014) ont signalé un rendement égal 1,15% pour l'extrait LPF de polysaccharides des fruits de *Litchi chinensis* Sonn. (Sapindaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 85 °C, qui semble inférieur à celui obtenu pour l'extrait BA. CHEN *et al.* (2020a) ont noté un rendement de 5,88% pour l'extrait CPPH de polysaccharides des fruits de *Crataegus pinnatifida* Bunge. (Rosaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 90 °C. TIAN *et al.* (2019) ont rapporté des rendements d'extraction variant entre 7,46 et 7,63% obtenu par macération dans l'eau distillée à 65 °C, pour les polysaccharides de fruits de *Lycium barbarum* (Solanaceae). AMAMOU *et al.* (2020) ont rapporté un rendement d'extraction égal 11,3% pour l'extrait PPN de polysaccharides des fruits d'*Opuntia macrorhiza* (Cactaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 60 °C. Les rendements sont supérieurs à ceux des extraits des polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca*.

Plusieurs facteurs comme la température, le temps, le rapport de l'eau/matière première, et le nombre d'extractions peuvent influencer sur le rendement d'extraction (WANG *et al.*, 2007; HAMMI *et al.*, 2016; HAN *et al.*, 2016a). Ainsi que, le rendement en polysaccharides varie significativement en fonction de la méthode d'extraction utilisée (YANG *et al.*, 2015; LI et WANG, 2016; DUAN *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020a ; WU *et al.*, 2020a).

### III.2.- Composition biochimique globale des extraits

Les résultats de dosages colorimétriques (oses totaux, oses acides, protéines et composés phénoliques) des différents extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles sont présentés dans le tableau IV. Les extraits polysaccharidiques de *Z. album* présentent des teneurs en sucres totaux plus faibles (49,02-59,33%) que les extraits de *B. aegyptiaca* (85,77-89,34%), et des teneurs en protéines (18,22-19,15%) plus élevées que les extraits de *B. aegyptiaca*. Alors que les taux de composés phénoliques (1,21-1,64%) entre les extraits des deux espèces sont proches.

Une différence très hautement significative dans la teneur en sucres totaux est notée dans les extraits polysaccharidiques de *Z. album* ( $P < 0,001$ ), dont le taux des sucres totaux dans l'extrait des graines ( $59,33 \pm 1,48\%$ ) soit supérieur à celui des feuilles ( $49,02 \pm 3,86\%$ ). FANG *et al.* (2020) ont noté une teneur en sucres totaux ( $46,07 \pm 0,10\%$ ) proche de celle obtenue pour l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album* dans la fraction MHP-W de polysaccharides des feuilles et des tiges de *Mentha haplocalyx* (Labiaceae), issu d'extraction par macération dans l'eau distillée à 95 °C. ADDOUN *et al.* (2021) ont rapporté un taux en oses totaux de l'ordre de  $66,6 \pm 1,42\%$  dans l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Plantago ciliata* (Plantaginaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 60 °C. Un taux en oses totaux de  $66,96 \pm 2,12\%$  a été enregistré dans les polysaccharides des feuilles d'*Oudneya africana* (Brassicaceae), extraits par macération dans l'eau distillée à 80 °C (MEHELLOU, 2023). BENYAKOUB *et al.* (2020) ont rapporté un taux de 89% dans l'extrait PSc de polysaccharides des feuilles de *Corchorus olitorius* (Malvaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 95 °C.

**Tableau IV.**-Composition biochimique des extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA et BAEp)

| Extrait | Sucres totaux (%)        | Sucres acides (%)        | Protéines (%)            | Polyphénols (%)         |
|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ZF      | 49,02 ±3,86 <sup>d</sup> | 32,91 ±0,23 <sup>b</sup> | 19,15 ±0,35 <sup>d</sup> | 1,64 ±0,02 <sup>c</sup> |
| ZG      | 59,33 ±1,48 <sup>c</sup> | 5,98 ±1,31 <sup>c</sup>  | 18,22 ±0,28 <sup>c</sup> | 1,31 ±0,01 <sup>b</sup> |
| BA      | 85,77 ±0,21 <sup>b</sup> | 6,16 ±1,61 <sup>c</sup>  | 7,39 ±0,06 <sup>b</sup>  | 1,34 ±0,02 <sup>b</sup> |
| BAEp    | 89,34 ±0,28 <sup>a</sup> | 36,57 ±0,37 <sup>a</sup> | 4,01 ±0,09 <sup>a</sup>  | 1,21 ±0,05 <sup>a</sup> |

Les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ ) sont présentés en a, b, c et d

Un taux en oses totaux de l'ordre de 49,21±0,03% a été enregistré dans l'extrait de polysaccharides (WSPAM1) des graines d'*Alhagi maurorum* (Fabaceae) (CHAKOU *et al.* 2021), obtenu par macération dans l'eau distillée à 80 °C, qui semble inférieur à celui obtenu dans l'extrait polysaccharidique de graines de *Z. album* (59,33±1,48%). Une teneur plus élevée des oses totaux a été rapportée pour les polysaccharides hydrosolubles des graines de *Plantago ciliata*, qui était de 86,5±4,32% (ADDOUN *et al.*, 2021).

Les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* présentent des teneurs en sucres totaux soient 85,77±0,21% pour BA et 89,34±0,28% pour BAEp, avec une différence très hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,001$ ). BENSACI *et al.* (2022) ont signalé une teneur en sucres totaux de 85,58 % dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Crataegus azarolus* (Rosaceae). Un taux de 81,28±0,32% a été enregistré dans l'extrait de polysaccharides (MFP-VI) des fruits de *Morus alba* (Moraceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 80 °C (HUANG *et al.*, 2023). Ces résultats semblent proches de ceux obtenus pour les extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*. Une teneur élevée en sucres totaux a été signalée pour la fraction polysaccharidique (ZLP) des fruits de *Zizyphus lotus* (Rhamnaceae) (97,92%), issue d'extraction par macération dans de l'eau distillée à 91 °C, et la fraction polysaccharidique (NTWP) des fruits de *Nitraria tangutorum* (Zygophyllaceae) (98,0%), issue d'extraction par macération dans de l'eau distillée à 90 °C (NI *et al.*, 2013 ; HAMMI *et al.*, 2016). Des taux plus faibles en sucres totaux ont été enregistrés dans la fraction polysaccharidique (DFP) des fruits de *Phoenix dactylifera* (Arecaceae), obtenu par macération dans l'eau distillée à 90 °C (66,09±0,28%) et dans la fraction polysaccharidique (BCP) des fruits de *Ribes nigrum* (Grossulariaceae) obtenu par macération dans l'eau distillée à 80 °C (59,27±0,71%) (XU *et al.*, 2018; ADEWALE *et al.*, 2024).

Une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ) dans la teneur en oses acides est notée entre les extraits polysaccharidiques de même espèce. En effet, les oses acides demeurent majoritaires dans l'extrait polysaccharidique des feuilles (32,91±0,23%) et minoritaires dans l'extrait polysaccharidique des graines de *Z. album* (5,98 ±1,31%). Le taux des oses acides dans BA (6,16±1,61%) est inférieur à celle de BAEp (36,57±0,37%). Un taux en oses acides à 34,64% a été enregistré dans l'extrait polysaccharidique (WPL) des feuilles d'*Allium roseum* (Liliaceae), obtenu

par macération dans de l'eau distillée à 80 °C (TEKA *et al.*, 2022), qui semble proche à celle obtenu dans l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album*. MZOUGH *et al.* (2018a, 2019) étudiant des polysaccharides des feuilles des deux espèces halophytes de famille de Chenopodiaceae, ont noté une teneur en oses acides de 47,5% dans l'extrait des polysaccharides de *Suaeda fruticosa* obtenu par macération dans de l'eau distillée assistée aux ultrasons, et un taux de 48,7% dans les polysaccharides de *Spinacia oleracea* issus d'extraction par macération dans de l'eau distillée à 80°C.

Il apparaît que les extraits polysaccharidiques de *Z. album* présentent des teneurs en protéines élevées malgré l'étape de la déprotéinisation à l'acide trichloracétique, soit 19,15±0,35% pour ZF et 18,22±0,28% pour ZG, avec une différence significative dans la teneur en protéines des deux extraits ( $P < 0,05$ ). BOUAL *et al.* (2013) et MEHELLOU (2023) ont signalé des taux de protéines proches de ceux enregistrés pour les extraits de *Z. album*, dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles de feuilles de *Malva parviflora* (Malvaceae) (17,14%), et l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines d'*Astragalus gombiformis* (Fabaceae) (18%), obtenus sans déprotéinisation. Toutefois, FU *et al.* (2019) ont signalé des taux plus faibles en protéines dans les différents extraits de polysaccharides hydrosolubles des feuilles d'*Eriobotrya japonica* (Rosaceae), obtenus sans déprotéinisation, variant entre 2,72 et 3,18%.

Une différence très hautement significative dans le taux de protéines ( $P < 0,001$ ) est notée pour les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca*, qui présentent des taux en protéines de 7,39±0,06% et de 4,01±0,09% dans BA et BAEp respectivement. Une teneur en protéines de 8,69% a été signalée pour les polysaccharides hydrosolubles de fruits de *Nitraria retusa* (Zygophyllaceae) (SONG *et al.*, 2023), obtenu après déprotéinisation par le réactif de Sevag (chloroforme : n-butanol = 4 :1, v/v) (HUANG *et al.*, 2022), semble proche à ceux obtenu pour BA. Des valeurs plus faibles sont rapportées pour la fraction de polysaccharides hydrosolubles (BBP) des fruits de Rubus, soit un taux de protéines de 1,77±0,04% (DOU *et al.*, 2019), obtenu après déprotéinisation par le réactif de Sevag. Des teneurs élevées en protéines (13-27%) pour les polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Lycium barbarum* (Solanaceae) extraits par quatre méthodes d'extraction (eau chaude, enzymes, ultrasons et enzymes assistées par ultrasons) obtenus sans déprotéinisation, sont rapportées par YANG *et al.* (2015). WANG *et al.* (2014) signalent aussi un taux élevé en protéines, même après l'étape de déprotéinisation par le réactif de Sevag, soit 21,41% pour l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Citrus aurantium* (Rutaceae).

Il est remarqué que les teneurs en composés phénoliques dans les différents extraits testés restent faibles. Les taux de composés phénoliques dans les extraits polysaccharidiques de *Z. album* soient 1,64±0,02% et 1,31±0,01% dans ZF et ZG respectivement, avec une différence très hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,001$ ). FANG *et al.* (2020) ont noté une teneur en polyphénols de 3,31±0,05% dans l'extrait de polysaccharides des feuilles et des tiges (MHP-W) de *Mentha haplocalyx* (Labiaceae), qui semble supérieure de celle obtenue pour l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album*. Des taux plus élevés en polyphénols ont été enregistrés dans l'extrait des polysaccharides de feuilles (PSc) de *Corchorus olitorius* (Malvaceae) (8%), issu d'extraction par macération dans l'eau distillée à 95 °C (BENYAKOUB *et al.*, 2020), et dans l'extrait des polysaccharides de feuilles (FLPs) de *Ficus carica* (Moraceae) (13,55± 0,02%) issu d'extraction par macération dans l'eau distillée à 80 °C (JIANG *et al.*, 2023).

Les teneurs en polyphénols dans les extraits polysaccharidiques de *B. aegyptiaca* soient  $1,34 \pm 0,02\%$  et  $1,21 \pm 0,05\%$  dans BA et BAEP respectivement, avec une différence hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,01$ ). Une teneur en polyphénols proche de celle obtenue pour les extraits de *B. aegyptiaca*, a été mentionnée dans les polysaccharides des fruits de *Crataegus azarolus* (Rosaceae) ( $1,10 \pm 0,01\%$ ) (RJEIBI *et al.*, 2020), et les polysaccharides des fruits de *Adansonia digitata* (Bombacaceae) ( $1,3 \pm 0,19\%$ ), issus d'extraction par macération dans l'eau distillée à  $90^\circ\text{C}$  (BOUGATEF *et al.*, 2023). Des teneurs plus élevées en polyphénols ont été enregistrés dans l'extrait de polysaccharides des fruits de *Nitraria retusa* (Zygophyllaceae) ( $5,47 \pm 0,12\%$ ), et dans l'extrait LBP-H de polysaccharides des fruits de *Lycium barbarum* (Solanaceae) ( $2,55 \pm 0,08\%$ ), issus d'extraction par macération dans l'eau distillée à  $100^\circ\text{C}$  (YANG *et al.*, 2015 ; RJEIBI *et al.*, 2019).

Les protéines et les composés phénoliques sont les principaux composés contaminant les polysaccharides (LIU *et al.*, 2015). D'après les résultats obtenus, il apparaît que les extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles de *B. aegyptiaca* avec des teneurs élevées en sucres totaux (85,77-89,34%) et des teneurs en protéines de 4,01 à 7,39% et en polyphénols de 1,34 à 1,21%, semblent mieux purifiés que les extraits bruts de polysaccharides de *Z. album*.

### III.3.-Analyse infrarouge

Les bandes d'absorption des extraits polysaccharidiques apparaissent sur les figures 21, 22, 23, 24 et les types de vibrations correspondants sont présentés dans le tableau V.

Les extraits polysaccharidiques de feuilles (ZF) et de graines (ZG) de *Z. album*, ainsi que les extraits polysaccharidiques de fruits de *B. aegyptiaca* (BA) et (BAEP) se caractérisent par une large bande intense dans la région de  $3000$  à  $3600\text{ cm}^{-1}$ , attribuée aux vibrations d'élongation des groupements OH (HONG *et al.*, 2021). Le signal situé aux alentours de  $2900\text{ cm}^{-1}$  résulte des vibrations d'élongation symétrique et asymétrique de la liaison C-H (GNANASAMBANDAM et PROCTOR, 2000).

Une bande d'absorption large et intense située aux alentours  $1750\text{ cm}^{-1}$ , dans le spectre de ZF et de ZG, correspond aux vibrations d'élongation de la liaison C=O des acides (HABIBI, 2004 ; SYNYTSYA *et al.*, 2010 ; ZHANG *et al.*, 2019). Le signal observé de  $1650\text{ cm}^{-1}$ , dans les spectres de BA et de ZG, est attribué aux vibrations de déformation de l'eau (HABIBI, 2004 ; SYNYTSYA *et al.*, 2010 ; ZHANG *et al.*, 2019). Une forte absorption obtenue environ  $1600\text{ cm}^{-1}$ , dans le spectre de BA, de BAEP et de ZF, est caractéristique des groupes COOH des acides uroniques (YE et LAI, 2015 ; WANG *et al.*, 2020). Dans le spectre de BAEP et de ZG, le signal situé aux alentours de  $1420\text{ cm}^{-1}$  résulte des vibrations de déformation de la liaison C-H (ZHANG *et al.*, 2015).

Une forte absorption observée dans la région de  $1000$  à  $1100\text{ cm}^{-1}$ , dans les spectres de différents extraits, semble attribuée aux vibrations d'élongation de la liaison C-C et C-O des polysaccharides (HABIBI, 2004). Le signal situé aux alentours de  $900\text{ cm}^{-1}$  résulte des vibrations d'élongation et de déformation des liaisons C-O-C, C-C-O et C-C-H (FAN *et al.*, 2012). Les bandes

d'absorption dans la région  $840\text{-}920\text{ cm}^{-1}$  peuvent être utilisées pour différencier entre la configuration  $\alpha$  et  $\beta$  du carbone anomérique (HONG *et al.*, 2021).

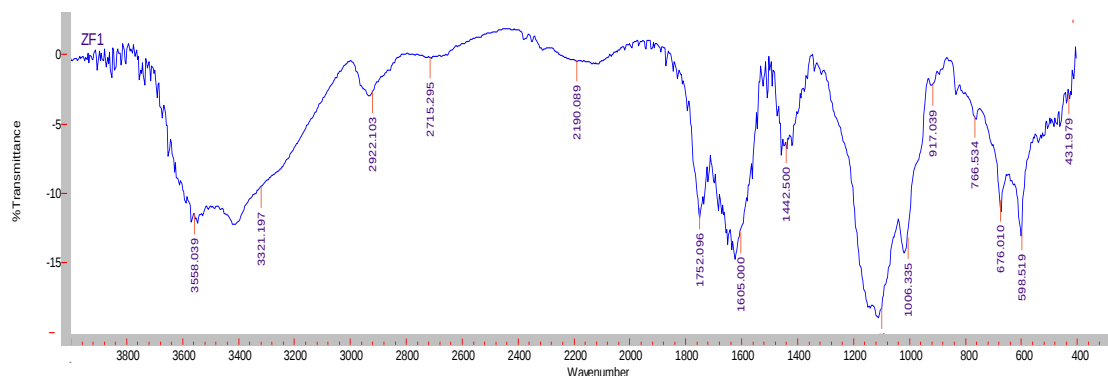


Figure 21.-Spectre FT-IR de l'extrait ZF

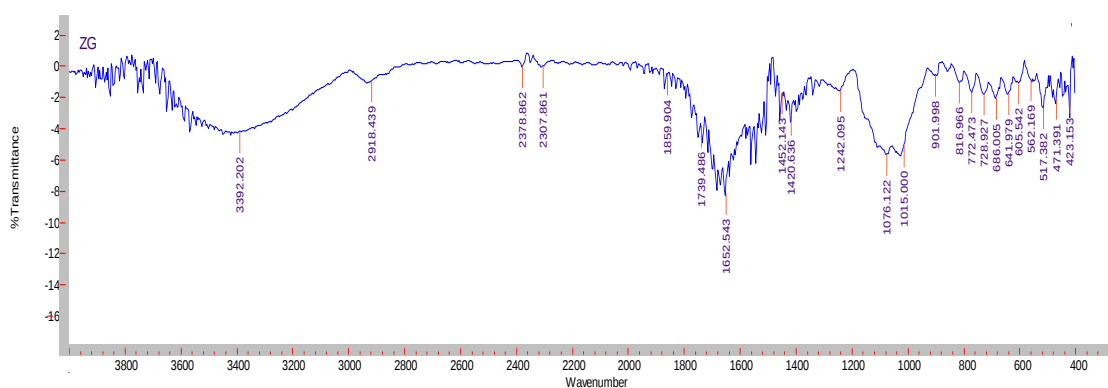


Figure 22.-Spectre FT-IR de l'extrait ZG

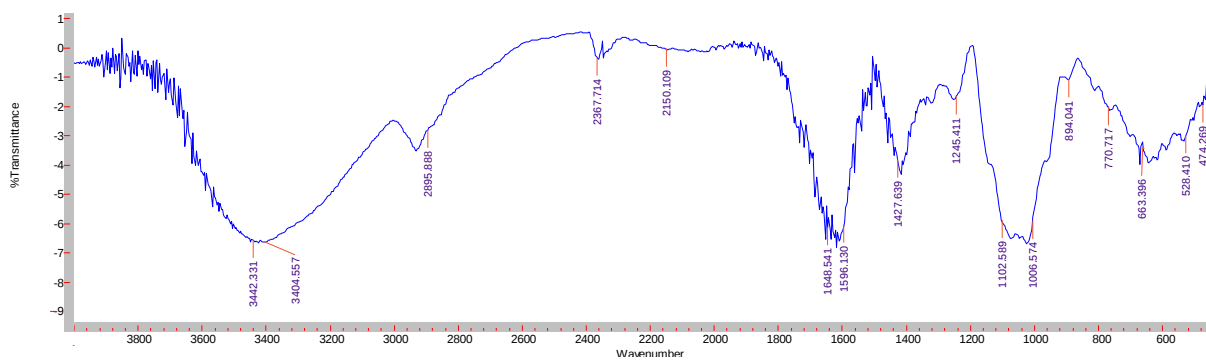


Figure 23.-Spectre FT-IR de l'extrait BA

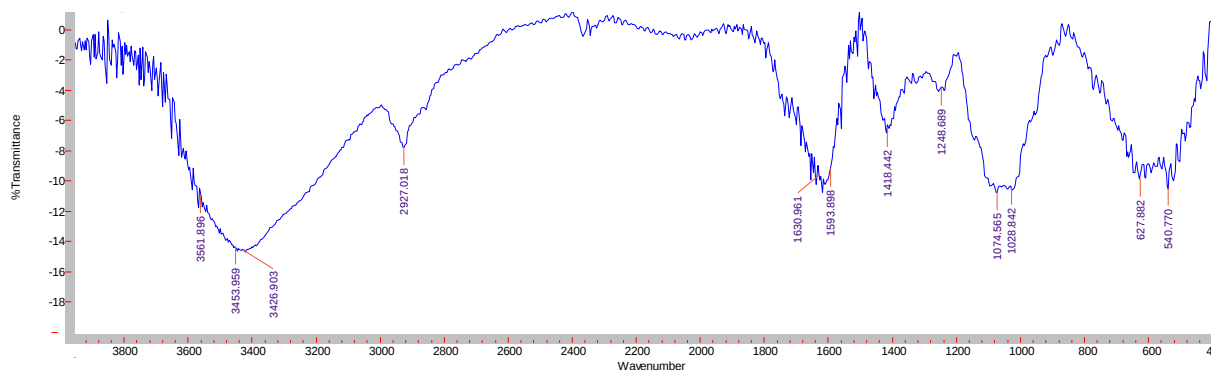


Figure 24.-Spectre FT-IR de l'extrait BAEp

La bande obtenue autour de  $770\text{ cm}^{-1}$ , dans le spectre de BA et de ZG, est attribuée à la vibration d'élongation symétrique des cycles pyranoses (LIU *et al.*, 2014 ; ZHANG *et al.*, 2015).

Les spectres FT-IR des extraits montrent une forte absorption dans la région de  $1000$  à  $1800\text{ cm}^{-1}$  et présentent des pics caractéristiques des acides uroniques constitutifs des polysaccharides étudiés. D'après les résultats obtenus, les spectres FT-IR des différents extraits sont similaires, et présentent les bandes caractéristiques des polysaccharides.

**Tableau V.-** Bandes d'absorption caractéristiques des groupes fonctionnels de polysaccharides extraits des feuilles (ZF), des graines (ZG) de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA)

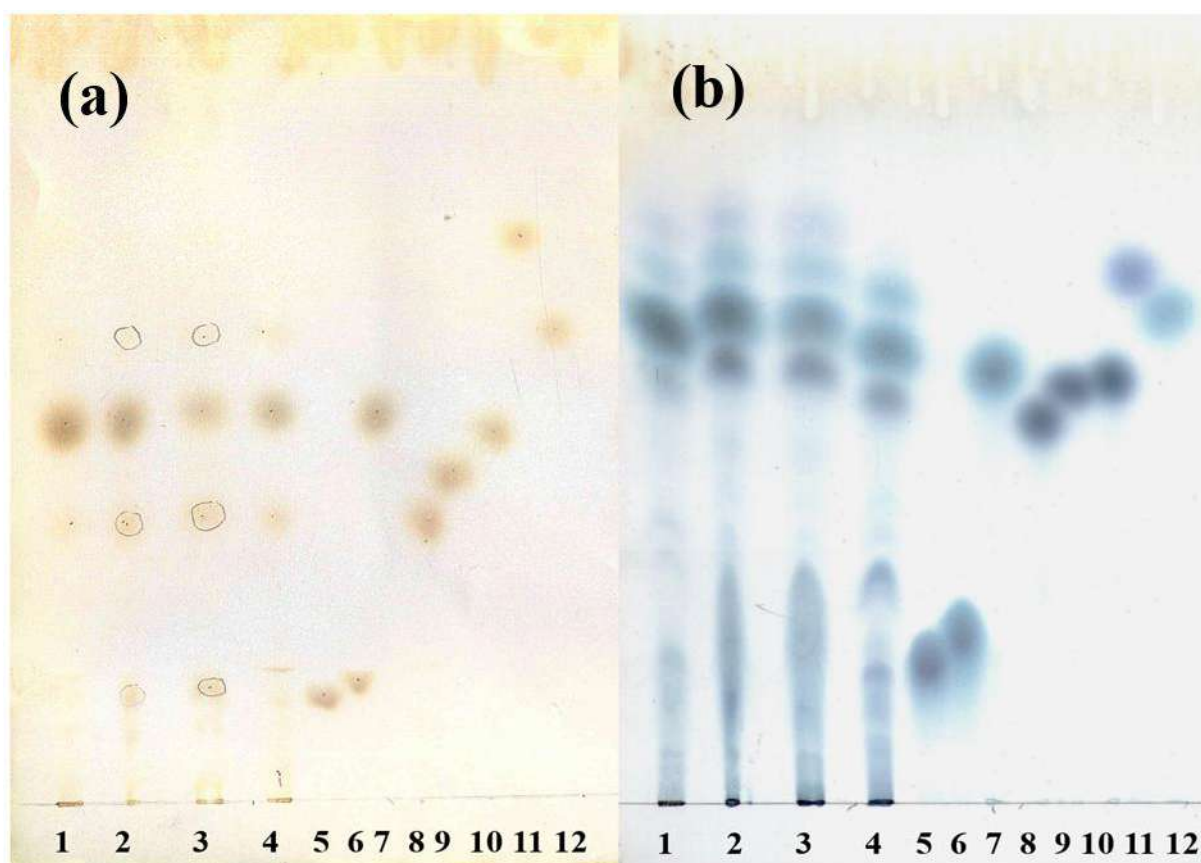
| Longueur d'onde $\text{cm}^{-1}$ | Type de vibration                                                            | Références                                                                |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 3000-3600                        | Vibrations d'élongation des groupements OH                                   | HONG <i>et al.</i> , 2021                                                 |
| 2800-3000                        | Vibrations d'élongation symétrique et asymétrique de la liaison C-H          | GNANASAMBANDAM et PROCTOR, 2000                                           |
| 1750                             | Vibrations d'élongation de la liaison C=O des acides                         | HABIBI, 2004 ; SYNYTSYA <i>et al.</i> , 2010 ; ZHANG <i>et al.</i> , 2015 |
| 1650                             | Vibrations de déformation de l'eau                                           | HABIBI, 2004 ; SYNYTSYA <i>et al.</i> , 2010 ; ZHANG <i>et al.</i> , 2015 |
| 1600                             | Groupe COOH des acides uroniques                                             | YE et LAI, 2015 ; WANG <i>et al.</i> , 2020                               |
| 1420                             | Vibrations de déformation de la liaison C-H                                  | ZHANG <i>et al.</i> , 2015                                                |
| 1000-1100                        | Vibrations d'élongation de la liaison C-C et C-O                             | HABIBI, 2004                                                              |
| 900                              | Vibrations d'élongation et de déformation des liaisons C-O-C, C-C-O et C-C-H | FAN <i>et al.</i> , 2012                                                  |
| 770                              | Vibration d'élongation symétrique des cycles pyranoses                       | LIU <i>et al.</i> , 2014 ; ZHANG <i>et al.</i> , 2015                     |
| 840-920                          | Région anomérique                                                            | HONG <i>et al.</i> , 2021                                                 |
| <800                             | Région squelettique                                                          | HONG <i>et al.</i> , 2021                                                 |

#### III.4.-Composition en monosaccharides

La composition des polysaccharides extraits en monosaccharides constitutifs est déterminée par la chromatographie sur couche mince (CCM), la chromatographie liquide à haute performance (HPLC-RID) et la chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC/SM-EI).

##### III.4.1.-Analyse par chromatographie sur couche mince

Les résultats obtenus après hydrolyse acide par TFA et analyse des hydrolysats de différents extraits par CCM sont présentés dans la figure 25.



**Figure 25.-** (a) Chromatogramme des hydrolysats de ZF, ZG, BA et BAEP obtenus par CCM par le système d'élution 1, (b) Chromatogramme des hydrolysats de ZF, ZG, BA et BAEP, obtenus par CCM par le système d'élution 2, 1: ZG, 2: BA, 3: BAEP, 4: ZF, 5: Acide galacturonique, 6: Acide glucuronique, 7: Arabinose, 8: Galactose, 9: Glucose, 10: Mannose, 11: Rhamnose, 12: Xylose

Les rapports frontaux des étalons et des hydrolysats de polysaccharides sont regroupés dans le tableau VI. Le système d'élution 1 a permis de révéler la présence d'arabinose ( $R_f = 0,463$ ), de galactose ( $R_f = 0,337$ ) et de xylose ( $R_f = 0,560$ ), dans les extraits de polysaccharides des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA et BAEP). Le système d'élution 2 a permis d'identifier la présence d'arabinose ( $R_f = 0,547$ ) et de xylose ( $R_f = 0,612$ ) dans tous les extraits, ainsi la présence de glucose ( $R_f = 0,517$ ) dans ZF et la présence de rhamnose ( $R_f = 0,662$ ) dans ZG, BA et BAEP.

Les deux systèmes d'élution permettent d'identifier la présence d'arabinose et de xylose dans les différents polysaccharides extraits. Le système d'élution 1 permet de révéler la présence de galactose dans tous les extraits. Le système d'élution 2 permet de révéler la présence de rhamnose dans tous les extraits sauf l'extrait des feuilles de *Z. album*. Toutefois, le système 1 a permis d'obtenir une bonne séparation des échantillons et facilite donc leur identification par rapport au système 2.

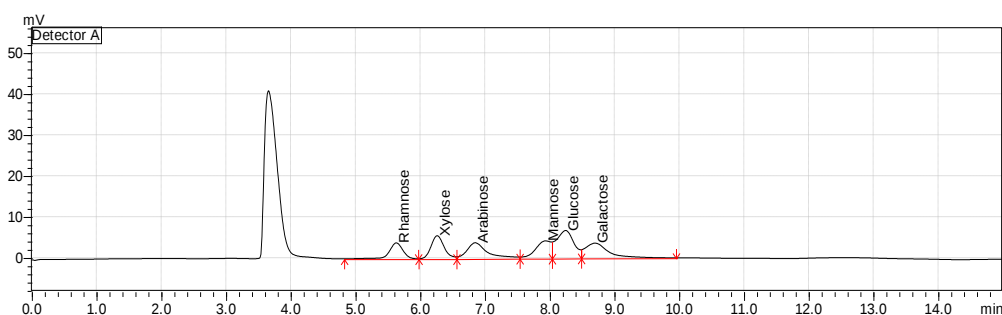
**Tableau VI.-** Rapports frontaux des hydrolysats de polysaccharides hydrosolubles des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA et BAEp) obtenus par CCM

| Rapports frontaux du système 1 |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Etalons                        | Gal A | Glc A | Ara   | Gal   | Glc   | Man   | Rha   | Xyl   |
|                                | 0,126 | 0,138 | 0,463 | 0,337 | 0,397 | 0,439 | 0,692 | 0,560 |
| ZF                             | /     | /     | 0,464 | 0,340 | /     | /     | /     | 0,560 |
| ZG                             | /     | /     | 0,460 | 0,337 | /     | /     | /     | 0,560 |
| BA                             | 0,126 | /     | 0,463 | 0,337 | /     | /     | /     | 0,554 |
| BAEp                           | /     | 0,138 | 0,463 | 0,339 | /     | /     | /     | 0,560 |
| Rapports frontaux du système 2 |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Etalons                        | Gal A | Glc A | Ara   | Gal   | Glc   | Man   | Rha   | Xyl   |
|                                | 0,181 | 0,218 | 0,547 | 0,481 | 0,518 | 0,531 | 0,662 | 0,612 |
| ZF                             | /     | /     | 0,548 | /     | 0,517 | /     | /     | 0,616 |
| ZG                             | /     | /     | 0,547 | /     | /     | /     | 0,661 | 0,614 |
| BA                             | /     | /     | 0,547 | /     | /     | /     | 0,662 | 0,612 |
| BAEp                           | /     | /     | 0,547 | /     | /     | /     | 0,662 | 0,612 |

Gal A: Acide galacturonique, Glc A: Acide glucuronique, Ara: Arabinose, Gal: Galactose, Glc: Glucose, Man: Mannose, Rha: Rhamnose, Xyl: Xylose

#### III.4.2.- Analyse par chromatographie liquide à haute performance

Les figures 26, 27, 28 et 29 présentent les chromatogrammes obtenus par HPLC-RID pour les étalons et l'hydrolysats de ZF, ZG et BA respectivement. Elles indiquent la présence des cinq sucres neutres (arabinose, galactose, xylose, rhamnose et glucose) en proportions différentes, et l'absence de mannose dans tous les extraits testés.



