

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 des Sciences Alimentaires
Spécialité Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire



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

Thème

**Etat de l'art sur l'extraction de
substances bioactives des cladodes du
figuier de Barbarie**

Présenté par :

ARIOUAT Imad Eddine & ABDENOURI Nassim

Soutenu le : 20 Septembre 2021

Devant le jury composé de :

Mme. BRAHMI F.	MCA	Présidente
Mme. TAMENDJARI S.	MCA	Examinatrice
Mme. ADJEROUD-ABDELLATIF N.	MCB	Encadreur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

Avant tout, nous tenons à remercier le bon *Dieu* pour nous avoir donné force, courage, patience et volonté pour mener à terme ce modeste travail.

Nous tenons à remercier très particulièrement notre promotrice *Mme Adjeroud-Abdellatif Nawel* pour son aide, sa compétence, sa patience pour élaborer ce mémoire. Merci pour votre sympathie, votre patience, et votre gentillesse.

Toutes nos expressions de respect à *Brahmi Fatiha* qui nous a fait honneur par sa présence en qualité de présidente de jury.

Nos sincères remerciements et considérations sont exprimés à *Mme. Tamendjari Soraya* qui a accepté d'examiner ce travail et de consacrer de son temps pour l'évaluer.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

A cette occasion, je dédie ce travail à :

Mes parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leur dois, pour leur bienveillance, leur affection et leur soutien, trésors de bonté, de générosité et de tendresse, en témoignage de mon profond amour et ma grande reconnaissance. Que Dieu vous garde.

Mes chers frères et sœurs, qui m'avez toujours soutenu et durant ces années d'études, tout en leur souhaitant la réussite dans tout ce qu'ils entreprennent.

A Mon binôme Imad Eddine et toute sa famille.

Ce travail est aussi dédié à mes collègues et à tous mes amis et professeurs.

Nassim

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mon cher père qui m'a beaucoup aidé avec son soutien tout au long
de mes études.*

*Ma chère mère qui m'a entouré avec sa tendresse et qui n'a cessé
de prier pour moi.*

*Mes chers frères, qui m'avez toujours soutenu et encouragé
durant ces années d'études.*

Mon binôme Nassim et toute sa famille.

*Tous mes amis, et mes proches sans exceptions qu'ils soient proche
ou loin.*

A tous mes enseignants du primaire jusqu'au supérieur.

*A toute la promotion de qualité des produits et sécurité
alimentaire.*

Imad Eddine

Table des Matières

Liste des Abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction.....1

CHAPITRE I : Généralités sur le Figuier de Barbarie

1. Définition.....	4
2. Dénomination du figuier de Barbarie.....	4
3. Histoire et origine.....	5
4. Classification et taxinomie.....	5
4.1. Espèce inerme.....	6
4.2. Espèce épineuse.....	7
5. Description.....	7
5.1. Racines.....	7
5.2. Raquette.....	8
5.3. Fleurs.....	8
5.4. Aréoles.....	8
5.5. Fruit.....	8
5.6. Graines.....	9

CHAPITRE II : Cladode du figuier de Barbarie

1. Morphologie.....	10
2. Composition chimique.....	11
2.1. Composants à faible poids moléculaire.....	12
a) Minéraux.....	12
b) Glucides.....	12
c) Acides organiques.....	13
d) Acides aminés.....	13
e) Acides gras.....	13
f) Vitamines, Caroténoïdes et Chlorophylles	13
g) Composants phénoliques.....	13

2.2. Composants à haut poids moléculaire.....	14
---	----

CHAPITRE III : Substances bioactives du cladode du figuier de Barbarie

1. Polyphénols.....	15
1.1. Biosynthèse	15
a) Flavonoïdes.....	16
a.1. Définition.....	16
b) Acides phénoliques.....	17
b.1. Acides hydroxycinnamiques (C6-C3).....	17
b.2. Acides hydroxybenzoïques (C6-C1).....	17
c) Coumarines.....	18
d) Tannins hydrolysables.....	18
1.2. Teneur en polyphénols des cladodes.....	19
2. Mucilages.....	20
2.1. Généralités.....	20
2.2. Composition chimique.....	21

CHAPITRE IV : Extractions des composés bioactifs des cladodes

1. Méthodes d'extraction des composés bioactifs (mucilage et polyphénols) des cladodes d' <i>Opuntia ficus indica</i>	24
2. Extraction solide liquide.....	25
2.1. Définition.....	25
2.2. Principe.....	25
3. Extraction des polyphénols.....	26
3.1. Techniques conventionnelles.....	26
3.1.1. Macération.....	26
3.2. Techniques innovantes.....	29
3.2.1. Extraction assistée par ultrasons (EAU).....	29
a. Définition.....	29
b. Principe d'extraction par Ultrasons (US).....	29
c. Paramètres influant l'extraction assistée par ultrasons.....	30
d. Avantages et inconvénients de l'extraction assistée par ultrasons.....	30
3.2.2. Extraction accélérée par solvant ou extraction par liquide pressurisé.....	31

a. Définition et principe.....	31
4. Extraction des mucilages.....	34
4.1. Techniques conventionnelles.....	34
4.1.1. macération.....	34
4.2. Techniques innovantes.....	35
4.2.1. Extraction assistée par microondes (EAM).....	35
a. Définition.....	35
b. Principe.....	35
c. Paramètres de l'EAM.....	35
d. Avantages et inconvénients de l'extraction assistée par microonde.....	35
5. Comparaison entre les différentes méthodes d'extraction du mucilage et des composés phénoliques.....	37

