

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université A.MIRA-BEJAIA**  
**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**  
**Département de microbiologie Spécialité biotechnologie et santé**



Réf : .....

**Mémoire de Fin de Cycle**  
**En vue de l'obtention du diplôme**  
**MASTER**

**Thème**

**Effet antibactérien des extraits**  
**de raquette du figuier de**  
**Barbarie**

**Présenté par :**

**IZEGHLOUCHE Nesrine & KHANOUCHE Lydia**

**Soutenu le : 26 Juin 2023**

**Devant le jury composé de :**

|                               |                                  |           |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Mme BENDALI Farida            | Professeur, Université de Béjaïa | Président |
| Mme ADJEROUD ABDELLATIF Nawel | MCA, Université de Béjaïa        | Encadreur |
| Mme BOUDRIA Asma              | MCA, Université de Béjaïa        | Examineur |

**Année universitaire : 2022/2023**

## **Remerciements**

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont apporté leur contribution à la réalisation de notre mémoire de fin d'étude.*

*Avant tout, nous tenons à remercier notre encadrante de mémoire, Mme ADJEROUD Nawel, pour son encadrement attentif, ses conseils précieux et son soutien constant tout au long de ce projet. Sa rigueur scientifique et sa disponibilité ont grandement facilité notre progression et nous ont permis d'atteindre nos objectifs.*

*Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers nos professeurs et membres du jury, Mme BENDALI Farida et Mme BOUDRIA Asma, pour avoir présidé le jury et accepté d'évaluer notre travail de mémoire. Nous sommes honorées de leur présence et les remercions chaleureusement.*

*Nous souhaitons également adresser nos plus sincères remerciements à nos familles et à nos proches pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de cette période intense. Leur confiance en nos capacités a été une source de motivation inépuisable.*

*Nous sommes conscientes que cette liste de remerciements ne peut être exhaustive, et nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien et leur engagement ont été des éléments clés de notre réussite.*

*Nous espérons que notre mémoire contribuera, ne serait-ce qu'un peu, à l'avancement des connaissances dans notre domaine d'étude.*

## **Liste des Abréviations**

**ABTS** : 2,2'-Azino-Bis(3-ethylbenzoThiazoline-6-Sulphonic acid)

**ALCL3** : Chlorure d'aluminium

**ATCC** : American Type Culture Collection

**CAET** : Capacité Anti-oxydante Equivalente au Trolox

**CAM** : Métabolisme de l'Acide Crassulacéen

**CMI** : Concentration minimale inhibitrice

**CPT** : Composés Phénoliques Totaux

**DO** : Densité optique

**E.A.U** : Extraction Assistée par Ultrasons

***E. coli*** : *Escherichia coli*

**EAG** : Equivalent Acide Gallique

**EC** : extraction conventionnelle (solide-liquide)

***E. faecalis*** : *Enterococcus faecalis*

**EQ** : Equivalent en Quercétine

**FT** : Flavonoides Totaux

**IRTF** : analyse par spectroscopie à transformée de Fourier

***K. oxytoca*** : *Klebsiella oxytoca*

***K. pneumonia*** : *Klebsiella pneumonia*

**Kbr** : Bromure de potassium

**KHz** : Kilohertz

**MH** : Mueller Hinton

**OFI** : *Opuntia ficus-indica*

***P. aeruginosa*** : *Pseudomonas aeruginosa*

**RAC** : Raquette avec Cuticule

**RFC** : Réactif de Folin-Ciocalteu

**rpm** : rotation par minute

**RSC** : Raquette sans Cuticule

***S. aureus*** : *Staphylococcus aureus*

**SARM** : *Staphylococcus aureus* Résistant à la Méthicilline

**UFC** : Unité Formant Colonies

## **Liste des Figures**

| <b>N° de la Figure</b> | <b>Légende</b>                                                                                                                                                                           | <b>N° Page</b> |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Figure 1</b>        | Arbre de l' <i>Opuntia ficus-indica</i> et ses composants                                                                                                                                | <b>3</b>       |
| <b>Figure 2</b>        | Applications industrielles des Cactacées et des sous-produits dérivés                                                                                                                    | <b>6</b>       |
| <b>Figure 3</b>        | Dispositifs à ultrasons : bac et sonde, respectivement                                                                                                                                   | <b>15</b>      |
| <b>Figure 4</b>        | <b>(a)</b> Évolution d'une bulle de cavitation à proximité d'une cellule végétale <b>(b)</b> Stress membranaire généré lors de passage d'une onde ultrasonique                           | <b>16</b>      |
| <b>Figure 5</b>        | Etapes de préparation des poudres de raquettes : (A) Cladodes lavés, (B) Cladodes découpés, (C) Séchage à l'étuve (40°C), (D) Poudre broyée                                              | <b>18</b>      |
| <b>Figure 6</b>        | Extraction conventionnelle des CPT                                                                                                                                                       | <b>19</b>      |
| <b>Figure 7</b>        | Extraction des CPT par ultrasons                                                                                                                                                         | <b>20</b>      |
| <b>Figure 8</b>        | Protocole de détermination des CMI sur microplaque de 96 puits (cas d' <i>Escherichia coli</i> )                                                                                         | <b>24</b>      |
| <b>Figure 9</b>        | Comparaison des teneurs en CPT des extraits de cladode d'OFI avec cuticule et sans cuticule obtenus par E.A.U et EC                                                                      | <b>28</b>      |
| <b>Figure 10</b>       | Comparaison des teneurs en flavonoïdes totaux des extraits de cladode d'OFI avec cuticule et sans cuticule obtenus par E.A.U et EC                                                       | <b>30</b>      |
| <b>Figure 11</b>       | Comparaison de l'activité antioxydante des extraits de cladode d'OFI avec et sans cuticule obtenus par EC et E.A.U                                                                       | <b>32</b>      |
| <b>Figure 12</b>       | Zones d'inhibition observées suite aux tests antibactériens de l'extrait EC sur la souche <i>E. faecalis</i> et l'extrait E.A.U sur les souches <i>E. coli</i> et <i>P. aeruginosa</i> . | <b>35</b>      |
| <b>Figure 13</b>       | Effet de l'extrait E.A.U sur les zones d'inhibition des souches : <i>S. aureus</i> (ATCC 6538) et <i>K. oxytoca</i>                                                                      | <b>35</b>      |
| <b>Figure 14</b>       | Tests antibactériens sur microplaques pour les souches : SARM, <i>Salmonella</i> sp. et <i>S. aureus</i> (ATCC 6538)                                                                     | <b>36</b>      |
| <b>Figure 15</b>       | Spectres infrarouges des extraits liquides (EC et E.A.U) des cladodes d' <i>Opuntia ficus indica</i>                                                                                     | <b>38</b>      |

## ***Liste des Tableaux***

| <b>N° du<br/>Tableau</b> | <b>Légende</b>                                                                                 | <b>N° Page</b> |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>Tableau I</b>         | Différentes parties d' <i>Opuntia ficus-indica</i>                                             | <b>5</b>       |
| <b>Tableau II</b>        | Quelques exemples de valorisation biotechnologique des cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i> | <b>11</b>      |
| <b>Tableau III</b>       | Composition chimique des cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i>                               | <b>11</b>      |
| <b>Tableau IV</b>        | La distribution et la teneur en polyphénols des feuilles d' <i>Opuntia ficus-indica</i>        | <b>12</b>      |
| <b>Tableau V</b>         | Effet nutraceutiques et thérapeutique des raquettes                                            | <b>14</b>      |
| <b>Tableau VI</b>        | Avantages et inconvénients de l'E.A.U                                                          | <b>16</b>      |
| <b>Tableau VII</b>       | Conditions de récolte de la plante                                                             | <b>17</b>      |
| <b>Tableau VIII</b>      | Caractéristiques des cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i>                                   | <b>17</b>      |
| <b>Tableau IX</b>        | Capacité antioxydantes des CPT en équivalent Trolox                                            | <b>32</b>      |
| <b>Tableau X</b>         | Activités antibactériennes des extraits RAC après EC et E.A.U                                  | <b>33</b>      |
| <b>Tableau XI</b>        | Concentrations minimales inhibitrices (CMI) des bactéries testées                              | <b>37</b>      |

## Table des matières

Remerciements

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

| N Titre | Titre                                                                               | N Page    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|         | <b>Introduction générale</b>                                                        | <b>1</b>  |
|         | <b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>                                        |           |
| I.1     | Figuier de Barbarie : <i>Opuntia ficus-indica</i>                                   | <b>3</b>  |
| I.1.1   | Origine d' <i>Opuntia ficus-indica</i>                                              | <b>3</b>  |
| I.1.2   | Historique du figuier de Barbarie                                                   | <b>4</b>  |
| I.1.3   | Description botanique                                                               | <b>5</b>  |
| I.2     | Valorisation du figuier de Barbarie                                                 | <b>6</b>  |
| I.2.1   | Valorisation économique et écologique                                               | <b>6</b>  |
| I.2.2   | Valorisation alimentaire                                                            | <b>7</b>  |
| I.2.3   | Valorisation médicinale                                                             | <b>8</b>  |
| I.2.4   | Valorisation en cosmétique                                                          | <b>9</b>  |
| I.2.5   | Valorisation biotechnologique                                                       | <b>10</b> |
| I.3     | Les cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i>                                         | <b>11</b> |
| I.3.1   | Composition chimique des cladodes                                                   | <b>11</b> |
| I.3.2   | Les composés polyphénoliques                                                        | <b>12</b> |
| I.3.3   | Effet nutraceutiques et thérapeutiques des raquettes d' <i>Opuntia ficus-indica</i> | <b>14</b> |
| I.4     | Méthodes d'extraction des composés phénoliques totaux                               | <b>14</b> |
| I.4.1   | Extraction conventionnelle solide-liquide                                           | <b>15</b> |
| I.4.2   | Extraction assistée par Ultrasons (E.A.U)                                           | <b>15</b> |
|         | <b>PARTIE EXPERIMENTALE</b>                                                         |           |
|         | <b>Chapitre II : Matériels et méthodes</b>                                          |           |
| II.1    | Matière végétale                                                                    | <b>17</b> |
| II.1.1  | Collecte et préparation de la poudre de raquette                                    | <b>17</b> |
| II.1.2  | Test d'humidité                                                                     | <b>18</b> |

|         |                                                                                                         |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2    | Préparation des extraits de deux raquettes                                                              | 19 |
| II.2.1  | Extraction conventionnelle (EC)                                                                         | 19 |
| II.2.2  | Extraction assistée par ultrasons (E.A.U)                                                               | 19 |
| II.3    | Dosage colorimétrique                                                                                   | 20 |
| II.3.1  | Dosage des composés phénoliques totaux                                                                  | 20 |
| II.3.2  | Dosage des flavonoïdes totaux                                                                           | 21 |
| II.4    | Evaluation de l'activité antioxydante par le test de l'ABTS                                             | 21 |
| II.5    | Evaluation <i>in vitro</i> de l'activité antibactérienne des extraits éthanoliques                      | 22 |
| II.5.1  | Les souches bactériennes testées                                                                        | 22 |
| II.5.2  | Revivification des souches bactériennes, standardisation des inocula bactériens et tests antibactériens | 22 |
| II.5.3  | Concentration minimale inhibitrice (CMI)                                                                | 23 |
| II.6    | Analyse des poudres de cladodes par spectroscopie à transformée de Fourier (IRTF)                       | 25 |
|         | <b>Chapitre III : Résultats et discussion</b>                                                           |    |
| III.1   | Identification de la plante                                                                             | 26 |
| III.2   | Test d'humidité et matière sèche                                                                        | 26 |
| III.3   | Extraction des composés phénoliques totaux (CPT)                                                        | 27 |
| III.3.1 | Rendement des extraits secs                                                                             | 27 |
| III.3.2 | Dosages CPT                                                                                             | 27 |
| III.3.3 | Dosages flavonoides                                                                                     | 29 |
| III.4   | Evaluation de l'activité antioxydante                                                                   | 31 |
| III.5   | Activités antibactériennes                                                                              | 33 |
| III.5.1 | Evaluation des activités antibacteriennes (test des disques)                                            | 33 |
| III.5.2 | Concentrations Minimales Inhibitrices (CMI)                                                             | 36 |
| III.6   | Analyse infrarouge des extraits RAC                                                                     | 37 |
|         | <b>Conclusion générale</b>                                                                              | 39 |
|         | <b>Références bibliographiques</b>                                                                      |    |
|         | <b>Annexes</b>                                                                                          |    |

# **Introduction**

## **Générale**

Les antibiotiques, qui ont préservé d'innombrables vies et atténué les souffrances de millions de personnes au fil des années, font actuellement face à une menace grandissante causée par l'émergence et la propagation de bactéries multi-résistantes (**Mameri et al., 2019**).

En conséquence, de nombreux chercheurs se sont engagés dans la recherche de médicaments d'origine naturelle répondant à des critères spécifiques, afin de les utiliser de manière plus étendue en tant qu'agents antimicrobiens. Cette quête a entraîné une expansion soudaine des plantes médicinales, qui peuvent être considérées comme des réservoirs de petites molécules de métabolites secondaires qui leur confèrent des propriétés médicinales puissantes, utilisées par diverses cultures pour traiter une multitude de maux, y compris les infections bactériennes (**Habibi et al., 2005**).

De plus, les plantes médicinales offrent une ressource naturelle abondante et durable. Elles peuvent être cultivées dans différentes régions du monde, ce qui en fait une solution accessible et économiquement viable. Leur utilisation peut également contribuer à la préservation de la biodiversité en valorisant les connaissances traditionnelles sur les plantes et en encourageant la conservation des écosystèmes naturels. Parmi les plantes médicinales qui ont démontré leur efficacité avérée, certaines espèces de cactus, notamment le figuier de Barbarie du genre *Opuntia*.

Récemment, plusieurs techniques d'extraction ont été développées pour extraire les composés polyphénoliques des plantes, ces techniques ont montrés plusieurs avantages par rapport aux techniques classiques. Parmi celles-ci, figurent l'extraction assistée par ultrasons, l'extraction assistée par micro-ondes, l'extraction accélérée par solvant et l'extraction par fluide supercritique (**Ong, 2004**). L'extraction assistée par ultrasons (E.A.U) se présente comme une alternative simple, économique et efficace par rapport aux méthodes d'extraction conventionnelles (**Ilghami et al., 2015**). Elle repose sur l'utilisation d'ondes ultrasoniques qui génèrent un effet de cavitation dans le solvant. Ce phénomène provoque le mouvement de petites bulles sous vide dans le liquide, favorisant ainsi la pénétration du solvant dans les matières premières végétales de manière rapide et efficace (**Teng et al., 2014**).

*Opuntia ficus-indica* a été l'objet de nombreuses recherches et études approfondies en raison de ses multiples applications industrielles. En Algérie, où environ 80% du territoire bénéficie d'un climat favorable caractérisé par des zones arides à semi-arides, et avec des terrains propices, cela favorise le développement de la culture de figuier de Barbarie (**Neffar et al., 2011**).

Les cladodes d'*Opuntia* sont constituées d'une matière végétale renfermant divers composés qui lui confèrent de nombreuses propriétés multifonctionnelles (composés phénoliques, flavonoïdes, vitamines, caroténoïdes, etc.). Ces substances présentent des activités biologiques et pharmacologiques intéressantes, offrant ainsi des avantages en termes de soins et de prévention de diverses maladies liées au stress oxydatif, telles que le cancer, les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives, ainsi que le soulagement des infections graves, et bien d'autres encore (Abirami *et al.*, 2014, Rasoulpour *et al.*, 2017) .

D'où notre intérêt pour cet axe, Ainsi l'objectif de notre travail est l'évaluation de l'activité antioxydante des extraits de raquette du figuier de Barbarie et l'étude de l'effet antibactérien de ces extraits sur quelques souches bactériennes.

Le présent manuscrit est composé de trois parties :

Dans la première partie, nous abordons les connaissances bibliographiques concernant *Opuntia ficus-indica*, la composition chimique et poly-phénolique des cladodes de cette plante, ainsi que les méthodes d'extraction de ces composés.

Dans la deuxième partie, nous explorons les différentes techniques et méthodes utilisées pour l'extraction des polyphénols (extraction conventionnelle et ultrasons), ainsi que la détermination des composés phénoliques totaux et de leurs activités antioxydantes. Enfin, nous évaluons *in vitro* l'activité antibactérienne des extraits obtenus.

La troisième partie est consacrée aux résultats obtenus dans notre étude.

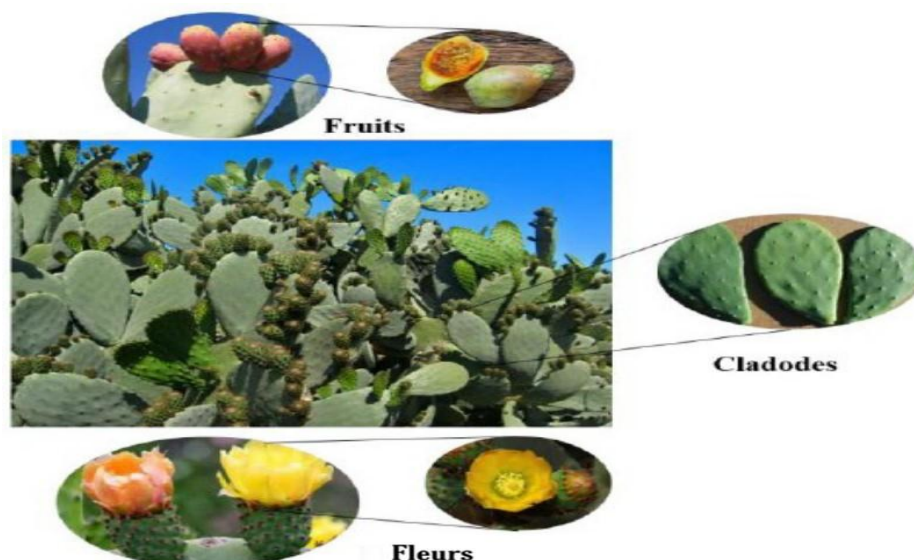
Une conclusion générale est donnée à la fin du présent travail en tirant les principaux résultats obtenus ainsi que les potentielles perspectives.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

### I.1 Figuier de Barbarie : *Opuntia ficus-indica* :

Les plantes aux propriétés bénéfiques sont connues en médecine traditionnelle. De nos jours, malgré la disponibilité généralisée de composés synthétiques, la recherche se porte vers des composés naturels à moindre coût et peu d'effets secondaires. L'intérêt croissant pour la médecine préventive encourage l'utilisation de nutraceutiques, des composés bioactifs d'origine végétale. Parmi les plantes médicinales, on cite : l'*Opuntia ficus-indica* (OFI) (Sinicropi *et al.*, 2022).



**Figure 1.** Arbre de l'*Opuntia ficus indica* et ses composants (Sinicropi *et al.*, 2022)

#### I.1.1 Origine d'*Opuntia ficus-indica*:

Le genre de plante *Opuntia* est originaire du continent américain ; à ce jour, 377 espèces ont été reconnues, dont 104 sont sauvages au Mexique, avec 60 espèces endémiques à ce pays. Il a joué un rôle important dans l'économie agricole et l'alimentation des anciens Mexicains de l'empire aztèque, et est maintenant répandu dans différents pays et sur tous les continents (Sinicropi *et al.*, 2022). Venant donc du Mexique, le genre *Opuntia* s'est largement répandu sur tout le continent américain (de l'Alberta, Canada, à la Patagonie, Argentine) et, après la conquête espagnole, dans le reste du monde (Anaya-Pérez and Bautista-Zane, 2008).

#### I.1.2 Historique du figuier de Barbarie :

Le figuier de Barbarie, a plusieurs appellations (figuier d'Inde, figuier de Barbarie et Nopal) dont l'appellation latine est *opuntia ficus-indica* (OFI), et pour ses fruits on l'appelle « tunas » au Mexique.

Marc Schweizer affirme que les Aztèques connaissaient ce cactus qui semblait déjà exister bien avant l'arrivée des Espagnols. Le nopal est une plante typique du paysage mexicain et est l'une

des plus grandes représentations de la nationalité mexicaine (**Anaya-Pérez and Bautista-Zane, 2008**).

Son histoire remonte aux anciennes civilisations mésoaméricaines, en particulier à l'époque des Aztèques (**Sáenz Hernández et al., 2013**), lorsque les gens récoltaient des cladodes et des fruits sauvages à des fins alimentaires et médicinales. L'expansion espagnole a contribué à la propagation des cactacées en Amérique et en Europe (**Cruz-Hernández and Paredes-López, 2010**). L'introduction de l'OFI en Afrique du Nord est due à deux causes : la première, elle a été emportée par l'expansion espagnole au XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles ; la seconde, les plantations du figuier de Barbarie servaient de haies pour se protéger des Espagnols en pleine guerre vers la fin du XIV<sup>e</sup> siècle en Afrique du Nord (**Mahdeb et al., 2021**).

Même si le nopal était une culture importante dans le centre du Mexique au 18<sup>e</sup> siècle, les Espagnols ont ensuite répandu son utilisation dans l'ancien monde en raison de ses nombreuses propriétés, en particulier celles des fruits, pour son utilisation par des marins contre le scorbut et surtout pour la production de colorants rouges (**Maniaci et al., 2021, Adjeroud 2017, Ali et al., 2022, Maran and Manikandan, 2012**).