**Figure 26.-**Chromatogramme des étalons obtenu par HPLC-RID

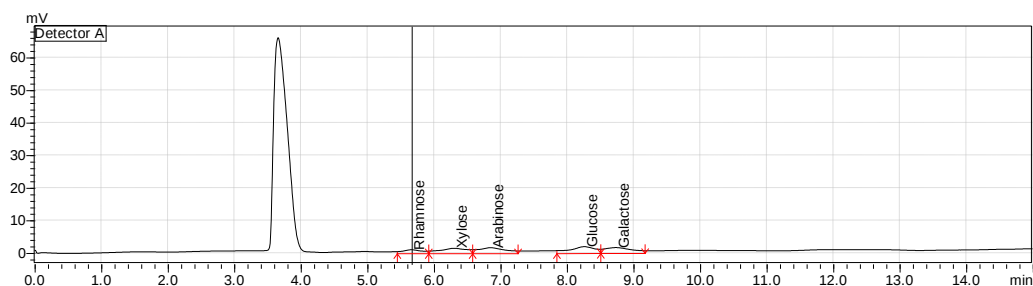


Figure 27 : Chromatogramme de ZF obtenu par HPLC-RID

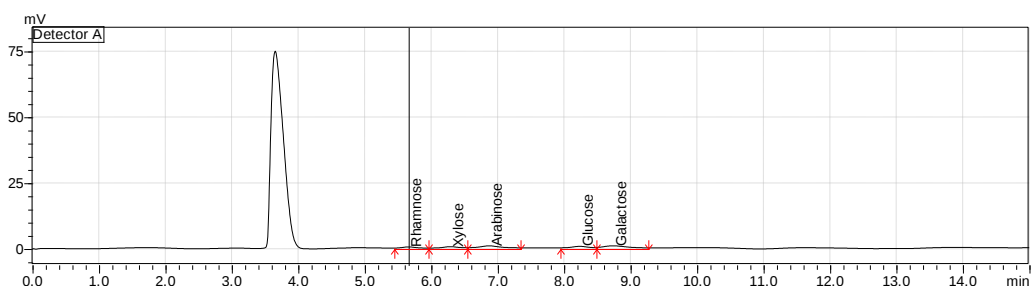


Figure 28.- Chromatogramme de ZG obtenu par HPLC-RID

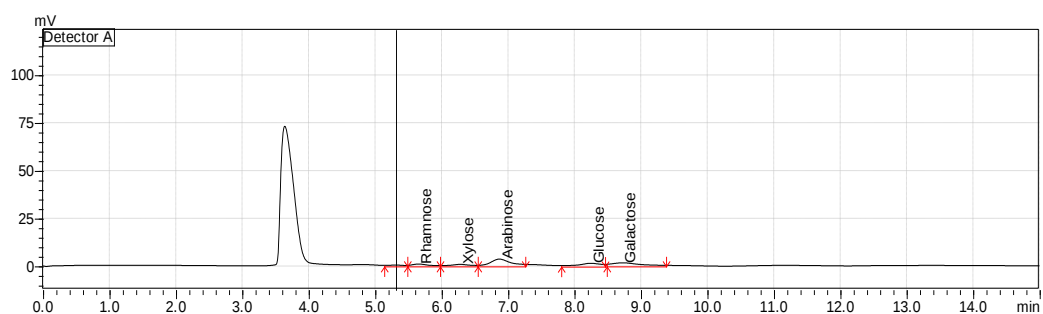


Figure 29.- Chromatogramme de BA obtenu par HPLC-RID

Les temps de rétention obtenus par HPLC-RID des monosaccharides constitutifs de ZF, ZG et BA sont consignés dans le tableau VII.

**Tableau VII.-** Composition osidique de polysaccharides extraits des feuilles (ZF) et des graines de *Z. album* (ZG) et des fruits de *B. aegyptiaca* (BA) obtenu par HPLC-RID

| Extrait | Paramètres  | Composition en monosaccharides |       |       |       |       |
|---------|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|         | calculés    | Ara                            | Gal   | Xyl   | Rha   | Glc   |
| ZF      | $t_R$ (min) | 6,852                          | 8,739 | 6,306 | 5,668 | 8,266 |
|         | (%)         | 20,90                          | 24,16 | 22,88 | 14,71 | 17,34 |
| ZG      | $t_R$ (min) | 6,874                          | 8,741 | 6,290 | 5,660 | 8,241 |
|         | (%)         | 21,64                          | 31,76 | 16,95 | 17,25 | 12,39 |
| BA      | $t_R$ (min) | 6,872                          | 8,725 | 6,283 | 5,654 | 8,251 |
|         | (%)         | 39,89                          | 26,24 | 9,44  | 13,10 | 11,32 |

$t_R$  : temps de rétention, Ara : Arabinose, Gal : Galactose, Xyl : Xylose, Rha : Rhamnose, Glc : Glucose

L'analyse des extraits par HPLC-RID, révèle la présence d'arabinose (20,90%), de galactose (24,16%), de xylose (22,88%), de rhamnose (14,71%) et de glucose (17,34%) pour l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album*, et d'arabinose (21,64%), de galactose (31,76%), de xylose (16,95%), de rhamnose (17,25%) et de glucose (12,39%) pour l'extrait polysaccharidique de graines de *Z. album*. Les deux extraits présentent donc une composition similaire en monosaccharides constitutifs.

ZOU *et al.* (2014) ont signalé une composition osidique en arabinose (23,6%), en galactose (25,4%) et en xylose (23,9%) dans les polysaccharides des feuilles de *Terminalia macroptera* (Combretaceae), proche à celle obtenu pour l'extrait des feuilles de *Z. album*. MZOUGH *et al.* (2018b) ont rapporté la prédominance d'arabinose (48,63%) et de galactose (29,42%) dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Suaeda fruticosa* (Chenopodiaceae), et la prédominance d'arabinose (66,68%) dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Arthrocnemum indicum* (Amaranthaceae). TEKA *et al.* (2022) ont signalé la prédominance de glucose (41,78%) et de mannose (32,87%) dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles d'*Allium roseum* (Liliaceae).

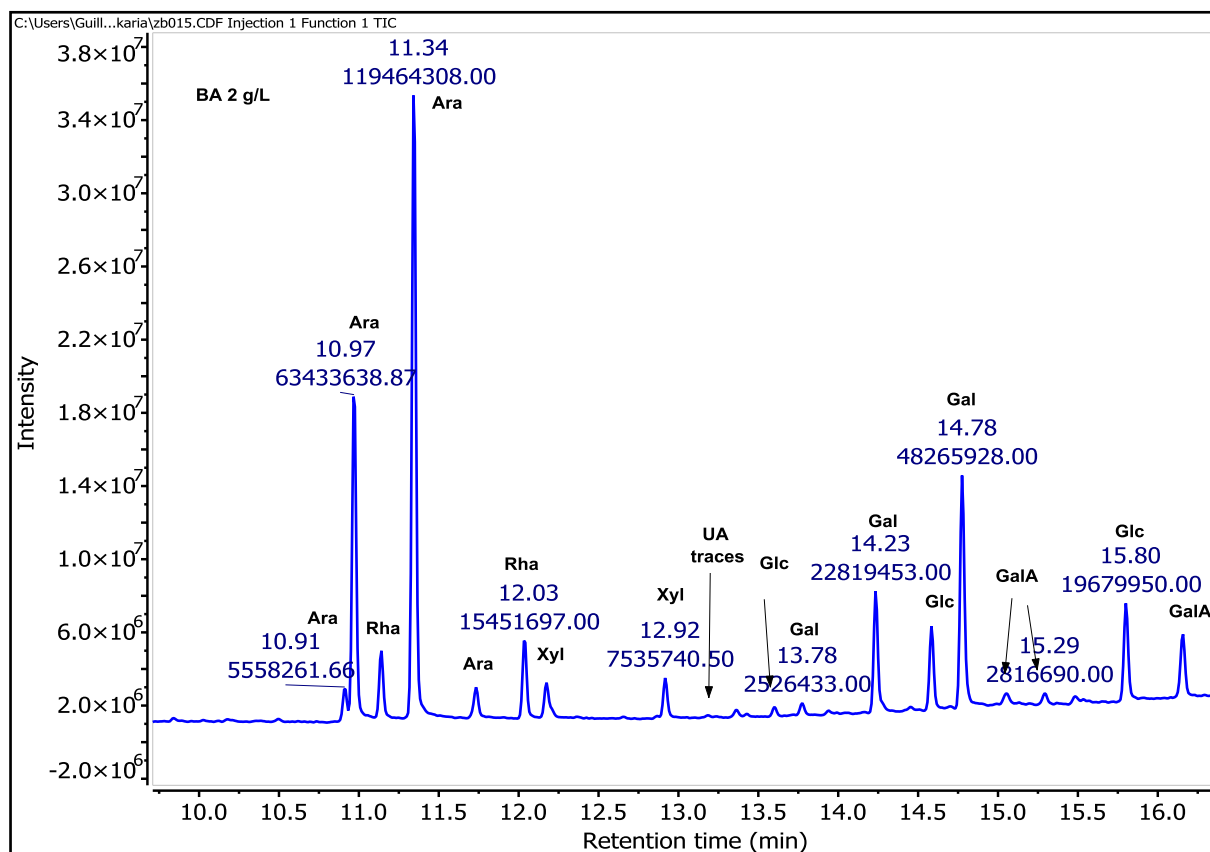
Le galactose et l'arabinose sont les sucres majoritaires dans ZF et ZG. Les polysaccharides hydrosolubles des feuilles et des graines de *Z. album* semblent constitués principalement des arabinogalactanes, qui sont des polymères structuraux essentiels dans la paroi cellulaire végétale (CIPRIANI *et al.*, 2006). Ils se trouvent dans des différentes parties de la plante, notamment les graines, les feuilles, les tiges, les fleurs, les fruits et les racines (SAEIDY *et al.*, 2021). Les arabinogalactanes sont des polysaccharides ramifiés, constitués des unités de  $\beta$ -D-galactopyranose (dans la chaîne principale) et de  $\alpha$ -L-arabinofuranose (dans la chaîne latérale). Des résidus de rhamnose, de glucose, d'acide galacturonique et de xylose peuvent également être présents (SAEIDY *et al.*, 2021). Ce type de hétéropolysaccharides peut être présent en tant que constituant des pectines. Ils peuvent aussi être associés à des protéines (CIPRIANI *et al.*, 2006).

L'analyse de l'hydrolysât de l'extrait polysaccharidique des fruits de *B. aegyptiaca* par HPLC-RID indique la présence de 39,89% d'arabinose, 26,24% de galactose, 9,44% de xylose, 13,10% de rhamnose et 11,32% de glucose. D'après ces résultats, l'arabinose suivi par le galactose présente les sucres neutres majoritaires dans cet extrait.

Bien que HPLC-RID est une méthode simple et rapide pour identifier et quantifier les oses constitutifs de polysaccharides extraits (XU *et al.*, 2014) et permet d'analyser les monosaccharides sans dérivation (ZHAO *et al.*, 2024), elle est moins sensible surtout lorsque le détecteur de type RID est utilisé (AGBLEVOR *et al.*, 2007 ; LIU *et al.*, 2021). En plus, cette méthode ne permet pas d'identifier les acides uroniques. De ce fait, la dérivation des monosaccharides est indispensable pour obtenir une détection très sensible.

### III.4.3.-Analyse par chromatographie phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse

La composition de l'extrait polysaccharidique des fruits de *B. aegyptiaca* en monosaccharides constitutives est confirmée par la chromatographie en phase gazeuse. Cette technique se caractérise par une résolution et une sensibilité élevée et un couplage aisé à différents détecteurs, y compris de la spectrométrie de masse, qui fournit des informations structurales assez complètes (RUIZ-MATUTE *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2024). Les résidus glycosidiques sont obtenus après hydrolyse acide par TFA et une triméthylsilylation. Le chromatogramme de BA obtenu par GC/SM-EI est présenté dans la figure 30.



**Figure 30.-** Chromatogramme de BA obtenu par GC/SM-EI

D'après l'analyse de GC/SM-EI, l'extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* est constitué principalement de 34,06% d'acide galacturonique, 27,82% d'arabinose, 15,63% de galactose, 9,71% de glucose, mais aussi de xylose (7,04%) et de rhamnose (5,74%), qui apparaissent comme des sucres minoritaires et des traces d'acide glucuronique (tableau VIII). Ces résultats confirment celles obtenus par HPLC-RID, qui montrent la présence de cinq sucres neutres (arabinose, galactose, glucose, xylose et rhamnose) et l'absence de mannose dans BA.

L'acide galacturonique et l'arabinose sont les sucres majoritaires dans BA. D'après ces résultats, l'extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* est constitué principalement des pectines. Sa composition osidique est en concordance avec celle évoquée par la bibliographie, qui montre l'abondance des polysaccharides de nature pectique dans les fruits (COMBO, 2011).

Les pectines sont les composants majeurs de la paroi cellulaire primaire des plantes supérieures (WILLATS *et al.*, 2001). Ces hétéropolysaccharides sont composés principalement des unités d'acide  $\alpha$ -D-galacturonique reliés en  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) et de certains résidus glycosylés neutres, tels que  $\alpha$ -L-arabinofuranose,  $\beta$ -D-galactopyranose et  $\alpha$ -L-rhamnopyranose (YAPO, 2011). Les résidus d'acide galacturonique sont partiellement acétylés ou estérifiés par des groupes méthyles. Les pectines sont constituées d'une association de différents polysaccharides, présentés par les homogalacturonanes, les rhamnogalacturonanes, les xylogalacturonanes, les arabinanes, les galactanes et les arabinogalactanes (COMBO *et al.*, 2011).

**Tableau VIII.-** Composition osidique de BA obtenu par GC/SM-EI

| Monosaccharides<br>identifiés | Ratio molaire<br>(%) | Ratio massique<br>(%) |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Arabinose                     | 27,82                | 24,07                 |
| Rhamnose                      | 5,74                 | 5,43                  |
| Galactose                     | 15,63                | 16,23                 |
| Glucose                       | 9,71                 | 10,07                 |
| Acide galacturonique          | 34,06                | 38,11                 |
| Xylose                        | 7,04                 | 6,09                  |
| Fucose                        | Absent               | Absent                |
| Mannose                       | Absent               | Absent                |
| Acide glucuronique            | Traces               | Traces                |
| Ribose                        | Absent               | Absent                |
| Glucosamine                   | Absent               | Absent                |
| Galactosamine                 | Absent               | Absent                |

FERIANI *et al.* (2020) ont rapporté que l'acide galacturonique (31,21-41,15%) et l'arabinose (40,55-42,03%) sont les sucres majoritaires dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Schinus terebinthifolius* et *Schinus molle* (Anacardiaceae). DOU *et al.* (2019) ont noté la prédominance de l'acide galacturonique (81,71-83,53%) dans les différentes fractions de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Rubus* (Rosaceae). YANG *et al.* (2020) ont rapporté la prédominance d'arabinose (51,43%) dans la fraction PMBP des polysaccharides extraits par micro-ondes de fruits de *Ribes nigrum* (Grossulariaceae). RJEIBI *et al.* (2019) ont signalé la prédominance de glucose (41,4%) et d'acide galacturonique (30,5%) dans les polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Nitraria retusa* (Zygophyllaceae). Toutefois, NI *et al.* (2013) ont mentionné la prédominance de glucose (70,6%) dans les polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Nitraria tangutorum* (Zygophyllaceae). GU *et al.* (2021) ont rapporté aussi la prédominance de glucose (60,14%) dans les polysaccharides alcali-solubles des fruits d'*Annona squamosa* (Annonaceae).

La variation dans la composition osidique des polysaccharides peut être expliquée par l'hétérogénéité de la matière première, du protocole d'extraction, de la méthode de purification, de la technique d'hydrolyse et d'analyse des monosaccharides (HAMMI *et al.*, 2016 ; LI *et al.*, 2018b).

Ainsi, la méthode d'extraction des polysaccharides influence fortement la composition en monosaccharides (JIA *et al.*, 2020). L'analyse de la composition osidique des polysaccharides de *Stigma maydis* (Poaceae) extraits par l'eau chaude (CSPw), l'acide chlorhydrique (0,1 M) (CSPc), l'hydroxyde de sodium (0,1 M) (CSPa) et les ultrasons (CSPu), montre une grande variabilité dans la composition en monosaccharides. En effet, l'arabinose et le glucose sont les sucres majoritaires dans CSPw et CSPu, tandis que le xylose est le principal sucre constitutif de CSPc et l'arabinose avec le xylose sont les sucres majoritaires dans CSPa (JIA *et al.*, 2020). L'étude de CHEN *et al.* (2020b) sur les polysaccharides des tiges et des feuilles de *Zingiber officinale* Roscoe. (Zingiberaceae) extraits par l'eau chaude (HWE-GSLP), les ultrasons (UAE-GSLP), la solution alcaline (ASE-GSLP) et les enzymes (EAE-GSLP) ont rapporté qu'EAE-GSLP présente une composition osidique différente, dont les teneurs en galactose (15,31%) et en rhamnose (9,63%) sont inférieures aux autres extraits, alors que la teneur en xylose est élevée (27,94%) par rapport aux autres extraits (allant de 5 à 7%).

Les principales difficultés dans l'analyse des polysaccharides en monosaccharides constitutives résident dans la complexité structurale des polysaccharides, la similitude dans la structure moléculaire des monosaccharides et l'optimisation des conditions d'hydrolyse (LIU *et al.*, 2021). ZHAO *et al.* (2024) signalent que les conditions d'hydrolyse, y compris l'hydrolyse acide en une et deux étapes, influence significativement l'analyse de la composition en monosaccharides. Ainsi, l'étude de l'effet des conditions d'hydrolyse sur la composition osidique de l'inuline, des pectines et des polysaccharides extraits de *Lycium barbarum* (Solanaceae) et *Codonopsis pilosula* (Campanulaceae), montre que la teneur en acide galacturonique a été augmenté après hydrolyse par l'acide chlorhydrique (2 M)-méthanol à 80°C pendant 16 h, suivi de l'hydrolyse par TFA de 2 M à 120°C pendant 1 h. L'hydrolyse acide en une étape (TFA 2 M / 90°C/ 8 h) est généralement insuffisante pour l'estimation de la composition osidique des polysaccharides acides (ZHAO *et al.*, 2024).

La détermination de la composition des monosaccharides est essentielle pour la caractérisation structurale des polysaccharides et pour mieux comprendre la relation entre la structure et l'activité biologique des polysaccharides (LIU *et al.*, 2021 ; ZHAO *et al.*, 2024).

### III.5.- Activités biologiques des polysaccharides

La présente étude vise à évaluer le potentiel antioxydant, anti-hyperglycémiant et anti-inflammatoire de polysaccharides hydrosolubles extraits des feuilles et des graines de *Z. album* et des fruits de *B. aegyptiaca*.

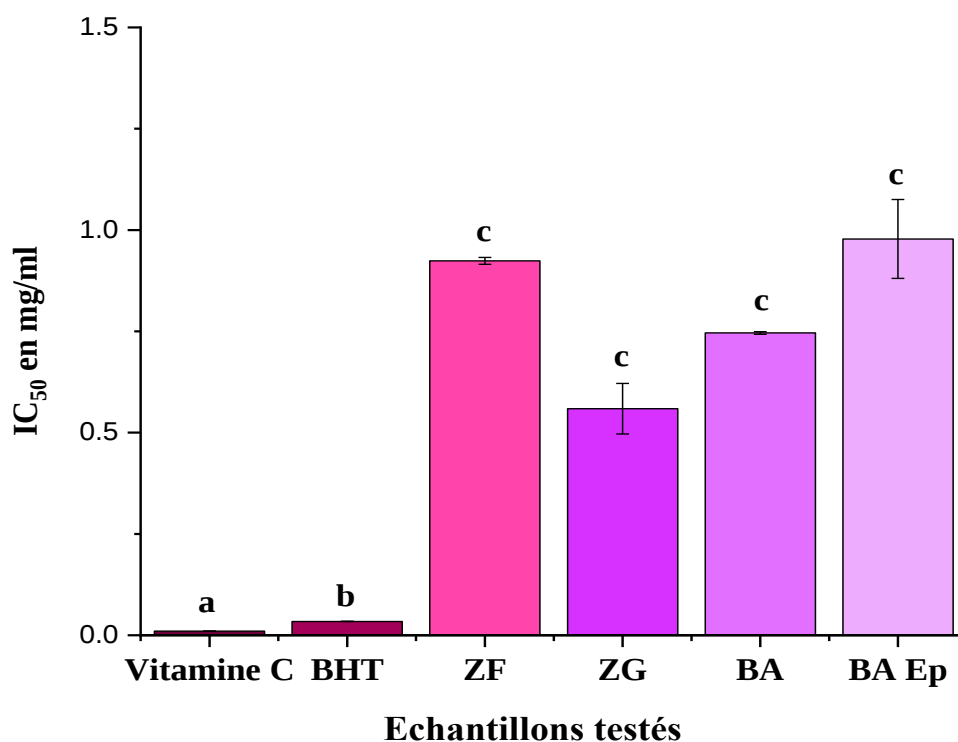
#### III.5.1.- Activité antioxydante

Afin d'estimer le potentiel des polysaccharides de *Z. album* et de *B. aegyptiaca* comme des antioxydants naturels, cinq tests ont été réalisés ; le test de piégeage du radical DPPH•, le test de piégeage du radical ABTS•+, le test de piégeage du radical OH•, la capacité antioxydante totale et le pouvoir réducteur de fer.

### III.5.1.1.- Test de piégeage du radical DPPH•

Les extraits ZF et ZG des polysaccharides de *Z. album* présentent une  $IC_{50}$  de l'ordre de  $0,924 \pm 0,008$  mg/ml et  $0,559 \pm 0,062$  mg/ml respectivement. Tandis que, les extraits BA et BAEp des polysaccharides de *B. aegyptiaca* présentent des  $IC_{50}$  de l'ordre de  $0,745 \pm 0,003$  mg/ml et  $0,977 \pm 0,097$  mg/ml respectivement. Les résultats obtenus montrent que tous les extraits testés sont dotés d'un pouvoir antioxydant contre le radical DPPH•, mais leur activité antiradicalaire est nettement inférieure à celle de l'acide ascorbique ( $IC_{50} = 0,009 \pm 6,853E-05$  mg/ml) et du BHT ( $IC_{50} = 0,033 \pm 0,000$  mg/ml).

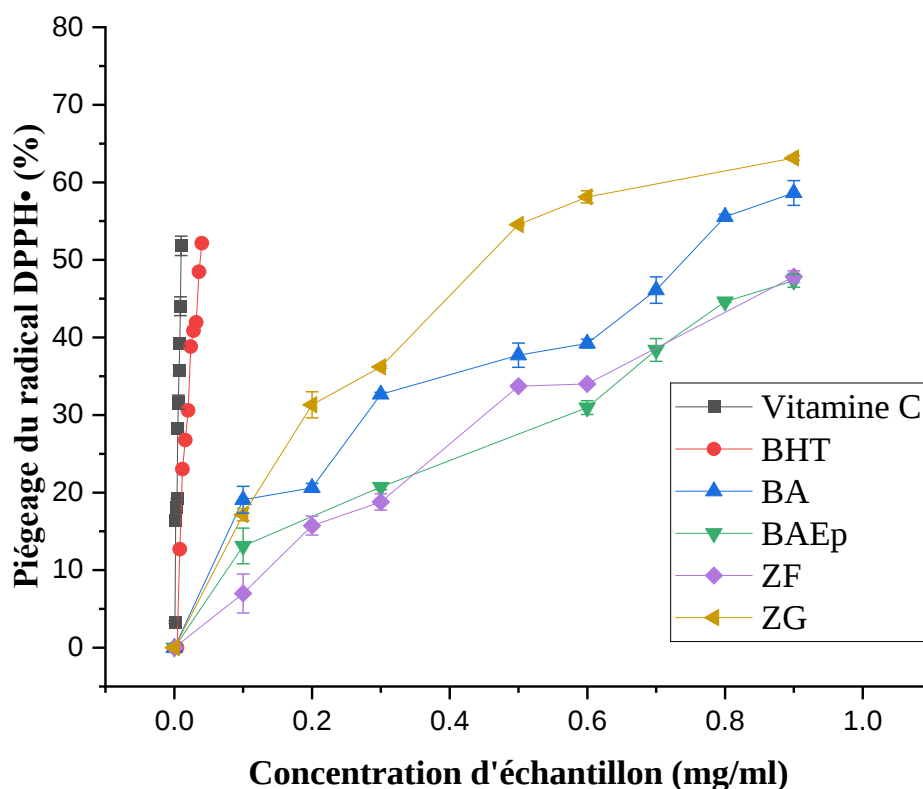
Dans l'ensemble, il n'existe pas une différence significative dans le pouvoir d'inhibition du radical DPPH• entre ZF, ZG, BA et BAEp ( $P > 0,05$ ) (fig. 31). Toutefois, il existe une différence significative entre l'activité anti-radicalaire des extraits testés, l'acide ascorbique et du BHT ( $P < 0,05$ ).



**Figure 31.-**  $IC_{50}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test de piégeage du radical DPPH•, a, b et c présentent les groupes statistiques significativement différentes ( $P < 0,05$ )

Le taux de piégeage du radical DPPH• obtenu par ZG soit 74,59% à la concentration de 1 mg/ml par rapport de ZF, dont le pourcentage d'inhibition soit 52,60% à la même concentration (fig. 32). Les résultats obtenus pour l'extrait polysaccharidique des graines de *Z. album* (74,59%) sont proches à l'activité anti-radicalaire de l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Plantago notata* (Plantaginaceae), dont le pourcentage d'inhibition de DPPH• soit 72,16 % à la concentration de 1 mg/ml (BENAOUN, 2017). HAFSA *et al.* (2018) ont noté un pourcentage

d'inhibition de DPPH• égale 93,2% à la concentration de 10 mg/ml, obtenu par les polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Carpobrotus edulis* L. (Aizoaceae). Le pourcentage d'inhibition de DPPH• obtenu par l'extrait WPL de polysaccharides hydrosolubles des feuilles d'*Allium roseum* (Liliaceae) soit 73,66% à la concentration de 3 mg/ml (TEKA *et al.*, 2022). Le pouvoir d'inhibition du radical DPPH• de ces extraits semble inférieur à celle trouvé pour l'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album*.



**Figure 32.-** Pouvoir d'inhibition du radical DPPH• des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH• obtenu par BA soit 69,32% à la concentration de 1 mg/ml par rapport de BAEP, dont le pourcentage d'inhibition soit 42,48% à la même concentration (fig. 32). Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH• de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Nitraria retusa* (Zygophyllaceae) et des fruits de *Crataegus azarolus* (Rosaceae) soient 77,72% et 83,2% respectivement, à la concentration de 4 mg/ml (RJEIBI *et al.*, 2019; RJEIBI *et al.*, 2020). Les pourcentages d'inhibition du radical DPPH• de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Ziziphus jujuba* Mill. (Rhamnaceae) soient 52,35% et 53,45% pour l'extrait PZMP1 et PZMP2 respectivement, à la concentration de 3 mg/ml (JI *et al.*, 2020). CHEN *et al.* (2020) ont rapporté un pourcentage d'inhibition de DPPH• de l'ordre de 69,5% à la concentration de 5 mg/ml, obtenu par l'extrait CPPH de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Crataegus pinnatifida* Bunge. (Rosaceae). BOUGATEF *et al.* (2023) ont noté un pourcentage d'inhibition de 97,09% à la concentration de 5 mg/ml, pour les polysaccharides hydrosolubles de

fruits d'*Adansonia digitata* (Bombacaceae). L'activité anti-radicalaire de ces extraits semble inférieure à celle trouvée par les extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.

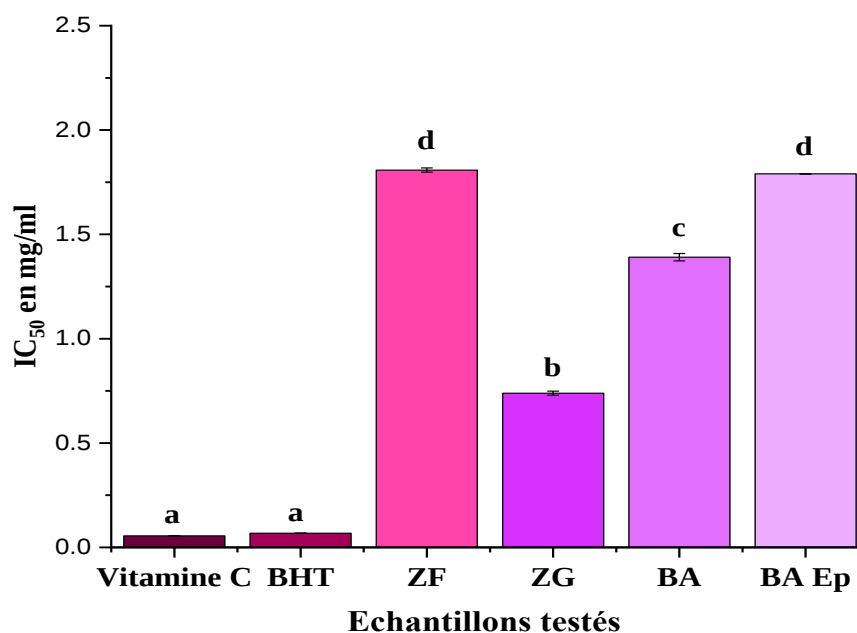
Le DPPH• était le radical libre le plus utilisé pour déterminer l'activité antioxydante des polysaccharides (MIRZADEH *et al.*, 2020 ; ZHONG *et al.*, 2019). Le piégeage des radicaux libres par des antioxydants est attribué de deux types de mécanismes ; soit la libération de l'atome d'hydrogène du groupement hydroxyle ou la libération d'un électron (POPOVICI *et al.*, 2009). En effet, les polysaccharides fournissent de l'hydrogène ou des électrons aux radicaux libres DPPH pour former des molécules stables (DPPH-H) (ZHONG *et al.*, 2019). Nombreux polysaccharides végétaux ont déjà été signalés pour leur capacité de piégeage du DPPH•, tels que les pectines, le dextrane et la gomme de guar, qui sont connus par leur activité antioxydante notable (WANG *et al.*, 2017).

La capacité de piégeage du DPPH• par les polysaccharides est fortement liée à leur teneur en acides uroniques. L'acide uronique est donc considéré comme une des principales caractéristiques structurales reflétant l'activité antioxydante des polysaccharides (SCHEPETKIN et QUINN, 2011 ; WANG *et al.*, 2016 ; MOHANTA *et al.*, 2022). En effet, les polysaccharides acides comme les pectines et les alginates riches en acides uroniques sont généralement des puissants antioxydants (WANG *et al.*, 2016). Le poids moléculaire faible peut également intensifier le potentiel des polysaccharides dans le piégeage du DPPH• (MIRZADEH *et al.*, 2020). Les polysaccharides de faible poids moléculaire peuvent réagir facilement avec les espèces radicalaires en raison de la disponibilité de leurs groupes fonctionnels (WANG *et al.*, 2016 ; ZHONG *et al.*, 2019 ; MOHANTA *et al.*, 2022). De nombreuses méthodes physiques, chimiques ou enzymatiques ont été utilisées pour l'hydrolyse partielle des polysaccharides et la réduction de leur poids moléculaire, ce qui s'est avérée renforcer leur activité antioxydante (WANG *et al.*, 2016 ; MOHANTA *et al.*, 2022).

#### III.5.1.2.- Test de piégeage du radical ABTS•+

Les extraits ZF et ZG des polysaccharides de *Z. album* présentent des IC<sub>50</sub> de l'ordre de 1,808 ± 0,010 mg/ml et 0,738 ± 0,009 mg/ml respectivement. Tandis que, les extraits BA et BAEp des polysaccharides de *B. aegyptiaca* présentent des IC<sub>50</sub> de l'ordre de 1,390 ± 0,018 mg/ml et 1,790 ± 0,001 mg/ml respectivement. D'après les résultats, l'extrait polysaccharidique des graines de *Z. album* présente un pouvoir inhibiteur du radical ABTS•+ appréciable, comparativement au ZF, BA et BAEp.