CHAPITRE V : Valorisation des substances bioactives du cladode du figuier de Barbarie

1. Valorisation et utilisation des polyphénols.....	39
1.1. Utilisation médicinale.....	39
1.2. Intérêts économiques et industrielle.....	40
2. Valorisation et utilisation du mucilage.....	41
2.1. Utilisation industriel et économique.....	41
2.2. Utilisation environnementale.....	42
2.3. Utilisation cosmétologique.....	43
2.4. Utilisation médicinale.....	43
Conclusion.....	45

Liste des références

Liste des abréviations

ABTS	2,2'-Azino-Bis(3-ethylbenzoThiazoline-6-Sulphonic acid)
CMC	Carboxymethylcellulose
Cm	Centimètre
CT	Coupe Transversale
DPPH	diphényl-picrylhydrazyle
EAM	Extraction Assistée par Microondes
EAS	Extraction Accélérée par Solvant
EAU	Extraction Assistée par Ultrasons
ECS	Extraction Conventiionnelle par Solvant
GHz	Gigahertz
HPLC	Chromatographie en phase liquide à haute performance
KHz	Kilohertz
MS	Matière sèche
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
OFI	<i>Opuntia ficus indica</i>
OA	<i>Opuntia amyclae</i>
OM	<i>Opuntia megacantha</i>
pH	Potentiel d'Hydrogène
PF	Poids Frais
PS	Poids Sec
PT	Polyphénol Totaux
US	Ultrasons

Liste des figures

Figure 1 : Plante du figuier de Barbarie.....	4
Figure 2 : (a) : Raquette d'une espèce inerme du figuier de Barbarie, (b) : glochides sur les raquettes du figuier de Barbarie.....	6
Figure 3 : Raquette d'une espèce épineuse du figuier de Barbarie.....	7
Figure 4 : (a) : Fleur du figuier de Barbarie, (b) : Fruit du figuier de Barbarie, (c) : Graines du figuier de Barbarie.....	9
Figure 5 : Morphologie des cladodes du figuier de Barbarie, (a) : Coupe transversale (CT) de L'ensemble du cladode ; (b) : CT des couches extérieures du cladode montrant la peau (S), chlorenchyme (CH), vaisseaux conducteurs (V), parenchyme (C) ; (c) : CT de la peau montrant un hypoderme à parois épaisse ; (d) : CT du chlorenchyme avec des plasmides et des cristaux oxalate.....	11
Figure 6 : Motif flavan (a) et flavon (b) et numérotation systématique	16
Figure 7 : Acides hydroxycinnamiques	17
Figure 8 : Acides hydroxybenzoïques	18
Figure 9 : Structure chimique d'un gallotannin	18
Figure 10 : Structure chimique du mucilage des cladodes du figuier de Barbarie	22
Figure 11 : Schéma générale de l'extraction solide-liquide	26
Figure 12 : Schéma générale de l'extraction par macération	27
Figure 13 : Représentation schématique du phénomène de cavitation.....	29
Figure 14 : Evolution d'une bulle de cavitation à proximité d'une cellule végétale	30
Figure 15 : Montage de l'extraction par liquide pressurisé	32
Figure 16 : Le système Dionex ASE monoposte pour laboratoires traitant peu d'échantillons	33
Figure 17 : (a) : Montage d'extraction assistée par microonde, (b) : appareillage de l'extraction assistée par microonde	35

Liste des tableaux

Tableau I : Classification du figuier de Barbarie.....	6
Tableau II : Principaux éléments contenus dans les cladodes du figuier de Barbarie.....	12
Tableau III : Composition en polyphénols des cladodes de l'OFI.....	19
Tableau IV : Composition en sucres du mucilage extrait des cladodes d'OFI.....	23
Tableau VI : Extraction des composés phénoliques par ultrasons.....	28
Tableau VII : Extraction des polyphénols par méthode d'extraction accélérée par solvant.....	31
Tableau VII : Extraction des polyphénols par méthode d'extraction accélérée par solvant.....	32
Tableau VIII : Extraction du mucilage par macération.....	34
Tableau IX : Extraction du mucilage par microondes.....	36

INTRODUCTION

Introduction :

Le cactus est originaire du Mexique il a constitué une source importante de nourriture pour les populations indigènes et la production de teinture de cochenille était l'un des principaux usages associés à cette plante. Il s'est répandu sur le pourtour méditerranéen après la découverte des Amériques au XVe siècle (**El Mannoubi et al., 2008**).

Le Figuier de Barbarie est connu sous le nom scientifique d'*Opuntia ficus indica*. Il existe de grandes similarités morphologiques entre *Opuntia ficus indica* et d'autres espèces du même genre, comme *Opuntia megacantha* et *Opuntia amyclae* (**Neffar, 2012**).