Emportée en Espagne pour être cultivée, la figue de Barbarie s'est propagée rapidement à travers le monde ; on la trouve en Afrique, en Australie, dans le sud de l'Europe et en Asie. En Algérie, on appelle Karmouss N'ssara car il est dit que cette plante a été importée du Mexique vers l'Algérie et le Nord de l'Afrique par des marins au XV<sup>e</sup> (**Ali et al., 2022, Maran and Manikandan, 2012**).

### I.1.3 Description botanique :

Le figuier de Barbarie est une plante originale et utile. Selon la classification botanique, les cactacées (ou cactées) sont des végétaux phanérogames appartenant à la classe des angiospermes dicotylédones et polypétales (**Schweizer, 1999**).

**Reyes-Agüero et al. (2005)** Affirment que l'*Opuntia ficus-indica* est un arbuste pouvant atteindre jusqu'à 1,7 (-3) m de haut, avec une tige primaire lignifiée et bien définie. Cette plante succulente s'adapte bien aux conditions climatiques extrêmes et elle a une croissance rapide dans les sols pauvres en eau (**Aragona et al., 2018**). Le type de photosynthèse qui se produit chez *Opuntia* est connu sous le nom de métabolisme de l'acide crassulacée (CAM). Les stomates s'ouvrent principalement la nuit et laissent entrer du CO<sub>2</sub>, ce qui conduit à une acidification progressive de la tige (**Sáenz Hernández et al., 2013**).

Le cactus *Opuntia* présente une variété génétique considérable et un certain nombre d'espèces ont été décrites. Certaines sont épineuses : dotées d'épines, tandis que d'autres sont inermes ; sans épines (Arba, 2009).

La classification botanique d'*Opuntia ficus-indica* est rappelée ci-dessous : selon Ghédira and Goetz (2018) :

- Règne : *Plantae*
- Classe : *Magnoliopsida*
- Espèce : *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill
- Genre : *Opuntia* Mill.
- Famille : *Cactaceae*

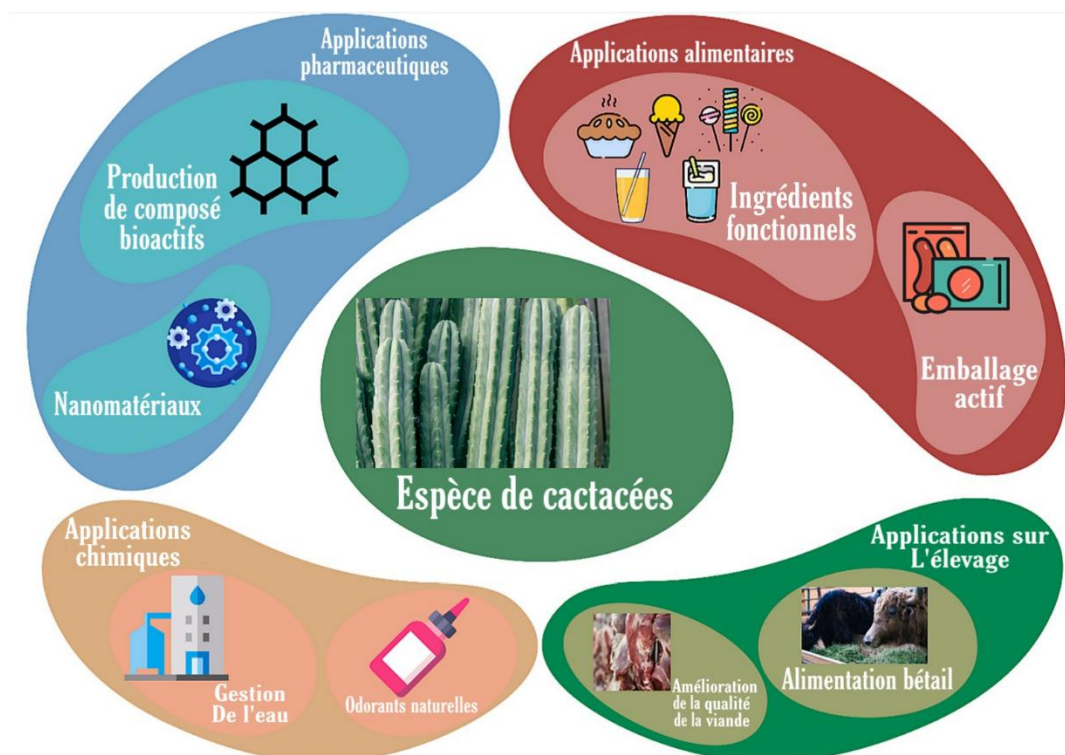
D'un point de vue morphologique, le figuier de Barbarie peut être divisé en différentes parties :

**Tableau I.** Différentes parties de l'*Opuntia ficus-indica*

| Compartiments     | Explications                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Système racinaire | Un système racinaire horizontal étendu qui se ramifie dans le sol (Agholor, 2016).<br>Peu profond et prêt à absorber l'eau même du brouillard ou d'une pluie légère (Feugang et al., 2006).                                                                                                        |
| Partie végétative | Fréquemment appelés coussinets, articulations ou cladodes, ce sont des tiges modifiées qui est faite d'un parenchyme blanc qui sert au stockage de l'eau (Feugang et al., 2006)<br>Certains types de cladodes sont épineux, tandis que d'autres sont sans épines et sont allongés (Agholor, 2016). |
| Fleur             | Fleurs d'anthèse diurnes, jusqu'à dix par cladodes, toujours prises dans la partie apicale de la marge du cladode ; généralement cylindrique, parfois ovoïde ou conique ; mesurant entre 4 et 6 cm de longueur et entre 2,5 et 3,1 cm de diamètre (Reyes-Agüero et al., 2005).                     |
| Fruit             | Les fruits présentent différentes couleurs : jaune, orange, rouge et violet. Généralement oblongs, parfois sphériques, cylindriques ou elliptiques.<br>Ils mesurent environ 7 cm de long, 5 cm de large et pèsent environ 146 g (Reyes-Agüero et al., 2005)                                        |

## I.2 Valorisation du figuier de Barbarie :

Les espèces de Cactacées produisent de grandes quantités de mucilage et de fibres, ainsi que de composés phénoliques, d'alkaloïdes et de triterpénoïdes. Grâce à leur teneur élevée en fibres et en glucides fermentescibles, ainsi qu'à d'autres composés bioactifs cibles, elles peuvent être considérées comme une stratégie de valorisation potentielle pour certaines applications (**Carpena et al., 2023**).



**Figure 2.** Applications industrielles des Cactacées et des sous-produits dérivés (**Carpena et al., 2023**)

### I.2.1 Valorisation économique et écologique :

Le figuier de Barbarie est une plante succulente qui s'adapte bien aux conditions climatiques extrêmes et qui a une croissance rapide même sur des sols pauvres et à faible besoin en eau. Il est utilisé pour l'alimentation, la pâture, la médecine et comme plante ornementale, et offre également des avantages industriels et écologiques. Bien qu'il ait longtemps été marginalisé, sa culture se développe aujourd'hui et son importance socio-économique et environnementale augmente en conséquence (**Maataoui and Hilali, 2004**).

Les sociétés humaines tirent profit du bien et des services essentiels fournis par les figuiers de Barbarie, tels que le contrôle des sols et de l'érosion hydraulique et éolienne (**Sáenz Hernández**

*et al.*, 2013), leur utilisation contre la propagation des incendies grâce à leur résistance au feu, la régulation du climat par séquestration de carbone, la conservation de la biodiversité des habitats pour la faune sauvage, sans oublier leur beauté esthétique en tant que plante verte toute l'année (Louhaichi, 2018, Mylo *et al.*, 2022).

D'un point de vue pédologique, ce végétal permet l'amélioration des sols par la biotransformation des racines et des rameaux en substances organiques, et donc une plus grande disponibilité en éléments nutritifs (Le Houérou, 1996, Mandouri, 2000).

Les cladodes d'OFI peuvent être utilisés comme aliment pour animaux, fourrage ou pour la consommation humaine (Rocchetti *et al.*, 2018). Au Maghreb, les vieilles raquettes d'*Opuntia* desséchées sont utilisées comme engrais des vergers et la dispersion d'articulations d'*Opuntia* moulues autour du pied de certaines plantes, éloigne les parasites et empêche la prolifération des mauvaises herbes (Belouad, 2001).

En outre, Le mucilage et le jus de la raquette ont montré une grande efficacité dans l'amélioration des rendements du procédé d'électrocoagulation dans l'élimination de polluants minéraux et métalliques en eaux usées (Adjeroud *et al.*, 2015, Adjeroud *et al.*, 2018). Le mucilage a également la capacité d'éliminer la matière organique et les bactéries telles que *Bacillus cereus* (Buttice *et al.*, 2010). L'efficacité de ce mucilage est comparable à celle du floculant industriel et offre une alternative économique en matière de dépollution des eaux usées grâce à son faible coût et à sa non-toxicité.

### I.2.2 Valorisation alimentaire :

*L'Opuntia ficus-indica* est l'une des plantes les plus utilisées en raison de sa polyvalence et de ses propriétés comestibles uniques. Elle est exploitée dans sa totalité, des fruits aux feuilles et tiges ; et est classiquement exploitée dans l'industrie alimentaire pour le développement et la production d'une large gamme de produits (Carpena *et al.*, 2023).

Les fruits sont généralement consommés sous forme fraîche, en jus ou en confiture. Les cladodes sont quant à eux le plus souvent utilisés pour l'alimentation des animaux ou jetés (Marin-Bustamante *et al.*, 2018). Certaines cultures ont intégré les cladodes à des préparations alimentaires, telles que des salades, de la confiture, du chutney ou des cornichons (Ginestra *et al.*, 2009). La peau et les épines ont par ailleurs été employées avec succès comme matières premières glucidiques pour améliorer la production de levures boulangères (Diboune *et al.*, 2019). Leurs

pelures peuvent être intégrées à des produits alimentaires, comme des boissons, des gélules et des colorants (**Jiménez-Aguilar et al., 2015**).

En Algérie, des entreprises telles que Thafath, Romais et la coopérative NOPALTEC ALGERIE, situées respectivement à Ouadhias (Tizi-Ouzou), El-Kseur (Bejaia) et Sidi-Fredj (Souk Ahras), sont spécialisées dans la transformation du figuier de Barbarie en produits agro-alimentaires et cosmétiques.

Le mucilage, extrait des cladodes, est utilisé comme emballage et offre la possibilité d'ajuster et d'améliorer les propriétés rhéologiques de certains produits. Son utilisation pourrait également s'avérer économiquement rentable en raison de son faible prix et de son accessibilité (**Gheribi and Khwaldia, 2019**). Parmi les différents extraits d'*Opuntia*, d'importants composants pour l'industrie alimentaire : la pectine et le chitosane, réputés pour leurs propriétés gélifiantes et stabilisantes (**Lefsih et al., 2017**).

Selon l'étude de **Sadok et al. (2014)**, le jus de cladode a un effet intéressant lors de la fermentation lactique, puisqu'il stimule et maintient la survie des bactéries lactiques et probiotiques, et accélère la cinétique de fermentation (**Barba et al., 2022**). Les chercheurs **Hernández-Urbiola et al. (2011)** ont considéré les figues de Barbarie comme une source importante de calcium pour les groupes qui ont une faible accessibilité aux produits laitiers et pour les personnes qui ont des difficultés à les digérer.

Ces dernières années, des applications technologiques de certaines espèces de cactus ont été notées, car elles constituent une bonne source d'aliments sains et d'ingrédients alimentaires naturels. Comme mentionné précédemment, et en raison de sa diversité et de son importance économique (**Carpena et al., 2023**).

### 1.2.3 Valorisation médicinale :

Les Cactacées présentent une variété de métabolites secondaires dont les propriétés bénéfiques pour la santé sont à l'origine de nombreuses applications médicales (**Silva et al., 2021**). Ces métabolites sont synthétisés par les plantes en réponse aux menaces climatiques et biologiques auxquelles elles sont confrontées dans leur habitat naturel, offrant ainsi une variété de composés bioactifs qui promettent des avantages pour la santé humaine (**García-Pérez et al., 2020**).

La recherche médicale moderne a mis en évidence les propriétés importantes du figuier de Barbarie, dues aux molécules actives qui le composent. Cette espèce permet de lutter efficacement contre les affections les plus graves : angoisse, artériosclérose, cholestérol, diabète, obésité,

spasmophilie et stress (**Schweizer, 1999**). De plus, son efficacité contre l'acné, l'arthrose, la dermatose, la diarrhée, la fièvre, l'hypertension artérielle, les rhumatismes, les maux d'estomac, les tumeurs, les verrues, les allergies, les plaies, la colite et certaines maladies virales est également reconnue (**Rasoulpour et al., 2017**).

À cet égard, plusieurs maladies (par exemple, cardiovasculaire, diabète sucré de type II, l'Alzheimer et obésité...) pourraient être prévenues (**Abirami et al., 2014**).

Une autre propriété intéressante de l'OFI a récemment été décrite, à savoir ses propriétés photo-protectrices ultraviolettes (UVA) (**Skarupova et al., 2020**). Le thé aux fleurs est utilisé en Sicile comme remède aux maux de reins ; des capsules qui sont faites à partir des fleurs séchées sont utilisées comme régulant diurétique et comme remède au dysfonctionnement de la prostate (**Arba, 2009**).

**Monter-Arciniega et al. (2019)** ont mis en lumière le fait que les déchets de cactus présentent la capacité la plus élevée d'adsorption des graisses, ce qui indique que les fibres alimentaires provenant de ces déchets pourraient être employées pour ralentir la digestion des lipides et ainsi réguler le niveau de cholestérol.

La réutilisation des anciens antiviraux est l'un des principaux moyens de répondre à l'urgence d'un traitement efficace contre la COVID-19 ;**Costanzo et al. (2020)**;**Vicidomini et al. (2021)** ont identifié des extraits de plantes *Opuntia ficus-indica* ou des composés isolés comme antiviraux et anti-pneumoniques, afin de développer des médicaments contre la COVID-19 in silico.

#### **I.2.4 Valorisation en cosmétique :**

Pendant des années, le figuier de Barbarie a été employé par les femmes berbères et indiennes d'Amérique pour ses propriétés cosmétiques. Elles utilisaient l'huile pour accélérer la guérison et pour protéger leur peau des effets desséchants du vent du désert (**Benattia, 2017**).

Des études qui portent sur l'utilisation de cette espèce dans les cosmétiques, qu'il s'agisse d'un excipient ou d'un composant actif, ont été prises en compte (**Lima et al., 2022**).

Les extraits de plantes offrent une alternative intéressante à la graisse de baleine dans la fabrication de crèmes et de pommades, ces produits sont particulièrement efficaces pour lutter contre les rides (**Bhira, 2012**). La même formule que celle utilisée pour *l'Aloe vera* pourrait également être appliquée aux crèmes contenant de *l'Opuntia* (**Eshun and He, 2004**).

Les propriétés hydratantes et adoucissantes du mucilage des cladodes sont mises à profit depuis longtemps par les femmes rurales du Maroc pour prendre soin de leurs cheveux. De nos jours, il est également utilisé pour la fabrication de shampoings, de crèmes et de laits pour la peau (Arba, 2009).

les épilures et cladodes OFI en tant que produits agro-déchets sont de bons candidats pour les phytocosmétiques antiviellissement (Abbas *et al.*, 2023).

L'huile extraite des graines de *cactus Opuntia ficus-Indica* a récemment été mise en avant comme un élément innovant et précieux dans le domaine des cosmétiques en raison de sa composition chimique optimale pour cet usage (Guillaume *et al.*, 2015).

Actuellement, le prix du marché de l'huile de graines de cactus est estimé à 500 €/L (Gharby *et al.*, 2021).

Les fleurs séchées d'OFI peuvent être vendues sous forme de sachet à infuser, à agrémenter ou à utiliser comme lotion et de macérât. Ces dernières années, des molécules bioactives contenues dans ces fleurs ont été mises à profit pour le développement de biofilms (De Farias *et al.*, 2021).

#### I.2.5 Valorisation biotechnologique :

La transformation des plantes de Cactacées pour des applications alimentaires et non alimentaires conduit à différents résidus, à savoir des grignons, des peaux, des épines et des résidus de cladodes. Plusieurs industries peuvent profiter de ces sous-produits pour le développement de produits durables, notamment les aliments et les boissons (par exemple, aliments fonctionnels, produits d'alimentation du bétail, nutraceutiques, pharmaceutiques, composés liants pour l'industrie de la construction, biogaz pour le secteur de l'énergie (par exemple, biogaz issu de la digestion des cladodes et des flux de déchets industriels), et des intrants agricoles (Lavelli, 2021).

Les possibilités biotechnologiques des espèces *Opuntia* sont en plein essor. Parmi celles-ci, on trouve des méthodes de culture in vitro spécifiquement conçues pour promouvoir la propagation de certaines espèces rares, ainsi que pour les espèces commerciales et ornementales (Angulo-Bejarano *et al.*, 2014).

**Tableau II.** Quelques exemples de valorisation biotechnologique des cladodes d'*Opuntia ficus-indica*.

| Type d'extraction                                                                          | Utilisation de cladodes                                                                             | Références                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Hydrolysats de cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i> (Par la méthode d'hydrolyse acide). | Production d'éthanol par trois levures.                                                             | (Pérez-Cadena <i>et al.</i> , 2018).                                |
| Coagulation-floculation (Poudre et Mucilage des cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i> ). | Traitement des eaux usées.                                                                          | (Rebah and Siddeeg, 2017).                                          |
| Extrait organique de cladodes.                                                             | Protection contre la corrosion dans les aciers industriels.                                         | (Ruiz <i>et al.</i> , 2018).                                        |
| Fermentation (Mucilage et jus de cladodes).                                                | Effet positif sur la fermentation du lait et la croissance des bactéries lactiques et probiotiques. | (Hadj sadok, 2010)                                                  |
| Fermentation (Figue de Barbarie avec différents genres et espèces de champignons).         | Production d'enzyme (xylanases, amyloglucosidase, $\beta$ -glucosidases).                           | (dos Santos <i>et al.</i> , 2018, de Santana <i>et al.</i> , 2012). |

### I.3 Les cladodes d'*Opuntia ficus-indica*

#### I.3.1 la composition chimique des cladodes :

La composition chimique des figues de Barbarie et des cladodes dépend de nombreux facteurs : espèce, variété ou cultivar ; facteurs environnementaux, tels que les conditions climatiques et édaphiques ; gestion des cultures, y compris l'engrais et le traitement après récolte et état de maturité (Méndez *et al.*, 2015, Inglese *et al.*, 2017).

**Tableau III.** Composition chimique des cladodes d'*O. ficus-indica* (Perucini-Avendaño *et al.*, 2021).

| Composition en % poids sec |              |
|----------------------------|--------------|
| Glucides                   | 38,0 – 61,4  |
| Protéines                  | 6,7 -11,73   |
| Lipides                    | 0,1 – 2,16   |
| Fibres bruts               | 5,97 – 55,05 |
| Cendre                     | 14,4 – 23,05 |

### I.3.2 Les composés polyphénoliques :

Selon **Ginestra et al. (2009)**, les cladodes d'*O. ficus-indica* représentent également une source de composés phénoliques, ces derniers ont été détectés dans les fruits et d'autres parties de différentes variétés de cactus (**Mahdeb et al., 2021**). **Amiot et al. (2009)** Souligne que les polyphénols sont des composés provenant du métabolisme secondaire des végétaux et caractérisés par leur structure contenant un ou plusieurs groupements phénoliques.

D'après **Mahdeb et al. (2021)** les polyphénols d'un point de vue chimique, elles sont définies par leurs cycles benzéniques contenant au moins un groupement hydroxyle, libre ou lié à une autre fonction (éther, ester, sucre...). Elles peuvent varier de molécules simples, telles que les acides phénoliques, à des composés hautement polymérisés, comme les tanins.

Les composés phénoliques regroupent une grande variété de composants qui sont répartis en quatre groupes (**Hadj sadok, 2010**) :

- Acides phénols (acides benzoïques, acides cinnamiques) et coumarines.
- Flavones, flavonols, flavanones et dérivés dont catéchines.
- Chalcones, dihydrochalcones et aures.
- Anthocyanes : anthocyanines, anthocyanidines.

Tous les organes de la plante de cactus sont riches en membres de la famille des polyphénols, tels que divers flavonoïdes et acides phénoliques. Cependant, certains polyphénols ne sont produits que par les cladodes de certaines variétés de cactus.

**Tableau IV.** La distribution et la teneur en polyphénols des feuilles d'OFI (**El-Mostafa et al., 2014**)

| Tissus végétaux | Composants principaux identifiés | Teneur en mg/100 g |
|-----------------|----------------------------------|--------------------|
| Cladodes        | Acide salicylique                | 0,58 – 3,54        |
|                 | Isoquercétine                    | 2,29 – 39,67       |
|                 | Isorhamnétine-3-O-glucoside      | 4,59 – 32,21       |
|                 | Nicotiflorine                    | 2,89 – 146,5       |
|                 | Rutine                           | 2,36 – 26,17       |
|                 | Narcissine                       | 14,69 – 137,1      |

Comme mentionné ci-dessus, les cladodes d'*Opuntia ficus-indica* sont riches en Nicotiflorine qui, associée à la rutine, présentent des effets bénéfiques sur le stress hypoxique, le glutamate et l'oxydation à des concentrations aussi basses que 1 nM. Les relations structure-activité suggèrent que la chaîne latérale du sucre de ces flavonoïdes pourrait être importante pour les activités neuroprotectrices. De plus, la rutine a montré des effets inhibiteurs sur les voies apoptotiques et nécrotiques. La Nicotiflorine et la rutine ont le potentiel d'être des médicaments neuroprotecteurs prometteurs à l'avenir (**Nakayama et al., 2011**).