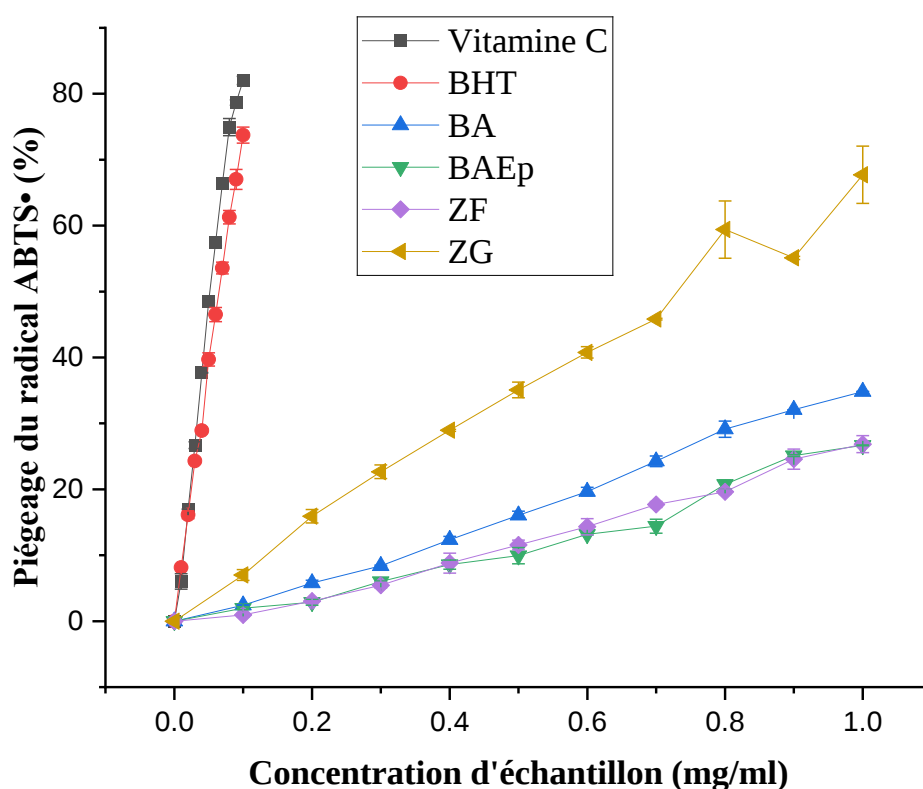
Il n'existe pas une différence significative dans le pouvoir d'inhibition d'ABTS•+ de ZF et BAEp ( $P > 0,05$ ), et dans le pouvoir d'inhibition d'ABTS•+ de l'acide ascorbique (IC<sub>50</sub> = 0,054 ± 0,001 mg/ml) et du BHT (IC<sub>50</sub> = 0,068 ± 0,001 mg/ml) ( $P > 0,05$ ) (fig. 33). Toutefois, il existe une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre l'activité antiradicalaire de chaque extrait polysaccharidique et l'acide ascorbique ou du BHT.



**Figure 33.-** IC<sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT obtenus par le test de piégeage du radical ABTS•+, a, b, c et d présentent les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ )

À la concentration de 1 mg/ml, l'extrait ZG a montré une grande capacité à inhiber le radical ABTS•+ (67,71%), par rapport à l'extrait ZF qui présente un pourcentage d'inhibition faible (26,84%) pour la même concentration (fig. 34). HE *et al.* (2018) ont rapporté que l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Moringa oleifera* (Moringaceae) présente des pourcentages d'inhibition variant entre 3,42 et 89,90%, dans un intervalle de concentration entre 0,125 et 4,0 mg/ml. Les pourcentages d'inhibition d'ABTS•+ par l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Suaeda fruticosa* (Chenopodiaceae) et des feuilles de *Spinacia oleracea* (Chenopodiaceae) soient 69% et 70,12% à la concentration de 10 mg/ml (MZOUGH *et al.*, 2018; MZOUGH *et al.*, 2019). Le pouvoir d'inhibition du radical ABTS•+ de ces extraits semble inférieur à celui d'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album*.

Les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* sont dotés d'une bonne activité antiradicalaire contre le radical ABTS•+, à la concentration de 3,6 mg/ml. Les pourcentages d'inhibition du radical ABTS•+ varient entre 10,90-89,92% pour BA et entre 2,02-72,99% pour BA Ep, dans un intervalle de concentration allant de 0,4 à 3,6 mg/ml. DHAHRI *et al.* (2023) ont noté des pourcentages d'inhibition du radical ABTS•+ égales  $55,52 \pm 2,79\%$  et  $89,15 \pm 0,08\%$  pour les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits et des graines de *Phoenix dactylifera* L. (Arecaceae) respectivement, à la concentration de 5 mg/ml. AMAMOU *et al.* (2020) ont signalé un pourcentage d'inhibition du radical ABTS•+ de l'ordre de 31,57% à la concentration de 10 mg/ml, pour l'extrait PPN de polysaccharides hydrosolubles d'écorces des fruits d'*Opuntia macrorhiza* (Cactaceae). Le pouvoir d'inhibition du radical ABTS•+ de ces extraits semble inférieur à ceux des extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.



**Figure 34.-** Pouvoir d'inhibition du radical ABTS•+ des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT

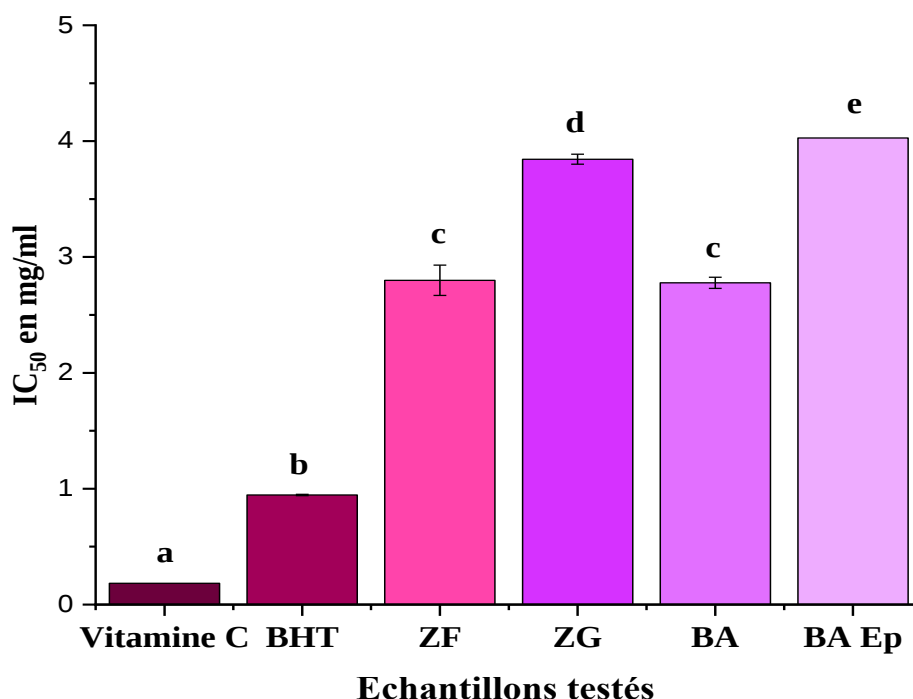
L'ABTS•+ est le radical le plus adapté à l'évaluation d'activité antioxydante des composés hydrophiles par rapport aux autres radicaux libres comme le DPPH•. Le poids moléculaire faible et la teneur élevée en acides uroniques contribuent à l'augmentation de l'inhibition du radical ABTS•+ par les polysaccharides (MIRZADEH *et al.*, 2020).

L'abondance des groupes fonctionnels (groupes hydroxyles, carboxyles ou sulfatés) dans la structure des polysaccharides permet aussi d'améliorer l'activité de piégeage des radicaux ABTS•+ (MIRZADEH *et al.*, 2020). Par exemple, la présence d'un groupement sulfate dans le polysaccharide permet d'activer l'hydrogène sur le carbone anomérique, d'améliorer la capacité d'approvisionnement en hydrogène du polysaccharide, d'améliorer la solubilité dans l'eau et de renforcer par conséquent son activité antioxydante (ZHONG *et al.*, 2019). Le taux du sulfate élevé dans les polysaccharides augmente leur activité antioxydante (SCHEPETKIN et QUINN, 2011 ; ZHONG *et al.*, 2019). Il permet d'éliminer efficacement les radicaux libres, et se lier aux catalyseurs d'ions métalliques pour inhiber la production continue des radicaux et d'inhiber la peroxydation des lipides (WANG *et al.*, 2016).

### III.5.1.3.- Test de piégeage du radical OH•

ZF et ZG présentent des IC<sub>50</sub> soient de 2,79 ±0,1311 mg/ml et 3,84 ±0,043 mg/ml respectivement, avec une différence très hautement significative entre les deux extraits (P < 0,001).

BA présente un pouvoir de piégeage du radical  $\text{OH}\cdot$  supérieur à celui de BAEp, avec une  $\text{IC}_{50}$  ( $2,77 \pm 0,048$  mg/ml) inférieure de celui de BAEp ( $4,02 \pm 0,000$  mg/ml) et une différence très hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,001$ ). Les extraits polysaccharidiques bruts présentent des activités antiradicalaires contre le radical  $\text{OH}\cdot$ , mais ces activités restent inférieures à celles de la vitamine C ( $0,18 \pm 0,000$  mg/ml) et de BHT ( $0,94 \pm 0,006$  mg/ml). En comparant les  $\text{IC}_{50}$  des extraits testés, il n'existe pas une différence significative entre l'activité anti-radicalaire de ZF et de BA ( $P > 0,05$ ) (fig. 35). Toutefois, il existe une différence hautement significative entre l'activité antiradicalaire de chaque extrait polysaccharidique et l'acide ascorbique ou du BHT ( $P < 0,01$ ).

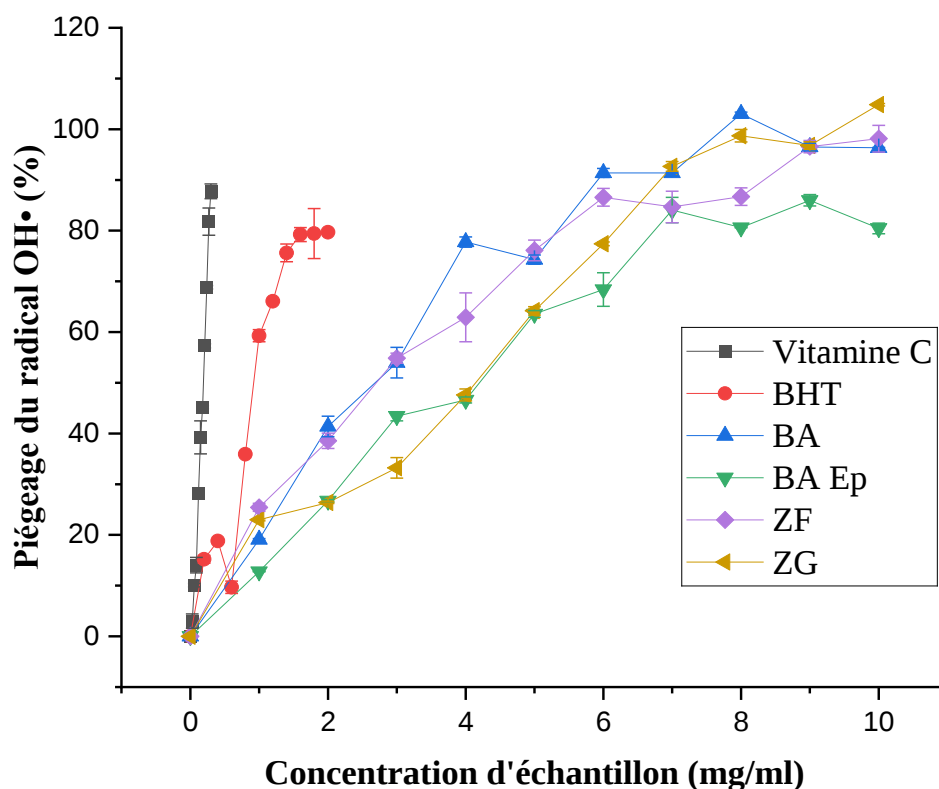


**Figure 35.-**  $\text{IC}_{50}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test de piégeage du radical  $\text{OH}\cdot$ , a, b, c, d et e présentent les groupes statistiques significativement différentes ( $P < 0,05$ )

Il apparaît que les pourcentages d'inhibition du radical  $\text{OH}\cdot$  présente la même allure pour ZF (25,43-98,14%) et ZG (22,99-104,83%) dans une gamme de concentrations allant de 1 à 10 mg/ml (fig.36). A la concentration de 10 mg/ml, le pourcentage d'inhibition du radical hydroxyle obtenu par l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Gynura bicolor* (Asteraceae) soit 90%, proche à celui d'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album* (YAN *et al.*, 2014).

A la concentration de 10 mg/ml, les extraits de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* présentent des pourcentages d'inhibitions fortes de l'ordre de 96,33% et 80,44% pour BA et BAEp respectivement (fig. 36). JI *et al.* (2020) ont enregistré un pourcentage d'inhibition contre le radical  $\text{OH}\cdot$  de 60,23% à la concentration de 3 mg/ml pour l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Ziziphus jujuba* Mill. (Rhamnaceae). SONG *et al.* (2023) ont signalé un pourcentage d'inhibition contre le radical  $\text{OH}\cdot$  de 45,90% pour l'extrait NRFP-3 de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Nitraria retusa* (Zygophyllaceae), à la concentration de 1 mg/ml.

ABUDUWAILI *et al.* (2021) ont rapporté un pourcentage d'inhibition de 90,81% à la concentration à 1 mg/ml, pour l'extrait brut NSP de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Nitraria sibirica* (Zygophyllaceae). Le pouvoir d'inhibition du radical hydroxyle de ces extraits semble supérieur à celui des extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.



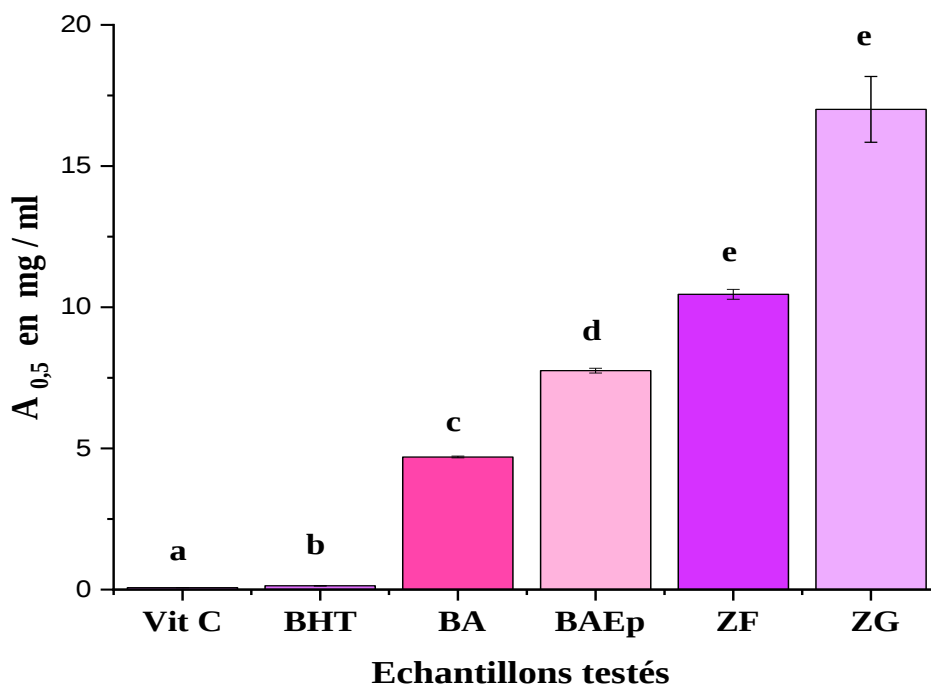
**Figure 36.-** Pouvoir d'inhibition du radical OH• des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT

Le pouvoir du piégeage de radical OH• est fortement associé à la capacité de chélation du fer par les polysaccharides (LIU *et al.*, 2016; MIRZADEH *et al.*, 2020). En effet, les ions de métaux de transition comme le fer et le cuivre pourraient catalyser la génération des radicaux hydroxyles extrêmement réactifs à partir du superoxyde et du peroxyde d'hydrogène. Les polysaccharides peuvent donc empêcher la génération de radicaux libres à partir des ions métalliques plutôt que de les piéger (WANG *et al.*, 2016).

WU *et al.* (2014) ont noté que la présence d'arabinose dans la structure des polysaccharides réduit la production des radicaux hydroxyles par chélation du  $\text{Fe}^{2+}$ . Le pouvoir du piégeage de radical OH• par les extraits polysaccharidiques des feuilles et des graines de *Z. album* et l'extrait de fruits de *B. aegyptiaca* semble dû à leur teneur appréciable en arabinose, qui est de l'ordre de 20,90%, 21,64% et 27,82% respectivement. Par ailleurs, la teneur en protéines dans les extraits de polysaccharides semble contribuer au piégeage direct des radicaux hydroxyles (WANG *et al.*, 2016).

### III.5.1.4.- Pouvoir réducteur des ions ferriques

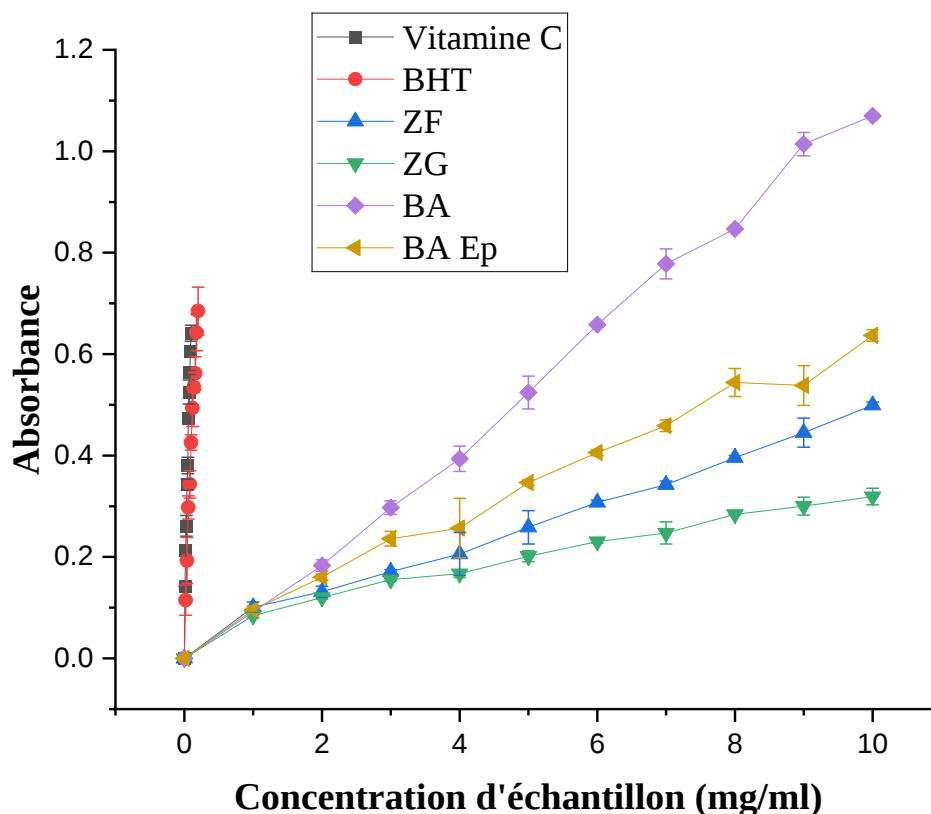
Les extraits polysaccharidiques de *B. aegyptiaca* présentent une  $A_{0,5}$  de l'ordre de  $4,69 \pm 0,031$  mg/ml et  $7,75 \pm 0,085$  mg/ml pour BA et BAEP respectivement, avec une différence significative dans la valeur d' $A_{0,5}$  ( $P < 0,05$ ) entre les deux extraits. Tandis que les extraits polysaccharidiques de *Z. album* présentent une  $A_{0,5}$  de l'ordre de  $10,46 \pm 0,175$  mg/ml et  $17,01 \pm 1,165$  mg/ml pour ZF et ZG respectivement. Il n'existe pas une différence significative dans la valeur d' $A_{0,5}$  entre les deux extraits ( $P > 0,05$ ).



**Figure 37.-**  $A_{0,5}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT obtenus dans le test du pouvoir réducteur des ions ferriques, a, b, c, d et e présentent les groupes statistiques significativement différentes ( $P < 0,05$ )

D'après les résultats enregistrés, les différents extraits polysaccharidiques sont dotés d'un pouvoir réducteur du fer qui reste inférieure à la vitamine C et au BHT, dont les valeurs d' $A_{0,5}$  sont de  $0,07 \pm 0,001$  mg/ml et  $0,13 \pm 0,007$  mg/ml respectivement. En comparant les différents extraits, l'extrait BA présente  $A_{0,5}$  la plus faible (fig. 37) et donc le meilleur pouvoir réducteur des ions ferriques.

Une augmentation très rapide dans l'absorbance de la vitamine C et de BHT a été observée à des concentrations allant de 0,02 à 0,2 mg/ml. Tandis que l'absorbance a été augmenté progressivement avec l'augmentation de la concentration de l'extrait testé (fig. 38). L'augmentation de l'absorbance dans BA est plus rapide que les autres extraits dans un intervalle de concentrations de 1 à 10 mg/ml.



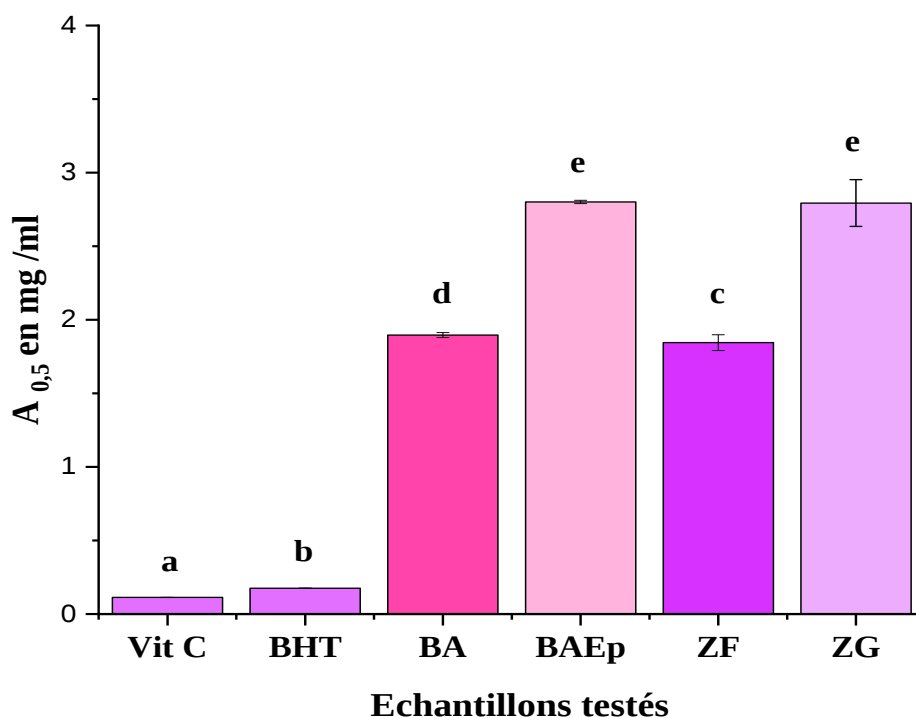
**Figure 38.-** Pouvoir réducteur des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de vitamine C et du BHT

Le pouvoir réducteur d'un extrait est un indicateur significatif sur son potentiel antioxydant (BOUGANDOURA et BENDIMERAD, 2013). Le pouvoir réducteur de polysaccharides est probablement dû à la présence des groupements hydroxyles et carboxyles dans leurs structures, qui peuvent servir comme donneur d'électrons et de l'hydrogène, et soient capables de réduire les ions ferriques (MIRZADEH *et al.*, 2020).

### III.5.1.5.-Capacité antioxydante totale

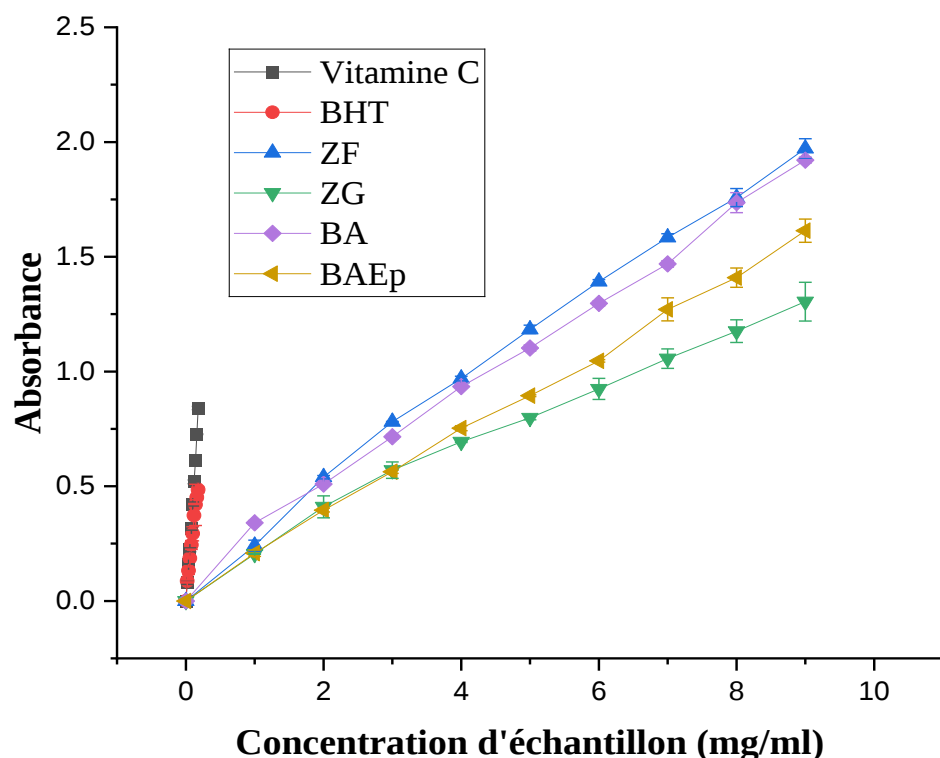
Les valeurs d' $A_{0,5}$  enregistrés pour les extraits de BA, BA Ep, ZF et ZG sont comparables et égalent à  $1,89 \pm 0,017$  mg/ml,  $2,80 \pm 0,011$  mg/ml,  $1,84 \pm 0,054$  mg/ml et  $2,79 \pm 0,159$  mg/ml respectivement. Ces résultats sont inférieurs à celle de la vitamine C et de BHT, dont les valeurs d' $A_{0,5}$  égales à  $0,11 \pm 0,001$  mg/ml et  $0,17 \pm 4,88E-05$  mg/ml (fig. 39).

Il n'existe pas une différence significative dans la valeur d' $A_{0,5}$  pour ZG et BA Ep ( $P > 0,05$ ), toutefois, il existe une différence significative dans la valeur d' $A_{0,5}$  entre chaque extrait testé et de la vitamine C ou de BHT ( $P < 0,05$ ).



**Figure 39.-** A<sub>0,5</sub> des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de la vitamine C et du BHT obtenus pour le test de la capacité antioxydante totale, a, b, c, d et e présentent les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ )

La capacité antioxydante totale est déterminée par la réduction du molybdène et la formation d'un complexe phosphomolybdène (PRIETO *et al.*, 1999 ; ALAM *et al.*, 2013). Cette activité est proportionnelle à l'augmentation de la concentration de l'extrait. Une augmentation rapide a été notée dans l'absorbance pour les antioxydants de référence utilisés à des concentrations allant de 0,02 à 0,2 mg/ml. L'augmentation de l'absorbance pour les extraits BA et ZF est plus rapide que les extraits BAEP et ZG dans un intervalle des concentrations allant de 1 à 10 mg/ml (fig. 40).



**Figure 40.-** Capacité antioxydante totale des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca*, de vitamine C et du BHT

### III.5.1.6.- Corrélation entre l'activité antioxydante et la composition biochimique des extraits bruts

Les résultats d'analyse de la corrélation de Pearson entre l'activité antioxydante et la composition biochimique d'extraits bruts des polysaccharides hydrosolubles de *Z. album* et *B. aegyptiaca* sont présentés dans le tableau IX. Il existe une corrélation positive et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus dans le test de piégeage du radical DPPH• et ABTS•+ et la teneur en oses acides, dont la valeur du coefficient de corrélation  $R$  égale 0,899 et 0,841 respectivement. Aucune corrélation significative ( $P > 0,05$ ) n'a été observée entre le pouvoir inhibiteur du DPPH• et d'ABTS•+ et le taux en oses totaux, en protéines ou en polyphénols. Pour la présente étude, l'activité antiradicalaire des extraits semble inversement proportionnelle à la teneur en oses acides.

Pour le test de piégeage du radical OH•, il existe une corrélation négative ( $R = -0,739$ ) et hautement significative ( $P = 0,006$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus pour les extraits polysaccharidiques et le taux des polyphénols. Aucune corrélation significative ( $P > 0,05$ ) n'a été observée pour le pouvoir inhibiteur du radical hydroxyle et le taux en oses totaux, en oses acides ou en protéines. L'analyse de la corrélation montre que la capacité du piégeage d'OH• est proportionnelle à la teneur en composés phénoliques présents dans les extraits bruts. L'activité antiradicalaire des extraits testés contre le radical hydroxyle est faible comparativement au radical du DPPH• et de l'ABTS•.

**Tableau IX.-** Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les IC<sub>50</sub> des tests antioxydants et la teneur en sucres totaux, en sucres acides, en protéines et en polyphénols dans les extraits bruts des polysaccharides de *Z. album* et *B. aegyptiaca*

| Paramètres /<br>test antioxydant | Sucres totaux |       | Sucres acides |         | Protéines |       | Polyphénols |       |
|----------------------------------|---------------|-------|---------------|---------|-----------|-------|-------------|-------|
|                                  | R             | P     | R             | P       | R         | P     | R           | P     |
| Test DPPH•                       | 0,257         | 0,420 | 0,899         | < 0,001 | -0,399    | 0,199 | 0,187       | 0,561 |
| Test ABTS•+                      | 0,236         | 0,460 | 0,841         | 0,001   | -0,374    | 0,231 | 0,319       | 0,312 |
| Test OH•                         | 0,250         | 0,434 | 0,174         | 0,589   | -0,249    | 0,436 | -0,739      | 0,006 |
| Pouvoir réducteur<br>de fer      | -0,700        | 0,011 | -0,211        | 0,510   | 0,740     | 0,006 | 0,055       | 0,866 |
| Capacité<br>antioxydante totale  | 0,219         | 0,493 | 0,037         | 0,909   | -0,196    | 0,541 | -0,757      | 0,004 |

R: coefficient de corrélation de Pearson, P : valeur de probabilité

Une corrélation négative (R = -0,700) et hautement significative (P = 0,011) a été notée entre les A<sub>0,5</sub> obtenus dans le test du pouvoir réducteur des ions ferriques et le taux des sucres totaux. Une corrélation positive (R = 0,740) et hautement significative (P = 0,006) a été observée entre les A<sub>0,5</sub> obtenus et le taux des protéines. Néanmoins, il n'existe pas une corrélation significative (P > 0,05) entre les A<sub>0,5</sub> obtenus et la teneur en oses acides ou en polyphénols. Le pouvoir réducteur d'ions ferriques des extraits est proportionnel à leur teneur en sucres totaux, et inversement proportionnel à leur teneur en protéines. De ce fait les extraits bruts de polysaccharides de *B. aegyptiaca*, avec leurs teneurs élevés en sucres totaux et faibles en protéines, présentent un pouvoir réducteur des ions ferriques supérieur aux extraits bruts de polysaccharides de *Z. album*.

L'analyse de la corrélation entre la capacité antioxydante totale et la composition biochimique d'extraits bruts montre qu'il n'existe pas une corrélation entre les A<sub>0,5</sub> obtenus et la teneur en oses totaux, en oses acides ou en protéines. Toutefois, une corrélation négative (R = -0,757) et hautement significative (P = 0,004) a été notée entre les A<sub>0,5</sub> obtenus et le taux des polyphénols. Ce qui signifie que la capacité antioxydante totale est proportionnelle à la teneur en composés phénoliques.

L'activité antioxydante des polysaccharides est un processus complexe impliquant de multiples mécanismes. Ces polymères permettent de réduire la production et l'accumulation des radicaux libres, d'augmenter l'activité du système antioxydant enzymatique (WEI *et al.*, 2023). Ils protègent l'organisme du stress oxydatif en chélatant les ions métalliques (BAI *et al.*, 2022). Nombreux polysaccharides végétaux montrent des propriétés antioxydantes (LIU et LI, 2020; MOHANTA *et al.*, 2022). Néanmoins, le mécanisme sous-jacent n'est pas bien élucidé, en raison de la complexité du type de polysaccharides et du manque des données structurales (SCHEPETKIN et QUINN, 2011; WANG *et al.*, 2016).

L'activité antioxydante des polysaccharides dépend surtout de leur structure, notamment leur poids moléculaire, leur composition en acides uroniques, leur degré de sulfatation, leur type de

liaison, leur degré de ramification, leur conformation et la présence des groupes fonctionnels (SCHEPETKIN et QUINN, 2011; WANG *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2019).