L'*Opuntia* comme les autres cactus est considéré comme une réserve d'eau vivante ; c'est une plante xérophyte adaptée aux conditions arides et semi-arides grâce à la succulence de ces tiges et son épais épiderme qui lui permettent de limiter les pertes d'eau et d'emmagasiner une importante quantité d'eau, ce qui a permis de maintenir en vie des troupeaux sans apport d'eau pendant plusieurs mois. C'est pour cela que le cactus a mérité le nom de « plante miracle » (**Schweizer, 1997**).

En Algérie le Figuier de Barbarie est très abondant particulièrement dans les régions de la Kabylie (**Ksouri et al., 2012**), grâce au climat aride et semi-aride de la région. Le cactus est une espèce adéquate pour une agriculture durable en Algérie grâce à sa résistance à la sécheresse, la lutte contre la désertification, la lutte contre les incendie et à son utilisation dans l'alimentation de l'homme et du bétail. C'est une plante qui est économiquement importante, mais qui reste très peu exploitée. On s'intéresse particulièrement à cette plante pour sa diversité phénotypique et le contenu photochimique des fruits de l'OFI, et le conditionnement des boues des eaux usées par le cladode de l'OFI (**Adli et al., 2017 ; Mazari et al., 2018 ; et Betatache et al., 2014**).

Pour l'extraction des polyphénols et du mucilage certains auteurs se sont intéressés aux méthodes d'extraction dites conventionnelles (**De Santiago et al. 2021, Djerroud et al., 2015**) respectivement. Tandis que d'autres se sont intéressés aux techniques dites innovantes et non conventionnelles basées sur des nouvelles technologies d'extraction. Ces techniques sont utilisées pour intensifier l'opération d'extraction et améliorer le rendement comme l'extraction assistée par microondes (**Adjeroud Abdellatif et al., 2018**), l'extraction assistée par ultrasons (**Mahdeb et al., 2021**) et l'extraction accélérée par solvant (**Astello Garcia. 2015**).

La valorisation du figuier de Barbarie, a suscité un grand intérêt ces dernières années cela dit, pour l'étude des extraits de biomolécules des cladodes du figuier de Barbarie, il existe une variété de moyens utilisés pour tirer bénéfice et exploiter leurs composants, que ça soit pour les utilisations en industries agroalimentaire et économique, médicales, cosmétologique, environnementale ou bien biotechnologique. Ainsi, ce large éventail de possibilités d'exploitation, démontre tout l'intérêt du figuier de barbarie.

En Algérie, un intérêt encore insuffisant est accordé à cette culture surtout à la forme inerme qui reste un potentiel fourrager et maraicher sous exploité.

Ainsi, l'objectif de notre travail est de faire une synthèse sur les travaux réalisés pour l'extraction de ces deux composés et d'effectuer une comparaison entre les différents procédés d'extraction, pour leurs conditions et leurs rendement d'extraction qui va permettre la meilleure valorisation des composés phénoliques et du mucilage dans les diverses applications potentielles.

Ce travail englobe des Généralités sur le figuier de Barbarie et la composition des cladodes en composés bioactifs des cladodes (le mucilage et les polyphénols) il traite les différentes méthodes conventionnelles et innovantes d'extraction des composés phénoliques et du mucilage et la comparaison entre ces différentes méthodes enfin il aborde les larges domaines d'application des composés phénoliques et des mucilages des cladodes du figuier de Barbarie.

CHAPITRE I :
Généralités sur le
Figuier de Barbarie

1. Définition

Le Figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) (**Figure 1**), est une espèce de plante de la famille des *Cactaceae*, originaire du Mexique, qui s'est naturalisée dans d'autres continents, notamment le pourtour méditerranéen et en Afrique du Sud. Il produit un fruit comestible appelé figue de Barbarie. Cette espèce appartient à la sous-famille des *Opuntioideae*, tribu des *Opuntieae*. (**Falcão et al., 2013**)



Figure 1: Plante du figuier de Barbarie (**Habibi, 2004**)

Elle occupe une partie importante dans l'alimentation humaine et elle est également utilisée comme fourrage pour le bétail. C'est une plante intéressante en raison des conditions environnementales dans lesquelles elle se développe et sa résistance aux conditions climatiques extrêmes (**Hernández-Urbiola et al., 2011**).

2. Dénomination du figuier de Barbarie

Le nom figuier de Barbarie trouve son origine dans le nom donné depuis le moyen âge aux côtes du Maghreb, où le figuier s'est particulièrement bien implanté.

Il existe plusieurs appellations selon les différentes régions dont le Nopal (*Opuntia*) est le nom mexicain de la plante, qui vient du mot Nochtli en Nahuatl, langue classique des Aztèques. *Opuntia* qui est l'appellation scientifique, vient du latin *Opuntius* d'Oponthe, qui réfère aux plantes grasses à rameaux épineux en forme de raquette, tel le figuier de Barbarie (**Schweizer, 1997**).

D'autres noms ont été utilisés comme figuier des Indes, figuier du désert, semelle du pape, et figuier d'Espagne, prickly pear est le nom anglais (Halmi, 2015). Parmi d'autres noms on trouve Oponce et Figue des chrétiens (Felice, 2004).