Plusieurs méta-analyses de plusieurs études épidémiologiques suggèrent une contribution des polyphénols aux effets bénéfiques des fruits et légumes. L'effet protecteur des polyphénols, en particulier vis-à-vis des maladies cardio-vasculaires, a d'abord été attribué à leurs propriétés antioxydantes. Du fait de leur structure chimique, les polyphénols sont capables de piéger certaines espèces radicalaires et de chélater les métaux de transition (Fer et Cuivre), catalyseurs d'oxydation. Il a donc été suggéré que les polyphénols diminuent le stress oxydant, susceptible de créer des dommages moléculaires et cellulaires et d'induire diverses pathologies (cancers, diabète de type 2, maladies cardio-vasculaires et neurodégénératives) (**Nakayama et al., 2011**).

## I.3.3 Effet nutraceutiques et thérapeutiques des raquettes d'OFI :

Tableau V. Effet nutraceutiques et thérapeutiques des raquettes

| Activité biologique                                        | Effet des activités                                                                                                                  | Les références                    |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Effet antioxydant                                          | Capacité de réduire les dommages oxydatifs induits par le lithium grâce à l'augmentation des niveaux d'enzymes antioxydantes.        | (Silva <i>et al.</i> , 2021).     |
| Activité antibactérienne                                   | Capacité d'inhiber la croissance de <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , <i>K. pneumoniae</i> et <i>P. aeruginosa</i> .               | (Barba <i>et al.</i> , 2022).     |
| Effet anti-cancéreux                                       | Inhibition de la prolifération des lignées cellulaires du cancer du col de l'utérus, de l'ovaire chez les souris.                    | (Kaur <i>et al.</i> , 2012).      |
| Activité anti-ulcère                                       | Conservation de la structure cellulaire de l'estomac.                                                                                | (Feugang <i>et al.</i> , 2006).   |
| Activité antiviral                                         | Activité antivirale significative contre le virus de la mosaïque du concombre.                                                       | (Sinicropi <i>et al.</i> , 2022). |
| Effet neuroprotecteurs                                     | Prévention des dommages neuronaux (inflammation, stress oxydatif) et protection du cerveau et du système nerveux.                    | (Silva <i>et al.</i> , 2021).     |
| L'influence sur le métabolisme des glucides et des lipides | Inhibition de l'activité enzymatique de la lipase pancréatique et contrôle de l'absorption du glucose, améliorant ainsi la glycémie. | (Silva <i>et al.</i> , 2021).     |
| Hépatoprotecteur                                           | Protection contre les lésions hépatiques induites chez la souris par un insecticide organophosphoré.                                 | (Kaur <i>et al.</i> , 2012).      |

## I.4 Méthodes d'extraction des composés phénolique :

L'extraction est le principal procédé pour récupérer et caractériser des composés phénoliques à partir des matières végétales. De nombreux travaux ciblant les substances phytochimiques biactives de ces matières végétales ont pour objectif de déterminer la technique d'extraction la plus adéquate (Vural *et al.*, 2018). On trouve parmi les méthodes utilisées à la fois la technique d'extraction conventionnelle liquide-solide et la technique innovante basée sur l'utilisation d'ultrasons.

### I.4.1 Extraction conventionnelle solide-liquide :

L'extraction solide-liquide est une méthode qui consiste à transférer des composants d'un solide à un solvant liquide, en les séparant et en les isolants. Cela implique de mettre le matériel végétal en contact avec le solvant, avec ou sans agitation, dans le but d'extraire un ou plusieurs de ses composants (**Handa, 2008, Herzi, 2013**).

L'extraction solide-liquide repose sur la capacité des principes actifs à se solubiliser dans un solvant d'extraction, qui est influencé par une variété de facteurs tels que la nature du matériel végétal, la concentration dans l'échantillon des solutés, la nature du solvant utilisé et la durée d'extraction. La sélection d'un solvant d'extraction approprié est la première étape du processus d'extraction solide-liquide. Une fois cela déclenché, le solvant pénètre à l'intérieur des cellules végétales, ce qui provoque la solubilisation des composés bioactifs qui migrent de la matrice végétale et diluent le solvant jusqu'à ce que l'équilibre de partage soit atteint (**Handa, 2008**).

L'utilisation des techniques conventionnelles pour extraire des molécules d'origine végétale ou ligneuse est délicate en raison des problèmes ci-dessous :

- 1) Elles sont très longues ;
- 2) Elles consomment beaucoup de solvants ;
- 3) Il existe un risque de dégradation des matières traitées (par exemple à chaud) ;
- 4) Le rendement d'extraction est faible (**Wang and Weller, 2006**).

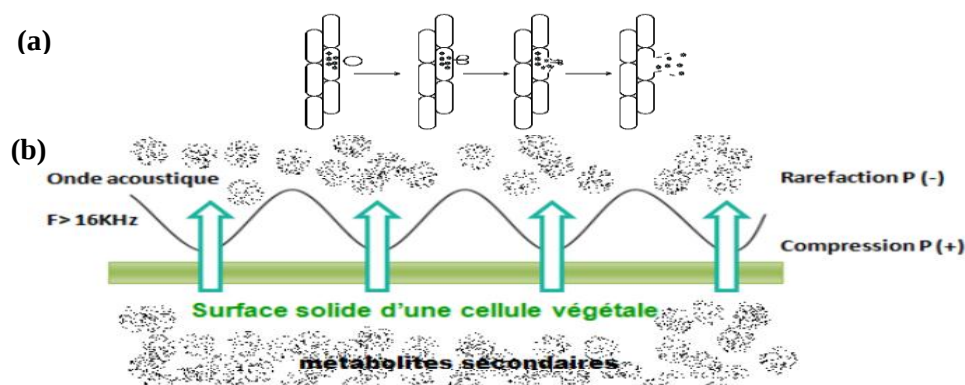
### I.4.2 Extraction assistée par Ultrasons (E.A.U) :

L'E.A.U est une nouvelle technique d'extraction verte et propre dont l'utilisation a été démontrée pour extraire des composés phénoliques présents dans différentes plantes à des fins commerciales (**Vural et al., 2018**). Le dispositif du bain à Ultrasons est montré en **Figure 3**.



**Figure 3.** Dispositifs à ultrasons : bac et sonde, respectivement (**Sherbrooke 2012**) (**Gomez-Maqueo et al., 2021**)

L'E.A.U est une méthode qui tire parti de l'utilisation de la propagation d'ondes mécaniques pour provoquer la formation de bulles de cavitation en raison des changements de température et de pression. Une fois créées, ces bulles s'effondrent lors des cycles de compression-raréfaction des ondes mécaniques (**Figure 4-a**), entraînant une augmentation rapide de la pression et de la température des bulles à plus de 100 MPa et 5000 K, respectivement, et de telles conditions induisent un freinage du matériel végétal facilitant la libération des extraits (**Figure 4-b**) (**Chemat et al., 2017**).



**Figure 4. (a)** (Mylo et al., 2022) Évolution d'une bulle de cavitation à proximité d'une cellule végétale **(b)** Stress membranaire généré lors de passage d'une onde ultrasonique (Sherbrooke 2012).

On peut identifier divers avantages et inconvénients concernant l'utilisation de la technique d'extraction ultrasons (E.A.U) :

**Tableau VI.** Avantages et inconvénients de l'E.A.U

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>-Elle est plus simple, plus rapide, plus efficace et moins coûteuse (<b>Brahmi et al., 2022</b>) .</li> <li>-Il est possible d'Extraire des composés d'intérêt de différentes matrices végétales par des méthodes alternatives à celles utilisées habituellement (<b>Azmir et al., 2013</b>).</li> <li>-Une pénétration plus efficace du solvant, une plus grande flexibilité en ce qui concerne sa dépendance vis-à-vis du solvant, une extraction à des températures plus basses et des rendements plus élevés du produit (<b>Azmir et al., 2013</b>).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-L'une des principales limites du système à bain est l'inefficacité de la transmission de l'énergie au solvant, causée par la présence d'eau dans la cuve en acier inoxydable ou dans la verrerie, ce qui réduit sa fiabilité et sa reproductibilité (<b>Rodríguez De Luna et al., 2020</b>).</li> </ul> |

# ***Partie Expérimentale***

# **Chapitre II**

## **Matériels et méthodes**

La partie expérimentale de notre travail a été réalisée dans les laboratoires de microbiologie ainsi que dans le laboratoire de recherche en biomathématiques, biophysique, biochimie et scientométrie (3BS) de l'Université Abderrahmane Mira Bejaia, entre Mars et Juin 2023.

## II.1 Matière végétale :

La matière première utilisée dans ce travail est la raquette d'*Opuntia ficus-indica* (OFI). Les conditions de récolte des raquettes du figuier de Barbarie sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau VII.** Conditions de récolte de la plante

| Lieu de récolte | Date de récolte | Saison    | Stade de développement |
|-----------------|-----------------|-----------|------------------------|
| Bir-Essalam     | Mars 2023       | Printemps | Cladodes jeunes        |

### II.1.1 Collecte et préparation de la poudre de raquettes :

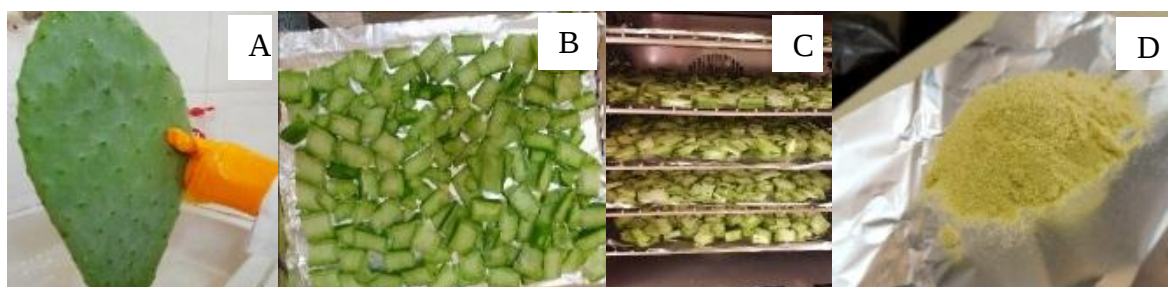
Les jeunes raquettes ont été collectées de Bir-Essalam wilaya de Bejaia, en Algérie. Les échantillons ont été soigneusement emballés dans des sacs et transportés au laboratoire, où les observations et les mesures nécessaires ont été faites selon le tableau ci-dessous :

**Tableau VIII.** Caractéristiques des cladodes d'OFI

| Paramètres             | Valeurs des paramètres mesurés |
|------------------------|--------------------------------|
| Forme                  | Ovoïde Oblongue                |
| Poids(g)               | 861,62 ± 194,71                |
| Longueur (cm)          | 34,51 ± 3,40                   |
| Largeur (cm)           | 16,21 ± 0,62                   |
| Epaisseur (cm)         | 1,84 ± 0,57                    |
| Nombre d'aréoles       | 0 – 3 ± 1,29                   |
| Distance entre aréoles | 2,95 ± 1,06                    |
| Longueur des épines    | 0,92 ± 0,45                    |

Ensuite, les raquettes ont été lavées à l'eau de robinet puis à l'eau distillée. Pour certaines raquettes la cuticule (couche externe cireuse couvrant la raquette) a été retirée afin d'accélérer le séchage des raquettes en étuve, elles sont désignées de raquettes sans cuticules (RSC), tandis qu'elle a été maintenue pour d'autres, ces dernières sont désignées de raquettes avec cuticules (RAC). Elles ont été découpées en petites lanières afin qu'elles puissent sécher rapidement à l'étuve aérée à 40 °C, permettant ainsi d'éliminer toute trace d'humidité (pour éviter les moisissures) et de préserver au mieux leurs composants (**Figure 5**).

Les bandelettes séchées après 2 à 3 jours sont moulues à l'aide d'un broyeur électrique domestique puis tamisées à une granulométrie de 250 µm afin d'obtenir une poudre fine et homogène. La poudre obtenue a été conservée dans des bocaux en verre hermétiquement fermés et stockés à l'abri de la lumière afin de prévenir l'oxydation des polyphénols.



**Figure 5.** Etapes de préparation des poudres de raquettes : (A) Cladodes lavés, (B) Cladodes découpés, (C) Séchage en étuve (40 °C), (D) Poudre broyée.

### II.1.2 Test d'humidité :

La teneur en eau est déterminée en plaçant 10 g de raquette dans une étuve à 105 °C jusqu'au séchage et à l'obtention d'une masse constante. La teneur en eau est définie comme étant la perte de poids subie durant le processus de dessiccation.

Le taux d'humidité est calculé selon la formule suivante :

$$H (\%) = (M_0 - M_1 / M_0). 100$$

Avec :  $M_0$  : masse en gramme de l'échantillon avant étuvage

$M_1$  : masse en gramme de l'échantillon après étuvage

Le taux de la matière sèche en pourcentage est calculé par la formule suivante :

$$\text{Matière sèche (\%)} = 100 - H (\%)$$

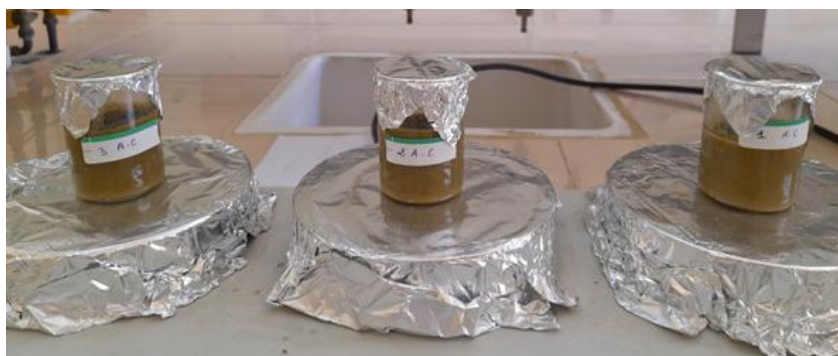
## II.2 Préparation des extraits de deux raquettes :

L'extraction des polyphénols a été effectuée par deux méthodes : la méthode d'extraction conventionnelle (EC) et l'extraction assistée par ultrasons (E.A.U) à partir de la poudre préparée d'OFI. Pour chaque procédé d'extraction, des paramètres opératoires (temps de traitement et le ratio solvant-eau) prédéfinis de travaux précédents ont été appliqués afin d'améliorer l'efficacité des extractions.

### II.1.1 Extraction conventionnelle (EC) :

La procédure d'extraction conventionnelle solide-liquide sous agitation des composés phénoliques totaux (CPT) a été réalisée comme suit :

Une quantité de 5 g de poudre de raquette a été placée dans 50 mL (*Aruwa et al., 2019*) de solvant d'extraction en utilisant de l'éthanol à 20 % (*Iftikhar et al., 2023b*) dans un bécher, et le mélange a été agité sur une plaque agitatrice à 600-700 rpm pendant 4h30 min à température ambiante (**Figure 6**). Ensuite, les surnageants ont été récupérés après centrifugation à 5000 rpm pendant 15 min. Chaque extraction a été répétée trois fois.



**Figure 6.** Extraction conventionnelle des CPT.

### II.2.2 Extraction assistée par ultrasons (E.A.U) :

Une quantité de 5 g de la poudre broyée de raquette a été placée dans un bécher avec 50 mL de solvant d'extraction (éthanol 20 %), puis le mélange a été soumis à un bain à ultrason pendant 40 min (**Figure 7**) (la puissance, la fréquence et l'impulsion sont fixés à 100 W, 42 KHz  $\pm$  6%, et 5 secondes, respectivement). Les extraits sont finalement récupérés après une centrifugation à 5000 rpm pendant 15 min à  $40^{\circ}\text{C} \pm 2$ , et chaque extraction a été répétée trois fois (*Mahdeb et al., 2021*).

Les extraits obtenus après les deux méthodes d'extraction utilisées ont été séchés à 37°C à l'étuve aérée pendant 24h pour l'élimination du solvant d'extraction, puis conservés à 4 °C jusqu'à utilisation.



**Figure 7.** Extraction des CPT par ultrasons

### II.3 Dosage colorimétrique :

#### Etude statistique

Une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA) suivie du test HSD de Tukey du logiciel JMP (SAS, USA), ont été réalisés pour montrer s'il existe des différences significatives entre les valeurs obtenues. Les évaluations sont basées sur le niveau de signification du  $p < 0,05$ . Toutes les expériences ont été répétées trois fois et les résultats sont rapportés comme moyenne  $\pm$  S.D.

#### II.3.1 Dosage des composés phénoliques totaux (CPT) :

La quantification des composés phénoliques totaux a été réalisée en utilisant la méthode Folin-Ciocalteu, qui est le protocole standard à appliquer dans ce type d'expériences. La précision des résultats obtenus par cette méthode est soutenue par utilisation d'étalons équivalents, d'un ordre d'addition des réactifs et du réactif spécifique Folin-Ciocalteu (RFC), qui contient du molybdène VI. Le mélange du RFC et des composés phénoliques est stable dans un environnement acide, mais il est instable en solution alcaline. Par conséquent, l'utilisation du carbonate de sodium, qui fournit un milieu alcalin, est primordiale pour la réaction (**Chen *et al.*, 2015**).

La concentration en CPT des extraits a été déterminée en suivant le protocole décrit par **Georgé *et al.* (2005)**: pour le dosage 250  $\mu$ L de l'extrait sec reconstitué en solvant d'extraction (10 mg/mL) a été prélevé dans des tubes à essai, mélangé avec 1,25 mL de réactif de Folin-Ciocalteu dilué à un dixième en eau distillée. Cette solution a ensuite été mélangée avec 1 mL de carbonate de sodium à 7,5 % et incubée pendant 30 min à l'obscurité. L'absorbance a été mesurée

à 760 nm par un spectrophotomètre. La teneur en (composés phénolique totaux) (CPT) a été exprimée en équivalent d'acide gallique, exprimée en milligrammes.

### II.3.2 Dosage des flavonoïdes totaux (FT) :

Les flavonoïdes présentent un groupe OH libre en position 5 qui, en présence de chlorure d'aluminium ( $\text{AlCl}_3$ ), peut former un complexe jaunâtre par chélation de l'ion ( $\text{Al}^{3+}$ ). La coloration jaune produite est proportionnelle à la quantité de flavonoïdes présents dans l'extrait (**Lagnika, 2005**).

Le dosage des flavonoïdes totaux a été réalisé en utilisant la méthode décrite par (**Djeridane et al., 2006**). Un volume de 1 mL d'extrait (avec dilution convenable) a été ajouté à 1 mL d'une solution d' $\text{AlCl}_3$  (2% m/v). Après une incubation de 15 minutes à l'obscurité, l'absorbance a été mesurée à 430 nm.

La teneur en FT a été exprimée en mg équivalent de quercétine par g de matière sèche (mg EQ/g MS) et déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage (**Annexe 06**). Le blanc a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction.

Par conséquent, un matériau ayant une composition chimique et une structure spécifiques sera associé à un ensemble distinct de bandes d'absorption caractéristiques qui permettent son identification (**Anthoni, 2007**).

### II.4 Evaluation de l'activité antioxydante par le test de l'ABTS :

La méthode du radical ABTS<sup>+</sup> est l'une des méthodes les plus couramment utilisés pour déterminer la concentration des radicaux libres. Elle repose sur la neutralisation d'un radical cation. Ce radical cationique est facilement formé par oxydation, en présence de persulfate de potassium, ce qui donne une solution colorée en vert-bleu (**Prouillac, 2006, Sochor et al., 2010**).

Le pourcentage d'inhibition du radical ABTS<sup>+</sup> est évalué par la méthode décrite par (**Re et al., 1999**). La solution d'ABTS radicalaire (7 mM) a été préparée 24 heures avant son utilisation en mélangeant de l'ABTS (38,4 mg) et du persulfate de potassium (6,62 mg) dans 10 mL d'eau distillée. Cette solution a ensuite été diluée avec de l'éthanol à 96 % jusqu'à ce que la densité optique initiale soit de  $0,7 \pm 0,02$  à 734 nm. Ensuite, 200  $\mu\text{L}$  de l'extrait sec reconstitué en solvant d'extraction (1 mg/mL) ont été ajoutés à 1,8 mL de la solution d'ABTS (DO 0,7). Après 6 min d'incubation dans l'obscurité, la densité optique finale (DO<sub>f</sub>) des extraits a été mesurée à 734 nm. Le blanc est le solvant d'extraction mesuré en premier à 734 nm, puis la densité optique initiale

(DO<sub>i</sub>) mesurée en second lieu est obtenue par incubation de 6 min de la solution d'ABTS (DO<sub>0,7</sub>).