Le pouvoir antioxydant des polysaccharides est principalement associé à leur poids moléculaire (WANG *et al.*, 2016; MOHANTA *et al.*, 2022). Les études supposent que les polysaccharides de faible poids moléculaire présentent un plus grand nombre d'extrémités réductrices pour réagir avec les espèces radicalaires (WANG *et al.*, 2016; ZHONG *et al.*, 2019; MOHANTA *et al.*, 2022). XING *et al.* (2005) ont rapporté que la capacité de piégeage du chitosane à poids moléculaire faible (9 kDa) contre le radical superoxyde était plus puissante que celui du chitosane de poids moléculaire élevé (760 kDa). En effet, nombreuses techniques et méthodes physiques, chimiques ou enzymatiques ont été utilisées pour l'hydrolyse partielle des polysaccharides et la réduction de leur poids moléculaire, ce qui renforce leur activité antioxydante (WANG *et al.*, 2016; MOHANTA *et al.*, 2022).

L'activité antioxydante est influencé par la méthode d'extraction et de séchage des polysaccharides, qui peuvent également influencer les caractéristiques structurales et les propriétés physico-chimiques des polysaccharides (WANG *et al.*, 2016; MOHANTA *et al.*, 2022).

### III.5.2.-Activité anti-hyperglycémiant

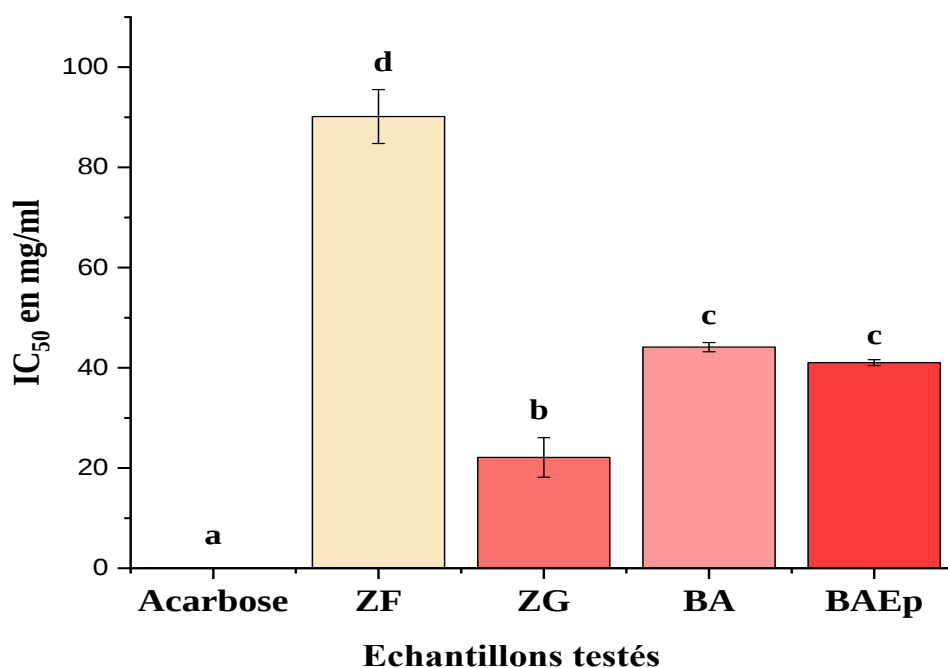
Le diabète est une maladie métabolique chronique, qui se caractérise par des taux de glycémie anormalement élevés et communément associée à des complications majeures, affectant le cœur, les vaisseaux sanguins, les reins, les nerfs et les yeux (KUMAR *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2017; SUBRAMONIAM, 2016). Une des approches thérapeutiques dans le traitement de diabète, en particulier type 2, consiste à réduire l'absorption intestinale du glucose, par l'inhibition des enzymes hydrolysant les glucides dans le tractus gastro-intestinal telles que les  $\alpha$ -glucosidases et les  $\alpha$ -amylases (KUMAR *et al.*, 2011; LI *et al.*, 2018a). Les  $\alpha$ -amylases pancréatiques et les  $\alpha$ -glucosidases intestinales sont des enzymes clés de la digestion des glucides dans le système digestif (TADERA *et al.*, 2006; SALEHI *et al.*, 2013). Les  $\alpha$ -amylases catalysent l'hydrolyse des liaisons  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidiques et produisent du maltose et du glucose à partir de l'amidon, tandis que les  $\alpha$ -glucosidases catalysent la dernière étape du processus digestif des glucides, en agissant sur les liaisons  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidiques et donnant comme résultat le glucose (KIM *et al.*, 2014; ISHNAVA et MOTISARIYA, 2018).

Les inhibiteurs des  $\alpha$ -glucosidases actuellement utilisés sont l'acarbose, le miglitol et le voglibose (BELLIN et CRACOWSKI, 2016; LAOUFI *et al.*, 2017; SUBRAMONIAM, 2016). Ces médicaments inhibent la dégradation enzymatique des glucides dans l'intestin et réduisent ainsi la libération du glucose dans le sang (SUBRAMONIAM, 2016). Cependant, ces inhibiteurs ayant des effets secondaires présentés par des troubles digestifs, flatulences ou diarrhées. Ces effets résultent de la fermentation bactérienne anormale des glucides non digérés dans le côlon (BLICKLE *et al.*, 1999; SALEHI *et al.*, 2013), qui semblent être causés par l'inhibition excessive de l' $\alpha$ -amylase pancréatique (SALEHI *et al.*, 2013). Les substances naturelles ayant une faible activité d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et une forte activité d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase, semblent donc être efficaces dans la réduction d'hyperglycémie postprandiale et dans la meilleure gestion du diabète (SALEHI *et al.*, 2013).

Les polysaccharides végétaux peuvent réduire le taux du glucose dans le sang en inhibant l'activité des enzymes digestives et en favorisant la sécrétion d'insuline (JI *et al.*, 2022). De ce fait, l'activité anti-hyperglycémique des polysaccharides testés a été évaluée par l'étude de leur pouvoir inhibiteur d'activité enzymatique de l' $\alpha$ -glucosidase et l' $\alpha$ -amylase.

### III.5.2.1.- Activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase

Les résultats du pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase des extraits testés montrent que l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Z. album* présente un bon effet inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase comparativement à l'extrait des feuilles de *Z. album* et aux extraits des fruits de *B. aegyptiaca*. Néanmoins, son activité est inférieure à celle de l'acarbose ( $IC_{50} = 0,051 \pm 0,001$  mg/ml), avec une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ) (fig. 41).



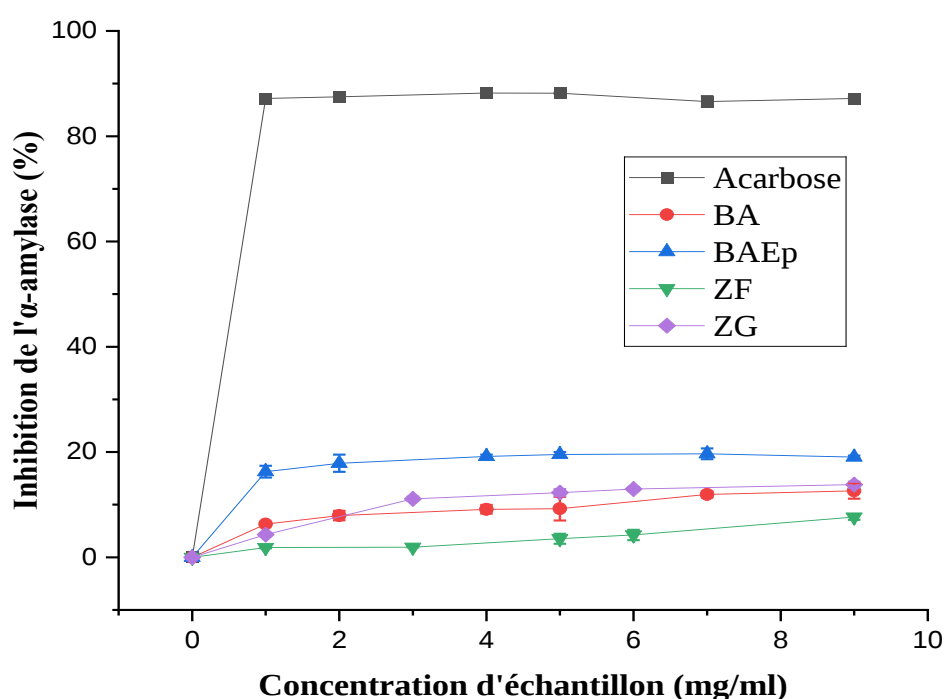
**Figure 41.-**  $IC_{50}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et de l'acarbose obtenus pour le test d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase, a, b, c et d présentent les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ )

La capacité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration de l'extrait. Le pourcentage d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase par l'extrait polysaccharidique des graines de *Z. album* est sensiblement supérieur à celui de l'extrait des feuilles pour toutes les concentrations testées, avec une  $IC_{50}$  nettement faible ( $22,107 \pm 3,955$  mg/ml) par rapport à l'extrait des feuilles ( $90,163 \pm 5,384$  mg/ml) et une différence très hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,001$ ).

L'étude de l'effet inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase par l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Chaenomeles speciosa* (Rosaceae) et des graines d'*Alhagi maurorum* (Fabaceae) montrent qu'ils présentent des  $IC_{50}$  de 6,24 mg/ml et 9,28 mg/ml respectivement (DENG *et al.*,

2020 ; CHAKOU *et al.*, 2021). L'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Plantago ciliata* (Plantaginaceae) présente un pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase avec une  $IC_{50}$  de 3,60 mg/ml (ADDOUN *et al.*, 2021). Une activité inhibitrice avec une  $IC_{50}$  de 0,8 mg/ml a été noté dans l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines d'*Astragalus gyzensis* (Fabaceae) (TEDJANI *et al.*, 2023). Le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase par ces extraits semble supérieur à celui de l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Z. album*.

Le pourcentage d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase présente la même allure pour les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *B. aegyptiaca* (fig. 42). Ils présentent des  $IC_{50}$  proches ( $44,132 \pm 0,926$  mg/ml pour BA et  $41,027 \pm 0,588$  mg/ml pour BAEp) et il n'existe pas une différence significative ( $P > 0,05$ ) entre le pouvoir inhibiteur de BA et de BAEp.



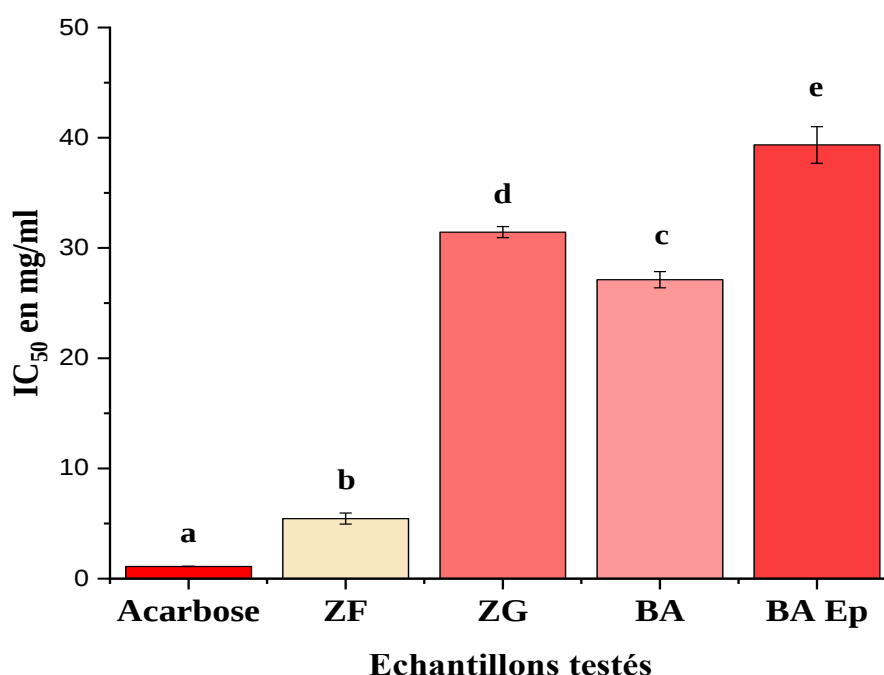
**Figure 42.-** Pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ - amylase des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et de l'acarbose

Les différentes fractions de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Morus alba* (Moraceae) présentent un effet inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase avec des  $IC_{50}$  entre 10,58 et 28,52 mg/ml (HUANG *et al.*, 2023). L'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Crataegus azarolus* (Rosaceae) et l'extrait purifié des polysaccharides alcali-solubles des fruits d'*Annona squamosa* (AWPA) (Annonaceae) présentent une activité inhibitrice, avec des  $IC_{50}$  de l'ordre de 1,81 mg/ml et 1,36 mg/ml respectivement (GU *et al.*, 2021; RJEIBI *et al.*, 2020). Les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Schinus terebinthifolius* et *Schinus molle* (Anacardiaceae) présentent une bonne capacité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase avec des  $IC_{50}$  de 0,11 mg/ml et 0,16 mg/ml respectivement (FERIANI *et al.*, 2020). Les activités inhibitrices d' $\alpha$ -amylase de ces extraits semblent supérieures à celles des extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.

Parmi les mécanismes impliqués dans l'inhibition d' $\alpha$ -amylase *in vivo* est la formation d'un complexe entre l'inhibiteur et l'enzyme en limitant son activité, c'est le cas de l'acarbose (KIM *et al.*, 2014), ou le ralentissement de la diffusion du glucose en retardant leur dégradation enzymatique et leur absorption intestinale par l'augmentation de la viscosité (COUDREAU, 2009 ; KIM *et al.*, 2014), c'est les cas des fibres alimentaires présentés principalement par les polysaccharides (KIM *et al.*, 2014).

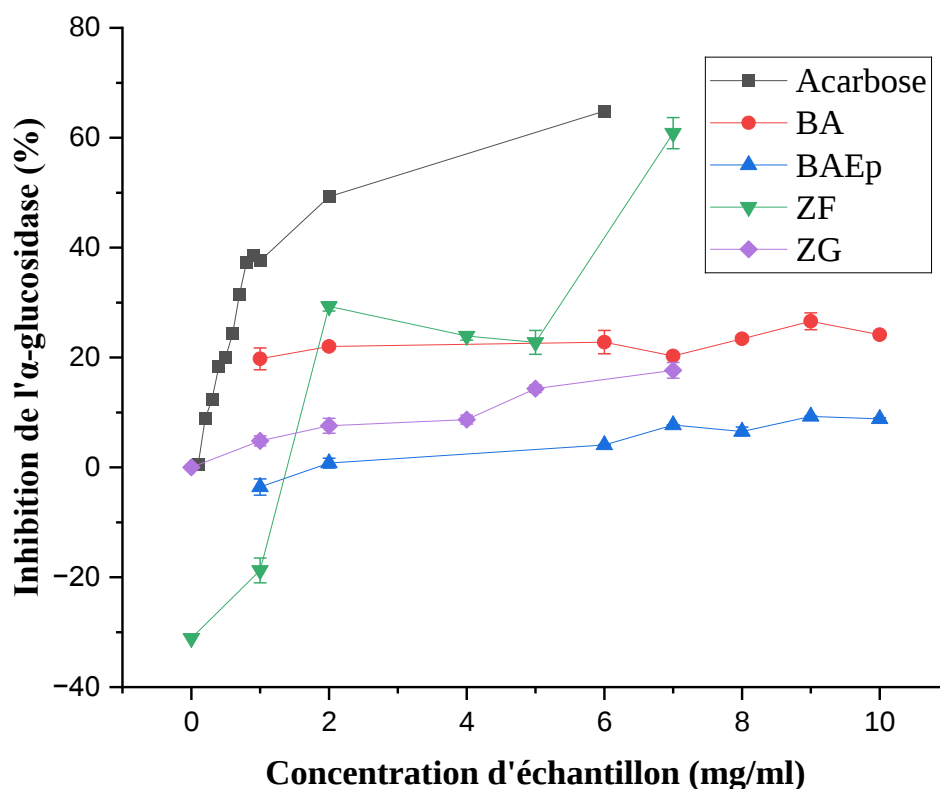
### III.5.2.2.- Activité inhibitrice de l' $\alpha$ -glucosidase

Il ressort des résultats que l'extrait de polysaccharides des feuilles de *Z. album* révèle une action inhibitrice remarquable sur l' $\alpha$ -glucosidase, avec une  $IC_{50}$  de  $5,448 \pm 0,502$  mg/ml comparable à celle de l'acarbose ( $IC_{50} = 1,108 \pm 0,006$  mg/ml). En comparant les  $IC_{50}$  des différents extraits, il existe une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre l'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -glucosidase de ZF, ZG, BA et BA Ep (fig. 43).



**Figure 43.-**  $IC_{50}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et de l'acarbose obtenus pour le test d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase, a, b, c, d et e présentent les groupes statistiques significativement différents ( $P < 0,05$ )

À une concentration de 7 mg/ml, l'extrait des feuilles de *Z. album* a montré une grande capacité d'inhiber l' $\alpha$ -glucosidase, avec un pourcentage d'inhibition de 60,83%, par rapport à l'extrait des graines qui présente un pourcentage d'inhibition faible soit 17,65% à la même concentration (fig. 44). Il apparaît clairement que l'extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Z. album* présente un pouvoir inhibiteur significatif sur l' $\alpha$ -glucosidase et semble être efficace dans la réduction d'hyperglycémie postprandiale.



**Figure 44.-** Pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et de l'acarbose

Les extraits de polysaccharides hydrosolubles de *Medicago sativa* L. (Fabaceae) présentent un effet inhibiteur de l' $\alpha$ -glucosidase avec des  $IC_{50}$  entre 9,73 et 13,98 mg/ml (SHANG *et al.*, 2021). WU *et al.* (2020b) ont rapporté que les extraits de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Rosa roxburghii* Tratt. (Rosaceae) montrent une activité inhibitrice avec des  $IC_{50}$  entre 6,29 et 9,59 mg/ml. Le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase de ces extraits semble inférieur à l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Z. album* (ZF). Toutefois, l'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -glucosidase de ZF est inférieure aux extraits de polysaccharides des feuilles et des tiges de *Zingiber officinale* Roscoe. (Zingiberaceae) ( $IC_{50}$  = 2,25-4,69 mg/ml) (CHEN *et al.*, 2021), de l'extrait MHP-S de polysaccharides hydrosolubles des feuilles et des tiges de *Mentha haplocalyx* (Labiaceae) ( $IC_{50}$  = 4,83 mg/ml) (FANG *et al.*, 2020) et celle obtenue pour l'extrait purifié de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Mallotus furetianus* (MFP-2A) (Euphorbiaceae), dont l' $IC_{50}$  est de 0,78 mg/ml (CHEN *et al.*, 2019b).

À la concentration de 10 mg/ml, BA présente un pourcentage d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase de 23,75 % supérieur à celui de BAEP (8,96 %) (Fig. 44). L'extrait BA est donc plus actif que l'extrait BAEP, avec des  $IC_{50}$  de  $27,117 \pm 0,737$  mg/ml et  $39,349 \pm 1,665$  mg/ml pour BA et BAEP respectivement et une différence très hautement significative ( $P < 0,001$ ).

L'extrait de polysaccharides hydrosolubles (BCP) des fruits de *Ribes nigrum* (Grossulariaceae) présente un effet inhibiteur de l' $\alpha$ -glucosidase, avec une  $IC_{50}$  de 4,86 mg/ml (XU

*et al.*, 2018). Les différents extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Rubus* montrent un pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -glucosidase, dont leurs  $IC_{50}$  varient entre 1,11 et 2,58 mg/ml (DOU *et al.*, 2019). Une bonne activité inhibitrice de l' $\alpha$ -glucosidase a été enregistré dans les extraits de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Schinus terebinthifolius* et *Schinus molle* (Anacardiaceae), avec des  $IC_{50}$  de 0,22 mg/ml et 0,17 mg/ml respectivement (FERIANI *et al.*, 2020). Le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase de ces extraits est supérieur à celui des extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.

Plusieurs mécanismes sont impliqués dans l'inhibition de l'activité de l' $\alpha$ -glucosidase. Une de ces mécanismes est le piégeage de l'hydrogène car l' $\alpha$ -glucosidase fournit l'hydrogène nécessaire pour catalyser l'hydrolyse de la liaison glucosidique de type  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4). L'inhibiteur agit en interceptant l'ion hydrogène libéré du site catalytique de l'enzyme. Certains composés bien connus, comme l'acarbose, agissent comme des inhibiteurs compétitifs en imitant le substrat de l'enzyme (KIM *et al.*, 2014). Ils inhibent donc de manière sélective l'hydrolyse enzymatique des glucides et ralentissent leur absorption intestinale (COUDREAU, 2009 ; BELLIEN et CRACOWSKI, 2016).

La liaison des polysaccharides à l' $\alpha$ -glucosidase peut entraîner des changements de la polarité et de la conformation moléculaire d'enzyme, induisant une perte partielle de son activité (ZHANG *et al.*, 2019 ; DENG *et al.*, 2020). JI *et al.* (2022) suggèrent que les groupes des chaînes latérales de polysaccharides peuvent être combinés au site actif de l'enzyme, de manière à réduire son activité catalytique et plus le poids moléculaire est petit, plus la combinaison des groupes de chaînes latérales au site actif sera importante (JI *et al.*, 2022).

Le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase par les polysaccharides est inversement proportionnel à leur poids moléculaire. L'hydrolyse de l'extrait de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Ribes nigrum* (BCP) (Grossulariaceae) par  $FeSO_4$  (1%) et de différentes concentrations de  $H_2O_2$  permet l'obtention des deux extraits de faible poids moléculaire (DBCP-1, DBCP-2). L'étude de leur pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase montre qu'ils présentent un pourcentage d'inhibition de 61,49% (DBCP-1) et 67,98% (DBCP-2) supérieurs à celle obtenue par l'extrait natif (48,37%), pour une concentration de 4 mg/ml (XU *et al.*, 2018). ADDOUN *et al.* (2021) ont signalé que l'hydrolyse acide d'extrait de polysaccharides hydrosolubles des graines de *Plantago ciliata* (Plantaginaceae) par l'acide sulfurique à 20% permet d'augmenter son effet inhibiteur sur l' $\alpha$ -glucosidase, ce qui se traduit par une augmentation du taux d'inhibition de 49% à 73% pour une concentration de 10 mg/ml. DOU *et al.* (2019) ont rapporté que l'extrait hydrolysé BBP-24 de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Rubus* présente un bon pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -glucosidase par rapport à l'extrait natif (BBP), avec une  $IC_{50}$  faible (1,11 mg/ml) par rapport de l'extrait non hydrolysé (1,59 mg/ml).

JIANG *et al.* (2023) ont montré que le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et l' $\alpha$ -glucosidase des polysaccharides dépend la méthode d'extraction utilisée. Cette étude a utilisé sept méthodes différentes pour l'extraction des polysaccharides des feuilles de *Ficus carica* (FLP) (Moraceae), présentés par l'extraction à l'eau chaude, l'extraction par micro-ondes, l'extraction par ultrasons, l'extraction enzymatique assistée par ultrasons, l'extraction par ultrasons et micro-ondes, extraction alcaline et extraction homogène par cisaillement à grande vitesse. Les résultats obtenus montrent

que l'extraction par ultrasons et à l'eau chaude ont été les méthodes les plus efficaces, dont les polysaccharides ont montré l'activité inhibitrice de l' $\alpha$ -amylase et l' $\alpha$ -glucosidase la plus élevée.

### III.5.2.3.- Corrélation entre l'activité anti-hyperglycémiant et la composition biochimique des extraits bruts

Au vu des résultats d'analyse statistique de la corrélation présentés dans le tableau X, il existe une corrélation positive ( $R = 0,877$ ) et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus dans le test d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et le taux en composés phénoliques, et une corrélation positive modéré ( $R = 0,578$ ) et significative ( $P = 0,049$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en oses acides. Néanmoins, aucune corrélation significative n'a été observée entre le pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase et le taux en oses totaux ou en protéines.

**Tableau X.-** Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les  $IC_{50}$  des tests de pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase et de l' $\alpha$ -glucosidase et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de *Z. album* et *B. aegyptiaca*

| Paramètres /test anti-hyperglycémique  | Sucres totaux |       | Sucres acides |       | Protéines |       | Polyphénols |         |
|----------------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------|-------|-------------|---------|
|                                        | R             | P     | R             | P     | R         | P     | R           | P       |
| Inhibition de l' $\alpha$ -amylase     | -0,436        | 0,157 | 0,578         | 0,049 | 0,322     | 0,308 | 0,877       | < 0,001 |
| Inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase | 0,732         | 0,007 | -0,181        | 0,573 | -0,678    | 0,015 | -0,992      | < 0,001 |

R: coefficient de corrélation de Pearson, P : valeur de probabilité

Une corrélation négative ( $R = -0,992$ ) et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) a été observée entre les  $IC_{50}$  obtenus dans le test d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase et le taux des polyphénols. Une corrélation négative ( $R = -0,678$ ) et hautement significative ( $P = 0,015$ ) a été notée entre les  $IC_{50}$  obtenus et le taux des protéines. De même, une corrélation positive ( $R = 0,732$ ) et hautement significative ( $P = 0,007$ ) a été observée entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en sucres totaux, et aucune corrélation significative ( $P > 0,05$ ) n'a été notée entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en oses acides. L'extrait brut de polysaccharides des feuilles de *Z. album* semble présenter le meilleur pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -glucosidase puisqu'il contient le taux le plus élevé en protéines et en polyphénols, et le taux le plus faible en sucres totaux. Selon HSU *et al.* (2013) et GUO *et al.* (2021), il existe une corrélation positive entre la teneur en protéines dans les polysaccharides et leur effet inhibiteur de  $\alpha$ -glycosidase.

Pour FU *et al.* (2019), les effets inhibiteurs remarquables sur l' $\alpha$ -amylase et l' $\alpha$ -glucosidase des extraits de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de différents cultivars d'*Eriobotrya japonica* (Rosaceae), semblent être attribués à leurs poids moléculaires élevés, à leur richesse en acides uroniques et à leur degré d'estérification élevé.

### III.5.3.-Activité anti-inflammatoire

L'inflammation est un processus biologique complexe qui peut être bénéfique ou préjudiciable, il se divise en deux parties : inflammation aiguë et chronique (PUNCHARD *et al.*, 2004; IWALEWA *et al.*, 2007). L'inflammation aiguë est la première réponse face à une agression. Elle est immédiate et rapide. Dès que l'inflammation se prolonge et persiste anormalement, on parle d'inflammation chronique (IWALEWA *et al.*, 2007; ELGORASHI et MCGAW, 2019). L'inflammation chronique augmente le développement des maladies dégénératives telles que la polyarthrite rhumatoïde, l'athérosclérose, les maladies cardio-vasculaires, la maladie d'Alzheimer, l'asthme, le diabète et le cancer (PUNCHARD *et al.*, 2004; IWALEWA *et al.*, 2007).

La dénaturation des protéines est un processus dans lequel les protéines perdent leurs structures secondaires et tertiaires par l'altération des liaisons électrostatiques, d'hydrogène, hydrophobes et des ponts disulfures (RAHMAN *et al.*, 2015; THANGARAJ, 2016; BAILEY-SHAW *et al.*, 2017).

Nombreuses études montrent que la dénaturation des protéines est une des causes de la polyarthrite rhumatoïde (RAHMAN *et al.*, 2015; THANGARAJ, 2016; SARVESWARAN *et al.*, 2017). Plusieurs types des Anti-inflammatoires Non Stéroïdiens (AINS) sont couramment utilisés, qui se lient à l'albumine plasmatique et empêchent son dénaturation (RAHMAN *et al.*, 2015; BAILEY-SHAW *et al.*, 2017). Toutefois, leur utilisation à long terme peut altérer les fonctions du tractus gastro-intestinal, du foie, du cœur et des reins (BAILEY-SHAW *et al.*, 2017 ; DJOVA *et al.*, 2019). Ces effets secondaires et toxiques des AINS sollicitent la recherche des sources alternatives d'origine naturel (BAILEY-SHAW *et al.*, 2017).

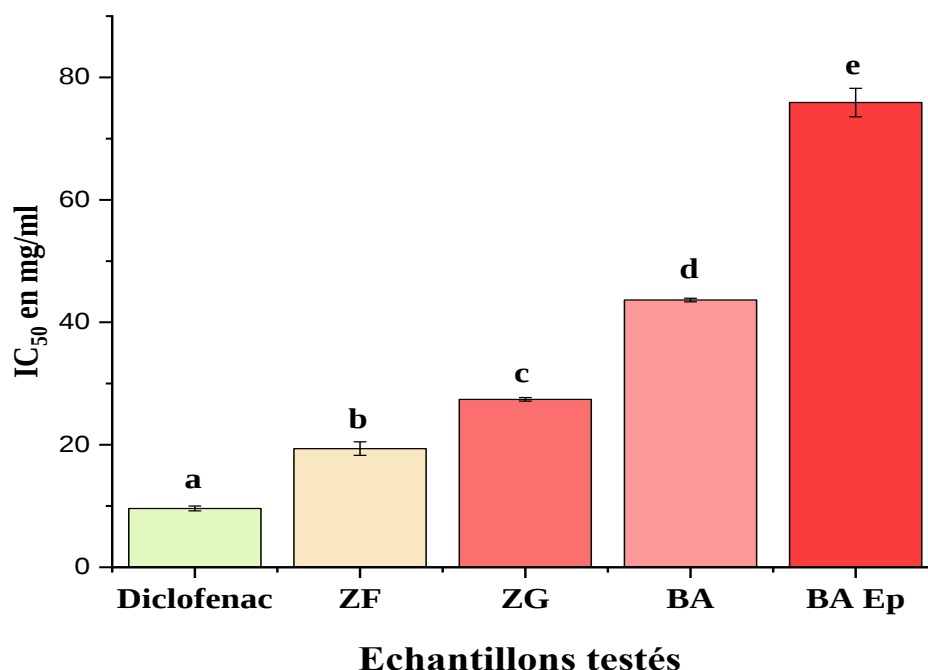
Les enzymes lysosomales libérées au cours de la réaction inflammatoire provoquent divers troubles dans le corps. L'activité de ces enzymes lie à une inflammation aiguë ou chronique (CHIPPADA *et al.*, 2011; BHATNAGAR *et al.*, 2012; SARASWATHY *et al.*, 2017; SARVESWARAN *et al.*, 2017). La stabilisation de la membrane lysosomale est importante pour limiter et contrôler la réponse inflammatoire (CHIPPADA *et al.*, 2011; SARVESWARAN *et al.*, 2017). Les AINS agissent soit en inhibant les enzymes lysosomales, qui provoquent la lésion des tissus, l'endommagement des macromolécules lors de leur libération extracellulaire, ou en stabilisant la membrane lysosomale (CHIPPADA *et al.*, 2011; BHATNAGAR *et al.*, 2012; SARASWATHY *et al.*, 2017; SARVESWARAN *et al.*, 2017).

La membrane des globules rouges est similaire à celle de la membrane lysosomale et les agents qui peuvent stabiliser ce type de membrane contre la lyse induite peuvent donc également stabiliser la membrane lysosomale (CHIPPADA *et al.*, 2011; IFFTH et CAROLINE, 2018).

De ce fait, l'inhibition de la dénaturation des protéines et la stabilisation de la membrane des globules rouges contre la lyse membranaire induite peuvent être prise comme mesure pour l'évaluation de l'activité anti-inflammatoire *in vitro* des extraits (PHANSE *et al.*, 2012; SARASWATHY *et al.*, 2017; SARVESWARAN *et al.*, 2017; IFFTH et CAROLINE, 2018).

### III.5.3.1.-Stabilisation de la membrane des hématies

L'étude du pouvoir d'inhibition de la lyse membranaire induite montre que le taux de stabilisation membranaire obtenu par l'extrait de polysaccharides des feuilles de *Z. album* est supérieur à celui des autres extraits, avec une différence hautement significative ( $P < 0,01$ ) dans l'effet inhibiteur des différents extraits (fig. 45). Toutefois, cette activité reste inférieure au diclofenac ( $IC_{50} = 9,602 \pm 0,393$  mg/ml).