En Afrique les indigènes ont donné de nouveaux nom au figuier de Barbarie, tels que :El hindi, Etinchawki, Karmouss n'ouham, Karmoussnssara qui signifie « la figue des Chrétiens », ou simplement karmouss ou akarmuss.

3. Histoire et origine

La culture de la figue de Barbarie aurait commencé il y a environ 5000 ans en Amérique du Sud. A cette époque, les Aztèques exploitaient l'*Opuntia* pour ses vertus médicinales et ses caractéristiques nutritives. De plus, ils exerçaient l'élevage des cochenilles grâce à ce fruit. L'exploitation de ces insectes permet de produire une teinte rouge obtenue à partir de l'acide carminique (colorant de couleur rouge) qui les composent.

Lorsque les Espagnols arrivèrent en 1492 sur l'île d'Hispaniola (aujourd'hui Haïti et la République Dominicaine) dans la mer des Caraïbes, les autochtones leurs présentèrent le fruit rouge de l'*Opuntia*, alors appelé « tuna », du mot caribéen tun.

Le Figuier de Barbarie a été importé pour la première fois sur le continent européen entre la fin du quinzième et le début du seizième siècle. En effet, le figuier de Barbarie est apparu en Europe suite à la découverte des Amériques par Christophe Colomb et l'introduction du cactus en Afrique du Nord a été favorisée par l'expansion espagnole et la France qui a développé la culture en Afrique du Nord notamment en Algérie où cette plante a déjà pris racine (Habibi et al., 2004).

4. Classification et taxinomie

Le genre *Opuntia* appartient à la famille des *Cactaceae*, ordre des *Caryophyllales* et la sous-classe des *Caryophyllidaes*. La famille des *Cactaceae* compte environ 130 genres et 1500 espèces, dont 300 appartiennent au genre *Opuntia* (Mulas et al., 2004).

Le groupe des *Opuntiaeae* comprend le genre *Opuntia*, subdivisé à son tour en quatre sous-genres : *Platyopuntia*, *Cylindropuntia*, *Tephrocactus* et *Brasiliopuntia*. Le sous genre *Platyopuntia* comprend 150 à 300 espèces décrites, on a l'espèce *Opuntia megacantha* et la série des *ficus-indicae*, qui comprennent l'*Opuntia ficus-indica* (OFI) (Tableau I) et qui sont connues sous le nom de figuier de Barbarie (Mulas et al., 2004).

Tableau I : Classification du figuier de Barbarie (Wallace et al, 1997)

Classification classique	
Règne	<i>Plantea</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magoliopsida</i>
Sous- classe	<i>Caryophyllidae</i>
Ordre	<i>Caryophyllales</i>
Famille	<i>Cactaceae</i>
Genre	<i>Opuntia</i>
Nom binomiale	
<i>Opuntia ficus-indica</i>	

Le cactus du genre *Opuntia* est doté d'une diversité génétique importante et un certain nombre d'espèces et variétés ont été décrit. Il y'a des espèces qui sont épineuses (ou aspermes), et d'autre qui sont inermes (Arba, 2009).

4.1. Espèce inerme

L'espèce inerme à fruit oranges (**Figure 2 a**), qui parait particulièrement rustique et qui n'est pas agressive car (presque) sans épines. Les aréoles, sur les raquettes et le fruit sont pourvues de glochides brunâtres (**Figure 2 b**) (les aiguillons à la place des épines) qui se détachent facilement et s'accrochent fortement dans la peau.

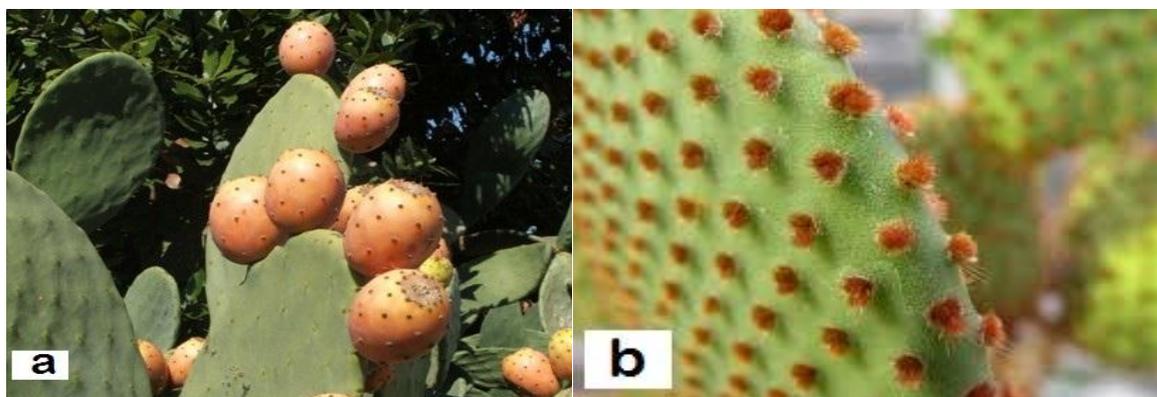


Figure 2 : (a) : Raquette d'une espèce inerme du figuier de Barbarie, (b) : glochides sur les raquettes du figuier de Barbarie (Boutakiout, 2015).