La capacité antioxydante des extraits testés est exprimée en milligrammes équivalents Trolox par gramme de matière sèche (mg CAET/g MS), en fonction des concentrations du standard Trolox. Le pouvoir antioxydant de l'extrait est exprimé en pourcentage d'inhibition du radical ABTS<sup>+</sup>.

Les taux d'inhibition ont été calculés à partir de la formule suivante :

$$\text{Le pourcentage d'inhibition (\%)} = (\text{DO}_i - \text{DO}_f / \text{DO}_i) \cdot 100$$

Où DO<sub>i</sub> : Densité optique initiale, et DO<sub>f</sub> : Densité optique finale

## II.5 Evaluation *in vitro* de l'activité antibactérienne des extraits éthanoliques :

Le milieu de culture Mueller-Hinton (MH) est utilisé pour évaluer l'activité antibactérienne des extraits de jeunes cladodes. Pour cela, on dissout 38 g de poudre de gélose MH déshydratée dans un litre d'eau distillée. Le milieu est ensuite chauffé et remué pour faciliter la dissolution jusqu'à ébullition. On procède à l'évaluation de l'activité antibactérienne en utilisant un test de diffusion sur disques (Quentin-Noury, 2016).

### II.5.1 Les souches bactériennes testées :

Les souches bactériennes étudiées sont les suivantes : *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Klebsiella pneumoniae* (souche non référencée), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), *Acinetobacter baumannii* (ATCC 610), *Salmonella* sp. (souche non référencée), *Bacillus subtilis* (ATCC 6633), *Bacillus cereus* (souche non référencée), *Klebsiella oxytoca* (souche non référencée), *Staphylococcus aureus* résistant à la Mécicilline (SARM) (ATCC 43300), *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) (*S. aureus* d'origine alimentaires), *Staphylococcus aureus* (souche non référencée).

### II.5.2 Revivification des souches bactériennes, standardisation les inocula bactériens et tests antibactériens :

Pour la revivification, les souches ont étéensemencées dans un bouillon nutritif et incubées à 37 °C pendant 18 heures. Ensuite, les cultures bactériennes sont diluées dans de l'eau physiologique (9 %) stérile en tube à essai afin de standardiser les inocula bactériens. Pour cela, la densité optique mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre calibré à 625 nm, doit se situer entre 0,08 et 0,13 ce qui correspond à 10<sup>7</sup> à 10<sup>8</sup> UFC/mL. Si l'inoculum s'avère trop faible ou trop élevé,

il peut être ajusté en ajoutant respectivement de la culture bactérienne ou de l'eau physiologique stérile.

Les cultures bactériennes sont étalées à l'aide d'écouvillons sur gélose Mueller-Hinton. Par la suite, des disques de papier Whatman standard N°1 (de 6 mm de diamètre) sont imprégnés des extraits secs (EC et E.A.U) d'OFI reconstitués en eau physiologique (50 mg/mL) avec des volumes de 15 µL (**Loukili et al., 2022**). L'eau physiologique stérile est utilisée comme contrôle négatif, et différents antibiotiques standards (**Annexe 07**) ont servi de contrôles positifs.

Les boîtes de Pétri sont conservées pendant 2 heures à 4 °C au réfrigérateur afin de favoriser la diffusion des substances bioactives, puis incubées à 37 °C pendant 24 heures. L'activité antibactérienne a été évaluée en mesurant les diamètres des zones d'inhibition de croissance (**Moreira et al., 2005**).

### II.5.3 Concentration minimale inhibitrice (CMI) :

La concentration minimale inhibitrice (CMI) a été définie comme étant la plus faible concentration capable d'inhiber la croissance bactérienne après une incubation de 24 heures (**Loukili et al., 2022**).

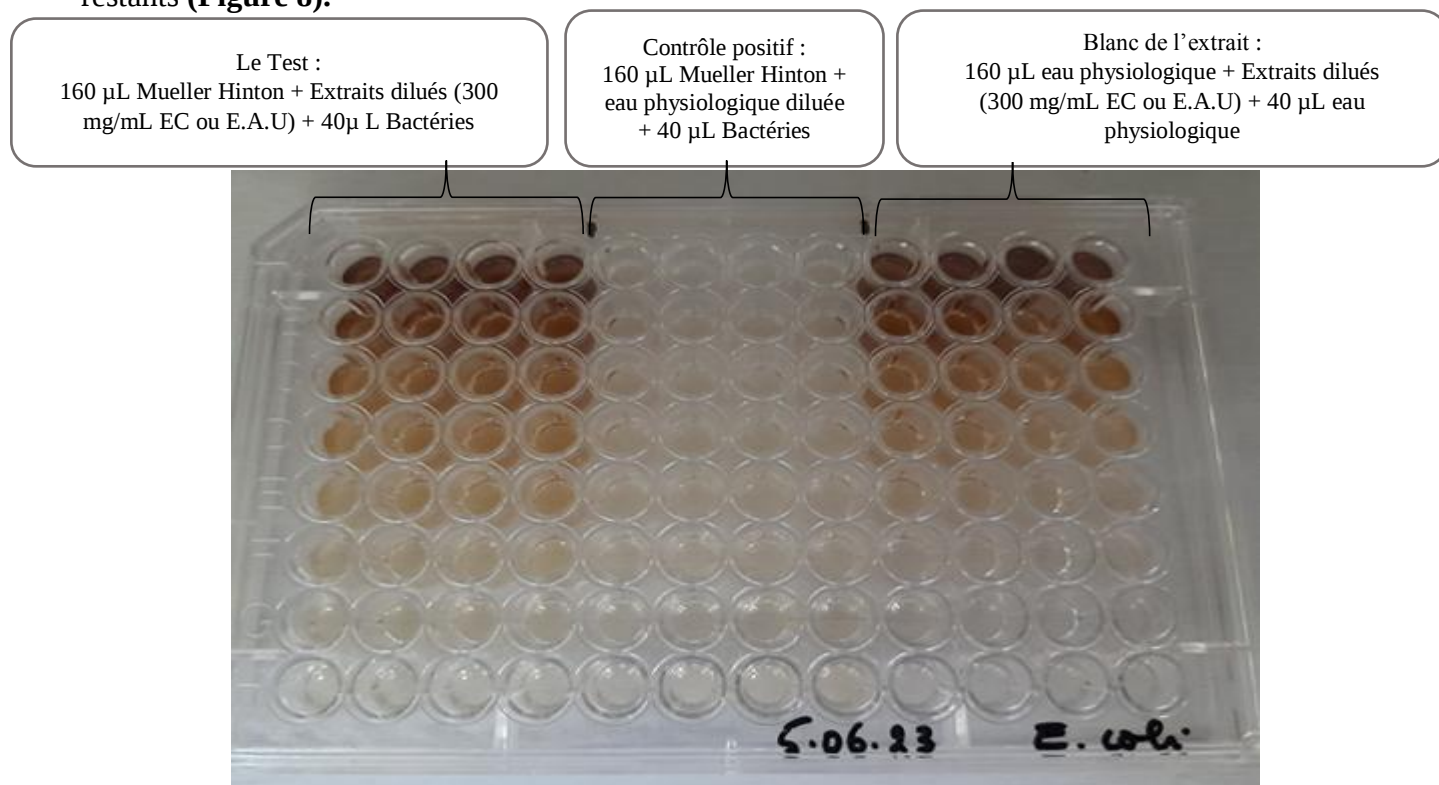
La détermination de la CMI a été réalisée en utilisant la méthode de micro-dilution en milieu liquide sur microplaque de 96 puits stériles en polystyrène en forme de "U". Dans notre étude, les extraits de la matière végétale des raquettes de figuier de Barbarie ont été utilisés pour évaluer la CMI des bactéries pour lesquelles des zones d'inhibition ont été observées : *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212), *Salmonella* sp. (souche non référencée) *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), *Staphylococcus aureus* (SARM) (ATCC 43300), *Klebsiella oxytoca* (souche non référencée), et *Staphylococcus aureus* d'origine alimentaire (ATCC 6538).

Pour la revivification, les souches ont étéensemencées dans un bouillon nutritif et incubées à 37 °C pendant 18 heures. Ensuite, les cultures bactériennes sont diluées dans de l'eau physiologique stérile en tubes à essai pour mesurer la densité optique des deux souches à l'aide d'un spectrophotomètre calibré à 625 nm. La DO doit se situer entre 0,08 et 0,13.

Pour la réalisation des tests antimicrobiens sur microplaques : les 64 premiers puits (4 premières et 4 deuxièmes colonnes) sont remplies avec 160 µL du milieu Mueller Hinton , tandis que les 4 dernières colonnes (32 puits) sont remplies avec 160 µL d'eau physiologique stérile. Par la suite, 160 µL de l'extrait liquide précédemment préparé, à une concentration de 300 mg/ml dans de l'eau physiologique, sont ajoutés à l'aide d'une micropipette sur la première ligne des 4

premières et 4 dernières colonnes, tandis que les 4 colonnes du milieu sont remplies avec de l'eau physiologique.

Par la suite, des séries de dilutions (au 1/2) sont réalisées en prélevant 160 µL du mélange et en les transférant vers le bas jusqu'à la dernière colonne comme représenté sur la **Figure (8)**. Pour compléter les 200 µL de volume par puit, 40 µL des suspensions bactériennes standardisés sont ajoutés aux 64 premiers puits, et la même quantité d'eau physiologique est ajoutés au 32 puits restants (**Figure 8**).



**Figure 8.** Protocole de détermination des CMI sur microplaque 96 puits (cas d'*Escherichia coli* avant incubation à 37° C).

Les microplaques sont ensuite incubés à l'étuve à 37°C pendant 18 à 24 heures. Les microplaques sont ensuite placées dans un lecteur à microplaques pour déterminer les absorbances à 630 nm. Les CMI sont déterminées par observations de l'absence de croissance visible à l'oeil nu et par le calcul des taux d'inhibitions des extraits selon la formule suivante :

Le pourcentage d'inhibition (%) =

$$\left[ \frac{\text{Absorbance contrôle positif} - (\text{Absorbance des tests} - \text{Absorbance du blanc de l'extrait})}{\text{Abs contrôle positif}} \right] * 100$$

**II.6 Analyse des poudres de cladodes par spectroscopie à transformée de Fourier (IRTF) :**

Les extraits bruts liquides des raquettes avec cuticule (RAC) obtenus suite aux deux méthodes d'extraction (EC et E.A.U), ont été analysés par spectroscopie à transformée de Fourier afin de mettre en évidence les différents groupements caractéristiques de diverses biomolécules présentes dans la raquette. L'analyse spectrale a été enregistrée dans un spectrophotomètre infrarouge dans la plage de 500 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ . L'échantillon a été préparé sous forme de pastilles faites d'un mélange de 2 mg de poudre de raquette avec 8 mg de bromure de potassium (KBr) qui sert de support de pastilles et est transparent au rayonnement infrarouge dans la zone 4000 à 500  $\text{cm}^{-1}$ . Le tout est finement broyé et mélangé dans un mortier de manière à être homogène. Le mélange est pressé sous une pression de 60 bar dans une pastilleuse pendant une minute.

La spectroscopie infrarouge est une méthode largement utilisée dans les laboratoires d'analyse pour la caractérisation physico-chimique des matériaux organiques. Cette technique permet d'identifier la nature chimique d'un produit en observant certaines bandes d'absorption présentes dans un spectre. Chaque bande d'absorption correspond à un mode de vibration d'une liaison chimique entre deux atomes, et si une liaison chimique est caractéristique d'un constituant, elle peut être considérée comme un indicateur de sa présence (**Farcas and Touzé, 2001**).

## **Résultats et discussion**



### III.1 Identification de la plante :

Le cactus *Opuntia ficus-indica* (OFI) est une plante dépourvue d'épines, mais la désignation de plante épineuse est acceptée dans un sens large car ce caractère contribue à identifier les formes des sous-espèces. Il existe deux formes appartenant toutes deux à *Opuntia ficus-indica* : l'une avec des épines, la forme *amyclae* et *mégancantha*, et la seconde sans épines, la forme *ficus-indica*. Selon les observations notées des dimensions et caractéristiques des raquettes (**Tableau VIII**), on peut déduire que l'échantillon prélevé pourrait être identifié comme *Opuntia ficus-indica* pour la forme et les dimensions de la raquette, mais sous la forme *amyclae* pour le nombre d'épines présents à la surface des cladodes (**Mahdeb et al., 2021**).

### III.2 Test d'humidité et matière sèche :

Les jeunes raquettes d'*Opuntia ficus-indica* (OFI) de la région de Bir-Esaalam présentent un taux d'humidité d'environ  $90,2 \% \pm 6,37$  pour la raquette sans cuticule et  $90,6 \% \pm 6,39$  pour la raquette avec cuticule. À partir de ces valeurs, nous avons pu déterminer que le pourcentage de matière sèche était estimé à 9,8 et 9,4 % pour la raquette sans cuticule et avec cuticule, respectivement.

Les valeurs obtenues sont similaires à celles trouvées par (**Osuna-Martínez et al., 2014a, Valente et al., 2010**) qui étaient comprises entre 80 et 95 %.

La plupart des organes aériens des plantes sont revêtus d'une cuticule. D'un point de vue chimique, cette dernière est constituée d'un mélange de composés présentant différentes propriétés physico-chimiques. Parmi ces composés, on trouve des cires, de la cutine et/ou du cutan, des polysaccharides, des composés phénoliques et des minéraux. Cette cuticule joue un rôle essentiel en régulant la transpiration et en protégeant la plante contre divers facteurs de stress, notamment la déshydratation. Elle agit également comme une barrière de protection contre les attaques d'agents pathogènes et d'insectes, tout en atténuant l'exposition aux rayons UV (**Fernández et al., 2016**). Ces diverses fonctions ont un effet sur le rendement et la qualité des cultures, y compris la qualité et le traitement après récolte, ce qui a suscité des recherches sur la structure, l'assemblage et la biosynthèse de leurs composants (**Reynoud et al., 2021**).

D'après ces résultats, il est observé que le taux d'humidité des raquettes avec cuticule est supérieur à celui des raquettes sans cuticule. Selon **López et al. (2009)**, la vitesse de séchage des cladodes avec cuticule était plus lente en raison de la présence de cette dernière, qui protège les

cladodes et empêche une perte d'humidité. Toutefois, nous avons observés pratiquement le même temps de séchage (entre 48 à 72h) pour nos deux types de raquettes RAC et RSC, et nous avons sélectionné après séchage les bandelettes de raquettes qui ont préservés au maximum la coloration verte naturelle de départ.

Il est constaté que le principal constituant des cladodes du figuier de Barbarie est l'eau (Osuna-Martínez *et al.*, 2014b), et que la teneur en eau varie en fonction du site de culture, des espèce du genre *Opuntia*, des saisons et de l'âge de la plante (Retamal *et al.*, 1987).

### III.3 Extractions des composés phénoliques totaux (CPT) :

Dans le but d'améliorer l'extraction des composés phénoliques des raquettes, certains facteurs sont pris en compte, tels que le type de raquette (avec et sans cuticule), et la méthode d'extraction (conventionnelle et assistée aux ultrasons) sont pris en compte.

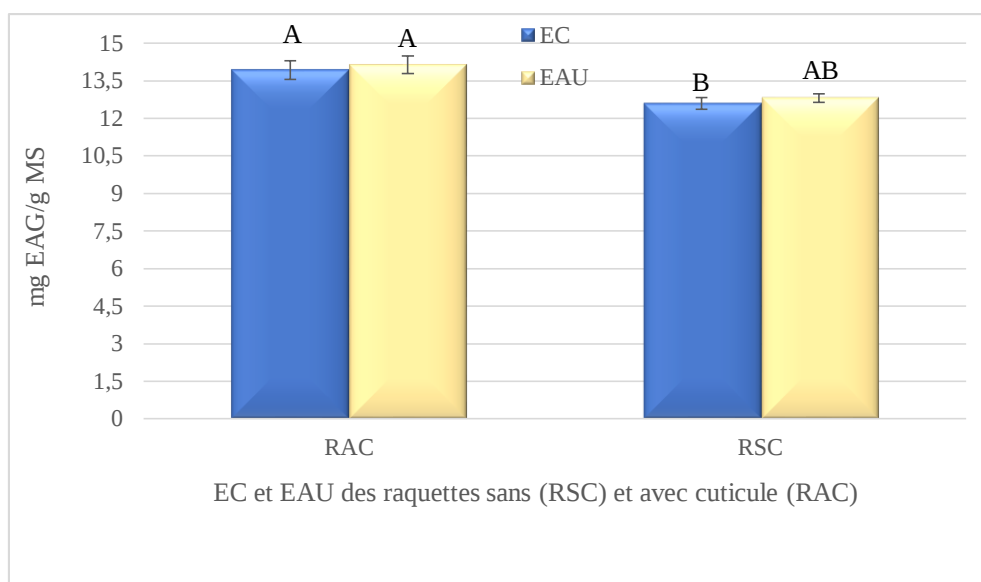
#### III.3.1 Rendement des extraits secs :

Les poudres préparées à partir des deux types de raquettes, avec et sans cuticule (RAC et RSC), ont été soumises à deux méthodes d'extraction : l'extraction conventionnelle (EC) et l'extraction assistée par ultrasons (E.A.U). Il est important de souligner que chaque extraction a été réalisée trois fois, ce qui nous permet de calculer une moyenne et des écart-types.

D'après les résultats obtenus pour les rendements d'extraction, nous observons que le rendement en extraits secs lors de l'extraction par ultrasons (E.A.U) pour la raquette avec cuticule (RAC) était supérieure par rapport à l'extraction conventionnelle (EC), avec une valeur moyenne de  $1,46 \text{ g} \pm 0,04$  contre  $1,35 \text{ g} \pm 1,04$  respectivement. Toutefois, l'extraction conventionnelle pour la raquette sans cuticule (RSC) a donné un meilleur rendement que son extraction par ultrasons, avec une moyenne de  $1,71 \text{ g} \pm 0,03$  contre  $1,49 \text{ g} \pm 0,01$  respectivement. Ceci pourrait être expliqué par des possibles erreurs lors des manipulations (pesée de 5g/50mL solvant pour chaque type de poudre).

#### III.3.2 Dosages CPT :

La Figure 9 présente la différence entre les deux méthodes d'extraction appliquées sur les extraits secs reconstitués en solvant d'extraction de raquettes avec et sans cuticule (RAC et RSC, respectivement) en termes de rendements en composés phénoliques totaux, mettant en évidence l'influence de la méthode d'extraction sur le rendement en composés phénoliques et l'effet de la présence ou pas de la cuticule.



**Figure 9.** Comparaison des teneurs en CPT des extraits de cladode d’OFI avec cuticule et sans cuticule obtenus par E.A.U et EC.

Les différentes lettres indiquent que les échantillons sont significativement différents ( $p < 0,05$ ).

Les barres verticales représentent les écarts types ( $n = 3$ ).

Les résultats obtenus ont montré que l'extraction par ultrasons (E.A.U) avec la raquette avec cuticule (RAC) a donné un rendement de  $14,14 \pm 0,35$  mg EAG/g MS, tandis que l'extraction conventionnelle (EC) avec la raquette avec cuticule (RAC) a donné un rendement légèrement inférieur de  $13,93$  mg EAG/g MS  $\pm 0,36$  mg EAG/g MS. D'autre part, l'extraction conventionnelle (EC) avec la raquette sans cuticule (RSC) a donné un rendement de  $12,59$  mg EAG/g MS  $\pm 0,23$  mg EAG/g MS, tandis que l'extraction par ultrasons (E.A.U) avec la raquette sans cuticule (RSC) a donné un rendement légèrement supérieur de  $12,81$  mg EAG/g MS  $\pm 0,16$  mg EAG/g MS.

Selon **Proestos and Komaitis (2006)**, l'extraction assistée par ultrasons constitue une alternative en raison de ses avantages, tels que la perturbation des cellules et une meilleure pénétration du solvant. Les ondes ultrasonores permettent de rompre les cellules végétales et de libérer leur contenu dans le milieu d'extraction, ce qui pourrait illustrer le rendement élevé obtenu avec cette méthode.

Ces résultats soulignent l'impact de la méthode d'extraction et du type de raquette sur le rendement des composés phénoliques totaux. Bien que la différence soit non significative selon l'étude statistique mais cela suggère que l'utilisation des ultrasons peut favoriser une meilleure

extraction des composés phénoliques totaux tel que mentionné par **Rodríguez-Pérez et al. (2015)**, **Mahdeb et al. (2021)** , et l'extraction E.A.U a permis d'obtenir un gain de temps remarquable (40 min au lieu de 4 heures en EC).

On peut observer que les raquettes avec cuticule (RAC) ont généralement conduit à des rendements légèrement plus élevés en CPT par rapport aux raquettes sans cuticule (RSC). Cela peut être dû à la présence de composés phénoliques totaux dans la cuticule elle-même et à une meilleure interaction entre la cuticule et le solvant d'extraction (**Fernández et al., 2016**).