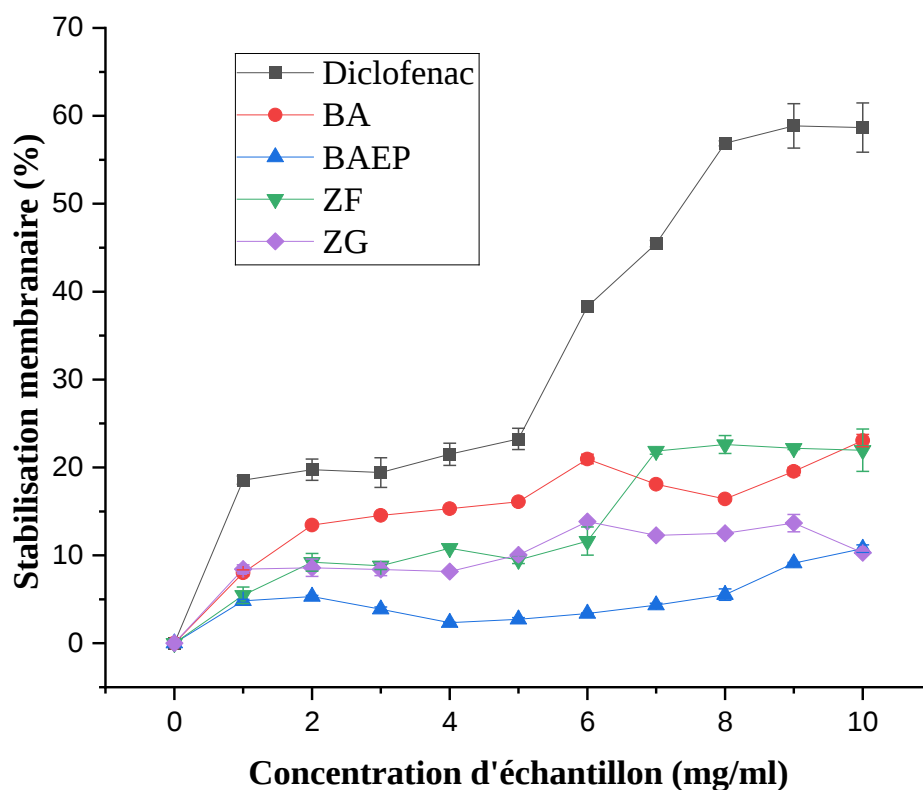


**Figure 45.-**  $IC_{50}$  des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et du diclofenac obtenus pour le test d'inhibition de la lyse membranaire, a, b, c, d et e présentent les groupes statistiques significativement différentes ( $P < 0,05$ )

À la concentration de 9 mg/ml, l'extrait de polysaccharides des feuilles de *Z. album* (ZF) a montré un pourcentage d'inhibition de 22,19% par rapport au l'extrait des graines (ZG), qui présente un pourcentage d'inhibition plus faible, soit 13,66% pour la même concentration. Ce taux inhibition reste inférieur au diclofenac (58,86%) (fig. 46). En effet, le pouvoir d'inhibition contre la lyse membranaire induite par ZF est supérieur à celui de ZG avec une  $IC_{50}$  de  $19,376 \pm 1,107$  mg/ml et de  $27,425 \pm 0,299$  mg/ml respectivement.

Les pourcentages de la stabilisation membranaire des extraits de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca*, soient 19,55% et 9,10% pour BA et BAEP respectivement à la concentration de 9 mg/ml (fig. 46), avec une  $IC_{50}$  de  $43,642 \pm 0,287$  mg/ml pour BA, et de  $75,886 \pm 2,317$  mg/ml pour BAEP. HAN *et al.* (2016b) ont rapporté que les extraits purifiés BPP-1, BPP-2 et BPP-3 de polysaccharides hydrosolubles des fruits de *Broussonetia papyrifera* (Moraceae) présentent des pourcentages d'inhibition de la lyse membranaire, soient 68,51%, 60,09% et 79,69% respectivement, à la concentration de 2 mg/ml. L'effet stabilisant de ces extraits semble supérieur aux extraits polysaccharidiques des fruits de *B. aegyptiaca*.

L'étude de la stabilisation membranaire des polysaccharides extraits des algues brunes, montre que le fucoïdane extrait de *Fucus vesiculosus* (FV2) (Fucaceae) présente un effet stabilisant significative comparable au diclofenac sodique, avec un pourcentage de stabilisation de 88% et 91% respectivement à la concentration de 0,5 mg/ml (OBLUCHINSKAYA *et al.*, 2022).



**Figure 46.-** Pouvoir d'inhibition de la lyse membranaire des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et du diclofenac

Il est noté que l'effet stabilisant augmente lentement avec l'augmentation de la concentration des extraits. D'après ces résultats, les polysaccharides extraits de *Z. album* présentent un pouvoir stabilisant de la membrane des hématies supérieur à celui des polysaccharides extraits de *B. aegyptiaca*.

#### III.5.3.1.1.-Corrélation entre la stabilisation de la membrane des hématies et la composition biochimique des extraits bruts

Les résultats d'analyse de la corrélation entre la stabilisation de la membrane des hématies et la composition biochimique d'extraits bruts (tableau XI) montre qu'il existe une corrélation positive ( $R = 0,888$ ) et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus de tests des effets inhibiteurs de la lyse membranaire et le taux des oses totaux.

Une corrélation négative ( $R = -0,925$ ) et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en protéines, et une corrélation négative ( $R = -0,756$ ) et hautement significative ( $P = 0,004$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en polyphénols ont été notés. Aucune corrélation significative ( $P > 0,05$ ) n'a été observée entre la stabilisation de la membrane des hématies et le taux en oses acides.

**Tableau XI.-** Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les  $IC_{50}$  de test d'effet inhibiteur de la lyse membranaire et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de *Z. album* et *B. aegyptiaca*

| Paramètres /test                  | Sucres totaux |         | Sucres acides |       | Protéines |         | Polyphénols |       |
|-----------------------------------|---------------|---------|---------------|-------|-----------|---------|-------------|-------|
|                                   | R             | P       | R             | P     | R         | P       | R           | P     |
| Inhibition de la lyse membranaire | 0,888         | < 0,001 | 0,367         | 0,241 | -0,925    | < 0,001 | -0,756      | 0,004 |

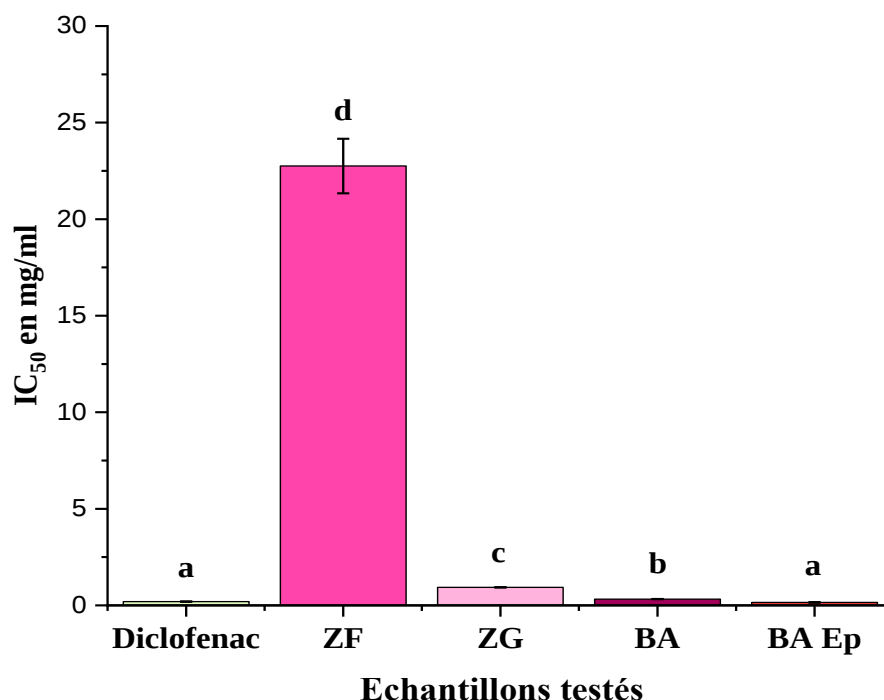
R: coefficient de corrélation de Pearson, P : valeur de probabilité

L'effet stabilisant des extraits contre la lyse membranaire est proportionnel à leur teneur en protéines et composés phénoliques et inversement proportionnel à leur teneur en oses totaux. L'extrait brut de polysaccharides des feuilles de *Z. album* semble présenter le meilleur effet stabilisant à cause de sa teneur la plus élevée en protéines et en polyphénols, et de sa teneur la plus faible en sucres totaux.

L'effet inhibiteur de la lyse membranaire induite est généralement attribué aux composés phénoliques. Dans des solutions hypotoniques, les polyphénols augmentent la résistance osmotique des érythrocytes, ce qui les rend moins susceptibles d'être hémolysés (CYBORAN *et al.*, 2012). Selon GRANATO *et al.*, (2022), les polysaccharides en solution peuvent former un système colloïdal qui exerce une barrière physique empêchant l'hémolyse. Les polysaccharides peuvent interagir aussi avec les composés phénoliques, créant une barrière physico-chimique qui protège les érythrocytes de l'hémolyse.

### III.5.3.2.- Inhibition de la dénaturation des protéines

D'après les résultats obtenus, il existe une proportionnalité entre la concentration en extrait et le pourcentage de l'inhibition de la dénaturation des protéines pour toutes les concertations utilisées. Les pourcentages d'inhibition de la dénaturation soient 33,76% et 11,37% pour ZG et ZF respectivement, à une concentration de 0,5 mg/ml. Il convient de noter que l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines par les polysaccharides des graines de *Z. album* ( $IC_{50} = 0,931 \pm 0,029$  mg/ml) reste meilleur par rapport à celle de polysaccharides des feuilles de *Z. album* ( $IC_{50} = 22,751 \pm 1,415$  mg/ml), avec une différence hautement significative entre les deux extraits ( $P < 0,01$ ).

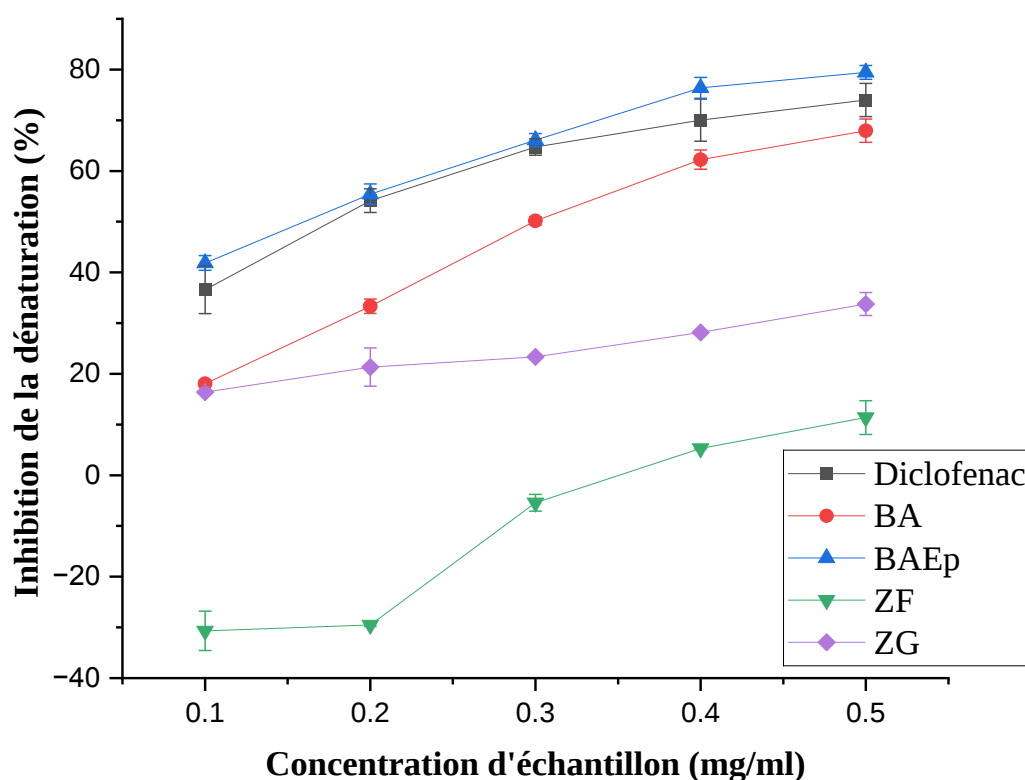


**Figure 47.-** IC<sub>50</sub> des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et du diclofenac obtenus dans le test d'inhibition de la dénaturation des protéines, a, b, c et d présentent les groupes statistiques significativement différentes ( $P < 0,05$ )

A la concentration de 0,5 mg/ml, le pourcentage d'inhibition de la dénaturation des protéines de BA Ep est égal à 79,44% par rapport au BA qui est de l'ordre de 67,94% et au diclofenac, qui est égal 73,98% à la même concentration (fig.48). L'activité inhibitrice de la dénaturation de BA Ep s'avère supérieure au diclofenac, avec une IC<sub>50</sub> de l'ordre de  $0,156 \pm 0,017$  mg/ml inférieur au diclofenac ( $0,197 \pm 0,009$  mg/ml).

CHAKOU *et al.* (2021) ont rapporté que l'extrait brut de polysaccharides hydrosolubles des graines de l'espèce de *Alhagi maurorum* (Fabaceae) (WSPAM1) présente un effet inhibiteur de la dénaturation des protéines supérieur au standard utilisé (ibuprofène), avec une IC<sub>50</sub> de l'ordre de 5,8 mg/ml et 6,29 mg/ml respectivement. MURAD *et al.* (2023) ont rapporté un pourcentage d'inhibition de la dénaturation égale 77,77% à la concentration de 0,15 mg/ml pour l'extrait de polysaccharides des écorces des fruits d'*Opuntia ficus* (Cactaceae).

OBLUCHINSKAYA *et al.* (2022) étudiant le pouvoir d'inhibition de la dénaturation des protéines des fucoïdanes extraits de cinq espèces des algues brunes (*Saccharina japonica* (Laminariaceae), *Fucus vesiculosus*, *Fucus distichus*, *Fucus serratus* (Fucaceae) et *Ascophyllum nodosum* (Fucaceae) ont montré que l'inhibition de la dénaturation augmente avec la teneur en fucose et diminue avec le poids moléculaire de fucoïdane. SONIA *et al.* (2021) a noté un pourcentage d'inhibition de la dénaturation de 60% à la concentration de 0,1 mg/ml, pour fucoïdane extrait de l'espèce de *Sargassum wightii* (Sargassaceae). VANAVIL *et al.* (2020) ont signalé un pourcentage d'inhibition de la dénaturation des protéines de 49,10% à la concentration de 0,01 mg/ml pour le polysaccharide sulfaté extrait de *Sargassum swartzii* (Sargassaceae).



**Figure 48.-** Pouvoir d'inhibition de la dénaturation des protéines des extraits polysaccharidiques de *Z. album* et *B. aegyptiaca* et du diclofenac

Les résultats obtenus pour la présente étude montrent que les polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* présentent une activité anti-inflammatoire significative par rapport aux polysaccharides de *Z. album*, et permettent de diminuer efficacement la dénaturation des protéines. Leur activité semble être émanée de la richesse en pectines, qui présentent une activité anti-inflammatoire significative par rapport aux autres types des polysaccharides (JIN *et al.*, 2021). Les pectines exercent leur effet anti-inflammatoire via la régulation de l'immunité de l'hôte en ciblant directement les cellules immunitaires, ou via la stimulation de la flore intestinale bénéfique. Ils stimulent aussi les médiateurs immuno-régulateurs, tels que l'oxyde nitrique (NO), le facteur de nécrose tumorale-alpha (TNF- $\alpha$ ), l'interleukine 1 bêta (IL-1 $\beta$ ) et l'interleukine 10 (IL-10).

L'activité anti-inflammatoire des pectines dépend leur structure moléculaire surtout leur poids moléculaire et leur composition en monosaccharides. D'autres types des polysaccharides végétaux sont reconnu aussi par leurs propriétés anti-inflammatoires, comme l'amidon, les  $\beta$ -glucanes, la gomme arabique et l'inuline (JIN *et al.*, 2021).

#### III.5.3.2.1.- Corrélation entre l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines et la composition biochimique des extraits bruts

Le tableau XII présente les résultats d'analyse de la corrélation entre l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines et la composition biochimique d'extraits bruts. Il existe une corrélation

négative ( $R = -0,728$ ) et hautement significative ( $P = 0,007$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et le taux des oses totaux. Il existe une corrélation positive ( $R = 0,632$ ) et significative ( $P = 0,028$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en protéines, et une corrélation positive ( $R = 0,948$ ) et très hautement significative ( $P < 0,001$ ) entre les  $IC_{50}$  obtenus et la teneur en polyphénols. Aucune corrélation significative ( $P > 0,05$ ) n'est notée pour la dénaturation des protéines et le taux en oses acides.

**Tableau XII.**-Coefficients de corrélation de Pearson (R) entre les  $IC_{50}$  des tests sur l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines et la composition biochimique des extraits bruts des polysaccharides de *Z. album* et *B. aegyptiaca*

| Paramètres /test anti-inflammatoire         | Sucres totaux |       | Sucres acides |       | Protéines |       | Polyphénols |         |
|---------------------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------|-------|-------------|---------|
|                                             | R             | P     | R             | P     | R         | P     | R           | P       |
| Inhibition de la dénaturation des protéines | -0,728        | 0,007 | 0,478         | 0,116 | 0,632     | 0,028 | 0,948       | < 0,001 |

R: coefficient de corrélation de Pearson, P : valeur de probabilité

Les résultats obtenus révèlent que l'effet inhibiteur de la dénaturation des protéines est proportionnel à la teneur en oses totaux et inversement proportionnel à la teneur en composés phénoliques et en protéines. Les extraits bruts de polysaccharides des fruits de *B. aegyptiaca* montrent une activité inhibitrice significative par rapport aux polysaccharides de *Z. album*. Cela semble dû de leur teneur élevé en sucres totaux et leur teneur faible en polyphénols et en protéines.

Selon OBLUCHINSKAYA *et al.* (2022), il existe une corrélation significative entre le pouvoir inhibiteur de la dénaturation des protéines et le poids moléculaire du polysaccharide et sa teneur en sucres totaux.

Selon YU *et al.* (2022), les polysaccharides exercent des effets anti-inflammatoires de trois manières ; soit par l'inhibition d'expression des chimiokines et des facteurs d'adhésion, par l'empêchement de l'activation des voies de signalisation et l'amélioration de la production de cytokines ; soit par l'activation des lymphocytes T et l'amélioration de la phagocytose par les macrophages ; soit par la réduction de la perméabilité des capillaires.

Le potentiel anti-inflammatoire des polysaccharides a été démontré, notamment dans le traitement des maladies inflammatoires de l'intestin (NIE *et al.*, 2017; JIN *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021). Ils pourraient limiter les réactions inflammatoires de l'intestin par différents mécanismes. Ils contribuent à la régulation de la sécrétion des cytokines via de multiples voies de signalisation, à l'augmentation l'intégrité intestinale et la modulation du stress oxydatif (NIE *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2021).

Différents types de polysaccharides peuvent être fermentés dans le côlon, ce qui est contribué à la modification de la diversité du microbiote intestinal, à la stimulation des divers types des cellules immunitaires et à l'activation de nombreuses voies de signalisation (WANG *et al.*, 2021).

---

# Conclusion

---

Le présent travail vise à caractériser les polysaccharides hydrosolubles extraits des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Zygophyllum album* L. et des fruits de *Balanites aegyptiaca* Del. (BA et BAEp), et à évaluer leur potentiel antioxydant, anti-hyperglycémiant et anti-inflammatoire.

Les rendements massiques en polysaccharides obtenus par macération dans de l'eau distillée à 60°C sont faibles (0,40-2,33%). Les dosages colorimétriques révèlent que les extraits polysaccharidiques bruts de *B. aegyptiaca*, par leurs teneurs élevées en sucres totaux et leurs teneurs faibles en protéines et en polyphénols, sont mieux purifiés que les extraits polysaccharidiques bruts de *Z. album*.

Les spectres FT-IR des extraits de deux espèces sont similaires et présentent les pics typiques des polysaccharides et des acides uroniques. L'analyse de la composition osidique des polysaccharides par les méthodes chromatographiques (CCM, HPLC-RID, GC/MS-EI) montre que le galactose (24,16-31,76%) et l'arabinose (20,90-21,64%) sont les sucres majoritaires dans ZF et ZG, et l'acide galacturonique (34,06%) et l'arabinose (27,82%) sont les sucres majoritaires dans BA. Les polysaccharides hydrosolubles de feuilles et de graines de *Z. album* semblent constitués principalement des arabinogalactanes, et ceux des fruits de *B. aegyptiaca* semblent constitués principalement de pectines.

Les extraits polysaccharidiques bruts présentent une activité anti-radicalaire contre le DPPH•, l'ABTS•+ et le OH• et un pouvoir réducteur du fer et de molybdène. Toutefois, leur activité antioxydante reste inférieure à celle de la vitamine C et du BHT. L'extrait polysaccharidique des graines de *Z. album* présente un pouvoir inhibiteur du radical DPPH• et ABTS•+ appréciable comparativement aux autres extraits. L'extrait polysaccharidique des feuilles de *Z. album* et celui des fruits de *B. aegyptiaca* (BA) sont les extraits les plus actifs contre le radical OH• et ils montrent une capacité antioxydante totale supérieure aux autres extraits. L'extrait BA présente aussi le meilleur pouvoir réducteur des ions ferriques.

Le pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et de l' $\alpha$ -glucosidase ne présente pas la même allure pour les extraits. ZF présente une activité inhibitrice remarquable sur l' $\alpha$ -glucosidase par rapport aux autres extraits, mais sa capacité inhibitrice sur l' $\alpha$ -amylase est la plus faible. L'extrait de polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Z. album* montre donc son potentiel hypoglycémiant par une forte inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase avec une  $IC_{50}$  ( $5,448 \pm 0,502$  mg/ml) comparable à celle de l'acarbose ( $IC_{50} = 1,108 \pm 0,006$  mg/ml).

L'étude de l'effet stabilisant contre la lyse membranaire des polysaccharides de deux espèces montre que la stabilisation membranaire augmente lentement avec l'augmentation de la concentration des extraits, et que le pouvoir stabilisant des extraits polysaccharidiques de *B. aegyptiaca* est inférieur aux extraits polysaccharidiques de *Z. album*. Toutefois, les extraits des fruits de *B. aegyptiaca* présentent un effet inhibiteur très significatif contre la dénaturation des protéines et l'activité inhibitrice de BAEp ( $IC_{50}$ :  $0,156 \pm 0,017$  mg/ml) est plus élevée que celle du diclofenac ( $IC_{50}$ :  $0,197 \pm 0,009$  mg/ml).

Globalement, les extraits bruts de polysaccharides hydrosolubles des espèces de *Z. album* et de *B. aegyptiaca* semblent présenter des propriétés antioxydantes, anti-hyperglycémiantes et anti-inflammatoires prometteuses. Cependant, cette étude nécessite des investigations plus approfondies et ouvre les perspectives suivantes :

- La purification des polysaccharides extraits pour identifier de manière précise les composants responsables des activités observées ;
- La détermination de la structure fine des polysaccharides pour mieux comprendre la relation entre la structure et l'activité biologique ;
- La réalisation des tests biologiques sur des modèles animaux pour valider les effets observés ;
- L'investigation des autres activités biologiques comme l'activité immunomodulatrice, l'activité prébiotique et l'activité anticancéreuse ;
- L'étude du comportement rhéologique des polysaccharides pour déterminer leurs propriétés fonctionnelles.

---

# **Références bibliographiques**

---

1. ABD EL-AAL M., MASHALY I.A., SOLIMAN M.I., RIZK R.M., ELMORSY M.F., 2019.- Vegetation Ecology Associated with Some Species of Family Zygophyllaceae in Different Biogeographic Regions of Egyptian Desert. *CATRINA*, 19 (1), 1-13.
2. ABDALLAH H.M., ESMAT A., 2017.- Antioxidant and anti-inflammatory activities of the major phenolics from *Zygophyllum simplex* L. *Journal of Ethnopharmacology*, 205, 51-56.
3. ABDELAZIZ S.M., LEMINE F.M.M., TFEIL H.O., FILALI-MALTOUF, A., BOUKHARY A.O.M.S., 2020.- Phytochemicals, antioxidant activity and ethnobotanical uses of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. fruits from the arid zone of Mauritania, Northwest Africa. *Plants*, 9(3), 401.
4. ABDELHAMEED R.F., FATTAH S.A., MEHANNA E.T., HAL D.M., MOSAAD S.M., ABDEL-KADER M.S., ELTAMANY E.E., 2022.- Zygo-albuside a: new saponin from *Zygophyllum album* L. with significant antioxidant, anti-inflammatory and antiapoptotic effects against methotrexate-induced testicular damage. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(18), 10799.
5. ABDOULAYE B., BECHIR A.B., MAPONGMETSEM P.M., 2017.- Utilités socioéconomiques et culturelles du *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. (Famille Zygophyllaceae) chez les populations locales de la Région du Ouaddaï au Tchad. *Journal of Applied Biosciences*, 111, 10854-10866.
6. ABUDUWAILI A., MUTAILIFU P., NUERXIATI R., GAO Y., AISA H. A., YILI A., 2021.- Structure and biological activity of polysaccharides from *Nitraria sibirica* Pall fruit. *Food Bioscience*, 40, 100903.
7. ADDOUN N., BOUAL Z., DELATTRE C., CHOUANA T., GARDARIN C., DUBESSAY P., BENAOUN F., ADDAOUD S., OULD EL HADJ M.D., MICHAUD P., et al., 2021.- Beneficial Health Potential of Algerian Polysaccharides Extracted from *Plantago ciliata* Desf. (Septentrional Sahara) Leaves and Seeds. *Applied Sciences*, 11 (9), 4299.
8. ADESINA S. K., JOHNNY I. I., OLAYIWOLA G., 2017.- Plants in respiratory disorders I- anti-asthmatics, a review. *British Journal of Pharmaceutical Research*, 16(2), 1-22.
9. ADEWALE O.O., OYELOLA R.F., OLADELE J.O., AGBAJE W.B., 2024.- Assessing the ability of Polysaccharides extracted from Date Palm Fruit to salvage Wistar rats from cisplatin-linked hepatic damage. *Pharmacological Research-Modern Chinese Medicine*, 11, 100400.
10. AGBLEVOR F.A., HAMES B.R., SCHELL D., CHUM H.L., 2007.- Analysis of biomass sugars using a novel HPLC method. *Applied biochemistry and biotechnology*, 136, 309-326.
11. AHMED A., HAMEED A., SAEED S., 2020.- Ecological distribution, morphological and molecular characterization of Zygophyllaceae from diverse ecological zones of Balochistan, Pakistan. *Applied ecology and environmental research*, 18(2), 2445-2462.
12. AHMED M.M., EID M.M., 2015.- Evaluation of *Balanites aegyptiaca* oil as untraditional source of oil and its antiinflammatory activity. *Journal of Drug Research of Egypt*, 36(1), 1-11.
13. AL ASHAAL H.A., FARGHALY A.A., ABD EL AZIZ M.M., ALI M.A., 2010.- Phytochemical investigation and medicinal evaluation of fixed oil of *Balanites aegyptiaca* fruits (Balantiaceae). *Journal of ethnopharmacology*, 127(2), 495-501.
14. ALAM M.N., BRISTI N.J., RAFIQUZZAMAN M., 2013.- Review on in vivo and in vitro methods evaluation of antioxidant activity. *Saudi pharmaceutical journal*, 21(2), 143-152.

15. ALEXANDRE D.Y., 2002.- *Initiation à l'agroforesterie en zone sahélienne: les arbres des champs du Plateau Central au Burkina Faso*. IRD – KARTHALA, 234p.
16. AL-MALKI A.L., BARBOUR E.K., ABULNAJA K.O., MOSELHY S.S., 2015.- Management of hyperglycaemia by ethyl acetate extract of *Balanites aegyptiaca* (desert date). *Molecules*, 20(8), 14425-14434.
17. AL-MALKI A.L., BARBOUR E.K., ABULNAJA K.O., MOSELHY S.S., KUMOSANI T.A., CHOUDHRY H., 2016.- *Balanites aegyptiaca* protection against proliferation of different cancer cell line. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 13(2), 25-30.
18. AL-THOBAITI S.A., ABU ZEID I.M., 2018.- Medicinal properties of desert date plants (*Balanites aegyptiaca*)-an overview. *Global Journal of Pharmacology*, 12(1), 01-12.
19. AMAMOU S., LAZREG H., HAFSA J., MAJDOUB H., RIHOUEY C., LE CERF D., ACHOUR, L., 2020.- Effect of extraction condition on the antioxidant, antiglycation and  $\alpha$ -amylase inhibitory activities of *Opuntia macrorhiza* fruit peels polysaccharides. *Lwt*, 127, 109411.
20. APOSTOLIDIS E., KWON Y.I., SHETTY K., 2007.- Inhibitory potential of herb, fruit, and fungal-enriched cheese against key enzymes linked to type 2 diabetes and hypertension. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8 (1), 46-54.
21. ARBONNIER M., 2002.- *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest* (2<sup>e</sup> éd). CIRAD, MNHN, 573p.
22. ARTS M.J., DALLINGA J.S., VOSS H.P., HAENEN G.R., BAST A., 2003.- A critical appraisal of the use of the antioxidant capacity (TEAC) assay in defining optimal antioxidant structures. *Food Chemistry*, 80(3), 409-414.
23. ASHOUSH Y., ALI A., ABOZID M., ASKER M., SALAMA M., 2022.- Comparative study between polysaccharides isolated from okra and purslane. *Menoufia Journal of Agricultural Biotechnology*, 7(2), 15-26.
24. AUDIGIE C., ZONSZAIN F., 1999.- *Biochimie structurale*. Doin. Paris. 266p.
25. BAI L., XU D., ZHOU Y.M., ZHANG Y.B., ZHANG H., CHEN Y.B., CUI Y.L., 2022.- Antioxidant Activities of Natural Polysaccharides and Their Derivatives for Biomedical and Medicinal Applications. *Antioxidants*, 11, 2491.
26. BAILEY-SHAW Y.A., WILLIAMS L.A., GREEN C.E., RODNEY S., SMITH A.M., 2017.- In-vitro evaluation of the anti-inflammatory potential of selected jamaican plant extracts using the bovine serum albumin protein denaturation assay. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 47(1), 145-153.
27. BAKHIET A.O., ADAM S.E., 1995.- Therapeutic utility, constituents and toxicity of some medicinal plants: a review. *Veterinary Human Toxicology*, 37(3), 255-258.
28. BATANOUNY K.H. and EZZAT N.H., 1971.- Eco-physiological studies on desert plants: I. Autecology of Egyptian Zygophyllum species. *Oecologia*, 7, 170-183.
29. BAUER W.J., BADOUD R., LOLIGER J., ETOURNAUD A., 2010.- *Science et technologies des aliments. Principes de chimie des constituants et de la technologie des procédés*. Ed. Presses polytechniques et universitaires. France. 736p.
30. BEENTJE H.J., 2003.- *Flora of tropical East Africa –Balanitaceae* (1<sup>e</sup> éd). CRC Press, London, 350p.

31. BEIT-YANNAI E., BEN-SHABAT S., GOLDSCHMIDT N., CHAPAGAIN B.P., LIU R.H., WIESMAN Z., 2011.- Antiproliferative activity of steroidal saponins from *Balanites aegyptiaca*—an in vitro study. *Phytochemistry letters*, 4(1), 43-47.
32. BELGUIDOUM M., DENDOUGUI H., KENDOUR Z., 2015.- In vitro antioxidant properties and phenolic contents of *Zygophyllum album* L. from Algeria. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 7(1), 510-514.
33. BELLIE J., CRACOWSKI J.L., 2016.- *Pharmacologie cardiovasculaire et respiratoire* (2<sup>e</sup> éd). Elsevier-Masson, 256p.
34. BELMIMOUN A., MEDDAH B., LARBI K.S., SONNET P., 2017.- Phytochemical study of *Zygophyllum album* extract. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 4(5), 1-10.
35. BELMIMOUN A., MEDDAH B., MEDDAH A.T., SONNET P., 2016.- Antibacterial and antioxidant activities of the essential oils and phenolic extracts of *Myrtus communis* and *Zygophyllum album* from Algeria. *Journal of fundamental and applied sciences*, 8(2), 510-524.
36. BEMILLER J., 2008.- Polysaccharides: Occurrence, significance, and properties. In *Glycoscience* (1413- 1435). Springer.
37. BEMILLER J.N., 1967.- Acid-catalyzed hydrolysis of glycosides. *Advances in carbohydrate chemistry*, 22, 25-108.
38. BENAOUN F., 2017.- *Caractérisation structurale et potentiel biologique des polysaccharides issus de Plantago notata Lagasca (Plantaginaceae) et Urginea noctiflora Batt. et Trab. (Liliaceae)*. Université Clermont-Auvergne, France; Thèse de doctorat, Biochimie, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie, 230p.
39. BENAOUN F., DELATTRE C., BOUAL Z., URSU A.V., VIAL C., GARDARIN C., WADOUACHI A., LE CERF D., VARACAVOUDIN T., OULD EL-HADJ M.D., MICHAUD P., PIERRE, G., 2017.- Structural characterization and rheological behavior of a heteroxylan extracted from *Plantago notata* Lagasca. (Plantaginaceae) seeds. *Carbohydrate Polymers*, 175, 96-104.
40. BENSACI N., ABDI A., AZIZA H.B., AOUADI S., 2022.- Characterization and biological evaluation of *Crataegus azarolus* fruit polysaccharides. *Journal of Molecular Structure*, 1270 (40), 133889.
41. BENYAKOUB A. R., ABDEHEDI O., JRIDI M., ELFALLEH W., BKHAIIRA I., NASRI M., FERCHICHI A., 2020.- Bioactive polysaccharides and their soluble fraction from Tossa jute (*Corchorus olitorius* L.) leaves. *Food Bioscience*, 37, 100741.
42. BHATNAGAR A., SHARMA P.K., KUMAR N., UPADHYAY A., 2012.- Synthesis and in vitro evaluation of antioxidant and anti-inflammatory activity of 3-[4, 5-dihydro-(5-substituted phenyl)-1 H-pyrazol-3-yl]-2 H-chromen-2-one derivatives. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 46(8), 482-487
43. BIERMANN C.J., 1988.- Hydrolysis and other cleavages of glycosidic linkages in polysaccharides. In *Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry* (251-271). Academic Press.
44. BLICKLE J.F., ANDRES E., BROGARD J.M., 1999.- Actualités dans les traitements du diabète de type 2. Les inhibiteurs des alpha-glucosidases. *La Revue de médecine interne*, 20, 379s-383s.