4.2. Espèce épineuse

Les formes épineuses (**Figure 3**) font partie de trois étages bioclimatiques différentes, et elles diffèrent entre elles par la couleur de la chaire et par la présence d'épines (**Su et Zhao, 2003**).



Figure 3 : Raquette d'une espèce épineuse du figuier de Barbarie (**Boutakiout, 2015**)

5. Description

C'est une plante arborescente qui peut atteindre de 3 à 5 mètres de haut. Son organisation en cladodes, couramment appelés « raquettes », est particulière. Les cladodes sont des tiges modifiées de forme aplatie, de 30 à 40 cm de long sur 15 à 25 cm de large et de 1,5 à 3 cm d'épaisseur. Unis les uns aux autres, ils tendent à former des branches. Ceux de la base se lignifient pour former au-delà de la quatrième année de croissance un véritable tronc (**Habibi et al., 2004**).

5.1. Racines

Le figuier de Barbarie a un système racinaire superficiel et charnu, qui se répand horizontalement. La distribution racinaire peut dépendre du type de sol et de la gestion culturale. Dans des conditions favorables de sol, une racine pivotante se développe, pénétrant presque 30 cm dans le sol. Dans des conditions de sécheresse, telles que celles rencontrées dans les régions arides et semi-arides, des racines secondaires charnues se développent depuis la racine pivotante pour absorber l'humidité du sol à une plus grande profondeur. Néanmoins, dans tous les types de sols, la majeure partie de la masse de racines absorbantes se trouve dans les centimètres superficiels, à une profondeur maximale de 30 cm, mais se répandant horizontalement sur 4 à 8 m (**Inglese et al., 2018**).

5.2. Raquette

Le terme feuilles de figuier de Barbarie est fréquemment utilisé dans la littérature pour désigner les segments de tiges aplaties de la plante qui remplacent les feuilles dans leurs fonctions chlorophyllienne, et sont recouverts d'une cuticule céroise (la cutine), qui limite la transpiration et les protège contre les prédateurs. Ces tiges de cactus, les raquettes de cactus ou cladodes sont les termes corrects, synonyme de Nopals (**Arba, 2009**).

5.3. Fleurs

Les fleurs du figuier de Barbarie (**Figure 4**) sont hermaphrodites, marginales sur le sommet des cladodes de couleur jaune et deviennent rougeâtre à l'approche de la sénescence de la plante. Les fleurs ont une forme conique et ont seulement quelques millimètres de long. Elles apparaissent sur les cladodes jeunes et sont éphémères (**Habibi, 2004**).

5.4. Aréoles

A la base des fleurs se trouvent les aréoles (environ 150 par cladode) qui sont des bourgeons axillaires modifiés, typiques des Cactacées. Leur méristème, selon les cas, produisent des épines et des glochides, ou bien émettent des racines adventives, de nouveaux cladodes ou des fleurs. A noter que même l'ovaire et donc le fruit est couvert d'aréoles susceptibles d'émettre à nouveau des fleurs ou des racines.

Les épines proprement dites, blanchâtres, sclérifiées, solidement implantées, sont longues de 1 à 2 cm. Il existe des variétés inermes, sans épines (**Angulo-Bejarano et al., 2014**).

5.5. Fruit

Le fruit ou figue de Barbarie (**figure 5**), est une baie charnue, uniloculaire, à nombreuses graines (polysperme) dont le poids peut varier de 150 à 400 g. Le fruit dérive de l'ovaire infère adhérent au réceptacle floral. Certains auteurs le considèrent comme une fausse arille (enveloppe charnue plus ou moins développée autour d'une graine) (**Feugang et al., 2006**).

Sa couleur est variable selon les variétés : jaune, rouge, blanc... La forme est également très variable, non seulement selon les variétés mais aussi selon l'époque de formation : les premiers sont arrondis, les plus tardifs ont davantage une forme allongée de pédoncule. Le nombre de graines est très élevé ; de l'ordre de 300 pour un fruit de 160

g. Et d'après (Mondragon Jacobo, 2000), la reproduction sexuelle et asexuelle est possible pour la plante *Opuntia ficus indica*.

5.6. Graines

Les graines de fruits du figuier de Barbarie (Figure 6) présentent une variation de forme, taille, structure, caractéristiques de l'embryon. Ils représentent environ 10-15 % des aliments comestibles (Feugang *et al.*, 2006).



Figure 4 : (a) : Fleur du figuier de Barbarie, (b) : Fruit du figuier de Barbarie, (c) : Graines du figuier de Barbarie (Habibi, 2004).

CHAPITRE II :
Cladode du figuier de
Barbarie

Les cladodes sont également appelés : Coussinets de cactus, tiges, légume de cactus, phyloclades, Nopals ou Pencas (Stintzing et al., 2005) et feuille du Cactus (Nharingo et al., 2016). Les jeunes cladodes sont appelés Nopalitos au Mexique, ils sont consommés en tant que légumes car ils sont tendres et riche en fibres (Stintzing et Carle, 2005), leur valeur nutritive est similaire à celle d'un grand nombre de légume et de feuilles (Arba, 2009).