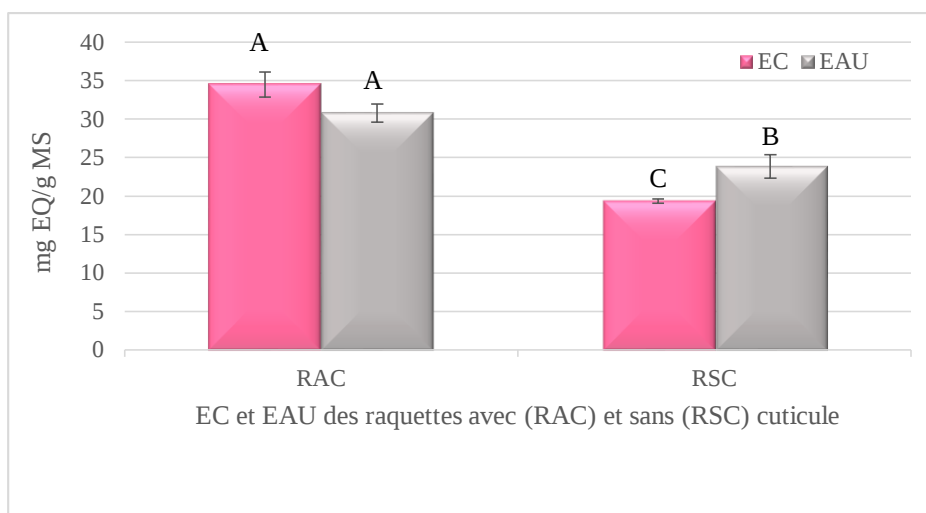
**Vázquez et al. (2014); Cai et al. (2016)** Ont observé une meilleure efficacité dans la récupération des composés phénoliques en utilisant les ultrasons pour extraire les anthraquinones des tiges de *Rubiaceae* et des pommes de terre violettes, respectivement. Cette méthode dépasse ainsi les rendements d'extraction obtenus par d'autres méthodes conventionnelles. De plus, selon **Medina-Torres et al. (2017)**, les E.A.U sont une technologie qui s'inscrit dans le domaine de la chimie durable, car elles favorisent l'utilisation de matières premières renouvelables dans l'extraction de composés phénoliques. Cette approche permet de substituer les solvants organiques toxiques par des solvants non toxiques.

Les E.A.U ont l'avantage de réduire considérablement les temps d'extractions tout en augmentant les rendements de composés phénoliques extraits (**Bourgou et al., 2016**).

Toutes les études ont convenu que cette amélioration de l'extraction est due au fait que l'utilisation des ultrasons favorise la rupture de la paroi cellulaire, avec l'augmentation subséquente de la pénétration du solvant (**Medina-Torres et al., 2017**).

### III.3.3 Dosage des flavonoïde :

Le dosage des flavonoïdes totaux a été réalisé sur extraits secs obtenus par EC et E.A.U de RAC et RSC reconstitués en solvant d'extraction. Les résultats sont illustrés dans **la Figure 10** ci-dessous :



**Figure 10.** Comparaison des teneurs en flavonoïdes totaux des extraits de cladode d'OFI avec cuticule et sans cuticule obtenus par E.A.U et EC

Les différentes lettres indiquent que les échantillons sont significativement différents ( $p < 0,05$ ). Les barres verticales représentent les écarts types ( $n = 3$ ).

D'après les résultats, on peut observer que pour la raquette avec cuticule (RAC), l'EC a donné une teneur en flavonoïdes plus élevée ( $34,52 \pm 1,62$  mg EQ/g MS) par rapport à l'E.A.U ( $30,80 \pm 1,19$  mg EQ/g MS). Cette différence n'est pas significative, mais cela suggère que l'extraction conventionnelle pourrait être légèrement plus efficace pour extraire les flavonoïdes des raquettes avec cuticule. En revanche, pour les raquettes sans cuticule (RSC), la meilleure teneur a été obtenue avec l'extraction E.A.U ( $23,86 \pm 1,19$  mg EQ/g MS) par rapport à l'extraction EC ( $19,35 \pm 0,27$  mg EQ/g MS).

Cela dit, les résultats montrent que les raquettes avec cuticule (RAC) ont généralement une teneur en flavonoïdes plus élevée que les raquettes sans cuticule (RSC), quelle que soit la méthode d'extraction utilisée. Cela pourrait indiquer que la cuticule est riche en flavonoïdes.

L'OFI est extrêmement riche en divers polyphénols (**Astello-García et al., 2015, Angulo-Bejarano et al., 2014**). Parmi ces composés phénoliques, les flavonoïdes occupent une place prépondérante (**Djeridane et al., 2006**).

Étant donné que les flavonoïdes sont sensibles à la chaleur et se dénaturent, les valeurs les plus précises ont été obtenues à partir de la température de séchage la plus basse lors de l'extraction conventionnelle par macération (**Tiho et al., 2017**). Cela pourrait corroborer avec notre travail, où l'extraction EC (à température ambiante) a donné de meilleurs résultats pour la RAC.

La non concordance des teneurs des FT avec celles des CPT (**Figure 10**) pour RAC ou RSC, peut être expliqué par le fait que les extraits éthanoliques contiennent d'autres composés phénoliques tels que les tannins et les acides phénoliques, qui possèdent des structures chimiques différentes de celles des flavonoïdes (**Angulo-Bejarano et al., 2014, Astello-García et al., 2015**).

#### III.4 Evaluation de l'activité antioxydante :

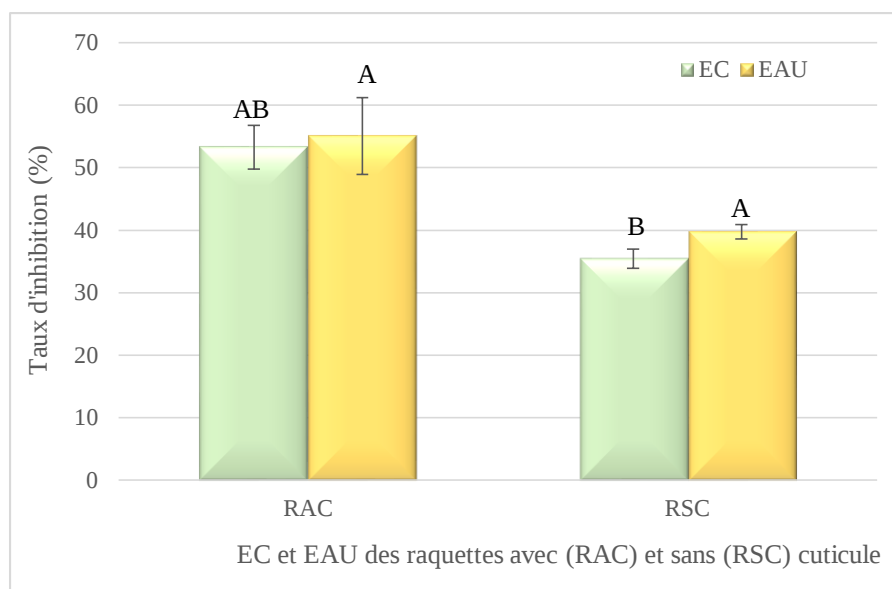
Cette activité a été déterminée sur les extraits secs RAC et RSC reconstitués en solvant d'extraction.

##### a. Expression des résultats en termes de taux d'inhibition (%) :

L'histogramme illustré en **Figure (11)** indique que tous les extraits d'OFI obtenus par les deux méthodes d'extraction EC et E.A.U, présentent la capacité à piéger le radical ABTS<sup>+</sup>, et cette capacité est accentuée avec l'E.A.U.

D'après les résultats obtenus dans le test d'ABTS, nous remarquons que le taux d'inhibition était plus élevé pour l'extraction E.A.U que ce soit pour l'extrait avec cuticule ( $55,05 \pm 6,13$  %) ou sans cuticule ( $39,73 \pm 1,15$  %) par rapport à l'EC avec et sans cuticule, respectivement ( $53,27 \pm 3,51$  % et  $35,41 \pm 1,54$  %). Nous remarquons surtout que les taux d'inhibition des extraits avec cuticule sont plus élevés que ceux des extraits sans cuticule, Ce qui correspond aux résultats des CPT, cela signifie qu'il existe une corrélation très positive entre les CPT et l'activité antioxydante. Plus le taux des CPT est élevé, meilleure est l'activité antioxydante.

Beaucoup d'études montrent que les propriétés anti-oxydantes d'un produit végétal sont fortement liées à sa teneur en polyphénols (**Das et al., 1997, Cai et al., 2004, Zujko et al., 2005, Aoshima et al., 2007**).



**Figure 11.** Comparaison de l'activité antioxydante des extraits de cladode d'OFI avec et sans cuticule obtenus par EC et E.A.U

Les différentes lettres indiquent que les échantillons sont significativement différents ( $p < 0,05$ ).

Les barres verticales représentent les écarts types ( $n = 3$ ).

**a) Expression des résultats en termes d'équivalent Trolox (CAET) :**

La capacité antioxydante est exprimé en équivalent trolox (CAET), le trolox est un composé chimique utilisé comme référence pour évaluer la capacité antioxydante des substance. Ainsi Plus la valeur en équivalent trolox est élevée, plus l'échantillon est considéré comme ayant une forte capacité antioxydante (**Rezaire, 2012**).

**Tableau IX.** Capacité antioxydante des CPT en équivalent Trolox

|              | Capacité antioxydante en équivalent Trolox ( $\mu\text{g CAET/gMS}$ ) |                  |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|
|              | RAC                                                                   | RSC              |
| <b>E.A.U</b> | $37,91 \pm 2.94$                                                      | $28,30 \pm 4,65$ |
| <b>EC</b>    | $29,96 \pm 5.33$                                                      | $17,16 \pm 1,41$ |

Les valeurs d'équivalent Trolox (CAET) exprimées en **Tableau (9)**, suivent également une tendance similaire des résultats en termes de taux d'inhibition (%). Les échantillons obtenus par la méthode d'extraction par ultrasons ont des valeurs d'équivalent Trolox plus élevées ( $37,91 \pm 2.94$  et  $28,30 \pm 4,65 \mu\text{g CAET/gMS}$ ) que ceux obtenus par la méthode d'extraction conventionnelle ( $29,96 \pm 5.33$  et  $17,16 \pm 1,41 \mu\text{g CAET/gMS}$ ). De plus, les échantillons de

raquette avec cuticule (RAC) présentent des valeurs d'équivalent Trolox plus élevées que les échantillons de raquette sans cuticule (RSC) pour les deux méthodes d'extraction.

Ces résultats suggèrent que la méthode d'extraction par ultrasons et l'utilisation d'échantillons de raquette avec cuticule (RAC) peuvent conduire à une meilleure extraction des composés phénoliques totaux et à une activité antioxydante plus élevée, telle que mesurée par l'équivalent Trolox. En conclusion vu les résultats obtenues suite aux dosages des TPC, des flavonoides et du test à l'ABTS, seul l'extrait RAC (EC et E.A.U) a été utilisé pour la réalisation des tests antibactériens sur gélose et sur microplaques.

### III.5 Activités antibactériennes

#### III.5.1 Evaluation des activités antibactériennes (test des disques) :

L'activité antibactérienne des extraits bruts d'*Opuntia ficus-indica* est évaluée en mesurant le diamètre de la zone d'inhibition autour des disques de papier Whatman contenant l'extrait secs RAC reconstitué en NaCl (9 %) avec la concentration de 50 mg/mL à tester vis-à-vis de 12 souches bactériennes.

Le **Tableau X** ci-dessous présentent les valeurs en mm des zones d'inhibitions atteintes avec les souches étudiées.

**Tableau X.** Activités antibactériennes des extraits RAC après EC et E.A.U

| Bactéries testées                                    | Gram         | Diamètres des zones d'inhibition (mm) |               |
|------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------|---------------|
|                                                      |              | Extrait EC                            | Extrait E.A.U |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 27853)           | Gram négatif | 10 ± 0,57                             | 11 ± 0,00     |
| <i>Staphylococcus aureus</i> (souche non référencée) | Gram positif | 11 ± 2,82                             | 10 ± 0,00     |
| <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922)                 | Gram négatif | 9,5 ± 0,70                            | 16 ± 0,00     |
| <i>Enterococcus faecalis</i> (ATCC 29212)            | Gram positif | 11 ± 0,70                             | 10 ± 1,00     |
| <i>Salmonella</i> sp. (souche non référencée)        | Gram négatif | EBP                                   | EBP           |
| <i>Staphylococcus aureus</i> (SARM) (ATCC 43300)     | Gram positif | 6 ± 0,00                              | EBP           |
| <i>Klebsiella oxytoca</i> (souche non référencée)    | Gram négatif | 11 ± 1,41                             | 14 ± 1,51     |
| <i>Klebsiella pneumoniae</i> (souche non référencée) | Gram négatif | EBP                                   | EBP           |
| <i>Bacillus cereus</i> (souche non référencée)       | Gram positif | EBP                                   | EBP           |
| <i>Bacillus subtilis</i> (ATCC 6633)                 | Gram positif | PSD                                   | PSD           |
| <i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538)             | Gram positif | 7 ± 0,00                              | 11 ± 0,00     |
| <i>Acinetobacter baumannii</i> (ATCC 610)            | Gram négatif | EBP                                   | EBP           |

EBP = effet bactériostatique probable ; apparition de larges zones externes denses (maximum de 29 mm) avec des zones internes généralement plus claires.

PSD = poussée sur disques de papier Whatman.

Selon **Moreira et al. (2005)**, les mesures des halos d'inhibition (diamètre du disque inclus) nous ont permis de classer les microorganismes suivant leur degré de sensibilité aux différents extraits comme suit :

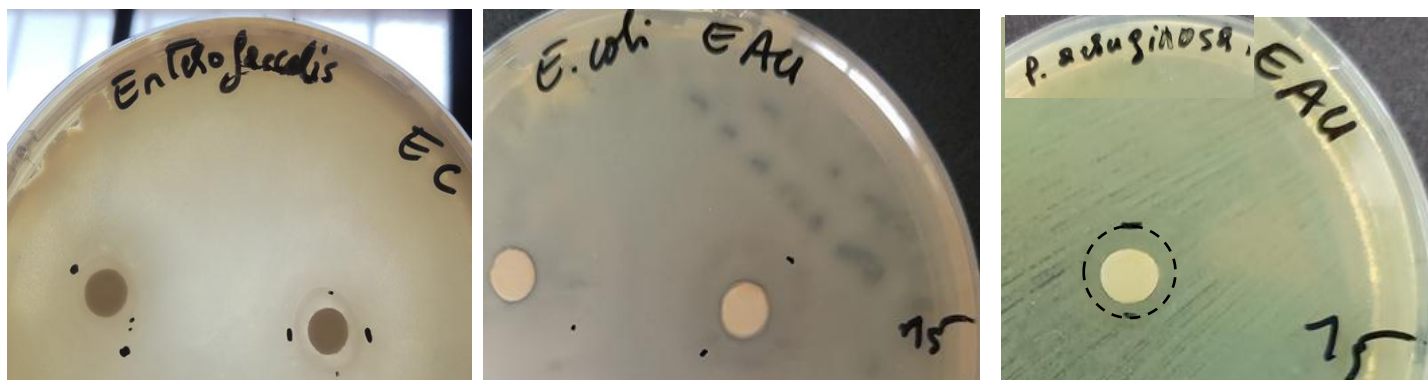
- $\emptyset < 8$  mm : bactérie non sensible ;
- $9 < \emptyset < 14$  mm : bactérie sensible ;
- $15 < \emptyset < 19$  mm : bactérie très sensible ;
- $\emptyset > 20$  mm : bactérie extrêmement sensible

Selon nos résultats, il n'y a pas une grande différence des diamètres des zones d'inhibition pour l'extraction EC par rapport aux souches à Gram+ et Gram-, telles que *Staphylococcus aureus* et *Klebsiella oxytoca*, avec un diamètre de 11 mm. En revanche, dans l'extraction E.A.U, les meilleurs résultats sont observés pour les souches à Gram négatif, comme *Escherichia coli* (16 mm) et *Klebsiella oxytoca* (14 mm). Nos résultats sont globalement en accord avec ceux de (**Aruwa et al., 2019; Iftikhar et al., 2023a**) en ce qui concerne l'effet antibactérien positif pour les deux types de souches, mais avec une meilleure efficacité pour les souches à Gram négatif ce qui est en accord avec **Bukhari et al. (2017)**. Aussi, nous remarquons que l'extrait E.A.U a amélioré les diamètres de zones d'inhibition pour *S.aureus* alimentaire, *K.oxytoca* et *E. coli*. Ce résultat est en accord avec celui de (**Touati et al., 2021**), où la méthode d'extraction assistée aux microondes a améliorés les effets antibactériens d'extrait de feuilles de la verveine citronnée. Les méthodes innovantes améliorent les rendements en composés phénoliques totaux et c'est le cas de nos résultats également.

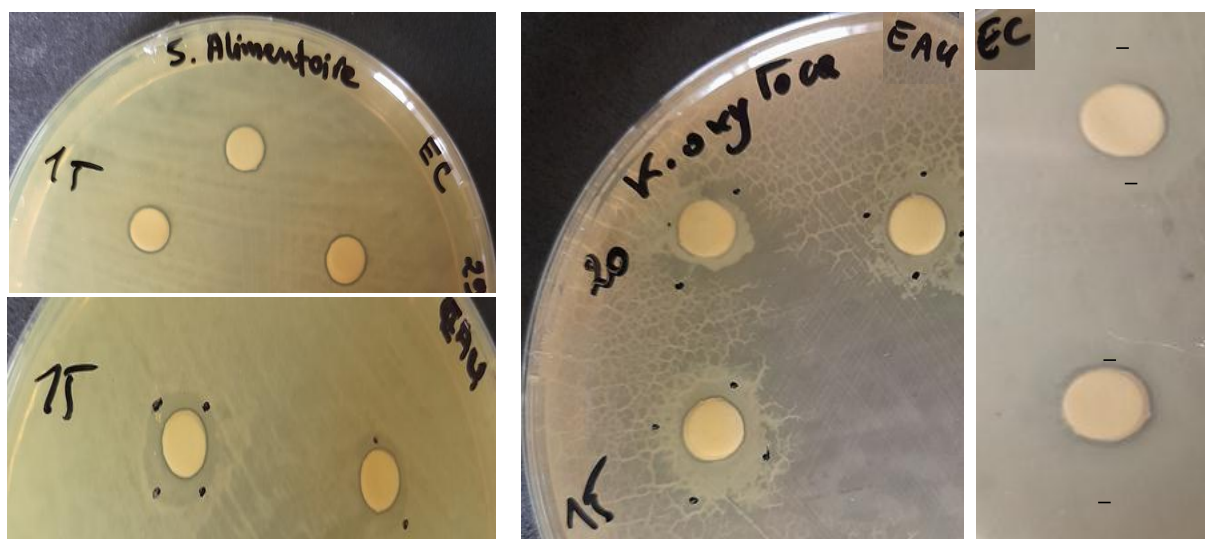
D'après nos résultats, l'effet de la méthode d'extraction n'est pas observé pour d'autres bactéries bien que l'extrait E.A.U soit plus riche en CPT, ceci pourrait être expliqué par la richesse de l'extrait EC en flavonoïdes totaux comme observé lors du dosage des FT.

L'influence des polyphénols purs et de l'extrait de plante, ainsi que la force de cet impact sur les bactéries, diffère en fonction du type de composés phénoliques et de la souche bactérienne. Parmi les mécanismes les plus importants de l'action antibactérienne des polyphénols on trouve : des interactions avec les protéines, des inhibitions de la synthèse de l'ADN bactérien et des interactions avec les acides nucléiques, des interactions avec la paroi cellulaire bactérienne ou inhibition de la formation de la paroi cellulaire, des altérations de la fonction de la membrane cytoplasmique, des inhibitions du métabolisme énergétique, et des privations de substrats (**Makarewicz et al., 2021**).

Quelques effets antibactériens sont montrés ci-dessous ainsi que les différences entre extraits EC et E.A.U de la RAC.



**Figure 12.** Zones d'inhibition observées suite aux tests antibactériens de l'extrait EC sur la souche *E. faecalis* et l'extrait E.A.U sur les souches *E. coli* et *P. aeruginosa*.