45. BLUMENKRANTZ N., ASBOE-HANSEN G., 1973.- New method for quantitative determination of uronic acids. *Analytical biochemistry*, 54(2), 484-489.
46. BONDET V., BRAND-WILLIAMS W., BERSET C.L.W.T., 1997.- Kinetics and mechanisms of antioxidant activity using the DPPH free radical method. *LWT-Food Science and Technology*, 30(6), 609-615.
47. BOUAL Z., 2014.- *Caractérisation physico-chimique des polysaccharides de quelques plantes spontanées à caractère médicinal récoltées dans la région de Ghardaïa (Sahara Septentrional Est algérien) : Activité biologique*. Thèse de doctorat, Biochimie, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie, 219p.
48. BOUAL Z., KEMASSI A., CHOUANA T., MICHAUD P., OULD EL HADJ M.D., 2015.- Chemical characterization and prebiotic effect of water-soluble polysaccharides from *Zizyphus lotus* leaves. *International Journal of Bioengineering and Life Sciences*, 9(12), 1194-1197.
49. BOUAL Z., KEMASSI A., OUDJANA A.H., MICHAUD P., OULD EL HADJ M.D., 2013.- Caractérisation partielle des polysaccharides hydrosolubles des feuilles de *Malva parviflora* L.(Malvaceae): activité prébiotique. *Lebanese Science Journal*, 14(2), 41-51.
50. BOUCHONNET S., 2009.- *La spectrométrie de masse en couplage avec la chromatographie en phase gazeuse*. Lavoisier, France, 195p.
51. BOUCHONNET S., LIBONG D., 2004.- Le couplage chromatographie en phase gazeuse-spectrométrie de masse. *Actualité Chimique*, 275, 7-14.
52. BOUGANDOURA N., BENDIMERAD N., 2013.- Evaluation de l'activité antioxydante des extraits aqueux et méthanolique de *Satureja calamintha* ssp. *Nepeta* (L.) Briq. *Nature and Technology*, (9), 14-19.
53. BOUGATEF H., TANDIA F., SILA A., HADDAR A., BOUGATEF A., 2023.- Polysaccharides from baobab (*Adansonia digitata*) fruit pulp: Structural features and biological properties. *South African Journal of Botany*, 157, 387-397.
54. BOURGOU S., MEGDICHE W., KSOURI R., 2017.- The halophytic genus *Zygophyllum* and *Nitraria* from North Africa: A phytochemical and pharmacological overview. *Medicinal and Aromatic Plants of the World-Africa*, 3, 345-356.
55. 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.
56. BRANDT A., GRÄSVIK J., HALLETT J. P., WELTON T., 2013.- Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. *Green chemistry*, 15(3), 550-583.
57. BRUNETON J., 1999.- Pharmacognosie. Phytochimie, Plantes Médicinales. (3<sup>rd</sup> éd.). TEC and DOC, Paris, 1120 p.
58. 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* (283-316). Elsevier.
59. BUCKERIDGE M.S., 2010.- Seed cell wall storage polysaccharides: models to understand cell wall biosynthesis and degradation. *Plant Physiol.* 154(3), 1017-1023.
60. CAFFALL K.H., MOHNEN D., 2009.- The structure, function, and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides. *Carbohydrate research*, 344(14), 1879-1900.
61. CAROCHO M., FERREIRA I.C., 2013.- A review on antioxidants, prooxidants and related controversy: Natural and synthetic compounds, screening and analysis methodologies and future perspectives. *Food and chemical toxicology*, 51, 15-25.

62. CERQUEIRA M.A., PINHEIRO A.C., SOUZA B.W.S., LIMA A.M., RIBEIRO C., MIRANDA C., TEIXEIRA J.A., MOREIRA R.A., COIMBRA M.A., GONÇALVES M.P., VICENTE A.A., 2009.- Extraction, purification and characterization of galactomannans from non-traditional sources. *Carbohydrate Polymers*, 75(3), 408-414.
63. CHAKOU F.Z., BOUAL Z., HADJ M.D.O.E., BELKHALFA H., BACHARI K., EL ALAOUI-TALIBI Z., EL MODAFAR C., HADJKACEM F., FENDRI I., ABDELKAFI S., et al., 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 (12), 2658. 3
64. CHAPAGAIN B. P., WIESMAN Z., TSROR L., 2007.- In vitro study of the antifungal activity of saponin-rich extracts against prevalent phytopathogenic fungi. *Industrial Crops and Products*, 26(2), 109-115.
65. CHAPAGAIN B.P., YEHOUSHUA Y., WIESMAN Z., 2009.- Desert date (*Balanites aegyptiaca*) as an arid lands sustainable bioresource for biodiesel. *Bioresource Technology*, 100(3), 1221-1226.
66. CHEHMA A., DJEBAR M.R., 2008.- Les espèces médicinales spontanées du Sahara septentrional algérien: distribution spatio-temporelle et étude ethnobotanique. *Revue Synthèse*, 17, 36-45.
67. CHEN J., ZHANG X., HUO D., CAO C., LI Y., LIANG Y., LI B., LI L., 2019b.- Preliminary characterization, antioxidant and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from *Mallotus furetianus*. *Carbohydrate Polymers*, 215, 307-315.
68. CHEN S., HUANG H., HUANG G., 2019a.- Extraction, derivatization and antioxidant activity of cucumber polysaccharide. *International journal of biological Macromol*, 140, 1047-1053.
69. CHEN X., CHEN G., WANG Z., KAN J., 2020b.- A comparison of a polysaccharide extracted from ginger (*Zingiber officinale*) stems and leaves using different methods: preparation, structure characteristics, and biological activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 151, 635-649.
70. CHEN X., WANG Z., KAN J., 2021.- Polysaccharides from ginger stems and leaves: Effects of dual and triple frequency ultrasound assisted extraction on structural characteristics and biological activities. *Food Bioscience*, 42, 101166.
71. CHEN X., ZHANG H., DU W., QIAN L., XU Y., HUANG Y., XIONG Q., LI H., YUAN J., 2020a.- Comparison of different extraction methods for polysaccharides from *Crataegus pinnatifida* Bunge. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1011-1019.
72. CHEVALLIER A., 2001.- *Encyclopédie des plantes médicinales* (2<sup>e</sup> éd). Larousse / VUEF, Londres, 235p.
73. CHIPPA S. C., VOLLURI S. S., BAMMIDI S. R., VANGALAPATI, M., 2011.- In vitro anti-inflammatory activity of methanolic extract of *Centella asiatica* by HRBC membrane stabilisation. *Rasayan Journal of Chemistry*, 4(2), 457-460.

74. CHOPRA I.C., ABRAL B.K., HANDA K.L., 1960.- *Les plantes médicinales des régions arides considérées surtout du point de vue botanique*. UNESCO, 99p.
75. CHOTHANI D.L., VAGHASIYA H.U., 2011.- A review on *Balanites aegyptiaca* Del. (desert date): phytochemical constituents, traditional uses, and pharmacological activity. *Pharmacognosy reviews*, 5(9), 55.
76. CHOUANA T., PIERRE G., VIAL C., GARDARIN C., WADOUACHI A., CAILLEU D., LE CERF D., BOUAL Z., OULD EL HADJ M.D., MICHAUD P., DELATTRE, C., 2017.- Structural characterization and rheological properties of a galactomannan from *Astragalus gombo* Bunge seeds harvested in Algerian Sahara. *Carbohydrate Polymers*, 175, 387- 394.
77. CICCIO N., LANORTE M. T., PARAGGIO M., VIGGIANO M., LATTANZIO V., 2009.- A reproducible, rapid and inexpensive Folin–Ciocalteu micro-method in determining phenolics of plant methanol extracts. *Microchemical journal*, 91(1), 107-110.
78. CIPRIANI T.R., MELLINGER C.G., DE SOUZA L.M., BAGGIO C.H., FREITAS C.S., MARQUES M.C., GORIN P.A., SASSAKI G.L., IACOMINI M., 2006.- A polysaccharide from a tea (infusion) of *Maytenus ilicifolia* leaves with anti-ulcer protective effects. *Journal of Natural Products*, 69(7), 1018-1021.
79. COLLIEC-JOUAULT S., ZANCHETTA P., HELLEY D., RATISKOL J., SINQUIN C., FISCHER A. M., GUEZENNEC J., 2004.- Les polysaccharides microbiens d'origine marine et leur potentiel en thérapeutique humaine. *Pathologie Biologie*, 52(3), 127-130.
80. COMBO A.M.M., AGUEDO M., PAQUOT M., 2011.- Les oligosaccharides pectiques: production et applications possibles. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(1), 153-164.
81. COUDREAU S., 2009.- Traitements antidiabétiques et prise de poids. *Réalités en nutrition et en diabétologie*, 21, 7-12.
82. CYBORAN S., OSZMIANSKI J., KLESZCZYNSKA H., 2012.- Interaction between plant polyphenols and the erythrocyte membrane. *Cellular and Molecular Biology Letters*, 17(1), 77-88.
83. DA SILVA A.E., MARCELINO H.R., GOMES M.C.S., OLIVEIRA E.E., NAGASHIMA JR T., EGITO E.S.T., 2012.- Xylan, a promising hemicellulose for pharmaceutical use. *Products and applications of biopolymers*, 7, 61-84
84. DELATTRE C., FENORADOSOA T.A., MICHAUD P., 2011.- Galactans: an overview of their most important sourcing and applications as natural polysaccharides. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 54, 1075-1092.
85. DELATTRE C., PIERRE G., LAROCHE C., MICHAUD P., 2016.- Production, extraction and characterization of microalgal and cyanobacterial exopolysaccharides. *Biotechnology advances*, 34(7), 1159-1179.
86. DENG Y., HUANG L., ZHANG C., XIE P., CHENG J., WANG X., LIU L., 2020.- Novel polysaccharide from *Chaenomeles speciosa* seeds: Structural characterization,  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activity evaluation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 755-766.
87. DESHAVATH N.N., VEERANKI V.D., GOUD V.V., 2019.- Lignocellulosic feedstocks for the production of bioethanol: availability, structure, and composition. *In Sustainable bioenergy* (1-19). Elsevier.

88. DEY H., SHAILI S., 2023.- Exploring the Phytochemical Diversity and pharmacological potentials of *Balanites aegyptiaca*: A Review. *International Journal of Newgen Research in Pharmacy and Healthcare*, 1(2), 53-63.
89. DEY P., CHATTERJEE P., CHANDRA S.,BHATTACHARYA S.,2011.- Comparative in vitro evaluation of anti-inflammatory effects of aerial parts and roots from *Mikania scandens*. *Journal of Advanced Pharmacy Education and Research*, 1(6), 271-277.
90. DHAHRI M., SIOUD S., ALSUHAYMI S., ALMULHIM F., HANEEF A., SAOUDI A., JAREMKO M., EMWAS A.H.M., 2023.- Extraction, Characterization, and Antioxidant Activity of Polysaccharides from Ajwa Seed and Flesh. *Separations*, 10, 103.
91. DHARANI N., 2016.- Traditional Ethnomedicinal uses, phytochemistry and pharmacological properties of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del. in East Africa: a review. *Pharm Journal* - Published by Kenyatta University Pharmacy Students Association (KUPHSA). Kenyatta University Press (KUP) PHARM J. 02,42-46.
92. DJOVA S.V., NYEGUE M.A., MESSI A.N., AFAGNIGNI A.D., ETOA F.X., 2019.- Phytochemical study of aqueous extract of *Ochna schweinfurthiana* F. Hoffm powder bark and evaluation of their anti- inflammatory, cytotoxic, and genotoxic properties. *Evidence- Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019 (1), 8908343.
93. DOU Z., CHEN C., FU X., 2019.- The effect of ultrasound irradiation on the physicochemical properties and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory effect of blackberry fruit polysaccharide. *Food Hydrocolloids*, 96, 568-576.
94. DRĂGAN M., STAN C.D., IACOB A., PROFIRE L., 2016.- Assessment of in vitro antioxidant and anti-inflammatory activities of new azetidin-2-one derivatives of ferulic acid. *Farmacia*, 64 (5), 717-721.
95. DUAN G.L., YU X.B., 2019.- Isolation, purification, characterization, and antioxidant activity of low-molecular-weight polysaccharides from *Sparassis latifolia*. *International journal of biological macromolecules*, 137, 1112-1120.
96. DUAN M., SHANG H., CHEN S., LI R., WU H., 2018.- Physicochemical properties and activities of comfrey polysaccharides extracted by different techniques. *International journal of biological macromolecules*, 115, 876-882.
97. DUBEY P.K., YOGI M., BHARADWAJ A., SONI M. L., SINGH A., SACHAN A.K., 2011.- *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., a semi-arid forest tree: a review. *Academic Journal of Plant Sciences*, 4(1), 12-18.
98. 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.
99. EBRINGEROVA A., HROMADKOVA Z., HEINZE T., 2005.- Hemicellulose. In *Polysaccharides I. Advances in Polymer Science* (1-67).Springer.
100. ECKARDT N.A., 2008.- Role of xyloglucan in primary cell walls. *Plant Cell*. 20(6), 1421-1422.
101. EL HADIDI M.N., 1978.- Adumbratio Florae Aethiopicae. 30. Zygophyllaceae. *Webbia*, 33(1), 45-101.
102. EL-NUR E.E., AHMED I.M., BABEKER H.A., 2015.- Phenolic compounds in the taxonomy of selected members of the family zygophyllaceae with reference to APG III classification system. *International Journal of Science, Environment*, 4(5), 1336-1343.

103. EL-ATTAR M.M., ABDEL-TAWAB F.M., AWAD A.A., AHMAD E.S., KAMEL H.A., HASSAN A.I., 2019.- Anti-cancer effects of *Zygophyllum album* and *Suaeda palaestina* extracts on human liver cancer cell lines. *Egyptian Journal of Genetics and Cytology*, 48, 77-90.
104. ELGAMAL M.H.A., SHAKER K.H., PÖLLMANN K., SEIFERT K., 1995.- Triterpenoid saponins from *Zygophyllum* species. *Phytochemistry*, 40, 1233-1236.
105. EL-GHANI M.A., SOLIMAN A., EL-FATTAH R.A., 2014.- Spatial distribution and soil characteristics of the vegetation associated with common succulent plants in Egypt. *Turkish Journal of Botany*, 38(3), 550-565.
106. ELGORASHI E.E., MCGAW L.J., 2019.- African plants with in vitro anti-inflammatory activities: A review. *South African Journal of Botany*, 126, 142-169.
107. FAN M DAI D., HUANG B., 2012.- Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Natural Fibers. *Fourier Transform-Materials Analysis*, 3, 45-68.
108. FANG C., CHEN G., KAN J., 2020.- Comparison on characterization and biological activities of *Mentha haplocalyx* polysaccharides at different solvent extractions. *International journal of biological macromolecules*, 154, 916-928.
109. FARAG M.A., PORZEL A., WESSJOHANN L.A., 2015.- Unraveling the active hypoglycemic agent trigonelline in *Balanites aegyptiaca* date fruit using metabolite fingerprinting by NMR. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*. 115,383-387.
110. FERIANI A., TIR M., GOMEZ-CARAVACA A.M., CONTRERAS M.D.M., TALHAOUY N., TAAMALLI A., SEGURA-CARRETERO A., GHAZOUANI L., MUFTI A., TLILI N., ALLAGUI M.S., 2020.- HPLC-DAD-ESI-QTOF-MS/MS profiling of *Zygophyllum album* roots extract and assessment of its cardioprotective effect against deltamethrin-induced myocardial injuries in rat, by suppression of oxidative stress-related inflammation and apoptosis via NF- $\kappa$ B signaling pathway. *Journal of Ethnopharmacol.* 247,112266.
111. FILISETTI-COZZI T.M., CARPITA N.C., 1991.- Measurement of uronic acids without interference from neutral sugars. *Analytical biochemistry*, 197(1), 157-162.
112. FROHNE D., PFÄNDER H.J., ANTON R., BERNARD M., 2009.- *Plantes à risques: un ouvrage destiné aux pharmaciens, aux médecins, toxicologues et biologistes*. Tec et Doc. Paris, 460p.
113. FRY S.C., 2010.- Cell wall polysaccharide composition and covalent crosslinking. *Annual plant reviews: plant polysaccharides, biosynthesis and bioengineering*, 41, 1-42.
114. FU Y., YUAN Q., LIN S., LIU W., DU G., ZHAO L., ZHANG Q., LIN D.R., LIU Y.T., QIN W., LI D.Q., WU D.T., 2019.- Physicochemical characteristics and biological activities of polysaccharides from the leaves of different loquat (*Eriobotrya japonica*) cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135,274-281.
115. GAJALAKSHMI S., VIJAYALAKSHMI S., DEVI RAJESWARI V., 2013.- Pharmacological Activities of *Balanites aegyptiaca* (L.)-A Perspective Review. *International Journal of Pharmaceutical Science Review Research*, 22(1), 117-120.
116. GARON-LARDIERE S., 2004.- *Etude structurale des polysaccharides pariétaux de l'algue rouge Asparagopsis armata (Bonnemaisoniales)*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, France, 332 p.

117. GAUR K., KORI M.L., SHARMA C.S., VIRENDRA, S., 2008.- Anti-inflammatory and analgesic activity of *Balanites aegyptiaca* in experimental animal models. *International Journal of Green Pharmacy*, 2, 214-217.
118. GHEBREGZABHER M., RUFINI S., MONALDI B., LATO M., 1976.- Thin-layer chromatography of carbohydrates. *Journal of Chromatography A*, 127(2), 133-162.
119. GHOUL J., BEN-ATTIA M., 2014.- Vasorelaxant effects of aqueous extract of *Zygophyllum album* and antihyperglycemic activities in streptozotocin-induced diabetic mice. *Journal of Diabetes and Metabolism*, 5(9), 426. doi:10.4172/2155-6156.1000426
120. GHOUL J., BOUGHATTAS N.A., BEN-ATTIA M., 2012.- Antihyperglycemic and antihyperlipidemic activities of ethanolic extract of *Zygophyllum album* in streptozotocin-induced diabetic mice. *Toxicology and Industrial Health*, 1-9.
121. GNANASAMBANDAM R., PROCTOR A., 2000.- Determination of pectin degree of esterification by diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy. *Food chemistry*, 68(3), 327-332.
122. GNOULA C., MEGALIZZI V., DE NEVE N., SAUVAGE S., RIBAUCCOUR F., GUISSOU P., DUEZ P., DUBOIS J., INGRASSIA L., LEFRANC F., KISS R., MIJATOVIC T., 2008.- Balanitin-6 and-7: diosgenyl saponins isolated from *Balanites aegyptiaca* Del. display significant anti-tumor activity in vitro and in vivo. *International journal of oncology*, 32(1), 5-15.
123. GODIN B., AGNEESSENS R., GOFFLOT S., LAMAUDIÈRE S., SINNAEVE G., GERIN P.A., DELCARTE J., 2011.- Revue bibliographique sur les méthodes d'analyse des polysaccharides structuraux des biomasses lignocellulosiques. *Biotechnologie, Agronomie, Société, Environnement*. 15 (1), 165-182.
124. GOMEZ L., JORDAN M.O., ADAMOWICZ S., LEISER H., PAGES L., 2003.- Du prélèvement au dosage: réflexions sur les problèmes posés par la mesure des glucides non structuraux chez les végétaux ligneux. *Cahiers Agricultures*, 12(6), 369-386.
125. GRANATO D., RESHAMWALA D., KORPINEN R., AZEVEDO L., VIEIRA DO CARMO M.A., CRUZ T.M., MARQUES M.B., WEN M., ZHANG L., MARJOMÄKI V., KILPELÄINEN P., 2022.- From the forest to the plate—hemicelluloses, galactoglucomannan, glucuronoxylan, and phenolic-rich extracts from unconventional sources as functional food ingredients. *Food chemistry*, 381, 132284.
126. GU S., SUN H., ZHANG X., HUANG F., PAN L., ZHU Z., 2021.- Structural characterization and inhibitions on  $\alpha$ -glucosidase and  $\alpha$ -amylase of alkali-extracted water-soluble polysaccharide from *Annona squamosa* residue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166, 730-740.
127. GUIGNARD J.L., POTIER P., 2000.- *Biochimie végétale*, (2<sup>e</sup> éd), Dunod, Paris, 274p.
128. GUO H., FU M.X., WU D.T., ZHAO Y.X., LI H., LI H.B., GAN R.Y., 2021.- Structural characteristics of crude polysaccharides from 12 selected Chinese teas, and their antioxidant and anti-diabetic activities. *Antioxidants*, 10(10), 1562.
129. GUPTA G.K., TEJAS J., KESHU M., ARIJIT C., 2017.- Therapeutic Properties and Nutritive Values of Some Fruit Bearing Medicinal Plants of Rajasthan State in India. *Pharmaceutical and Biosciences Journal*, 18-26.
130. HABIBI Y., 2004.- *Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de Barbarie, les polysaccharides pariétaux : caractérisation et modifications chimiques*. Thèse de Doctorat. Université Joseph Fourier; France, Université Cadi Ayyad,

- Maroc, 236p.
131. HAFSA J., HAMMI K.M., LE CERF D., LIMEM K., MAJDOUB H., CHARFEDDINE B., 2018.- Characterization, antioxidant and antiglycation properties of polysaccharides extracted from the medicinal halophyte *Carpobrotus edulis* L. *International journal of biological macromolecules*, 107, 833-842.
  132. HAMMAD I., QARI S.H., 2010.- Genetic diversity among *Zygophyllum* (Zygophyllaceae) populations based on RAPD analysis. *Genetics and Molecular Research*, 9 (4), 2412-2420.
  133. HAMMI K.M., HAMMAMI M., RIHOUEY C., CERF D.L., KSOURI R., MAJDOUB H., 2016.- Optimization extraction of polysaccharide from Tunisian *Zizyphus lotus* fruit by response surface methodology: Composition and antioxidant activity, *Food Chemistry*, 212, 476-484.
  134. HAMMICHE V., MAIZA K., 2006.- Traditional medicine in Central Sahara: Pharmacopoeia of Tassili N'ajjer. *Journal of Ethnopharmacology*, 105, 358–367.
  135. HAN N., WANG L., SONG Z., LIN J., YE C., LIU Z., YIN J., 2016a.- Optimization and antioxidant activity of polysaccharides from *Plantago depressa*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 644-654.
  136. HAN Q., WU Z., HUANG B., SUN L., DING C., YUAN S., ZHANG Z., CHEN Y., HU C., ZHOU L., LIU J., HUANG Y., LIAO J., YUAN M., 2016b.- Extraction, antioxidant and antibacterial activities of *Broussonetia papyrifera* fruits polysaccharides. *International journal of biological macromolecules*, 92, 116-124.
  137. HASANEAN H.A., EL-SHANAWANY M.A., BISHAY D.W., FRANZ G., 1989.- Saponins from *Zygophyllum album* L. *Bulletin of Pharmaceutical Sciences Assiut University*, 12(1), 117-124.
  138. HASSAN L.E., DAHHAM S.S., SAGHIR S.A., MOHAMMED A.M., ELTAYEB N.M., MAJID A.M., MAJID A.S., 2016.- Chemotherapeutic potentials of the stem bark of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile: an antiangiogenic, antitumor and antioxidant agent. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 16(396), 1-13.
  139. HASSANEAN H.H., DESOKY E.K., EL-HAMOULY M.M.A., 1993.- Quinovic acid glycosides from *Zygophyllum album*. *Phytochemistry*, 33, 663-666.
  140. HE T.B., HUANG Y.P., HUANG Y., WANG X.J., HU J.M., SHENG J., 2018.- Structural elucidation and antioxidant activity of an arabinogalactan from the leaves of *Moringa oleifera*. *International journal of biological macromolecules*, 112, 126-133.
  141. HEINZE T., PETZOLD-WELCKE K., VAN DAM J.E., 2012.- Polysaccharides: Molecular and supramolecular structures. Terminology. In *The European Polysaccharide Network of Excellence (EPNOE) Research Initiatives and Results* (23-64). Springer.
  142. HINES D.A., ECKMAN K., 1993.- *Indigenous multipurpose trees of Tanzania: uses and economic benefits for people*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 276 p.
  143. HOFFMAN M., JIA Z., PEÑA M.J., CASH M., HARPER A., 2005.- Structural analysis of xyloglucans in the primary cell walls of plants in the subclass Asteridae. *Carbohydrate research*, 340(11), 1826-1840.
  144. HONG T., YIN J.Y., NIE S.P., XIE M.Y., 2021.- Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective. *Food chemistry: X*, 12, 100168.

145. HOTON-DORGE M., 1976.- Séparation des aldoses et des polysaccharides par chromatographie en couche mince de cellulose et nouveau réactif de pulvérisation permettant leur révélation sensible. *Journal of Chromatography A*, 116(2), 417-423.
146. HSU W.K., HSU T.H., LIN F.Y., CHENG Y.K., YANG J.P.W., 2013.- Separation, purification, and  $\alpha$ -glucosidase inhibition of polysaccharides from *Coriolus versicolor* LH1 mycelia. *Carbohydrate polymers*, 92(1), 297-306.
147. HUANG F., ZHANG R., YI Y., TANG X., ZHANG M., SU D., DENG Y., WEI Z., 2014.- Comparison of physicochemical properties and immunomodulatory activity of polysaccharides from fresh and dried litchi pulp. *Molecules*, 19(4), 3909-3925.
148. HUANG X., AI C., YAO H., ZHAO C., XIANG C., HONG T., XIAO J., 2022.- Guideline for the extraction, isolation, purification, and structural characterization of polysaccharides from natural resources. *eFood*, 3(6), 1-16.
149. HUANG Y., XIE W., TANG T., CHEN H., ZHOU X., 2023.- Structural characteristics, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Mori Fructus* based on different extraction methods. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1125831.
150. HUSSEIN S.R., MARZOUK M.M., IBRAHIM L.F., KAWASHTY NABIEL S.A., SALEH A.M., 2011.- Flavonoids of *Zygophyllum album* L.f. and *Zygophyllum simplex* L. (Zygophyllaceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, 39, 778-780.
151. HYARDIN A., ASTIER C., MEJEAN L., 2009.- Peut-on parler de fonctionnalité pour un aliment de formulation complexe?. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 44(3), 119-123.
152. IFFATH H.M., CAROLINE R.J., 2018.- In vitro anti-inflammatory and antiarthritic activity of *Pergularia daemia* leaves and roots. *International Journal of Drug Development and Research*, 10, 10-13.
153. ISHNAVA K.B., MOTISARIYA D.M., 2018.- In vitro study on  $\alpha$ -amylase inhibitory activity of selected ethnobotanical plant extracts and its herbal formulations. *International Journal of Pharmacognosy and Chinese Medicine*, 2(3), 1-11.
154. IŞIL BERKER K., GÜÇLÜ K., TOR İ., DEMIRATA B., APAK R., 2010.- Total antioxidant capacity assay using optimized ferricyanide/prussian blue method. *Food Analytical Methods*, 3, 154-168.
155. IWALEWA E. O., MCGAW L. J., NAIDOO V., ELOFF J. N., 2007.- Inflammation: the foundation of diseases and disorders. A review of phytomedicines of South African origin used to treat pain and inflammatory conditions. *African journal of biotechnology*, 6(25), 2868-2885.
156. JANAHA I., ELHASNAOUI A., BAMMOU A.B., AMSSAYEF A., EDDOUKS M., 2024.- An Overview on Pharmacological, Ethnomedicinal and Phytochemical Investigations of *Zygophyllum gaetulum* Emb. and Maire - an Endemic Species of Southeast of Morocco. *Plant Science Today*, 11(sp1), 207-215.
157. JI N., LIU P., ZHANG N., YANG S., ZHANG M., 2022.- Comparison on bioactivities and characteristics of polysaccharides from four varieties of *Gastrodia elata* Blume. *Frontiers in Chemistry*, 10, 956724.
158. JI X., HOU C., YAN Y., SHI M., LIU Y., 2020.- Comparison of structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit. *International journal of biological Macromol*, 149, 1008-1018.
159. JIA Y., GAO X., XUE Z., WANG Y., LU Y., ZHANG M., PANICHAYUPAKARANANT P, CHEN H. 2020.- Characterization, antioxidant activities,

- and inhibition on  $\alpha$ -glucosidase activity of corn silk polysaccharides obtained by different extraction methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163, 1640-1648.
160. JIANG X.Y., WANG C.W., ZHANG J., XU P.P., XUE Y.T., WANG Q., 2023.- Effects of different extraction methods on physicochemical characteristics and bioactivities of fig (*Ficus carica* L.) leaves polysaccharides. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(12), 105319.
  161. JIN M.Y., LI M.Y., HUANG R.M., WU X.Y., SUN Y.M., XU Z.L., 2021.- *Structural features and anti-inflammatory properties of pectic polysaccharides: a review. Trends in Food Science and Technology*, 107, 284–98.
  162. JOSEPH N.M., MONIKA S., ALOK S., ALOK M., SHRUTI R., 2010.- In vitro and in vivo models for antioxidant activity evaluation: A review. *International Journal Of Pharmaceutical Sciences And Research*, 1(1), 1-11.
  163. JUDD W.J., CAMBELL C.J., KELLOGY E.A., STEVENS P., 2002.- *Botanique systématique : une perspective phylogénétique*, De Boeck, Paris, 467 p.
  164. KABIR S.F., RAHMAN A., YEASMIN F., SULTANA S., MASUD R.A., KANAK N.A., HAQUE P., 2022.- Occurrence, distribution, and structure of natural polysaccharides. In *Radiation-processed polysaccharides* (1-27), Academic Press.
  165. KALASZ H., BATHORI M., VALKO K.L., 2000.- Basis and pharmaceutical applications of thin-layer chromatography. In *Handbook of Analytical Separations* (439-501). Elsevier Science BV.
  166. KAMERLING J.P., GERWIG G.J., VLIEGENTHART J.F.G., CLAMP J.R., 1975.- Characterization by gas-liquid chromatography-mass spectrometry and proton-magnetic-resonance spectroscopy of pertrimethylsilyl methyl glycosids obtained in the methanolysis of glycoproteins and glycopeptides. *Biochemical Journal*. 151, 491-495.
  167. KCHAOU M., BEN SALAH H., MHIRI R., ALLOUCHE N., 2016b.- Anti-oxidant and anti-acetylcholinesterase activities of *Zygophyllum album*. *Bangladesh Journal of Pharmacology*. 11(1), 54-62.
  168. KCHAOU M., BEN SALAH H., MNAFGUI K., ABDENNABI R., GHARSALLAH N., ELFEKI A., DAMAK M., ALLOUCHE N., 2016a.- Chemical Composition and Biological Activities of *Zygophyllum album* (L.) Essential Oil from Tunisia. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18, 1499-1510.
  169. KHAN S.S., KHAN A., KHAN A., FAROOQ U., AHMED A., ZAHOOOR A., AHMAD V.U., SENER B., ERDEMOGLU N., 2014.- A New Ursane Type Sulfated Saponin from *Zygophyllum fabago* Linn, *Records of Natural Products*, 8 (21), 354-359.
  170. KIM K.T., RIOUX L.E., TURGE S.L., 2014.- Alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibition is differentially modulated by fucoidan obtained from *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*. *Phytochemistry*, 98, 27-33.
  171. KRUGER N. J., 2009.- The Bradford method for protein quantitation. *The protein protocols handbook*, 17-24.
  172. KSOURI W.M., MEDINI F., MKADMINI K., LEGAULT J., MAGNÉ C., ABDELLY C., KSOURI R., 2013.- LC-ESI-TOF-MS identification of bioactive secondary metabolites involved in the antioxidant, anti-inflammatory and anticancer activities of the edible halophyte *Zygophyllum album* Desf. *Food Chemistry*, 139(1-4), 1073-1080.
  173. KUMAR V., NAGAR S., SHARMA P., 2020.- Opportunity of plant oligosaccharides and polysaccharides in drug development. In *Carbohydrates in drug discovery and development* (587-639). Elsevier.