1. Morphologie

Le terme feuilles de figuier de Barbarie est fréquemment utilisé dans la littérature pour désigner les segments de tiges aplaties de la plante qui remplacent les feuilles dans leurs fonctions. Ces tiges de cactus, les raquettes de cactus ou cladodes sont les termes corrects, synonyme de « nopals ». Les tiges sont composées d'un parenchyme blanc (tissu de base) et le contenant de la chlorophylle au sein du chlorenchyme (tissu de cortex) (Figure 7). Ce dernier est recouvert d'épines (feuilles modifiées) et poils ou trichomes multicellulaires, qui forment l'aréole et qui est une caractéristique des membres de la famille des cactacées (Anderson, 2001). Les glochides sont composées de 100% de cellulose cristalline (Waldron et al., 1996).

Les micro fibrilles de cellulose sont de 0,4 mm de longueur et de 6 à 10 µm en diamètre, et sont parallèlement ancrées dans une matrice d'arabinose. Celle-ci est présente sous forme de gel solide, tissé et serré avec la cellulose. Les épines sont constituées de 96 % de polysaccharides, qui eux-mêmes sont divisés en 49,7 % de cellulose et 50,3 % d'arabinose, le reste est constitué de cendres, matières grasses, cires et lignine (Malainine et al., 2003).

Elles mesurent 1 à 3 cm de longueur et forment 8,4 % du poids total du cladode. Leurs fonctions comprennent la protection mécanique face aux herbivores, la réflexion de la lumière, l'ombre pour la tige, et donc permettent la réduction de la perte en eau ainsi que la condensation du brouillard (Anderson, 2001).

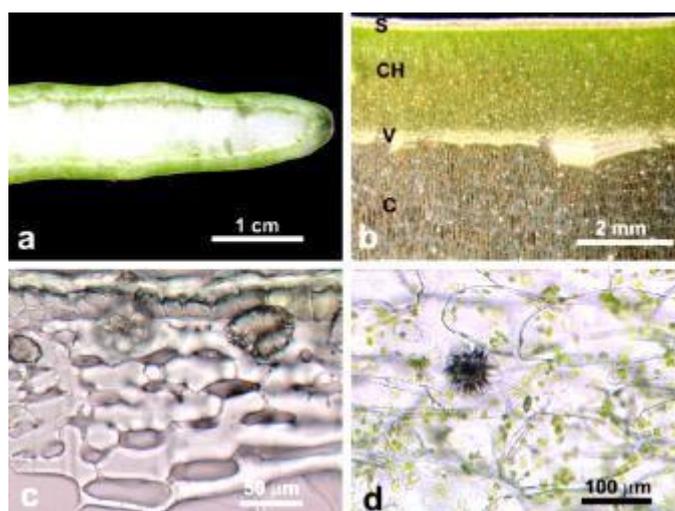


Figure 5 : Morphologie des cladodes du figuier de Barbarie, (a) : Coupe transversale (CT) de L'ensemble du cladode ; (b) : CT des couches extérieures du cladode montrant la peau (S), chlorenchyme (CH), vaisseaux conducteurs (V), parenchyme (C) ; (c) : CT de la peau montrant un hypoderme à parois épaisses ; (d) : CT du chlorenchyme avec des plasmides et des cristaux oxalate (**Ginestra et al., 2009**)

2. Composition chimique

La composition chimique des cladodes varie en fonction des facteurs édaphiques (relatif au sol), l'endroit de la culture, la saison et l'âge de la plante. Le **Tableau II** montre les divers composants des cladodes (**Stintzing et Carle, 2005**).

Les cladodes du figuier de Barbarie sont riches en eau, en hydrates de carbones, en vitamine C et en bêta-carotène (**Arba, 2009**). Les teneurs en eau des cladodes fraîches varient de 80 à 90 % (**Benattia, 2017**). Les cladodes ont une haute teneur en calcium et en fibres. Ils sont moins nutritifs que les épinards et plus nutritifs que la laitue (**Stintzing et Carle, 2005**).

De nombreuses recherches ont démontrées que l'utilisation d'engrais azotés et phosphatés augmente le contenu en protéines brutes des raquettes d'*Opuntia*. Le contenu en substances nutritives varie suivant l'âge des raquettes. Le pourcentage des protéines brutes diminue (de 5 à 3 % de la MS) tandis que le contenu en fibres augmente (de 9 à 20 % de la MS), quand les raquettes passent de 1 à 5 ans (**Mulas et Mulas, 2004**).

Tableau II : Principaux éléments contenus dans les cladodes du figuier de Barbarie (Stintzing *et al.*, 2005 ; El Mostafa *et al.*, 2014).