**Figure 13.** Effet de l'extrait E.A.U sur les zones d'inhibition des souches : *S. aureus* alimentaire et *K. oxytoca*

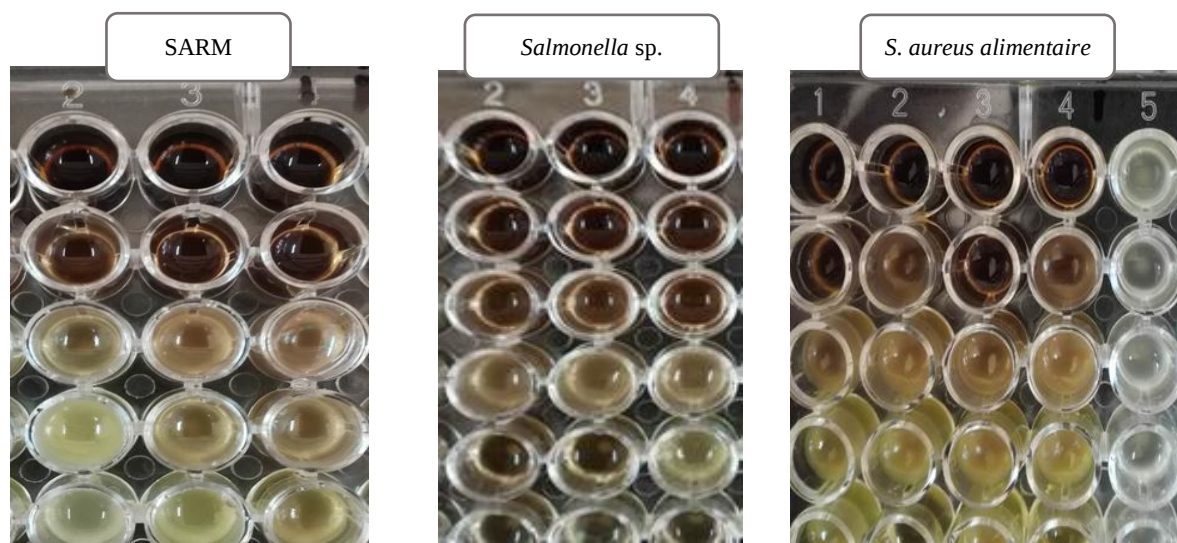
Des études récentes ont montré que le contenu phénolique est fortement influencé par des facteurs extrinsèques, tels que la géographie, le climat, les caractéristiques génétiques, le stade de maturation et la période de stockage (Cheurfa and Allem, 2016). D'après R'bia *et al.* (2017), les extraits d'huile d'*Opuntia* ont un effet inhibiteur sur la croissance des micro-organismes, en fonction de la sensibilité des souches et de la nature de la fraction. En réalité, la fraction glycéridique ne présente aucune activité antimicrobienne et n'inhibe pas la croissance des bactéries. Par conséquent, l'extrait non glycéridique contient certains composés intéressants et bioactifs, car ils sont capables d'inhiber certaines souches résistantes, notamment la bactérie à Gram négatif comme *E. coli*. Ces actions antibactériennes de la fraction non glycéridique peuvent

être attribuées à la présence de composants aliphatiques (alcools aliphatiques, hydrocarbures) et de composants terpéniques (caroténoïdes, stérols, tocophérols, alcools terpéniques, squalène et saponines) (Gharby *et al.*, 2011).

### III.5.2 Concentration minimale inhibitrice (CMI) :

Seul l'extrait EAU de la RAC a été testé contre *E. coli* et *K. oxytoca* vu les résultats des zones d'inhibition obtenus sur gélose Mueller Hinton, pour le reste des bactéries c'est l'extrait EC de la RAC qui a été utilisé.

En se basant sur les observations à l'œil nu des puits obtenus (**Figure 15**) et le pourcentage de taux d'inhibition, nous avons pu déterminer les CMI des bactéries testées. Ces CMI correspondent à un taux d'inhibition de 100% calculé à partir des résultats des tests antibactériens sur microplaques (**Tableau XI**).



**Figure 14.** Tests antibactériens sur microplaques pour les souches : SARM, *Salmonella* sp. et *S. aureus* (ATCC 6538)

Les concentrations minimales inhibitrices (CMI) pour les extraits d'*Opuntia* varient de 37,5 à 150 mg/mL (**Tableau XI**).

**Tableau XI.** Concentrations minimales inhibitrices (CMI)

| Bactérie testées                                                 | CMI (mg/mL)  |
|------------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Escherichia coli</i>                                          | > 75 mg/mL   |
| <i>Enterococcus faecalis</i>                                     | 100 mg/mL    |
| <i>Klebsiella oxytoca</i>                                        | > 75 mg/mL   |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i>                                    | 75 mg/mL     |
| <i>Salmonella sp</i>                                             | > 37,5 mg/mL |
| <i>Staphylococcus aureus</i> alimentaire                         | 75 mg/mL     |
| <i>Staphylococcus aureus</i> résistant a la<br>mécicilline(SARM) | 75 mg/mL     |

La souche *Salmonella sp.* présente la CMI la plus basse, supérieure à 37,5 mg/mL, tandis que les souches de *Staphylococcus aureus* résistantes à la méthicilline (SARM), *Pseudomonas aeruginosa* et *Staphylococcus aureus* (d'origine alimentaire) ont une CMI fixée à 75 mg/mL, ce qui indique qu'il n'y a pas une grande différence entre les bactéries à Gram positives et négatives. En revanche, les souches résistantes d'*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* et *Klebsiella oxytoca* présentent des CMI plus élevées par rapport aux bactéries mentionnées précédemment.

Les variations dans les rapports de CMI peuvent être attribuées à de légères différences dans les techniques utilisées, telles que la durée (Moosazadeh *et al.*, 2014).

Les composés polyhydroxylés, les acides phénoliques, les dérivés de flavonoïdes et d'autres composés non identifiés pourraient être responsables de l'activité antimicrobienne à large spectre (Aruwa *et al.*, 2019).

### III.6 Analyse Infrarouge des extraits RAC :

Les spectres FTIR (de 500 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ ) des extraits liquides de la RAC (EC et E.A.U) sont présentés dans la **Figure 15**. Ils servent à déterminer les groupements fonctionnels des extraits.

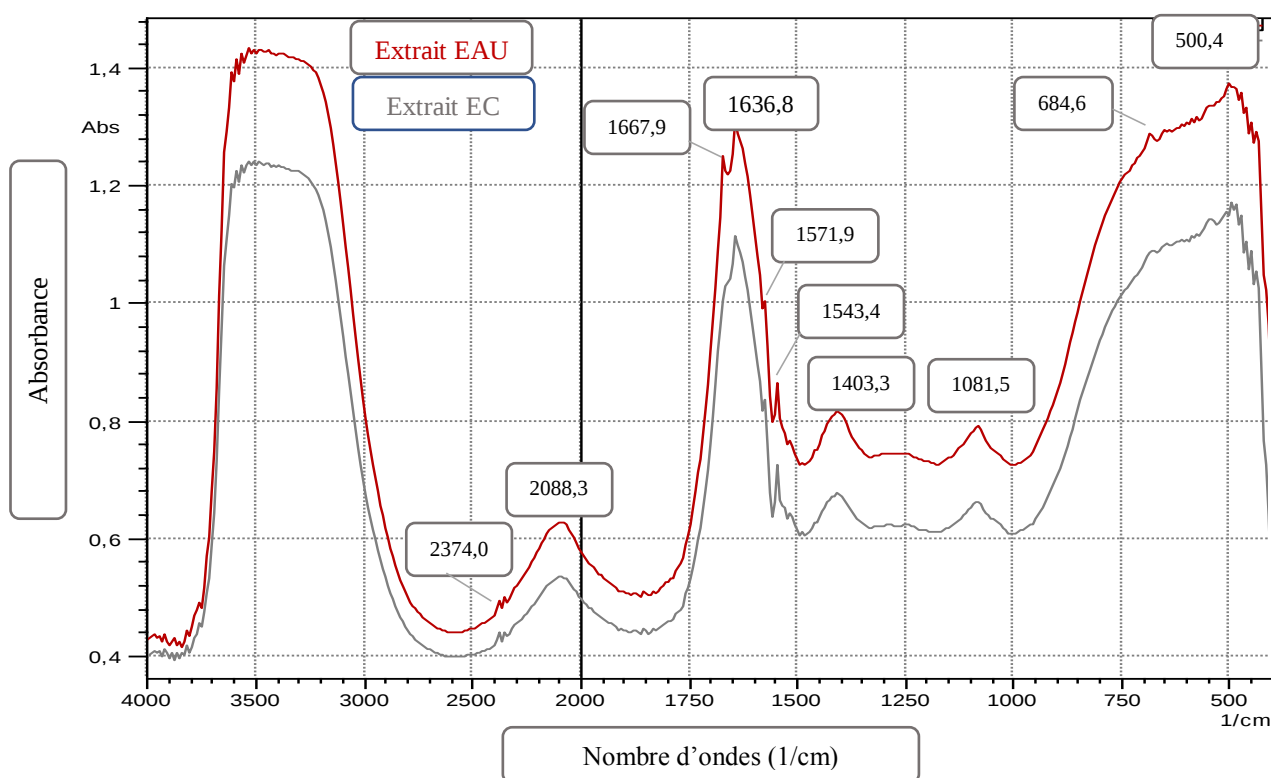
Les spectres FTIR illustrés en **Figure 15** montrent des bandes larges et fortes dans l'intervalle de 3800-3000  $\text{cm}^{-1}$  qui est due à la présence des groupes OH caractéristiques des polyphénols et des carbohydrates.

La bande d'absorption autour de 1571 et 1636  $\text{cm}^{-1}$  peut être due à la vibration d'élongation de la liaison C=C des acides aromatiques. Le pic à environ 1667  $\text{cm}^{-1}$  serait dû à l'étirement asymétrique de la double liaison carboxylique COO- des groupes fonctionnels carboxylates déprotonés (Farinella *et al.*, 2007) . Le pic près de 1403  $\text{cm}^{-1}$  pourrait être celui de l'étirement phénolique -OH (Barka *et al.*, 2013), ou bien cela pourrait refléter une déformation dans le plan de la liaison N-H appartenant à la classe des amines secondaires.

La bande près de  $1080\text{ cm}^{-1}$  pourrait être due à la vibration de  $\text{-C-O-C}$  et du OH des polysaccharides (Ibarra and Moliner, 1991).

Les deux pics de  $684$  à  $500\text{ cm}^{-1}$  peuvent designer la présence de composés halogènes particulièrement, la classe Bromée.

Il est clair que l'extrait E.A.U de la RAC présente des bandes d'adsorption intenses et plus larges en comparaison avec l'extrait EC, ceci pourrait s'expliquer par la richesses des composés contenus dans cet extrait et expliquerait l'effet positif observé de la méthode d'extraction sur les tests antibactériens pour quelques souches bactériennes testées.



**Figure 15.** Spectres infrarouges des extraits liquides (EC et E.A.U) des cladodes d'*Opuntia ficus indica*



## **Conclusion**

De nombreuses plantes sont connues pour leur énorme potentiel métabolique de substances dites secondaires. Ces substances sont synthétisées dans différentes parties de la plante (racines, tiges, feuilles, etc.). Cependant, leur métabolisme produit des milliers de composants différents, dont seuls quelques-uns produisent des effets thérapeutiques.

Le but de cette étude est d'évaluer la teneur en composés phénoliques totaux et en flavonoïdes, les activités antioxydantes et antibactériennes *in vitro* d'extraits éthanoliques de raquettes d'*Opuntia ficus-indica* en utilisant deux méthodes d'extraction (méthode d'extraction conventionnelle et assistée par ultrasons en tant que méthode innovante).

La détermination du taux d'extraction a montré que la teneur en composés phénoliques totaux des raquettes avec cuticule, lors de l'extraction par ultrasons (E.A.U), était légèrement meilleure que celle de l'extraction conventionnelle (EC), avec des valeurs moyennes de  $14,14 \pm 0,35$  mg EAG/g MS pour la raquette avec cuticule et de  $13,93 \pm 0,36$  mg EAG/g MS pour la raquette sans cuticule, respectivement. De même, les valeurs moyennes étaient de  $12,81 \pm 0,16$  mg EAG/g MS pour la raquette avec cuticule et de  $12,59 \pm 0,23$  mg EAG/g MS pour la raquette sans cuticule lors de l'extraction par ultrasons et l'extraction conventionnelle, respectivement.

La teneur en flavonoïdes varie en fonction du type de raquette et de la méthode d'extraction. Les résultats de la raquette avec cuticule ( $34,52 \pm 1,62$  mg EQ/g MS en EC et  $30,80 \pm 1,19$  mg EQ/g MS en E.A.U) sont meilleurs que ceux de la raquette sans cuticule ( $23,86 \pm 1,19$  mg EQ/g MS en E.A.U et  $19,35 \pm 0,27$  mg EQ/g MS en EC).

L'activité antioxydante a été évaluée à l'aide de la méthode du pouvoir antiradicalaire de l'ABTS. Les résultats ont révélé une corrélation positive entre les composés phénoliques totaux (CPT) et les activités antioxydantes pour les deux types de raquettes quel que soit la méthode d'extraction.

L'activité antimicrobienne a été évaluée sur douze souches pathogènes en utilisant la méthode de diffusion sur disque et en calculant la concentration minimale inhibitrice (CMI) sur microplaques. Les résultats obtenus révèlent que les deux extraits hydro-éthanoliques de la raquette avec cuticule de figuier de Barbarie présentent une moyenne activité antimicrobienne contre plusieurs souches testées, qu'elles soient à Gram positif ou négatif. L'extrait E.A.U améliore les diamètres des zones d'inhibition pour quelques souches. L'analyse infrarouge révèle un spectre plus large pour l'extrait E.A.U ce qui montre sa richesse en divers CPT. Ces résultats suggèrent que les cladodes d'*Opuntia ficus-indica* possèdent des propriétés antibactériennes.

Au vu des résultats obtenus au cours de cette étude, des perspectives à venir s'imposent :

- Réaliser des extractions en utilisant des solvants apolaires seules ou en association (méthanol, Acétone...etc.) afin d'améliorer les effets antibactériens et déterminer la CMB et la CMI par la suite d'une façon plus précise.
- Optimiser la méthode d'extraction innovante en améliorant les conditions d'extraction (Températures, temps...) sur l'extraction assistée par ultrasons ou bien réaliser également des extractions assistées par Micro-Ondes tout en optimisant les paramètres d'extraction afin d'améliorer les rendements d'extractions.
- Éventuellement comparer ces résultats de raquette avec des extraits de fruits ou de la fleur du figuier de Barbarie.
- Potentiellement tester les effets antibactériens de la RSC et les comparer aux résultats obtenus de la RAC.
- Purifier et identifier les extraits obtenus suite aux extractions réalisées.

# *Références Bibliographiques*

- ABBAS, E. Y., EZZAT, M. I., RAMADAN, N. M., ELADL, A., HAMED, W. H., ABDEL-AZIZ, M. M., TEAIMA, M., EL HEFNAWY, H. M. & ABDEL-SATTAR, E. 2023. Characterization and anti-aging effects of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller extracts in ad-galactose-induced skin aging model. *Food & Function*, 14, 3107-3125.
- ABIRAMI, A., NAGARANI, G. & SIDDHURAJU, P. 2014. Measurement of functional properties and health promoting aspects-glucose retardation index of peel, pulp and peel fiber from *Citrus hystrix* and *Citrus maxima*. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 4, 16-26.
- ADJEROUD, N., DAHMOUNE, F., MERZOUK, B., LECLERC, J.-P. & MADANI, K. 2015. Improvement of electrocoagulation–electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice. *Separation and Purification Technology*, 144, 168-176.
- ADJEROUD, N., ELABBAS, S., MERZOUK, B., HAMMOUI, Y., FELKAI-HADDACHE, L., REMINI, H., LECLERC, J.-P. & MADANI, K. 2018. Effect of *Opuntia ficus indica* mucilage on copper removal from water by electrocoagulation-electroflotation technique. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 811, 26-36.
- AGHOLOR, A. I. 2016. Overview of Cactus (*Opuntia Ficus-Indica* (L)): a myriad of alternatives. *EthnoMed*.
- ALI, B., ABDERRAHIM, Z., HASSANE, M., MARIANNE, S., MARIE-LAURE, F., ABDELKHALEQ, L., MOHAMMED, A. & MOHAMED, B. 2022. Chemical Composition of Cactus Pear Seed Oil: phenolics identification and antioxidant activity. *J Pharmacopuncture*, 25, 121-129.
- AMIOT, M.-J., RIOLLET, C. & LANDRIER, J.-F. 2009. Polyphénols et syndrome métabolique: Polyphenols and metabolic syndrome. *Médecine des maladies métaboliques*, 3, 476-482.
- ANAYA-PÉREZ, M. A. & BAUTISTA-ZANE, R. 2008. El nopal forrajero en México: del siglo XVI al siglo XX. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 5, 167-183.
- ANGULO-BEJARANO, P., MARTÍNEZ-CRUZ, O. & PAREDES-LÓPEZ, O. 2014. Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science*, 10, 196-217.
- ANTHONI, J. 2007. *Synthèse enzymatique, modélisation moléculaire et caractérisation d'oligomères de flavonoïdes*. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- AOSHIMA, H., HIRATA, S. & AYABE, S. 2007. Antioxidative and anti-hydrogen peroxide activities of various herbal teas. *Food Chemistry*, 103, 617-622.
- ARAGONA, M., LAURIANO, E., PERGOLIZZI, S. & FAGGIO, C. 2018. *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller as a source of bioactivity compounds for health and nutrition. *Natural product research*, 32, 2037-2049.
- ARBA, M. Le cactus *opuntia* une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. Actes du Symposium International AGDUMED-durabilité des systèmes de culture en zone méditerranéenne et gestion des ressources en eau et en sol, 2009. Cana Print Rabat, 14-16.
- ARUWA, C., AMOO, S. & KUDANGA, T. 2019. Extractable and macromolecular antioxidants of *Opuntia ficus-indica* cladodes: Phytochemical profiling, antioxidant and antibacterial activities. *South African Journal of Botany*, 125, 402-410.
- ASTELLO-GARCÍA, M. G., CERVANTES, I., NAIR, V., DEL SOCORRO SANTOS-DÍAZ, M., REYES-AGÜERO, A., GUÉRAUD, F., NEGRE-SALVAYRE, A., ROSSIGNOL, M., CISNEROS-ZEVALLOS, L. & DE LA ROSA, A. P. B. 2015. Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 119-130.

- AZMIR, J., ZAIDUL, I. S. M., RAHMAN, M. M., SHARIF, K., MOHAMED, A., SAHENA, F., JAHURUL, M., GHAFOR, K., NORULAINI, N. & OMAR, A.** 2013. Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of food engineering*, 117, 426-436.
- BARBA, F. J., GARCIA, C., FESSARD, A., MUNEKATA, P. E., LORENZO, J. M., ABOUDIA, A., OUADIA, A. & REMIZE, F.** 2022. *Opuntia ficus indica* edible parts: A food and nutritional security perspective. *Food Reviews International*, 38, 930-952.
- BARKA, N., OUZAOUT, K., ABDENNOURI, M. & EL MAKHFOUK, M.** 2013. Dried prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes as a low-cost and eco-friendly biosorbent for dyes removal from aqueous solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44, 52-60.
- BENATTIA, F. K.** 2017. *Analyse et Application des Extraits de pépains de Fignes de Barbarie*. 08-01-2018.
- BHIRA, O.** 2012. *Potentialités thérapeutiques d'Opuntia ficus indica au Maroc et en Tunisie*.
- BOURGOU, S., BEJI, R. S., MEDINI, F. & KSOURI, R.** 2016. Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'Euphorbia helioscopia. *Journal of New Sciences*, 28.
- BRAHMI, F., MATEOS-APARICIO, I., GARCIA-ALONSO, A., ABACI, N., SAOUDI, S., SMAIL-BENAZZOZ, L., GUEMGHAR-HADDADI, H., MADANI, K. & BOULEKBACHE-MAKHLOUF, L.** 2022. Optimization of Conventional Extraction Parameters for Recovering Phenolic Compounds from Potato (*Solanum tuberosum* L.) Peels and Their Application as an Antioxidant in Yogurt Formulation. *Antioxidants*, 11, 1401.
- BUKHARI, S., NAWAZ, H., TARIQ, S. & MUNEER, A.** 2017. In vitro antimicrobial activity of Aloe vera gel on selected urinary pathogens. *Biomedica*, 33, 39-42.
- BUTTICE, A. L., STROOT, J. M., LIM, D. V., STROOT, P. G. & ALCANTAR, N. A.** 2010. Removal of sediment and bacteria from water using green chemistry. *Environmental Science & Technology*, 44, 3514-3519.
- CAI, Y., LUO, Q., SUN, M. & CORKE, H.** 2004. Antioxidant activity and phenolic compounds of 112 traditional Chinese medicinal plants associated with anticancer. *Life sciences*, 74, 2157-2184.
- CAI, Z., QU, Z., LAN, Y., ZHAO, S., MA, X., WAN, Q., JING, P. & LI, P.** 2016. Conventional, ultrasound-assisted, and accelerated-solvent extractions of anthocyanins from purple sweet potatoes. *Food Chemistry*, 197, 266-272.
- CARPENA, M., CASSANI, L., GOMEZ-ZAVAGLIA, A., GARCIA-PEREZ, P., SEYYEDI-MANSOUR, S., CAO, H., SIMAL-GANDARA, J. & PRIETO, M. A.** 2023. Application of fermentation for the valorization of residues from *Cactaceae* family. *Food Chem*, 410, 135369.
- CHEMAT, F., ROMBAUT, N., SICAIRE, A.-G., MEULLEMIESTRE, A., FABIANO-TIXIER, A.-S. & ABERT-VIAN, M.** 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 34, 540-560.
- CHEN, L.-Y., CHENG, C.-W. & LIANG, J.-Y.** 2015. Effect of esterification condensation on the Folin-Ciocalteu method for the quantitative measurement of total phenols. *Food Chemistry*, 170, 10-15.
- CHEURFA, M. & ALLEM, R.** 2016. Évaluation de l'activité anti-oxydante de différents extraits des feuilles d'Aloysia triphylla (L'Hérit.) d'Algérie in vitro. *Phytothérapie*, 14, 181-187.
- COSTANZO, M., DE GIGLIO, M. A. & ROVIELLO, G. N.** 2020. SARS-CoV-2: recent reports on antiviral therapies based on lopinavir/ritonavir, darunavir/umifenovir, hydroxychloroquine, remdesivir, favipiravir and other drugs for the treatment of the new coronavirus. *Current medicinal chemistry*, 27, 4536-4541.