174. KUMAR V., PRAKASH O., KUMAR S., NARWAL S., 2011.-  $\alpha$ -glucosidase inhibitors from plants: A natural approach to treat diabetes. *Pharmacognosy Reviews*, 5(9), 19-29.
175. LAKHDARI W., DEHLIZ A., ACHEUK F., MLIK R., HAMMI H., DOUMANDJIMITICHE B., GHERIANI S., BERREKBIA M., GUERMIT K., CHERGUI S., 2016.- Ethnobotanical study of some plants used in traditional medicine in the region of Oued Righ (Algerian Sahara). *Journal of Medicinal Plants Studies*, 4 (2), 204-211.
176. LAOUFI H., BENARIBA N., ADJDIR S., DJAZIRI R., 2017.- In vitro  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitory activity of *Ononis angustissima* extracts. *Journal of applied pharmaceutical science*, 7(2), 191-198.
177. LEVEQUE E., HAYE B., BELARBI A., 2004.- L'amidon et ses dérivés, applications industrielles. Elsevier, Paris, 120p.
178. LI B., DOBRUCHOWSKA J.M., GERWIG G.J., DIJKHUIZEN L., KAMERLING J.P., 2013.- Structural investigation of water-soluble polysaccharides extracted from the fruit bodies of *Coprinus comatus*. *Carbohydrate Polymers*, 91(1), 314-321.
179. LI K., YAO F., XUE Q., FAN H., YANG L., LI X., SUN L., LIU Y., 2018a.- Inhibitory effects against  $\alpha$ -glucosidase and  $\alpha$ -amylase of the flavonoids-rich extract from *Scutellaria baicalensis* shoots and interpretation of structure–activity relationship of its eight flavonoids by a refined assign-score method. *Chemistry Central Journal*, 12 (82), 1-11.
180. LI L., SU Y., FENG Y., HONG R., 2020.- A comparison study on digestion, anti-inflammatory and functional properties of polysaccharides from four *Auricularia* species. *International journal of biological macromolecules*, 154, 1074-1081.
181. LI X., WANG L., 2016.- Effect of extraction method on structure and antioxidant activity of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, 83, 270-276.
182. LI Y., XU F., ZHENG M., XI X., CUI X., HAN C., 2018b.- Maca polysaccharides: A review of compositions, isolation, therapeutics and prospects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 894-902.
183. LI Y.J., LIN D.D., JIAO B., XU C.T., QIN J.K., YE G.J., SU G.F., 2015.- Purification, antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharide from *Cissus pteroclada* Hayata. *International Journal of Biological Macromolecules*, 77, 307-313.
184. LIANG D., ZHOU Q., GONG W., WANG Y., NIE Z., HE H., LI J., WUA J., WUA C., ZHANG J., 2011.- Studies on the antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharides from *Talinum triangulare*. *Journal of ethnopharmacology*, 136(2), 316-321.
185. LIBOUGA D.G., VERCAIGNE-MARKO D., DJANGAL S.L., CHOUKAMBOU I., EBANGI A.L., OMBIONYO M., BEKA R.G., ABOUBAKAR T.M., GUILLOCHON D., 2006.- Mise en évidence d'un agent coagulant utilisable en fromagerie dans les fruits de *Balanites aegyptiaca*. *Tropicult*, 24(4), 229-238.
186. LITESCU S.C., EREMIA S.A., TACHE A., VASILESCU I., RADU G.L., 2014.- The use of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assays in the assessment of beverages' antioxidant properties. In *Processing and impact on antioxidants in beverages* (245-251). Oxford Academic press.
187. LIU C., LIU Q., SUN J., JIANG B., YAN J., 2014.- Extraction of water-soluble polysaccharide and the antioxidant activity from *Semen cassiae*. *Journal of food and drug analysis*. 22, 492-499.

188. LIU D., TANG W., YIN J. Y., NIE S. P., XIE M. Y., 2021.- Monosaccharide composition analysis of polysaccharides from natural sources: Hydrolysis condition and detection method development. *Food Hydrocolloids*, 116, 106641.
189. LIU J., WILLFO S., XUN C., 2015.- A review of bioactive plant polysaccharides: Biological activities, functionalization, and biomedical applications. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 5, 31-61.
190. LIU Y., LI S.M., 2020.- Extraction optimization and antioxidant activity of *Phyllanthus urinaria* polysaccharides. *Food Science and Technology*. 1-7.
191. LIU Y., ZHANG B., IBRAHIM S.A., GAO S.S., YANG H., HUANG W., 2016.- Purification, characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Flammulina velutipes* residue. *Carbohydrate polymers*, 145, 71-77.
192. LIVINGSTON D.P., HINCHA D.K., HEYER A.G., 2009.- Fructan and its relationship to abiotic stress tolerance in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 66, 2007-2023.
193. MAHMOUD T., GAIROLA S., 2013.- Traditional knowledge and use of medicinal plants in the Eastern Desert of Egypt: a case study from Wadi El-Gemal National Park. *Journal of Medicinal Plants*, 1(6), 10-17.
194. MAJEE S.B., AVLANI D., BISWAS G.R., 2016.- Non-starch plant polysaccharides: physicochemical modifications and pharmaceutical applications. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 6(10), 231-241.
195. MAJI B., 2019.- Introduction to natural polysaccharides. In *Functional polysaccharides for biomedical applications* (1-31). Woodhead Publishing.
196. MARC F., DAVIN A., DEGLÈNE-BENBRAHIM L., FERRAND C., BACCAUNAUD M., FRITSCH P., 2004.- Méthodes d'évaluation du potentiel antioxydant dans les aliments. *Medecine Sciences*, 20(4), 458-463.
197. MAROUF A., TREMBLIN G., 2009.- Abrégé de biochimie appliquée. EDP sciences, Paris, 483p.
198. MAYAKRISHNAN V., KANNAPPAN P., ABDULLAH N., AHMED A.B.A., 2013.- Cardioprotective activity of polysaccharides derived from marine algae: An overview. *Trends in Food Science and Technology*, 30(2), 98-104.
199. MAYBA T., SUKY G., PARTHIPAN B., KINGSTON C., MOHAN V.R., SORIS P.T., 2011.- Hepatoprotective and antioxidant effect of *Balanites aegyptiaca* (L.) Del against CCL4 induced hepatotoxicity in rats. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2(3), 887-892.
200. MC NAUGHT A.D., 1996.- Nomenclature of carbohydrates (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, 68(10), 1919-2008.
201. MEDA R.N., VLASE L., LAMIEN-MEDA A., LAMIEN C.E., MUNTEAN D., TIPERCIUC B., ONIGA I., NACOULMA O.G., 2011.- Identification and quantification of phenolic compounds from *Balanites aegyptiaca* (L) Del. (Balanitaceae) galls and leaves by HPLC-MS. *Natural Product Research*, 25(2), 93-99.
202. MEHANNI A.E.S., EL- REFFAEI W.H.M., MELO A., CASAL S., FERREIRA I.M., 2017.- Enzymatic extraction of oil from *Balanites aegyptiaca* (Desert Date) kernel and comparison with solvent extracted oil. *Journal of food biochemistry*, 41(2), e12270.
203. MEHELLOU Z., 2023.- Caractérisation et activités biologiques des polysaccharides de quelques plantes spontanées à caractère médicinale récoltées dans la région d'El Oued

- (Sahara Septentrional Est Algérien). Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 121p.
204. MHYA D.H., ANIGO K.M., UMAR I.A., ALEGBEJO J.O., 2018.- Mechanisms and antidiabetic compounds of *Balanites aegyptiaca* Delile. plant: a mini-review, *South Asian Research Journal of Natural Products*, 1(2), 39-47.
  205. MIRZADEH M., ARIANEJAD M.R., KHEDMAT L., 2020.- Antioxidant, antiradical, and antimicrobial activities of polysaccharides obtained by microwave-assisted extraction method: A review. *Carbohydrate Polymers*, 229,115421.
  206. MNAFGUI, K., HAMDEN, K., BEN SALAH, H., KCHAOU, M., NASRI, M., SLAMA, S., DERBALI F., ALLOUCHE N., ELFEKI A., 2012.- Inhibitory Activities of *Zygophyllum album*: A Natural Weight-Lowering Plant on Key Enzymes in High-Fat Diet-Fed Rats. *Evid Based Complement Alternat Med*. 620384.
  207. MNAFGUI K., KCHAOU M., HAMDEN K., DERBALI F., SLAMA S., NASRI M., SALAH HB., ALLOUCHE N., ELFEKI A., 2014.- Inhibition of carbohydrate and lipid digestive enzymes activities by *Zygophyllum album* extracts: effect on blood and pancreas inflammatory biomarkers in alloxan-induced diabetic rats. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 70(1),93-106.
  208. MOHAMMED H.A., KHAN R.A., ABDEL-HAFEZ A.A., ABDEL-AZIZ M., AHMED E., ENANY S., MAHGOUB S., AL-RUGAIE O., ALSHARIDAH M., ALY M.S.A., et al., 2021.- Phytochemical Profiling, In vitro and in silico anti-microbial and anti-cancer activity evaluations and Staph GyraseB and h-TOP-II $\beta$  Receptor-Docking studies of major constituents of *Zygophyllum coccineum* L. aqueous-ethanolic extract and its subsequent fractions: an approach to validate traditional phytomedicinal knowledge. *Molecules*, 26, 577.
  209. MOHAMMEDI Z., 2020.- Phytochemical, antidiabetic and therapeutic properties of *Zygophyllum*. *Herbal Medicines Journal*, 5(4), 163-177.
  210. MOHANTA B., SEN D.J., MAHANTI B., and NAYAK A.K., 2022.- Antioxidant potential of herbal polysaccharides: An overview on recent researches. *Sensors International*, 3, 100158.
  211. MOHNEN D., 2008.- Pectin structure and biosynthesis. *Current opinion in plant biology*, 11(3), 266-277.
  212. MONTASSER A.O., SALEH H., AHMED-FARID O.A., SAAD A., MARIE M.A.S., 2017.- Protective effects of *Balanites aegyptiaca* extract, melatonin and ursodeoxycholic acid against hepatotoxicity induced by methotrexate in male rats. *Asian Pacific journal of tropical medicine*, 10(6), 557-565.
  213. MONTREUIL J., BOUQUELET S., DEBRAY H., FOURNET B., SPIK G., STRECKER G., 1986.- *Glycoproteins*. In *Carbohydrate analysis, a practical approach* (143-204). IRL Press, Oxford.
  214. MOREIRA L.R., FILHO E.X., 2008.- An overview of mannan structure and mannan-degrading enzyme systems. *Appl Microbiol Biotechnol*. 79(2), 165-78.
  215. MORRISON I.M., 1988.- Hydrolysis of plant cell walls with trifluoroacetic acid. *Phytochemistry*, 27(4), 1097-1100.
  216. MOUSTAFA A.M.Y., KODAIR A.I., HAMMOUDA F.M., HOUSSEINY H.A., 2007.- Phytochemical and toxicological studies of *Zygophyllum album* L., *Journal of pharmacology and toxicology*, 2(3), 220-237.

217. MULIMANI V.H., PRASHANTH S.J., 2002.- Investigating plant galactomannans. *Biochemistry and molecular biology education*, 30(2), 101-103
218. MUNTEANU I.G., APETREI C., 2021.- Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International journal of molecular sciences*, 22(7), 3380.
219. MURAD S.A., ABD-ELSHAFY D.N., ABOU BAKER D.H., BAHGAT M.M., IBRAHIM E.A., GAAFAR A.A., SALAMA Z., 2023.- Unveiling the anti-alzheimer, antioxidant, anti-inflammatory, antiviral therapeutic functionality of polysaccharides extracted from *Opuntia Ficus*. *Egyptian Journal of Chemistry*, 66(5), 237-244.
220. MURTHY H.N., YADAV G.G., DEWIR Y.H., IBRAHIM, A., 2021.- Phytochemicals and Biological Activity of Desert Date (*Balanites aegyptiaca* (L.) Delile). *Plants*, 10, 32.
221. MZOUGH Z., ABDELHAMID A., RIHOUEY C., LE CERF D., BOURAOUI A., MAJDOUB H., 2018a.- Optimized extraction of pectin-like polysaccharide from *Suaeda fruticosa* leaves: Characterization, antioxidant, anti-inflammatory and analgesic activities. *Carbohydrate polymers*, 185, 127-137.
222. MZOUGH Z., CHAOUCH M.A., HAMMI K.M., HAFSA J., LE CERF D., KSOURI R., MAJDOUB H., 2018b.- Optimization of antioxidant and antiglycated activities of polysaccharides from *Arthrocnemum indicum* leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113,774-782.
223. MZOUGH Z., SOUID G., TIMOUMI R., LE CERF D., MAJDOUB H., 2019.- Partial characterization of the edible *Spinacia oleracea* polysaccharides: Cytoprotective and antioxidant potentials against Cd induced toxicity in HCT116 and HEK293 cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 332-340.
224. NI W., GAO T., WANG H., DU Y., LI J., LI C., WEI L., 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.
225. NIE Y., LIN Q., LUO F., 2017.- Effects of non-starch polysaccharides on inflammatory bowel disease. *International journal of molecular sciences*, 18(7), 1372.
226. NIMSE S.B., PAL D.,2015.- Free radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC advances*, 5(35), 27986-28006.
227. NISHINARI K., TAKEMASA M., ZHANG H., TAKAHASHI R., 2007.- Storage plant Polysaccharides: Xyloglucans, Galactomannans, Glucomannans. In *Comprehensive glycoscience* (613-652). Elsevier Ltd.
228. O'NEILL M.A., YORK W.S., 2003.- The composition and structure of plant primary cell walls. In *The Plant Cell Wall* (1-54). Oxford: Blackwell Publishing.
229. OBLUCHINSKAYA E.D., POZHARITSKAYA O.N., SHIKOV A.N., 2022.- In Vitro Anti-Inflammatory Activities of Fucoindans from Five Species of Brown Seaweeds. *Marine drugs*, 20(10), 606.
230. OCHOA-VILLARREAL M., AISPURO-HERNÁNDEZ E., VARGAS-ARISPURO I., MARTÍNEZ-TÉLLEZ M.Á., 2012.- Plant cell wall polymers: function, structure and biological activity of their derivatives. *Polymerization*, 4, 63-86.
231. OGUNTIBEJU O.O., 2018.- Medicinal plants with anti-inflammatory activities from selected countries and regions of Africa. *Journal of inflammation research*, 11:307-317.
232. OGUTU F.O., MU T., ELAHI R., ZHANG M., SUN H., 2015.- Ultrasonic Modification of Selected Polysaccharides-Review. *Journal of Food Processing and Technology*, 6, 2-8.
233. OJEDA J.J., DITTRICH M., 2012.- Fourier transform infrared spectroscopy for molecular

- analysis of microbial cells. *Microbial Systems Biology: Methods and Protocols*, 881, 187-211.
234. OLSON B.J., MARKWELL J., 2007.- Assays for determination of protein concentration. *Current Protocols in Pharmacology*, 38(1), 1-29.
235. OSMAN-BASHIR N.A., ELHUSSEIN S.A., 2017.- Variation in the levels of steroidal sapogenins within the mature fruit of *Balanites aegyptiaca* and among kernels of *Balanites* fruit accessions collected from different geographical localities in Sudan. *Research journal of pharmaceutical biological and chemical sciences*, 8(1), 768-780.
236. OULD EL HADJ M.D., HADJ-MAHAMMED M., ZABEIROU H., CHEHMA A., 2003.- Importance des plantes spontanées médicinales dans la pharmacopée traditionnelle de la région d'Ouargla (Sahara septentrional - Est Algérien). *Sciences et Technologie*, 20, 73-78.
237. OYAIZU M., 1986.- Studies on Products of Browning Reactions: Antioxidative Activities of Product of Browning Reaction Prepared from Glucosamine. *Japan Journal of Nutrition*, 44, 307-315.
238. OZENDA P., 2004.- *Flore du Sahara*. (3<sup>e</sup> éd), CNRS, Paris, 670p.
239. PARIS R., AUBRAT M.M., 1946.- Le genre *Balanites*: Ses affinités et sa place en systématique. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 93(7-8), 202-204.
240. PARK Y.B., COSGROVE D.J., 2015.- Xyloglucan and its interactions with other components of the growing cell wall. *Plant and Cell Physiology*, 56(2), 180-194.
241. PAULY M., GILLE S., LIU L., MANSOORI N., DE SOUZA A., SCHULTINK A., XIONG G., 2013.- Hemicellulose biosynthesis. *Planta*. 238(4), 627-642.
242. PEDROSA L.F., FABI J.P., 2024.- Polysaccharides from Medicinal Plants: Bridging Ancestral Knowledge with Contemporary Science. *Plants*, 13, 1721.
243. PEREZ S., RODRIGUEZ-CARVAJAL M.A., DOCO T., 2003.- A complex plant cell wall polysaccharide: rhamnogalacturonan II. A structure in quest of a function. *Biochimie*. 85(1-2), 109-121.
244. PERSSON S., SØRENSEN I., MOLLER I., WILLATS W., PAULY M., 2011.- Dissection of Plant Cell Walls by High-Throughput Methods. *Annual plant reviews: plant polysaccharides, biosynthesis and bioengineering*, 41, 43-64.
245. PESHEV D., VAN DEN ENDE W., 2014.- Fructans: Prebiotics and immunomodulators. *Journal of Functional Foods*, 8, 348-357.
246. PETERA B., 2016.- *Extraction et caractérisations (structurale et physico-chimique) de polysaccharides hydrosolubles issus de cladodes de *Cereus triangularis**. Thèse de doctorat, Sciences des Aliments, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand, France, 237p.
247. PETERA B., DELATTRE C., PIERRE G., WADOUACHI A., ELBOUTACHFAITI R., ENGEL E., POUGHON L., MICHAUD P., FENORADOSOA T.A., 2015.- Characterization of arabinogalactan-rich mucilage from *Cereus triangularis* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 127, 372-380.
248. PETROPOULOS S. A., KARKANIS A., MARTINS N., FERREIRA I. C., 2018.- Halophytic herbs of the Mediterranean basin: An alternative approach to health. *Food Chem Toxicol*, 114, 155-169.
249. PHANSE M.A., PATIL M.J., ABBULU K., CHAUDHARI P.D., PATEL B., 2012.- In-vivo and in-vitro screening of medicinal plants for their anti-inflammatory activity: an overview. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(7), 19-33.
250. PIERRE G., DELATTRE C., LAROCHE C., MICHAUD P., 2014.- Galactans and its

- applications. In *Polysaccharides* (1-37). Springer, Cham.
251. PIERRE G., GRABER M., RAFILIPOSON BA., DUPUY C., ORVAIN F., DE CRIGNIS M., MAUGARD T., 2012.- Biochemical composition and changes of extracellular polysaccharides (ECPS) produced during microphytobenthic biofilm development (Marennes-Oléron, France). *Microbial ecology*, 63(1), 157-169.
  252. POPA V., 2011.- *Polysaccharides in medicinal and pharmaceutical applications*. Smithers Rapra, 408 p.
  253. POPOVICI C., SAYKOVA I., TYLKOWSKI B., 2009.- Evaluation de l'activité antioxydant des composés phénoliques par la réactivité avec le radical libre DPPH. *Revue de génie industriel*, 4(8), 25-39.
  254. POUSSET J.L., 1989.- *Plantes médicinales africaines, Tome 1-Utilisation pratique*. Ellipses, 160p.
  255. PRIETO P., PINEDA M., AGUILAR M., 1999.- Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E1. *Analytical biochemistry*, 269, 337-341.
  256. PUNCHARD N.A., WHELAN C.J., ADCOCK I., 2004.- The journal of inflammation. *Journal of inflammation*, 1, 1-4.
  257. QIAN L., LIU H., LI T., LIU Y., ZHANG Z., ZHANG Y., 2020.- Purification, characterization and in vitro antioxidant activity of a polysaccharide AAP-3-1 from *Auricularia auricula*. *International journal of biological macromolecules*, 162, 1453-1464.
  258. QUENTIN F., GALLET P.F., GUILLOTON M., QUINTARD B., 2015.- *Maxi fiches-Biochimie: en 84 fiches*. (2<sup>e</sup> éd). Dunod, Paris, 216 p.
  259. QUEZEL P., SANTA S., 1963.- *Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales*. Tome II, CNRS, Paris, 1170 p.
  260. RAHMAN H., ESWARAIHAH M.C., DUTTA A.M., 2015.- In-vitro anti-inflammatory and anti-arthritic activity of *Oryza sativa* Var. Joha Rice (an aromatic indigenous rice of Assam). *Am Eurasian J Agric Environ Sci*, 15(1), 115-121.
  261. RATHEE P., CHAUDHARY H., RATHEE S., RATHEE D., KUMAR V., KOHLI K., 2009.- Mechanism of action of flavonoids as anti-inflammatory agents: a review. *Inflammation and Allergy-Drug Targets*, 8(3), 229-235.
  262. 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.
  263. RIDLEY B.L., O'NEILL M.A., MOHNEN D., 2001.- Pectins: structure, biosynthesis, and oligogalacturonide-related signaling. *Phytochemistry*, 57(6), 929-967.
  264. RJEIBI I., FERIANI A., HENTATI F., HFAIEDH N., MICHAUD P., PIERRE G., 2019.- Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Nitraria retusa* fruits and their antioxidant and hypolipidemic activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 422-432.
  265. RJEIBI I., ZAABI R., JOUIDA W., 2020.- Characterization of Polysaccharides Extracted from Pulps and Seeds of *Crataegus azarolus* L. var. aronia: Preliminary Structure, Antioxidant, Antibacterial,  $\alpha$ -Amylase, and Acetylcholinesterase Inhibition Properties. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 1903056. doi: 10.1155/2020/1903056.
  266. ROLLAND Y., 2004.- Antioxydants naturels végétaux. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*,

- 11(6), 419-424.
267. ROUESSAC F., ROUESSAC A., CRUCHE D., 2004.- *Analyse chimique : Méthodes et techniques instrumentales modernes. Cours et exercices corrigés.* (6<sup>e</sup> éd.). Dunod, Paris, 481p.
  268. RUIZ-MATUTE A.I., HERNANDEZ-HERNANDEZ O., RODRIGUEZ-SANCHEZ S., SANZ M.L., MARTINEZ-CASTRO I., 2011.- Derivatization of carbohydrates for GC and GC-MS analyses. *Journal of chromatography B*, 879(17-18), 1226-1240.
  269. RUNYORO D.K., MATEE M.I., NGASSAPA O.D., JOSEPH C.C., MBWAMBO Z. H., 2006.- Screening of Tanzanian medicinal plants for anti-Candida activity. *BMC complementary and alternative medicine*, 6, 1-10.
  270. SABOO S.S., CHAVAN R.W., TAPADIYA G.G., KHADABADI S.S., 2014.- An Important Ethnomedicinal Plant *Balanites aegyptiaca* Del. *International Journal of Phytopharmacy*, 4(3), 75-78.
  271. 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.
  272. SAGNA M.B., NIANG K.S., GUISSSE A., GOFFNER D., 2014.-*Balanites aegyptiaca* (L.) Delile: geographical distribution and ethnobotanical knowledge by local populations in the Ferlo (north Senegal). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 18(4), 503-511.
  273. SALEHI P., ASGHARI B., ESMAEILI M.A., DEHGHAN H., GHAZI I., 2013.- $\alpha$ -Glucosidase and  $\alpha$ -amylase inhibitory effect and antioxidant activity of ten plant extracts traditionally used in Iran for diabetes. *Journal of Medicinal Plants Research*, 7(6), 257-266.
  274. SALIHU-LASISI M., AKPABIO C.J., OGUNSOLA M.O., 2014.- *Balanites aegyptiaca* Carbohydrate Fractions and the Effect of Aqueous Extract of Mesocarp on Some Blood Parameters of CCl<sub>4</sub> Induced Rats. *International Journal of Toxicological and Pharmacological Research*, 6(1), 1-5.
  275. SALMEN L., AKERHOLM M., HINTERSTOISSER B., 2005.- Two-Dimensional Fourier Transform Infrared Spectroscopy Applied to Cellulose and Paper. In *Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility* (159-187). Marcel Dekker.
  276. SALVALAGGIO M.D.O., DE FREITAS R.A., FRANQUETTO E.M., KOOP H.S., SILVEIRA, J.L., 2015.- Influence of the extraction time on macromolecular parameters of galactomannans. *Carbohydrate polymers*, 116, 200-206.
  277. SANDS M.J., 2001.- The desert date and its relatives: A revision of the genus *Balanites*. *Kew Bulletin*, p128.
  278. SAPAN C.V., LUNDBLAD R.L. and PRICE N.C., 1999.- Colorimetric protein assay techniques. *Biotechnology and applied Biochemistry*, 29(2), 99-108.
  279. SARASWATHY M., KALIMUTHU K., CHINNADURAI V., JULIET S.Y., 2017.-In vitro Evaluation of Antidiabetic and Anti-Inflammatory Activity of Ethanolic and Methanolic Extracts of *Ceropegia juncea*. *British Journal of Pharmaceutical Research*, 15(2), 1-9.
  280. SARKER S.D., BARTHOLOMEW B., NASH R.J., 2000.- Alkaloids from *Balanites aegyptiaca*. *Fitoterapia*. 71(3), 328-330.
  281. SARRAF A., VERTON E., ADDOUN N., BOUAL Z., OULD EL HADJ M.D., EL ALAOUI-TALIBI Z., EL MODAFAR C., ABDELKAFI S., FENDRI I., DELATTRE C., DUBESSAY P., MICHAUD P., PIERRE G., 2021.- Polysaccharides and derivatives

- from Africa to address and advance sustainable development and economic growth in the next decade. *Applied Sciences*, 11(11), 5243.
282. SARVESWARAN R., JAYASURIYA W.J.A.B., SURESH T.S., 2017.- In vitro assays to investigate the anti-inflammatory activity of herbal extracts a review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 6 (17), 131-141.
283. SCHELLER H.V., ULVSKOV P., 2010.- Hemicelluloses. *Annual review of plant biology*, 61(1), 263-289
284. SCHEPETKIN I.A., QUINN M.T., 2006.- Botanical polysaccharides: macrophage immunomodulation and therapeutic potential. *International immunopharmacology*, 6(3), 317-333.
285. SCHEPETKIN I.A., QUINN M.T., 2011.- Immunomodulatory effects of botanical polysaccharides. *Polysaccharides in medicinal and pharmaceutical applications*, 35, 988-994.
286. SELVAKUMAR K., MADHAN R., SRINIVASAN G., BASKAR V., 2011.- Antioxidant assays in pharmacological research. *Asian Journal of Pharmacy and technology*, 1(4), 99-103.
287. SEVIOUR R.J., SCHMID F., CAMPBELL B.S., POPA V., 2011.- Fungal exopolysaccharides. In *Polysaccharides in medicinal and pharmaceutical applications* (89-144). Smithers Rapra.
288. SHAFIK N.H., SHAFEK R.E., MICHAEL H.N., ESKANDER E.F., 2016.- Phytochemical study and antihyperglycemic effects of *Balanites aegyptiaca* kernel extract on alloxan induced diabetic male rat. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(3):128-136.
289. SHAHIDI F., ZHONG Y., 2015.- Measurement of antioxidant activity. *Journal of functional foods*, 18, 757-781.
290. SHAKHMATOV E.G., TOUKACH P.V., MICHAILOVA E.A., MAKAROVA E.N., 2014.- Structural studies of arabinan-rich pectic polysaccharides from *Abies sibirica* L. Biological activity of pectins of *A. sibirica*. *Carbohydrate polymers*, 113, 515-524.
291. SHANG H., CAO Z., ZHANG H., GUO Y., ZHAO J., WU H., 2021.- Physicochemical characterization and in vitro biological activities of polysaccharides from alfalfa (*Medicago sativa* L.) as affected by different drying methods. *Process Biochemistry*, 103, 39-49.
292. SHAWKY E., GABR N., EL-GINDI M., MEKKY R., 2019.- A comprehensive review on genus *Zygophyllum*. *Journal of Advanced Pharmacy Research*, 3(1), 1-16.
293. SHEAHAN M.C., CHASE M.W., 2000.- Phylogenetic Relationships within Zygophyllaceae Based on DNA Sequences of Three Plastid Regions, with Special Emphasis on Zygophylloideae. *Systematic Botany*, 25(2), 371-384.
294. SHI Y., SI D., ZHANG X., CHEN D., HAN Z., 2023.- Plant fructans: Recent advances in metabolism, evolution aspects and applications for human health. *Current Research in Food Science*, 100595.
295. SILVEIRA J.L.M., BRESOLIN T.M.B., 2011.- Pharmaceutical use of galactomannans. *Química Nova*, 34, 292-299.
296. SINGH R., 2015.- Medicinal plants: A review. *Journal of plant sciences*, 8(2), 50-55.
297. SINGLETON V.L., ORTHOFER R., LAMUELA-RAVENTÓS R.M., 1999.- Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu

- reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152-178.
298. SMATI D., LONGEON A., GUYOT M., 2004.- 3 $\beta$ -(3,4-Dihydroxycinnamoyl)-erythrodiol, a cytotoxic constituent of *Zygophyllum geslini* collected in the Algerian Sahara. *Journal of Ethnopharmacology*, 95, 405-407.
  299. PAULSEN B., BARSETT H., 2005.- Bioactive pectic polysaccharides. *Polysaccharides I: Structure, characterization and use*, 69-101.
  300. SONG J., WU Y., MA X., FENG L., WANG Z., JIANG G., TONG H., 2019.- Structural characterization and -glycosidase inhibitory activity of a novel polysaccharide fraction from *Aconitum coreanum*, *Carbohydrate Polymers*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115586>
  301. SONG L., LIU S., ZHANG L., PAN L., XU L., 2023.- Polysaccharides from *Nitraria retusa* fruit: Extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activities. *Molecules*, 28(3), 1266.
  302. SONIA K., MEENA K.S., RAJESH D., 2021.- Structural characterization, biological evaluation and molecular docking studies of fucoidan isolated from brown marine algae. *Journal of Advanced Scientific Research*, 12(04 Suppl 1), 90-100.
  303. SOUDDI M., BOUALLALA M., 2023.- Floristic Diversity of *Zygophyllum album* Communities Associated with Water Towers in the Algerian Sahara. *Advanced research in life sciences*, 7, 125-134.
  304. SPERONI E., CERVELLATI R., INNOCENTI G., COSTA S., GUERRA M.C., DALL'ACQUA S., GOVONI P., 2005.- Anti-inflammatory, anti-nociceptive and antioxidant activities of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile. *Journal of Ethnopharmacology*, 98(1-2), 117-125.
  305. SUBRAMONIAM A., 2016.- *Anti-diabetes mellitus plants: active principles, mechanisms of action and sustainable utilization* (1<sup>e</sup> éd.). CRC Press. 408p.
  306. SUN L., WARREN F.J., GIDLEY M.J., 2019.- Natural products for glycaemic control: Polyphenols as inhibitors of alpha-amylase. *Trends in Food Science and Technology*, 91, 262-273.
  307. SUN Y.X., KENNEDY J.F., 2010.- Antioxidant activities of different polysaccharide conjugates (CRPs) isolated from the fruiting bodies of *Chroogomphus rutilus* (Schaeff.: Fr.) O. K. Miller. *Carbohydrate Polymers*, 82, 510-514.
  308. SYNITSYA A., KIM W.J., KIM S.M., POHL R., SYNITSYA A., KVASNICKA F., COPIKOVA J., PARK Y.I., 2010.- Structure and antitumour activity of fucoidan isolated from sporophyll of Korean brown seaweed *Undaria pinnatifida*. *Carbohydrate Polymers*, 81(1), 41-48.
  309. TADERA K., MINAMI Y., TAKAMATSU K., MATSUOKA T., 2006.- Inhibition of  $\alpha$ -glucosidase and  $\alpha$ -amylase by flavonoids. *Journal of nutritional science and vitaminology*, 52(2), 149-153.
  310. TEDJANI A.; BOUAL Z.; OULD EL HADJ M. D.; LANEZ T.; BELKHALFA H.; EL ALAOUI-TALIBI Z.; EL MODAFAR C.; ABDELKAFI S.; FENDRI I.; LE CERF D.; DUBESSAY, P.; DELATTRE, C.; GUILLAUME, P.; MICHAUD, P., 2023.- Antidiabetic potential of mucilage fraction extracted from *Astragalus gyzensis* seeds. *European Journal of Biological Research*, 13(1), 18-30.