Composants	Matière sèche (g/100 g)	Poids frais (g/100g)
Eau	-	88-95
Glucides	64-71	3-7
Cendres	19-23	1-2
Fibres	18	1-2
Protéines	4-10	0,5-1
Lipides	1-4	0,2
Polyphénols : Ac. Gallique	0,00064-0,00237	-

2.1. Composants à faible poids moléculaire

a) Minéraux

Des études ont démontré que la composition minérale est de 50 mg/100 g de poids sec, 18-57 mg/100 g de poids secs pour le potassium, 11-17 mg/100 g pour le calcium et magnésium, suivie du manganèse (62-103 µg/g), du fer (59-66 µg/g), du zinc (22 à 27 µg/g) et du cuivre (8-9 µg/g) (Stintzing et Carle, 2005).

b) Glucides

Les glucides constituent un total de 36 à 37% de l'ensemble du poids sec des cladodes. Les glucides solubles constituent la fraction essentielle de l'extractif non azoté (Stintzing et Carle, 2005).

Cette fraction glucidique est composée de glucose, fructose et une faible teneur de saccharose et d'autres sucres, leur proportion varie cependant selon la variété et le stade de croissance. Le fructose est le plus important des sucres solubles (Ayadi, 2009).

La teneur en glucides est comprise entre 64 et 71 g/100 g par rapport au poids sec. Des variations peuvent être dues aux facteurs agronomiques et environnementaux ainsi que l'âge du cladode. Les jeunes cladodes sont plus riches en glucides (Ginestra *et al.*, 2009).

c) Acides organiques

L'acide malonique et l'acide citrique représentent respectivement 36 et 178 mg /100 g de poids frais. En revanche, les cladodes âgées ne contiennent plus d'acide malonique. En outre, l'acide malique varie de 95 à 985 mg/100 g de poids frais (**Teles et al., 1984**).

d) Acides aminés

Il existe 18 acides aminés compris dans les cladodes du figuier de Barbarie (**Bruckner et al., 2003**). La teneur en protéine est de 11 g/100 g de poids frais ou de 0,5 g/100 de poids sec (**Teles et al., 1997**).

Les principaux acides aminés sont la glutamine, suivie par la leucine, la lysine, la valine, l'arginine, la phénylalanine et l'isoleucine (**El-Mostafa et al., 2014**).

e) Acides gras :

Les analyses chromatographiques des lipides totaux extraits à partir des cladodes de cactus montrent que la contribution totale en acide gras est de 13,87 % pour l'acide palmitique (C16: 0), 11,16 % pour l'acide oléique (C18: 1), 34,87 % pour l'acide linoléique (C18: 2) et 32,83 % pour l'acide linoléique (C18: 3). Ces quatre gras acides représentent ainsi plus de 90 % des acides gras totaux (**Abidi et al., 2009**).

f) Vitamines, caroténoïdes et chlorophylles

La teneur totale de la vitamine C (acide ascorbique et déhydroascorbique) dans 100 g de matière fraîche s'élève à 22 mg, b-carotène à de 11,3 à 53,5 µg, thiamine à 0,14 mg, riboflavine à 0,6 mg et niacine à 0,46 mg (**Stintzing et Carle, 2005**).

g) Composants phénoliques

La teneur en polyphénols totaux dans les cladodes représentent 8 à 9 mg/100 g de poids frais (**Rodrigues-Felix, 2002**). Parmi les acides phénoliques qui ont été détectés : acide ferulique, acide p-Coumarique, acide 4-Hydroxybenzoïque, acide caféique, acide salicylique, acide gallique. Les flavonoïdes détectés sont : rutine, iso-quercitrine, nicotiflorine, narcissine (**Guevara-Figueroa et al., 2010**).

2.2. Composants à haut poids moléculaire :

La teneur moyenne de la cellulose dans les cladodes par rapport à la matière sèche est de 11 %, hémicellulose 8 % et la lignine 3,9 % (**Ben-Thlija, 2002**).

La teneur en amidon dans les cladodes fluctue en fonction des saisons et atteint une valeur moyenne de 85 à 171 mg/g de poids sec (**Retamal et al., 1987**).

Les hydrocolloïdes occupent 36 % du volume total du cladode, cela est dû à leur grande capacité à gonfler. Le stockage de l'eau atteint 50 % de leur poids total (**Sutton et al., 1981**).

Le mucilage : la composition moyenne du sucre dans le mucilage du figuier de Barbarie est composée de 42 % d'arabinose, 22 % de xylose, 21 % de galactose, 8 % d'acide galacturonique et 7 % de rhamnose (**Nobel et al., 1992**).

CHAPITRE III :
Substances bioactives
du cladode du figuier
de Barbarie

1. Les polyphénols

Les composés phénoliques regroupent un vaste ensemble de substances chimiques comprenant au moins un noyau aromatique, et un ou plusieurs groupes hydroxyles, en plus d'autres constituants. Les polyphénols naturels vont de molécules simples, comme les acides phénoliques, à des composés hautement polymérisés comme les tanins. Il existe différentes classes de polyphénols, notamment : les acides phénoliques, les flavonoïdes, les tanins, les stilbènes, les lignanes, les saponines, les phytostérols ou bien phytostanols. Les plus importants sont : les acides phénoliques, les flavonoïdes et les tanins.

Le terme « polyphénols » désigne des composés phénoliques, réservé aux seules molécules présentant plusieurs fonctions phénols, ce qui éliminerait les mono phénols, donc il est préférable d'utiliser la désignation générale « composés phénoliques ». Ces composés appartiennent au groupe des métabolites secondaires (**Macheix et al, 2005**).