- CRUZ-HERNÁNDEZ, A. & PAREDES-LÓPEZ, O.** 2010. Enhancement of economical value of nopal and its fruits through biotechnology. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 12, 110-126.
- DAS, M., VEDASIROMONI, J., CHAUHAN, S. & GANGULY, D.** 1997. Effect of green tea (*Camellia sinensis*) extract on the rat diaphragm. *Journal of ethnopharmacology*, 57, 197-201.
- DE FARIAS, P. M., DE VASCONCELOS, L. B., FERREIRA, M. E., PASCALL, M. & TAPIA-BLÁCIDO, D. R.** 2021. Nopal cladode (*Opuntia ficus-indica*) flour: Production, characterization, and evaluation for producing bioactive film. *Food packaging and shelf life*, 29, 100703.
- DE SANTANA, R., GONCALVES, Z. S., BONOMO, R. & FRANCO, M.** 2012. Production of amyloglucosidase using cactus pear as substrate. *Revista Caatinga*, 25, 188-193.
- DIBOUNE, N., NANCIB, A., NANCIB, N., ANÍBAL, J. & BOUDRANT, J.** 2019. Utilization of prickly pear waste for baker's yeast production. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 66, 744-754.
- DJERIDANE, A., YOUSFI, M., NADJEMI, B., BOUTASSOUNA, D., STOCKER, P. & VIDAL, N.** 2006. Antioxidant activity of some Algerian medicinal plants extracts containing phenolic compounds. *Food Chemistry*, 97, 654-660.
- DOS SANTOS, T. C., DOS SANTOS REIS, N., SILVA, T. P., BONOMO, R. C. F., AGUIAR-OLIVEIRA, E., DE OLIVEIRA, J. R. & FRANCO, M.** 2018. Production, optimisation and partial characterisation of enzymes from filamentous fungi using dried forage cactus pear as substrate. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 571-579.
- EL-MOSTAFA, K., EL KHARRASSI, Y., BADREDDINE, A., ANDREOLETTI, P., VAMECQ, J., EL KEBBAJ, M. H. S., LATRUFFE, N., LIZARD, G., NASSER, B. & CHERKAOUI-MALKI, M.** 2014. Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19, 14879-14901.
- ESHUN, K. & HE, Q.** 2004. *Aloe vera*: a valuable ingredient for the food, pharmaceutical and cosmetic industries—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 44, 91-96.
- FARCAS, F. & TOUZÉ, P.** 2001. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). *Une méthode intéressante pour la caractérisation des ciments (in French)* Bull. Lab. Ponts Chaussées, 230, 77-88.
- FARINELLA, N., MATOS, G. & ARRUDA, M.** 2007. Grape bagasse as a potential biosorbent of metals in effluent treatments. *Bioresource technology*, 98, 1940-1946.
- FERNÁNDEZ, V., GUZMÁN-DELGADO, P., GRAÇA, J., SANTOS, S. & GIL, L.** 2016. Cuticle structure in relation to chemical composition: re-assessing the prevailing model. *Frontiers in plant science*, 7, 427.
- FEUGANG, J. M., KONARSKI, P., ZOU, D., STINTZING, F. C. & ZOU, C.** 2006. Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 11, 2574-2589.
- GARCÍA-PÉREZ, P., LOZANO-MILO, E., LANDIN, M. & GALLEGU, P. P.** 2020. From ethnomedicine to plant biotechnology and machine learning: the valorization of the medicinal plant *Bryophyllum* sp. *Pharmaceuticals*, 13, 444.
- GEORGÉ, S., BRAT, P., ALTER, P. & AMIOT, M. J.** 2005. Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53, 1370-1373.
- GHRBY, S., GUILLAUME, D., NOUNAH, I., HARHAR, H., HAJIB, A., MATTHÄUS, B. & CHARROUF, Z.** 2021. Shelf-life of Moroccan prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) and argan (*Argania spinosa*) oils: a comparative study. *Grasas y Aceites*, 72, e397-e397.
- GHRBY, S., HARHAR, H., KARTAH, B., EL MONFALOUTI, H., HADDAD, A. & CHARROUF, Z.** 2011. Analyse chimique et sensorielle de l'huile d'argane. *Les Technologies de laboratoire*, 6.

- GHÉDIRA, K. & GOETZ, P.** 2018. Figuier de Barbarie: *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). *Phytothérapie*, 16, 374.
- GHERIBI, R. & KHWALDIA, K.** 2019. Cactus mucilage for food packaging applications. *Coatings*, 9, 655.
- GINESTRA, G., PARKER, M. L., BENNETT, R. N., ROBERTSON, J., MANDALARI, G., NARBAD, A., LO CURTO, R. B., BISIGNANO, G., FAULDS, C. B. & WALDRON, K. W.** 2009. Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57, 10323-10330.
- GUILLAUME, D., GHARBY, S., HARHAR, H. & BABA, M.** 2015. *Opuntia ficus-indica* and *Balanites aegyptiaca* oils: two seed oils to watch. *Household and Personal Care Today*, 1, 2.
- HABIBI, Y., MAHROUZ, M. & VIGNON, M. R.** 2005. Arabinan-rich polysaccharides isolated and characterized from the endosperm of the seed of *Opuntia ficus-indica* prickly pear fruits. *Carbohydrate polymers*, 60, 319-329.
- HADJ SADOK, T.** 2010. *Composition chimique des jeunes cladodes d'opuntia ficus indica et possibilités de valorisation alimentaire*.
- HANDA, S.** 2008. An overview of extraction techniques for medicinal and aromatic plants. *Extraction technologies for medicinal and aromatic plants*, 1, 21-40.
- HERNÁNDEZ-URBIOLA, M. I., PÉREZ-TORRERO, E. & RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E.** 2011. Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus indica*) at varied ages in an organic harvest. *Int J Environ Res Public Health*, 8, 1287-1295.
- HERZI, N.** 2013. *Extraction et purification de substances naturelles: comparaison de l'extraction au CO<sub>2</sub>-supercritique et des techniques conventionnelles*.
- IBARRA, J. V. & MOLINER, R.** 1991. Coal characterization using pyrolysis-FTIR. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 20, 171-184.
- IFTIKHAR, K., SIDDIQUE, F., AMEER, K., ARSHAD, M., KHARAL, S., MOHAMED AHMED, I. A., YASMIN, Z. & AZIZ, N.** 2023a. Phytochemical profiling, antimicrobial, and antioxidant activities of hydroethanolic extracts of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit and pulp. *Food Sci Nutr*, 11, 1916-1930.
- IFTIKHAR, K., SIDDIQUE, F., AMEER, K., ARSHAD, M., KHARAL, S., MOHAMED AHMED, I. A., YASMIN, Z. & AZIZ, N.** 2023b. Phytochemical profiling, antimicrobial, and antioxidant activities of hydroethanolic extracts of prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit and pulp. *Food Science & Nutrition*, 11, 1916-1930.
- ILGHAMI, A., GHANBARZADEH, S. & HAMISHEHKAR, H.** 2015. Optimization of the ultrasonic-assisted extraction of phenolic compounds, ferric reducing activity and antioxidant activity of the *Beta vulgaris* using response surface methodology. *Pharmaceutical Sciences*, 21, 46-50.
- INGLESE, P., MONDRAGON, C., NEFZAOU, A. & SAENZ, C.** 2017. *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- JIMÉNEZ-AGUILAR, D. M., LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. M., HERNÁNDEZ-BRENES, C., GUTIÉRREZ-URIBE, J. A. & WELTI-CHANES, J.** 2015. Dietary fiber, phytochemical composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear. *Journal of Food Composition and Analysis*, 41, 66-73.
- KAUR, M., KAUR, A. & SHARMA, R.** 2012. Pharmacological actions of *Opuntia ficus indica*: A Review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2, 15-18.
- LAGNIKA, L.** 2005. Etude phytochimique et activité biologique de substances naturelles isolées de plantes béninoises. *France/Bénin: Université Louis Pasteur Starsbourg/Université d'Abomey Calavi*, 280.

- LAVELLI, V.** 2021. Circular food supply chains–Impact on value addition and safety. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 323-332.
- LE HOUÉROU, H. N.** 1996. The role of cacti (*Opuntiaspp.*) in erosion control, land reclamation, rehabilitation and agricultural development in the Mediterranean Basin. *Journal of arid environments*, 33, 135-159.
- LEFSIH, K., GIACOMAZZA, D., DAHMOUNE, F., MANGIONE, M. R., BULONE, D., SAN BIAGIO, P. L., PASSANTINO, R., COSTA, M. A., GUARRASI, V. & MADANI, K.** 2017. Pectin from *Opuntia ficus indica*: Optimization of microwave-assisted extraction and preliminary characterization. *Food Chemistry*, 221, 91-99.
- LIMA, A., SOUZA, T., TAVARES, J. & SILVA, M.** Technological potential for cosmetics applications of *Opuntia ficus-indica* Mill. X International Congress on Cactus Pear and Cochineal: Cactus the New Green Revolution in Drylands 1343, 2022. 525-530.
- LÓPEZ, R., DE ITA, A. & VACA, M.** 2009. Drying of prickly pear cactus cladodes (*Opuntia ficus indica*) in a forced convection tunnel. *Energy Conversion and Management*, 50, 2119-2126.
- LOUHAICHI, M.** 2018. Promoting cactus (*Opuntia ficus-indica*) as drought resilient feed resource filed day. *Beirut, Lebanon: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA)*.
- LOUKILI, E., BOUCHAL, B., BOUHRIM, M., ABRIGACH, F., GENVA, M., ZIDI, K., BNOUHAM, M., BELLAOUI, M., HAMMOUTI, B. & ADDI, M.** 2022. Chemical Composition, Antibacterial, Antifungal and Antidiabetic Activities of Ethanolic Extracts of *Opuntia dillenii* Fruits Collected from Morocco. *Journal of food quality*, 2022.
- MAATAOUI, B. & HILALI, S.** 2004. Composition physico-chimique de jus de deux types de fruits de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica*) cultivés au Maroc. *Biotechnology and Molecular Biology Reviews*, 3, 8-13.
- MAHDEB, A., ADJEROUD-ABDELLATIF, N., MAZARI, A., PORTILLO, L., ABDELOUHAB, K. A., MAAMER, D. A. & MADANI, K.** 2021. Identification of some *Opuntia* spp. from two Algerian regions and ultrasound-assisted extraction of their phenolic compounds. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 23, 94-120.
- MAKAREWICZ, M., DROŹDŹ, I., TARKO, T. & DUDA-CHODAK, A.** 2021. The interactions between polyphenols and microorganisms, especially gut microbiota. *Antioxidants*, 10, 188.
- MAMERI, A., SADAoui, R. & GHERRAF, N.** 2019. Quantification des composés phénoliques et activités biologiques de l'extrait méthanolique de zingiber officinale et *opuntia ficus indica*.
- MANDOURI, T.** 2000. Hydromasse et biomasse des *Opuntia*. Cactus.
- MARAN, J. P. & MANIKANDAN, S.** 2012. Response surface modeling and optimization of process parameters for aqueous extraction of pigments from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit. *Dyes and Pigments*, 95, 465-472.
- MARIN-BUSTAMANTE, M., CHANONA-PÉREZ, J., GYEMES-VERA, N., ARZATE-VÁZQUEZ, I., PEREA-FLORES, M., MENDOZA-PÉREZ, J., CALDERÓN-DOMÍNGUEZ, G. & CASAREZ-SANTIAGO, R.** 2018. Evaluation of physical, chemical, microstructural and micromechanical properties of nopal spines (*Opuntia ficus-indica*). *Industrial Crops and Products*, 123, 707-718.
- MEDINA-TORRES, N., AYORA-TALAVERA, T., ESPINOSA-ANDREWS, H., SÁNCHEZ-CONTRERAS, A. & PACHECO, N.** 2017. Ultrasound assisted extraction for the recovery of phenolic compounds from vegetable sources. *Agronomy*, 7, 47.
- MÉNDEZ, L. P., FLORES, F. T., MARTÍN, J. D., RODRÍGUEZ, E. M. R. & ROMERO, C. D.** 2015. Physicochemical characterization of cactus pads from *Opuntia dillenii* and *Opuntia ficus indica*. *Food Chemistry*, 188, 393-398.

- MONTER-ARCINIEGA, A., HERNÁNDEZ-FALCÓN, T. A., CRUZ-CANSINO, N. D. S., RAMÍREZ-MORENO, E., ALANÍS-GARCÍA, E., ARIAS-RICO, J. & ARIZA-ORTEGA, J. A.** 2019. Functional properties, total phenolic content and antioxidant activity of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) waste: comparison with commercial fibers. *Waste and Biomass Valorization*, 10, 2897-2906.
- MOOSAZADEH, E., AKHGAR, M. R. & KARIMINIK, A.** 2014. Chemical composition and antimicrobial activity of *Opuntia stricta* F. essential oil. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 4, 94-101.
- MOREIRA, M., PONCE, A., DEL VALLE, C. & ROURA, S.** 2005. Inhibitory parameters of essential oils to reduce a foodborne pathogen. *LWT-Food Science and Technology*, 38, 565-570.
- MYLO, M. D., HOPPE, A., PASTEWKA, L., SPECK, T. & SPECK, O.** 2022. Elastic property and fracture mechanics of lateral branch-branch junctions in cacti: A case study of *Opuntia ficus-indica* and *Cylindropuntia bigelovii*. *Frontiers in plant science*, 13, 950860.
- NAKAYAMA, M., AIHARA, M., CHEN, Y.-N., ARAIE, M., TOMITA-YOKOTANI, K. & IWASHINA, T.** 2011. Neuroprotective effects of flavonoids on hypoxia-, glutamate-, and oxidative stress-induced retinal ganglion cell death.
- NEFFAR, S., FRAGA-BEDDIAR, A., REDJEL, N. & BOULKHELOUA, J.** 2011. Effets de l'âge des plantations de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica* f. inermis) sur les propriétés du sol et la végétation à Tébessa (zone semi-aride de l'est algérien). *ecologia mediterranea*, 37, 5-15.
- ONG, E. S.** 2004. Extraction methods and chemical standardization of botanicals and herbal preparations. *Journal of Chromatography B*, 812, 23-33.
- OSUNA-MARTÍNEZ, U., REYES-ESPARZA, J. & RODRÍGUEZ-FRAGOSO, L.** 2014a. Cactus (*Opuntia ficus-indica*): A Review on its Antioxidants Properties and Potential Pharmacological Use in Chronic Diseases. *Opuntia ficus-indica Nat Prod Chem Res* 2: 153. doi: 10.4172/2329-6836.1000153 Page 2
- OSUNA-MARTÍNEZ, U., REYES-ESPARZA, J. & RODRÍGUEZ-FRAGOSO, L.** 2014b. Cactus (*Opuntia ficus-indica*): A Review on its Antioxidants Properties and Potential Pharmacological Use in Chronic Diseases. *Nat Prod Chem Res* 2: 153. doi: 10.4172/2329-6836.1000153 *Opuntia ficus-indica*.
- PÉREZ-CADENA, R., SOLARES, T. E., MEDINA-MORENO, S. A., MARTÍNEZ, A., LIZARDI-JIMÉNEZ, M. A. & TÉLLEZ-JURADO, A.** 2018. Production of ethanol by three yeasts in defined media and hydrolyzed cladodes of *Opuntia ficus-indica* var. Atlixco. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 8, 26-34.
- PERUCINI-AVENDAÑO, M., NICOLÁS-GARCÍA, M., JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, C., PEREA-FLORES, M. D. J., GÓMEZ-PATIÑO, M. B., ARRIETA-BÁEZ, D. & DÁVILA-ORTIZ, G.** 2021. Cladodes: Chemical and structural properties, biological activity, and polyphenols profile. *Food Science & Nutrition*, 9, 4007-4017.
- PROESTOS, C. & KOMAITIS, M.** 2006. Ultrasonically assisted extraction of phenolic compounds from aromatic plants: comparison with conventional extraction technics. *Journal of food quality*, 29, 567-582.
- PROUILLAC, C.** 2006. *Synthèse et évaluation de nouveaux composés organiques et phosphorés contre les effets des rayonnements ionisants. Etude de leur mécanisme d'action in vitro.* Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- QUENTIN-NOURY, C.** 2016. Automatisation de l'antibiogramme au laboratoire de bactériologie. *Revue Francophone des Laboratoires*, 2016, 49-59.
- R'BI, O., CHKIOUA, C., HELLAL, R., HERCHI, W. & SMITI, S. A.** 2017. Antioxidant and antibacterial activities of *Opuntia ficus indica* seed oil fractions and their bioactive compounds identification. *Turkish Journal of Biochemistry*, 42, 481-491.

- RASOULPOUR, R., AFSHARIFAR, A., IZADPANAH, K. & AMINLARI, M.** 2017. Purification and characterization of an antiviral protein from prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller) cladode. *Crop Protection*, 93, 33-42.
- RE, R., PELLEGRINI, N., PROTEGGENTE, A., PANNALA, A., YANG, M. & RICE-EVANS, C.** 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26, 1231-1237.
- REBAH, F. B. & SIDDEEG, S.** 2017. Cactus an eco-friendly material for wastewater treatment: A review. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8, 1770-1782.
- RETAMAL, N., DURÁN, J. M. & FERNÁNDEZ, J.** 1987. Seasonal variations of chemical composition in prickly pear (*Opuntia ficus indica* (L.) miller). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38, 303-311.
- REYES-AGÜERO, J. A., AGUIRRE-RIVERA, J. R. & HERNÁNDEZ, H. M.** 2005. Systematic notes and a detailed description of *Opuntia ficus-indica* (L) Mill.(*Cactaceae*). *Agrociencia*, 39, 395-408.
- REYNOUD, N., PETIT, J., BRES, C., LAHAYE, M., ROTHAN, C., MARION, D. & BAKAN, B.** 2021. The complex architecture of plant cuticles and its relation to multiple biological functions. *Frontiers in plant science*, 2907.
- REZAIRE, A.** 2012. *Activité anti-oxydante, et caractérisation phénolique du fruit de palmier amazonien Oenocarpus bataua (patawa)*. Antilles-Guyane.
- ROCCHETTI, G., PELLIZZONI, M., MONTESANO, D. & LUCINI, L.** 2018. Italian *Opuntia ficus-indica* cladodes as rich source of bioactive compounds with health-promoting properties. *Foods*, 7, 24.
- RODRÍGUEZ-PÉREZ, C., QUIRANTES-PINÉ, R., FERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, A. & SEGURA-CARRETERO, A.** 2015. Optimization of extraction method to obtain a phenolic compounds-rich extract from *Moringa oleifera* Lam leaves. *Industrial Crops and Products*, 66, 246-254.
- RODRÍGUEZ DE LUNA, S. L., RAMÍREZ-GARZA, R. & SERNA SALDÍVAR, S. O.** 2020. Environmentally friendly methods for flavonoid extraction from plant material: Impact of their operating conditions on yield and antioxidant properties. *The Scientific World Journal*, 2020.
- RUIZ, A. M., ALMAZÁN, L.-E. C., HERNÁNDEZ, H. H. & HERNÁNDEZ, J. M.** 2018. *Opuntia ficus-indica* (Nopal Extract) as Green Inhibitor for Corrosion Protection in Industrial Steels. *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. IntechOpen.
- SADOK, H. T., AID, F., DOUMANDJI, A. & BELLAL, M.** 2014. Effet du jus de cladodes d'*Opuntia ficus indica* sur la fermentation du lait et la croissance des bactéries lactiques et probiotiques. *Nature & Technology*, 17.
- Sherbrooke, 2012.** Mise en place d'un procédé d'extraction et de pré-purification de molécules bioactives à partir d'une culture énergétique« *Salix miyabeana* SX67». Sherbrooke (Québec) Canada.
- SÁENZ HERNÁNDEZ, C. L., BERGER, H., RODRÍGUEZ-FÉLIX, A., GALLETTI, L., CORRALES GARCÍA, J., SEPÚLVEDA, E., VARNERO MORENO, M. T., GARCÍA DE CORTÁZAR, V., CUEVAS GARCÍA, R. & ARIAS, E.** 2013. Agro-industrial utilization of cactus pear.
- SCHWEIZER, M.** 1999. *Docteur Nopal: médecin du bon Dieu*, APB, Aloe plantes et beauté.
- SILVA, M. A., ALBUQUERQUE, T. G., PEREIRA, P., RAMALHO, R., VICENTE, F., OLIVEIRA, M. B. P. & COSTA, H. S.** 2021. *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26, 951.
- SINICROPI, M. S., BALDINO, N., CERAMELLA, J., IACOPETTA, D., SCALI, E., BASILE, G., SATURNINO, C. & CATALANO, A.** 2022. *Opuntia ficus indica* (L.) Mill.

An Ancient Plant Source of Nutraceuticals. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 22, 1736-1749.