311. TEKA N., ALMINDEREJ F.M., SOUID G., EL-GHOUL Y., LE CERF D., MAJDOUB H., 2022.- Characterization of polysaccharides sequentially extracted from *Allium roseum* leaves and their hepatoprotective effects against cadmium induced toxicity in mouse liver. *Antioxidants*, 11 (10), 1866.
312. TESFAYE A., 2015.- Balanites (*Balanites aegyptiaca*) Del., Multipurpose Tree a Prospective Review. *International Journal of Modern Chemistry and Applied Science*, 2(3): 189-194.
313. THANGARAJ P., 2016.- *Pharmacological assays of plant-based natural products. Progress in Drug Research*, (Vol. 71, p 182). Springer, India, 182 p.
314. The Angiosperm Phylogeny Group., 1998.- An ordinal classification for the families of flowering plants. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 85(4), 531-553.
315. TIAN X., LIAN T., LIU Y., DING G., ZHANG F. and MA Z., 2019.- Extraction, structural characterization, and biological functions of *Lycium barbarum* polysaccharides: A review. *Biomolecules*, 9(9), 389.
316. TIGRINE-KORDJANI N., MEKLATI B.Y., CHEMAT F., 2006.- Analysis by gas chromatography-mass spectrometry of the essential oil of *Zygophyllum album* L., an aromatic and medicinal plant growing in Algeria. *The International Journal of Aromatherapy*, 16, 187-191.
317. VAN DEN BERG R., HAENEN G.R., VAN DEN BERG H., BAST A., 1999.- Applicability of an improved Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) assay for evaluation of antioxidant capacity measurements of mixtures. *Food chemistry*, 66(4), 511-517.
318. VANAVIL B., SELVARAJ K., AANANDHALAKSHMI R., USHA S.K., ARUMUGAM M., 2020.- Bioactive and thermostable sulphated polysaccharide from *Sargassum swartzii* with drug delivery applications. *International journal of biological macromolecules*, 153, 190-200.
319. VENUGOPAL V., 2016.- *Marine polysaccharides: Food applications*. (1<sup>st</sup> éd). CRC press. 396p.
320. VERMA D.K., PATEL A.R., THAKUR M., SINGH S., TRIPATHY S., SRIVASTAV P.P., CHAVEZ-GONZALEZ M.L., GUPTA A.K., AGUILAR C.N., 2021.- A review of the composition and toxicology of fructans, and their applications in foods and health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 99, 103884.
321. VERMERRIS W., NICHOLSON R., 2007.- *Phenolic compound biochemistry*. Springer Science and Business Media, USA, 284p.
322. VIJAYALAKSHMI M., RUCKMANI K., 2016.- Ferric reducing antioxidant power assay in plant extract. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 11(3), 570-572.
323. VOET D., VOET J.G., 2016.- *Biochimie*. (3<sup>e</sup> éd), De Boeck Supérieur, 1784p.
324. VORAGEN A.G., COENEN G.J., VERHOEF R.P., SCHOLS H.A., 2009.- Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Structural Chemistry*, 20, 263-275.
325. WANG F.L., JI Y.B., YANG B., 2020.- Sulfated modification, characterization and monosaccharide composition analysis of *Undaria pinnatifida* polysaccharides and anti-tumor activity. *Experimental and therapeutic medicine*, 20, 630-636.
326. WANG J., HU S., NIE S., YU Q., XIE M., 2016.- Reviews on mechanisms of in vitro antioxidant activity of polysaccharides. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016, 5692852.

327. WANG M., CHEONG K.L., 2023.- Preparation, Structural Characterisation, and Bioactivities of Fructans: A Review. *Molecules*, 28, 1613.
328. WANG Q.H., SHU Z.P., XU B.Q., XING N., JIAO W.J., YANG B.Y., KUANG H.X., 2014.- Structural characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Citrus aurantium* L. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, 112-123.
329. WANG Y., ZHU H., WANG X., YU Y., XIE J., 2021.- Natural food polysaccharides ameliorate inflammatory bowel disease and its mechanisms. *Foods*, 10(6), 1288
330. WANG Z.J., XIE J.H., NIE S.P., XIE M.Y., 2017.- Review on cell models to evaluate the potential antioxidant activity of polysaccharides. *Food and function*, 8(3), 915-926.
331. WANG Z., LUO D., ENA C., 2007.- Optimization of polysaccharides extraction from *Gynostemma pentaphyllum* Makino using uniform design. *Carbohydrate Polymers*, 69(2), 311-317.
332. WEI P., DENG M., DING Y., XIA D., YAN Z., CHEN T., 2023.- Antioxidant activity of polysaccharides from natural sources. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 80(5), 705-716.
333. WEIL J.H., 2001.- Biochimie générale, (9<sup>e</sup> éd), Dunod, Paris, 656p.
334. WEINMAN S., MEHUL P., 2004.- *Toute la biochimie*. Dunod, Paris, 464 p.
335. WILLATS W.G., MCCARTNEY L., MACKIE W., KNOX J.P., 2001.- Pectin: cell biology and prospects for functional analysis. *Plant molecular biology*. 47(1-2), 9-27.
336. WILLIAMS L., O'CONNOR A., LATORE L., DENNIS O., RINGER S., WHITTAKER J., CONRAD J., VOGLER B., ROSNER H., KRAUS W., 2008.- The *in vitro* Anti-denaturation Effects Induced by Natural Products and Non-steroidal Compounds in Heat Treated (Immunogenic) Bovine Serum Albumin is Proposed as a Screening Assay for the Detection of Anti-inflammatory Compounds, without the use of Animals, in the Early Stages of the Drug Discovery Process. *West Indian Medical Journal*, 57 (4), 327-331.
337. WROLSTAD R. E., ACREE T. E., DECKER E. A., PENNER M. H., REID D. S., SCHWARTZ S. J., SHOEMAKER C.F., SMITH D., SPORNS P., 2004.- *Handbook of food analytical chemistry: water, proteins, enzymes, lipids, and carbohydrates*. Ed John Wilcy and Sons. New Jersey, 784p.
338. WU G.H., HU T., LI Z.Y., HUANG Z.L., JIANG J.G., 2014.- In vitro antioxidant activities of the polysaccharides from *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) Sing. *Food chemistry*, 148, 351-356.
339. WU H., LI M., YANG X., WEI Q., SUN L., ZHAO J., SHANG H., 2020b.- Extraction optimization, physicochemical properties and antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from roxburgh rose (*Rosa roxburghii* Tratt.) leaves. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 517-529.
340. WU H., SHANG H., GUO Y., ZHANG H., WU H., 2020a.- Comparison of different extraction methods of polysaccharides from cup plant (*Silphium perfoliatum* L.). *Process Biochemistry*, 90, 241-248.
341. XING R., LIU S., GUO Z., YU H., WANG P., LI C., LI Z., LI P., 2005.- Relevance of molecular weight of chitosan and its derivatives and their antioxidant activities in vitro. *Bioorganic and medicinal chemistry*, 13(5), 1573-1577.
342. XU W., LIANG L., ZHU M., 2014.- Determination of sugars in molasses by HPLC following Solid-Phase Extraction, *International Journal of Food Properties*, 18(3), 547-557.

343. XU Y., NIU X., LIU N., GAO Y., WANG L., XU G., LI X., YANG Y., 2018.- Characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of degraded polysaccharides from blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) fruits. *Food Chemistry*, 243, 26-35.
344. YAN F., YANG X., LIU C., HUANG S., LIAO L., FU C., 2014.- Extraction optimization of antioxidant polysaccharides from leaves of *Gynura bicolor* (Roxb. and Willd.) DC. *Food Science and Technology*, 34, 402-407.
345. YAN X., 2014.- High-performance liquid chromatography for carbohydrate analysis. In *High-Performance Liquid Chromatography (HPLC): Principles, Practices and Procedures (1-20)*. Nova Science Publishers.
346. YANG C., GUAN J., ZHANG J.S., LI S.P., 2010.- Use of HPTLC to differentiate among the crude polysaccharides in six traditional Chinese medicines. *JPC-Journal of Planar Chromatography-Modern TLC*, 23(1), 46-49.
347. YANG R.F., ZHAO C., CHEN X., CHAN S.W., WU J.Y., 2015.- Chemical properties and bioactivities of Goji (*Lycium barbarum*) polysaccharides extracted by different methods. *Journal of Functional Foods*, 17, 903-909.
348. YANG Y., LEI Z., ZHAO M., WU C., WANG L., XU Y., 2020.- Microwave-assisted extraction of an acidic polysaccharide from *Ribes nigrum* L.: Structural characteristics and biological activities. *Industrial Crops and Products*, 147, 112249.
349. YAPO B.M., 2011.- Pectin rhamnogalacturonan II: On the “Small Stem with Four Branches” in the primary cell walls of plants. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*, 2011(1), 964521.
350. YE C.L., LAI Y.F., 2015.- Optimization of extraction process and antioxidant activity of polysaccharides from leaves of *Artemisia argyi* Levl. et Vant. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 1309-1317.
351. YI Y., XU W., WANG H.X., HUANG F., WANG L.M., 2020.- Natural polysaccharides experience physiochemical and functional changes during preparation: A review. *Carbohydrate Polymers*, 234, 115896.
352. YU W., ZENG D., XIONG Y., SHAN S., YANG X., ZHAO H., LU W., 2022.- Health benefits of functional plant polysaccharides in metabolic syndrome: An overview. *Journal of Functional Foods*, 95, 105154.
353. YUAN Q., XIE Y., WANG W., YAN Y., YE H., JABBAR S., ZENG X., 2015.- Extraction optimization, characterization and antioxidant activity in vitro of polysaccharides from mulberry (*Morus alba* L.) leaves. *Carbohydrate polymers*, 128, 52-62.
354. ZAAHKOUK S.A., RASHID S.Z., MATTAR A.F., 2003.- Anti-diabetic properties of water and ethanolic extracts of *Balanites aegyptiaca* fruits flesh in senile diabetic rats. *The Egyptian Journal of Hospital Medicine*, 10(1), 90-108.
355. ZAKY A.S., KANDEIL M., ABDEL-GABBAR M., FAHMY E.M., ALMEHMADI M.M., ALI T.M., AHMED O.M., 2022.- The Antidiabetic effects and modes of action of the *Balanites aegyptiaca* fruit and seed aqueous extracts in NA/STZ-induced diabetic rats. *Pharmaceutics*, 14(2), 263.

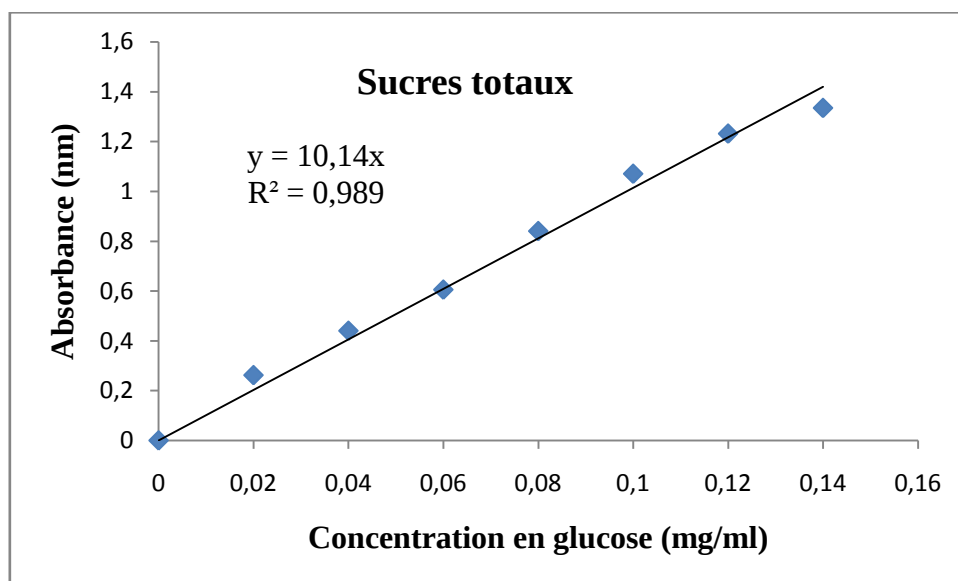
356. ZANDLEVEN J., SØRENSEN S.O., HARHOLT J., BELDMAN G., SCHOLS H.A., SCHELLER H.V., VORAGEN A.J., 2007.- Xylogalacturonan exists in cell walls from various tissues of *Arabidopsis thaliana*. *Phytochemistry*, 68(8), 1219-1226.
357. ZEIN N., YASSIN F., AYOUB H.G., 2024.- An overview of the phytochemical components, pharmacological action, and therapeutic applications of *Balanites aegyptiaca* Del. (desert date). *Biochemistry Letters*, 20 (1), 68-75.
358. ZHANG A., SHEN Y., CEN M., HONG X., SHAO Q., CHEN Y. and ZHENG B., 2019.- Polysaccharide and crocin contents and antioxidant activity of saffron from different origins. *Industrial Crops and Products*, 133, 111-117.
359. ZHANG B.W., LI X., SUN W.L., XING Y., XIU Z.L., ZHUANG C.L., DONG Y.S., 2017.- Dietary flavonoids and acarbose synergistically inhibit  $\alpha$ -glucosidase and lower postprandial blood glucose. *Journal of agricultural and food chemistry*, 65(38), 8319-8330.
360. ZHANG S., LIU X., YAN L., ZHANG Q., ZHU J., HUANG N., WANG Z., 2015.- Chemical Compositions and Antioxidant Activities of Polysaccharides from the Sporophores and Cultured Products of *Armillaria mellea*. *Molecules*, 20, 5680-5697.
361. ZHAO M., KUANG F., ZHANG Y., LV G., 2024.- Effects of Hydrolysis Condition and detection method on the monosaccharide composition analysis of polysaccharides from natural sources. *Separations*, 11(1), 2. <https://doi.org/10.3390/separations11010002>.
362. ZHONG Q., WEI B., WANG S., KE S., CHEN J., ZHANG H., WANG H., 2019.- The Antioxidant Activity of Polysaccharides Derived from Marine Organisms: An Overview. *Marine Drugs*, 17(12), 674.
363. ZONG H., CAO F., WANG A., 2012.- Anticancer polysaccharides from natural resources: A review of recent research. *Carbohydrate Polymers*, 90, 1395-1410.
364. ZOU Y.F., BARSETT H., HO G.T.T., INNGJERDINGEN K.T., DIALLO D., MICHAELSEN T.E., PAULSEN B.S., 2015.-Immunomodulating pectins from root bark, stem bark, and leaves of the Malian medicinal tree *Terminalia macroptera*, structure activity relations. *Carbohydrate research*, 403, 167-173.

---

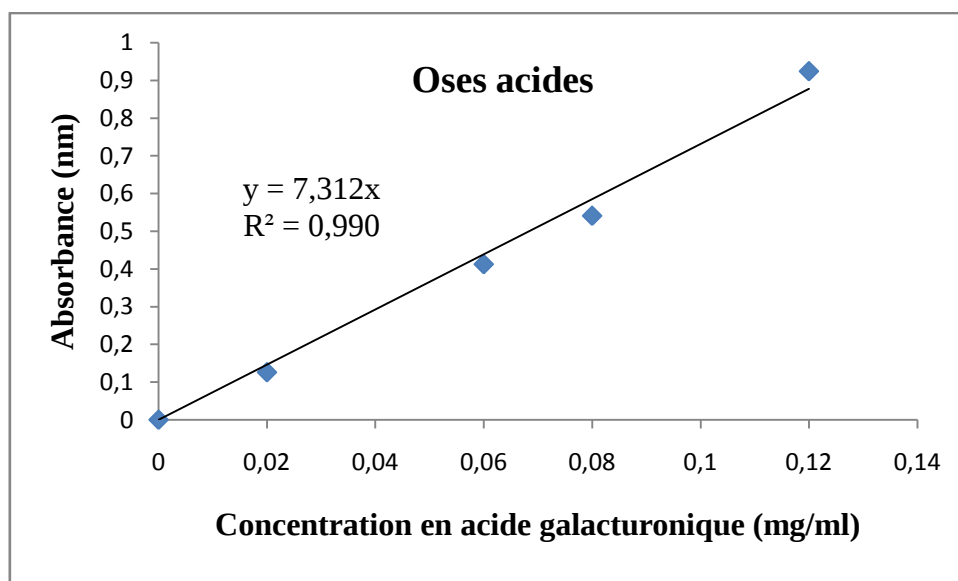
# **Annexes**

---

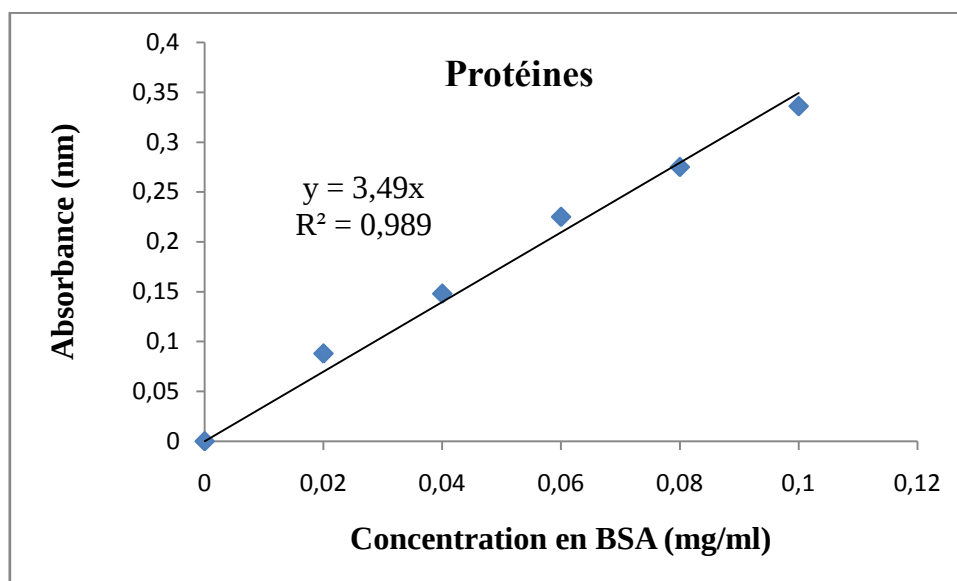
## Courbes d'étalonnage des dosages colorimétriques



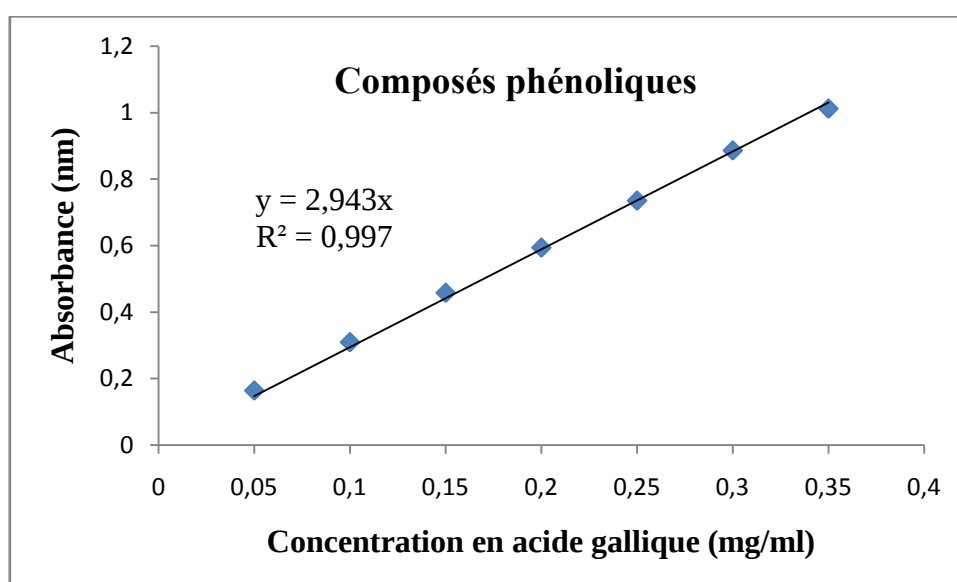
Courbe d'étalonnage des oses totaux



Courbe d'étalonnage des oses acides



Courbe d'étalonnage des protéines



Courbe d'étalonnage des composés phénoliques

## Caractérisation et activités biologiques des polysaccharides de quelques espèces spontanées de la famille de Zygophyllaceae récoltées au Sahara algérien

### Résumé

La présente étude porte sur la caractérisation et l'évaluation des activités biologiques de polysaccharides extraits des feuilles (ZF) et des graines (ZG) de *Zygophyllum album* L. (Agga) et des fruits de *Balanites aegyptiaca* Del. (Taboûrak) (BA et BAEP), deux plantes médicinales spontanées de la famille des Zygophyllaceae récoltées au Sahara algérien. La caractérisation des extraits bruts de polysaccharides a été effectuée par des méthodes spectrophotométriques (UV-Vis, FT-IR) et chromatographiques (CCM, HPLC-RID, GC/MS-EI). L'activité antioxydante a été déterminée par les tests de piégeage des radicaux de DPPH•, d'ABTS• et d'OH• et par le test du pouvoir réducteur de fer et de molybdène. L'activité anti-hyperglycémiant a été évaluée par les tests d'inhibition de l' $\alpha$ -amylase et de l' $\alpha$ -glucosidase. L'activité anti-inflammatoire a été évaluée par les tests d'inhibition de la lyse membranaire induite et de la dénaturation des protéines. Les extractions de polysaccharides par macération dans l'eau distillée à 60 °C donnent des rendements faibles (0,40-2,33%). Les extraits polysaccharidiques de *B. aegyptiaca* présentent des teneurs élevées en sucres totaux (85,77-89,34%) et des teneurs faibles en protéines (4,01-7,39%) par rapport aux extraits polysaccharidiques de *Z. album*. Toutefois, les taux de composés phénoliques dans les extraits des deux espèces sont proches et faibles (1,21-1,64%). Les spectres FT-IR de différents extraits présentent les pics caractéristiques des polysaccharides. Les extraits polysaccharidiques, ZF est constitué de 20,90% d'arabinose, 24,16% de galactose, 22,88% de xylose, 14,71% de rhamnose et 17,34% de glucose, et ZG est constitué de 21,64% d'arabinose, 31,76% de galactose, 16,95% de xylose, 17,25% de rhamnose et 12,39% de glucose. Tandis que BA est constitué de 34,06% d'acide galacturonique, 27,82% d'arabinose, 15,63% de galactose, 9,71% de glucose, 7,04% de xylose et 5,74% de rhamnose. Au vu des résultats, les différents extraits montrent un pouvoir de piégeage pour le DPPH• et l'ABTS•, dont ZG présente la meilleure activité anti-radicalaire avec des  $IC_{50}$  de  $0,559 \pm 0,062$  mg/ml pour le test de DPPH• et  $0,738 \pm 0,009$  mg/ml pour le test d'ABTS•. Les extraits présentent aussi une capacité de piégeage d'OH• ( $IC_{50}$  : 2,77-4,02 mg/ml), une capacité antioxydante totale ( $A_{0,5}$  : 1,84 -2,80 mg/ml) et un pouvoir réducteur du fer ( $A_{0,5}$  : 4,69-17,01 mg/ml). Toutefois, leur activité antioxydante reste inférieure à celle de la vitamine C et du BHT. L'étude de l'activité anti-hyperglycémiant révèle que les polysaccharides extraits présentent un faible pouvoir inhibiteur de l' $\alpha$ -amylase ( $IC_{50}$  : 22,107-90,163 mg/ml). Toutefois, ZF révèle un fort pouvoir d'inhibition de l' $\alpha$ -glucosidase ( $IC_{50}$  :  $5,44 \pm 0,50$  mg/ml) et semble être efficace dans la réduction d'hyperglycémie. Dans les tests anti-inflammatoires, ZF présente un effet stabilisant contre la lyse membranaire plus important que les autres extraits ( $IC_{50}$  :  $19,376 \pm 1,107$  mg/ml). Les extraits des fruits de *B. aegyptiaca* laissent apparaître une activité anti-inflammatoire remarquable et diminuent efficacement la dénaturation des protéines, avec un pouvoir inhibiteur de BAEP significatif ( $IC_{50}$  :  $0,156 \pm 0,017$  mg/ml). Les extraits polysaccharidiques bruts de *Z. album* et *B. aegyptiaca* pourraient donc constituer une source naturelle d'agents antioxydants, hypoglycémiant et anti-inflammatoires.

**Mots-clés :** Sahara, *Z. album*, *B. aegyptiaca*, caractérisation, activités biologiques, polysaccharides.

## Characterisation and biological activities of the polysaccharides of some wild species of the Zygophyllaceae family harvested in the Algerian Sahara

### Abstract

The present study investigated the characterisation and evaluation of the biological activities of polysaccharides extracted from the leaves (ZF) and seeds (ZG) of *Zygophyllum album* L. (Agga) and the fruits of *Balanites aegyptiaca* Del. (Taboûrak) (BA and BAEp), two wild medicinal plants of the Zygophyllaceae family harvested in the Algerian Sahara. The crude polysaccharide extracts were characterised using spectrophotometric (UV-Vis, FT-IR) and chromatographic methods (TLC, HPLC-RID, GC/MS-EI). Antioxidant activity was determined by DPPH•, ABTS• and OH• radical scavenging, ferric reducing power, and total antioxidant capacity assays. Hypoglycaemic activity was assessed by  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibition assays. Anti-inflammatory activity was evaluated by tests for inhibition of erythrocyte hemolysis and protein denaturation. Extractions of polysaccharides by maceration in distilled water at 60°C gave low yields (0.40-2.33%). Polysaccharide extracts from *B. aegyptiaca* had high total sugar contents (85.77-89.34%) and low protein contents (4.01-7.39%) compared with polysaccharide extracts from *Z. album*. However, the levels of phenolic compounds in the extracts of the two species were close and low (1.21-1.64%). The FT-IR spectra of the different extracts displayed the characteristic peaks of polysaccharides. The polysaccharide extracts, ZF consisted of 20.90% arabinose, 24.16% galactose, 22.88% xylose, 14.71% rhamnose and 17.34% glucose, and ZG consisted of 21.64% arabinose, 31.76% galactose, 16.95% xylose, 17.25% rhamnose and 12.39% glucose. BA consisted of 34.06% galacturonic acid, 27.82% arabinose, 15.63% galactose, 9.71% glucose, 7.04% xylose and 5.74% rhamnose. According to the results, the various extracts showed a scavenging capacity against DPPH• and ABTS• of which ZG exhibited the best anti-radical activity with  $IC_{50}$ s of  $0.559 \pm 0.062$  mg/ml in the DPPH• test and  $0.738 \pm 0.009$  mg/ml in the ABTS• test. The extracts also showed a scavenging capacity against OH• ( $IC_{50}$ : 2.77-4.02 mg/ml), total antioxidant capacity ( $A_{0.5}$ : 1.84-2.80 mg/ml), and iron-reducing capacity ( $A_{0.5}$ : 4.69-17.01 mg/ml). However, their antioxidant activity is lower than that of vitamin C and BHT. The study of hypoglycaemic activity revealed that the polysaccharides extracted displayed a low  $\alpha$ -amylase inhibitory power ( $IC_{50}$ : 22.107-90.163 mg/ml). However, ZF showed strong inhibition of  $\alpha$ -glucosidase ( $IC_{50}$ :  $5.44 \pm 0.50$  mg/ml) and appears to be effective in reducing hyperglycaemia. In anti-inflammatory tests, ZF had a higher stabilising effect against membrane lysis than other extracts ( $IC_{50}$ :  $19.376 \pm 1.107$  mg/ml). *B. aegyptiaca* fruit extracts showed a considerable anti-inflammatory activity and effectively reduced protein denaturation, with a significant BAEp inhibitory power ( $IC_{50}$ :  $0.156 \pm 0.017$  mg/ml). Crude polysaccharide extracts of *Z. album* and *B. aegyptiaca* could represent a natural source of antioxidant, hypoglycaemic and anti-inflammatory agents.

**Keywords:** Sahara, *Z. album*, *B. aegyptiaca*, characterisation, biological activities, polysaccharides.

**العنوان: الخصائص والفعالية البيولوجية للسكريات المتعددة المستخلصة من بعض الأصناف للنباتات البرية من فصيلة Zygophyllaceae المتواجدة في الصحراء الجزائرية.**

**الملخص**

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد خصائص السكريات المتعددة ودراسة فعاليتها البيولوجية التي تم استخلاصها من أوراق (ZF) وبذور (ZG) نبات *Zygophyllum album* L. (العقة) ومن ثمار نبات *Balanites aegyptiaca* Del. (تبورق) (BA, BAEp) وهما نبتتان برّيتان من فصيلة Zygophyllaceae تم جمعهما من ال صحراء الجزائرية. وقد تم تحليل مستخلصات السكريات المتعددة باستخدام القياسات الطيفية الضوئية (UV-Vis, FT-IR) والكروماتوغرافية (CCM, HPLC- RID, GC/MS-EI)، وتمت دراسة النشاط المضاد للأكسدة عن طريق اختبارات DPPH و ABTS و OH واختبار القدرة الإرجاعية للحديد والموليبدين. وتم تقييم النشاط الخافض للسكر في الدم للمستخلصات عن طريق اختبارات تثبيط إنزيم  $\alpha$ -amylase وإنزيم  $\alpha$ -glucosidase ودراسة النشاط المضاد للالتهابات عن طريق اختبارات تثبيط تحلل الغشاء الخلوي وتحلل البروتين. أعطت مردودية استخلاص السكريات المتعددة بالنقع في الماء المقطر (بدرجة 60 °C) قيما منخفضة (0.40-2.33%)، وكشف تحليل مستخلصات نبات *B. aegyptiaca* على محتويات عالية من السكريات الكلية (85.77-89.34%)، وكذا محتويات منخفضة من البروتينات (4.01-7.39%) مقارنة بمستخلصات نبات *Z. album*؛ إلا أن مستويات المركبات الفينولية في مستخلصات الزيتون جاءت متقاربة ومنخفضة (1.21-1.64%). ويُظهر تحليل FT-IR للمستخلصات المختلفة أطيافاً مميزة للسكريات المتعددة. يتكون مستخلص ZF من 20.90% من arabinose و 24.16% من galactose و 22.88% من xylose و 14.71% من rhamnose و 17.34% من glucose، ويتكون مستخلص ZG من 21.64% من arabinose و 31.76% من galactose و 16.95% من xylose و 17.25% من rhamnose و 12.39% من glucose. يتكون مستخلص BA من 34.06% من acide galacturonique و 27.82% من arabinose و 15.63% من galactose و 9.71% من glucose، و 7.04% من xylose و 5.74% من rhamnose. أظهرت النتائج أن المستخلصات المختلفة تُبدي نشاطاً مثبطاً للجذور الحرة (DPPH•) و (ABTS•) بحيث أظهر مستخلص ZG أفضل نشاط مثبط للجذور الحرة ( $IC_{50}: 0.559 \pm 0.062$  mg/ml) في الـ (DPPH•) و ( $IC_{50}: 0.738 \pm 0.009$  mg/ml في الـ (ABTS•)، كما أظهرت المستخلصات قدرة على تثبيط جذر (OH•) ( $IC_{50}: 2.77-4.02$  mg/ml)، وقدرة إجمالية مضادة للأكسدة ( $A_{0.5}: 1.84-2.80$  mg/ml) وقدرة إرجاعية للحديد ( $A_{0.5}: 4.69-17.01$  mg/ml). لكن نشاطها المضاد للأكسدة أقل من فيتامين C و BHT. وكشف تقييم النشاط الخافض للسكر في الدم أن السكريات المتعددة المستخلصة لها قدرة منخفضة على تثبيط إنزيم  $\alpha$ -amylase ( $IC_{50}: 22.107-90.163$  mg/ml) ومع ذلك، أظهر مستخلص ZF تثبيطاً قوياً لأنزيم  $\alpha$ -glucosidase ( $IC_{50}: 5.44 \pm 0.50$  mg/ml) ويبدو أنه فعال في الحد من ارتفاع السكر في الدم. أما في الاختبارات المضادة للالتهابات، فقد كان لمستخلص ZF تأثيراً مثبطاً ضد تحلل الغشاء الخلوي أضعف من المستخلصات الأخرى ( $IC_{50}: 19.376 \pm 1.107$  mg/ml). وأظهرت مستخلصات *B. aegyptiaca* نشاطاً ملحوظاً مضاداً للالتهابات وخفّضت بشكل فعال من تحلل البروتين، مع قوة مثبطة ملحوظة لـ ( $IC_{50}: 0.156 \pm 0.017$  mg/ml) BAEp لذلك يمكن أن تشكّل مستخلصات السكريات المتعددة من النبتتين *B. aegyptiaca* و *Z. album* مصدراً طبيعياً لمضادات الأكسدة ومضادات ارتفاع السكر في الدم ومضادات الالتهاب.

**الكلمات المفتاحية:** الصحراء، *B. aegyptiaca*، *Z. album*، خصائص، الفعالية البيولوجية، السكريات المتعددة