- SKARUPOVA, D., VOSTALOVA, J. & SVOBODOVA, A. R.** 2020. Ultraviolet A protective potential of plant extracts and phytochemicals. *Biomedical Papers of the Medical Faculty of Palacky University in Olomouc*, 164.
- SOCHOR, J., RYVOLOVA, M., KRYSTOFOVA, O., SALAS, P., HUBALEK, J., ADAM, V., TRNKOVA, L., HAVEL, L., BEKLOVA, M. & ZEHNALÉK, J.** 2010. Fully automated spectrometric protocols for determination of antioxidant activity: Advantages and disadvantages. *Molecules*, 15, 8618-8640.
- TENG, H., LEE, W. Y. & CHOI, Y. H.** 2014. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polyphenols, anthocyanins, and antioxidants from raspberry (*Rubus coreanus* Miq.) using response surface methodology. *Food analytical methods*, 7, 1536-1545.
- TIHO, T., YAO, N., BROU, Y. C. & ADIMA, A. A.** 2017. Drying temperature effect on total phenols and flavonoids content, and antioxidant activity of *Borassus aethiopum* Mart ripe fruits' pulp. *Journal of Food Research*, 6, 50-64.
- TOUATI, Z., GUEMGHAR, M., BEDJAOU, K., DJERRADA, N. E., DJAOUD, K., ADJEROUD, N., MADANI, K. & BOULEKBACHE-MAKHLOUF, L. E.** 2021. Optimization of the microwave assisted extraction and biological activities of polyphenols from lemon verbena leaves. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI-Food Technology*, 45, 157-177.
- VALENTE, L. M., DA PAIXÃO, D., DO NASCIMENTO, A. C., DOS SANTOS, P. F., SCHEINVAR, L. A., MOURA, M. R., TINOCO, L. W., GOMES, L. N. F. & DA SILVA, J. F.** 2010. Antiradical activity, nutritional potential and flavonoids of the cladodes of *Opuntia monacantha* (Cactaceae). *Food Chemistry*, 123, 1127-1131.
- VÁZQUEZ, M. B., COMINI, L. R., MARTINI, R. E., MONTOYA, S. N., BOTTINI, S. & CABRERA, J. L.** 2014. Comparisons between conventional, ultrasound-assisted and microwave-assisted methods for extraction of anthraquinones from *Heterophyllaea pustulata* Hook f.(*Rubiaceae*). *Ultrasonics sonochemistry*, 21, 478-484.
- VICIDOMINI, C., ROVIELLO, V. & ROVIELLO, G. N.** 2021. In silico investigation on the interaction of chiral phytochemicals from *opuntia ficus-indica* with SARS-CoV-2 Mpro. *Symmetry*, 13, 1041.
- VURAL, N., ALGAN CAVULDAK, Ö. & ANLI, R.** 2018. Multi response optimisation of polyphenol extraction conditions from grape seeds by using ultrasound assisted extraction (UAE). *Separation Science and Technology*, 53, 1540-1551.
- WANG, L. & WELLER, C. L.** 2006. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 300-312.
- ZUJKO, M., WITKOWSKA, A. & KIERNÓZEK, B.** 2005. Antioxidant activities of herbal infusions. *Brom. Chem. Toksykol*, 37, 189-191.

# ***Annexes***

## Annexes

### Annexe 01 : Appareils utilisés

| Appareils                       | Marques                               |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Balance analytique              | RADWG, Algérie                        |
| Etuve                           | MMM Medcenter Ecocell                 |
| Bain Marie                      | Memmert                               |
| Bain à Ultrasons                | BRASONIC-UI Trasonic cleaner, Mexique |
| Centrifugeuse                   | Benchtop low speed                    |
| Plaque agitatrice               | VELP SCIENTIFICA (ITALY)              |
| Réfrigérateur                   | ENIEM                                 |
| Spectrophotomètre<br>UV-Visible | RAYLEIGH, chine                       |
| IRaffinity                      | SHIMADZU CORPORATIONS                 |

### Annexe 02 : logiciels utilisés

- Endnote (logiciel de gestion des références bibliographiques)
- IRsolution (logiciel d'analyse FTIR)
- JMP

### Annexe 03 : Produits et réactifs chimiques

- Ethanol Absolu
- Folin-Ciocalteau
- Acide gallique  $C_7H_6O_5$
- Chlorure de Sodium Na Cl
- Eau distillée
- ABTS l'acide 2,2'-azino -bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulphonique)
- Trolox

### Annexe 04 : Matériels utilisés

| Verrerie :     | Autres  |
|----------------|---------|
| Béchers        | Couteau |
| Tubes à essais | Pince   |
| Flacons        | Spatule |

|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| Erlenmeyers               | Micropipette    |
| Cristallisoir             | Gants           |
| Eprouvette de 25 mL et 1L | Embouts bleus   |
| Boites Pétri              | Embouts jaunes  |
|                           | Pissette        |
|                           | Papier Whatman  |
|                           | Pied à coulisse |

## Annexe 05 : Composition des milieux de cultures et solutions utilisées

- Milieu Mueller Hinton Agar (MH)

Infusion de viande bovine (2g)

Hydrolysate acide de caséine (17,0g)

Amidon soluble (1,5g)

Agar (17g)

pH = 7,4±0,2 à 25°C

- Mueller Hinton Bouillon (même composition que le Mueller Hinton mais sans Agar).
- Bouillon nutritif (BN)

Peptone de Gélatine (5,0 g)

Extrait de betterave (3,0g)

pH = 6,8±0.2 à 25°C

- Gélose Nutritive (GN)

Extrait de viande (1,0g)

Extrait de viande (2,5g)

Peptone (5,0g)

Chlorure de sodium (5,0g)

Agar (15,0g)

pH = 7,0

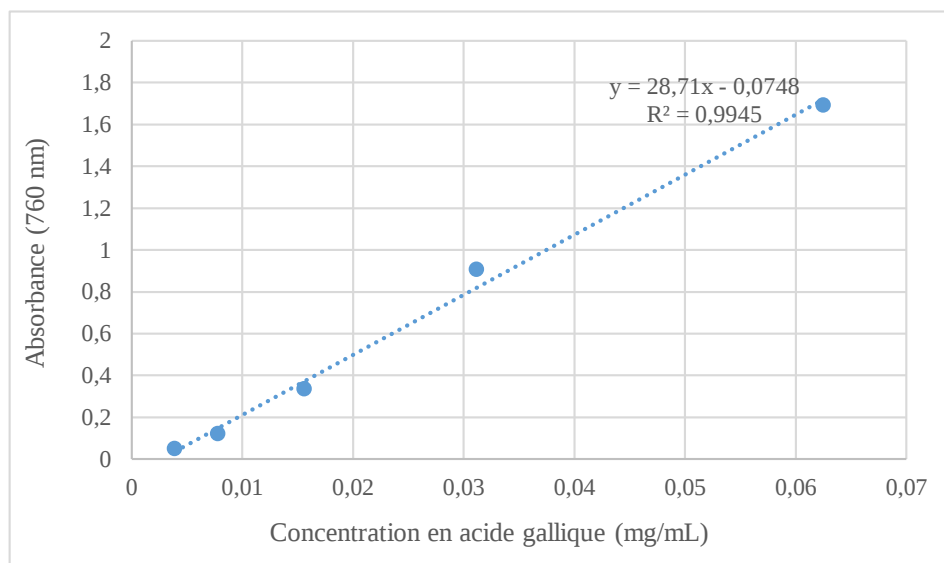
- Eau physiologique stérile

Chlorure de sodium (Na CL) (9g)

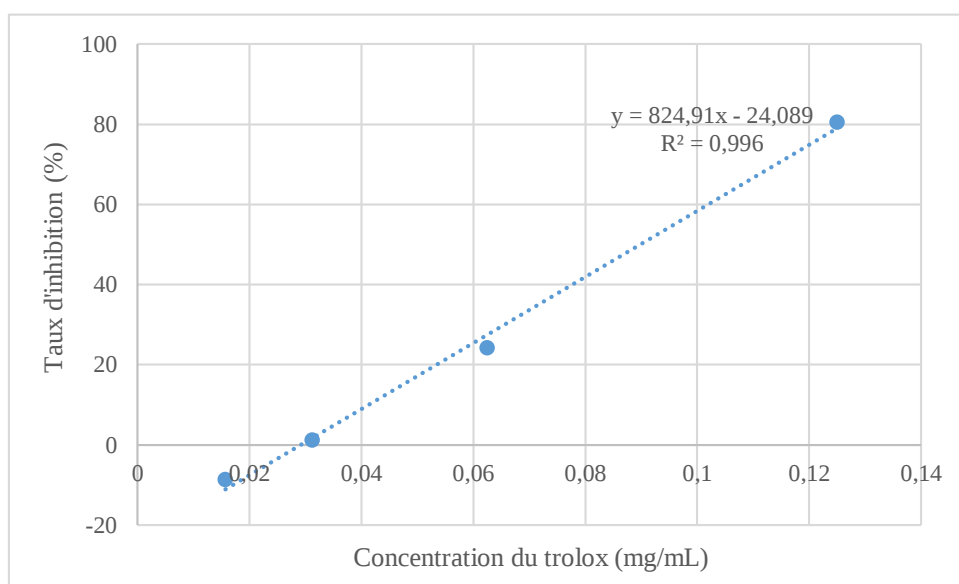
Eau distillée (100ml)

## Annexe 06 : Courbes d'étalonnages

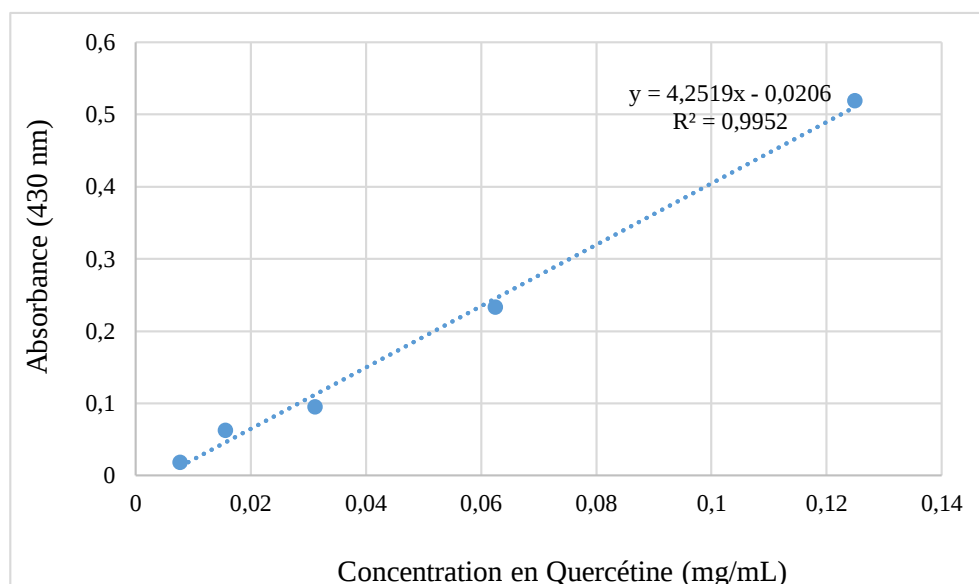
### 6. a Courbe d'étalonnage de l'acide gallique



### 6. b Courbe d'étalonnage de Trolox



### 6 .c Courbe d'étalonnage de la quercétine.



### Annexe 07 : Antibiogramme et infections causées par les souches utilisées :

Ces seuils de sensibilité sont basés sur les recommandations du Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI).

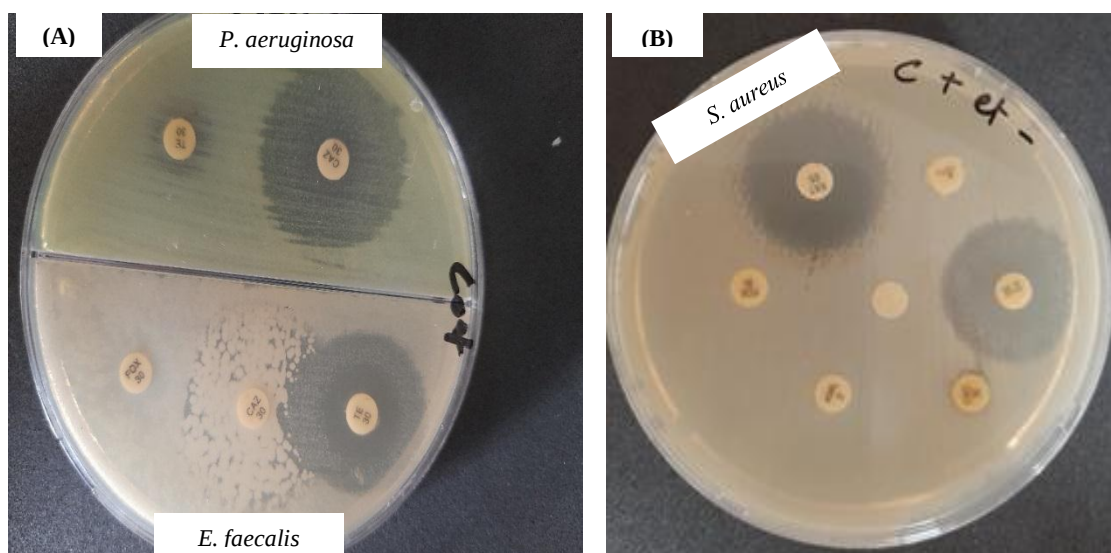
| Souches bactériennes                      | Gram         | Infections                                                                                                                                                                                                                           | Antibiogramme                                          |                                                  |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                                           |              |                                                                                                                                                                                                                                      | Diamètre zone                                          | Résistance                                       |
| <i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922)      | Gram négatif | Infections entérocoques.<br>Infections urinaires.                                                                                                                                                                                    | TE = 12mm<br>CRO = 5,5<br>SXT = 25,5 mm<br>CAZ = 27 mm | Résistante<br>Résistante<br>Sensible<br>Sensible |
| <i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 6633) | Gram négatif | Infections communautaires :<br>oculaires (lentilles++), ORL,<br>cutanées.<br><br>Entérites et suppurations diverses :<br>abcès infections associées aux soins<br>pneumopathies, infections urinaires,<br>infections post-opératoires | TE =17,17 mm<br>CAZ = 27 mm<br>SXT = 28 mm             | Sensible<br>Sensible<br>Sensible                 |
| <i>Salmonella</i> sp.                     | Gram négatif | La fièvre typhoïde<br>Les toxi-infections<br>Alimentaires                                                                                                                                                                            | TE = 21, 6 mm<br>SXT = 24,33 mm                        | Sensible<br>Sensible<br>Sensible                 |

|                                                                           |              |                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                         |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                                                           |              |                                                                                                                                                                                                                                             | CAZ = 28 mm                                                             |                                                              |
| <i>Klebsiella pneumoniae</i>                                              | Gram négatif | Infections nosocomiales et communautaires : broncho-pulmonaires et urinaires. Méningites purulentes et sepsis...                                                                                                                            | TE = 24 mm<br>SXT = 29 mm                                               | Sensible<br>Sensible                                         |
| <i>Klebsiella oxytoca</i>                                                 | Gram négatif | Infections nosocomiales et communautaires : broncho-pulmonaires et urinaires. Méningites purulentes et sepsis...                                                                                                                            | TE = 34 mm<br>AML = 26 mm<br>SXT = 12 mm<br>FOX = 20 mm                 | Sensible<br>Sensible<br>Intermédiaire<br>Résistante          |
| <i>Acinetobacter baumannii</i> (ATCC 610)                                 | Gram négatif | Infections nosocomiales                                                                                                                                                                                                                     | TE = 11, 5 mm                                                           | Résistante                                                   |
| <i>Enterococcus faecalis</i> (ATCC 29212)                                 | Gram positif | Infections urinaires Infections abdominales pelviennes                                                                                                                                                                                      | TE = 19,5 mm<br>SXT = 28 mm<br>DA = 20 mm<br>FOX = 10 mm<br>CAZ = 30 mm | Sensible<br>Sensible<br>Résistante<br>Résistante<br>Sensible |
| <i>Staphylococcus aureus</i>                                              | Gram positif | Infections suppuratives superficielles ou profondes (peau, tissu mou, muscle, os, tractus respiratoire, valves cardiaque, tractus urinaire, infection sur matériel étranger).<br>Toxi infection dues à la synthèse de différentes toxines). | TE = 21 mm<br>SXT = 25 mm<br>CAZ = 27 mm                                | Sensible<br>Sensible<br>Sensible                             |
| <i>Staphylococcus aureus</i> résistant à la Meticilline (SARM ATCC 43300) | Gram positif | Infections sanguines, infections des tissus profonds (osseuses et articulaires).                                                                                                                                                            | TE = 22,5 mm<br>AML = 19 mm<br>SXT = 20 mm                              | Sensible<br>Intermédiaire<br>Sensible                        |
| <i>Staphylococcus aureus</i>                                              | Gram positif | Production de toxines qui provoquent une intoxication                                                                                                                                                                                       | TE = 30,5 mm<br>SXT = 30 mm                                             | Sensible<br>Sensible                                         |

|                                         |              |                                                                                                                                                            |                                                       |                                                          |
|-----------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| (ATCC 6538)                             |              | alimentaire plutôt qu'une infection proprement dite.                                                                                                       | FOX = 44 mm                                           | Sensible                                                 |
| <i>Bacillus subtilis</i><br>(ATCC 6633) | Gram positif | Infections nosocomiales.<br>Infections associées à des dispositifs médicaux (cathéters).                                                                   | TE = 26 mm<br>AML = 8 mm<br>SXT = 30 mm<br>FOX = 9 mm | Sensible<br>Résistante<br><br>Sensible<br><br>Résistante |
| <i>Bacillus cereus</i>                  | Gram positif | Toxi infections alimentaires collectives, infections des tissus mous (abcès cutanés, infections osseuses sur plaies traumatiques, infections sur brûlure). | TE = 26 mm<br>SXT = 25 mm                             | Sensible<br>Sensible                                     |

**Abréviations des antibiotiques standards utilisés :**

**SXT** : Triméthoprim / Sulfaméthoxazole ; **FOX** : Céfoxitine ; **CAZ** : Ceftazidime ;  
**AM** : Ampicilline ; **TE** : Tétracycline ; **DA** : Clindamycine ; **CRO** : Ceftriaxone ; **AML** :  
 Amoxicilline..



**Annexe 8 :** Antibiogramme pour trois souches bactériennes *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus faecalis* (A), et *Staphylococcus aureus* (souche non référencée) (B).

## Résumé

Dans cette étude menée sur l'extraction des composés phénoliques des raquettes d'*Opuntia ficus-indica* (OFI) avec (RAC) et sans cuticule (RSC) provenant de la région de Bir-Essalam (Béjaia), nous avons mis l'accent sur l'efficacité de deux méthodes d'extraction, à savoir l'extraction conventionnelle (EC) et l'extraction assistée par ultrasons (E.A.U), en termes de teneurs en composés phénoliques totaux (CPT), d'activité antioxydante et antibactériennes. Le dosage quantitatif a révélé la richesse des cladodes d'*Opuntia* en CPT et en flavonoïdes totaux (FT). Les rendements d'extraction en CPT, FT et activités antioxydantes sont meilleurs pour la RAC que ceux de la RSC. Les résultats de l'extraction montrent que les rendements les plus élevés en CPT ( $14,14 \pm 0,35$  mg EAG/g MS) et en activité antioxydante (taux d'inhibition de  $55,05 \pm 6,13$  %) sont obtenus par l'extrait E.A.U pour la RAC, alors que le rendement en FT est meilleur avec l'EC pour la même raquette. L'extrait E.A.U de la RAC a montré des améliorations des zones d'inhibitions des bactéries testées par rapport à l'extrait EC, ce qui corrobore avec le résultat de l'analyse infrarouge où l'extrait RAC montre des bandes plus larges que l'extrait EC. Le potentiel antimicrobien *in vitro* des extraits hydro-éthanolique par la méthode des disques et sur microplaques sur 12 souches bactériennes (à Gram + et -) montrent le potentiel des extraits bruts des raquettes de l'OFI en tant qu'agents antibactériens.

**Mots-clés :** *Opuntia ficus indica*, extraction conventionnelle, extraction assistée par ultrasons, activité antioxydante, activité antibactérienne.

## Abstract

In this study, conducted on the extraction of total phenolic compounds from the *Opuntia ficus-indica* (OFI) cladodes with (CC) and without (CWC) cuticle from Bir-Essalam region (Béjaia), we focused on the effectiveness of two extraction methods, namely conventional extraction (CE) and ultrasonically assisted extraction (UAE), in terms of total phenolic compound (TPC) content, antioxidant and antibacterial activities. Quantitative assay revealed the richness of *Opuntia* cladodes in CPT and total flavonoids (TF). The extraction yields of CPT, FT and antioxidant activities are better for CC than those of CWC. The extraction results show that the highest yields of CPT ( $14.14 \pm 0.35$  mg EAG/g DM) and antioxidant activity (inhibition rate of  $55.05 \pm 6.13$  %) are obtained by the UAE extract for the cladode with cuticle, whereas the yield in FT is better with the EC for the same cladode. The UAE extract of cladode with cuticle showed improvements in the zones of inhibition of the tested bacteria compared to the EC extract, this is in adequation with the infrared analysis result where the CC extract showed a larger spectrum than that of CWC. The *in vitro* antimicrobial potential of hydro-ethanolic extracts by the disc method and the microplates method on the 12 (Gram + and -) bacterial strains show the potential of crude extracts of OFI cladodes as antibacterial agents.

**Keywords:** *Opuntia ficus-indica*, conventional extraction, ultrasound-assisted extraction, antioxidant activity, antibacterial activity.