Ce sont des molécules largement répandues dans le règne végétal étant trouvées dans tous les fruits et les légumes. Elles sont présentes au niveau de toutes les parties de l'organisme végétal mais avec une répartition quantitative qui varient entre les différents tissus (**Waksmundzka-Hajnos et al, 2011**). D'un point de vue chimique, elles se définissent par leurs cycles benzéniques porteurs d'au moins un groupement hydroxyle (**Urquiaga, 2000**), libre ou engagé dans une autre fonction (éther, ester, sucre...) (**Chira et al, 2008**). Elles peuvent aller de molécules simples, comme les acides phénols à des composés hautement polymérisés, comme les tanins (**Mahmoudi et al, 2013**).

1.1. Biosynthèse

La formation des composés phénoliques peut être issue de deux voies biosynthétiques :

- Celle de l'acide shikimique qui est à l'origine de la formation des oses aux acides aminés aromatiques (phénylalanine et tyrosine) puis par désamination de ces derniers, aux acides cinnamiques (**Richter, 1993 ; Croteau et al, 2002**) et à leurs très nombreux dérivés : acide benzoïques, acétophénones, lignanes et lignines, coumarines, tanins (**Bruneton, 1999**).
- Celle de l'acétate qui conduit à des poly acétates de longueur variable menant par cyclisation a des composés polycycliques tels que les dihydroxy-1,8 anthraquinones ou les naphthoquinones (**Richter, 1996 ; Martin et Andriantsitohaina, 2002**).

- Celle du shikimate et de l'acétate qui donnent naissance à toute une série de composés d'origine mixte tels que les flavonoïdes, stilbènes, xanthones...etc (Bruneton, 2009).

a) Les flavonoïdes

a.1. Définition

Le terme « flavonoïdes » proviendrait du terme flavedo, désignant la couche externe des écorces d'orange, cependant d'autres auteurs supposaient que ce terme a été plutôt prêté du flavus qui désigne jaune (Garon et Guéguen, 2014). Ce groupe comprend comme son nom l'indique des composés jaunes mais aussi d'autres composés colorés ou incolores. Les flavonoïdes constituent le plus grand groupe de composés phénoliques, avec plus de 6000 composés naturels qui sont quasiment universels chez les plantes vasculaires (Knežević S.V. et al, 2012) et sont largement distribués dans les feuilles, les graines, les écorces et les fleurs des plantes. Plusieurs milliers des molécules ont été identifiées à ce jour. Ils jouent un rôle déterminant dans la protection de la plante des UV, de microorganismes pathogènes et des herbivores (Heim et al, 2002).

Les flavonoïdes ont tous une origine biosynthétique commune et par conséquent, possèdent tous un même squelette de base de quinze atomes de carbones constitué de deux unités aromatiques, deux cycles en C6 (A et B) reliés par une chaîne en C3.

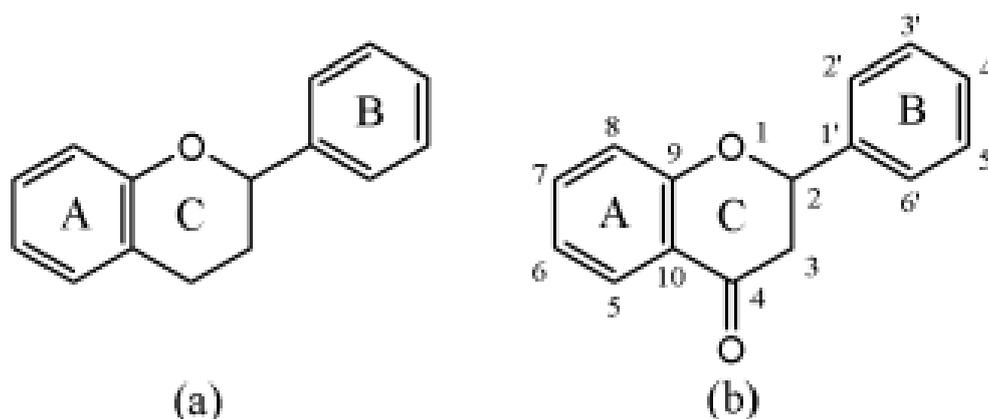


Figure 6 : Motif flavan (a) et flavon (b) et numérotation systématique (Boutakiout et al., 2015).

Les flavonoïdes font partie d'une classe de composés naturels largement répandue chez les végétaux. Ils sont très présents dans les feuilles, les graines, l'écorce et les fleurs de plante, abondants dans les légumes feuilles et présents dans les aliments d'origine végétale (légumes, céréales, légumineuse, fruits, etc.) et les boissons (vin, thé, cidre bière, cacao, etc.). Cette présence est en grande partie influencée par des facteurs génériques et des conditions environnementales (Lugasi et al., 2003).

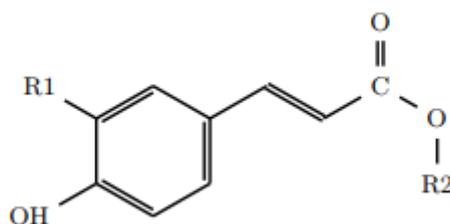
b) Les acides phénoliques

Ce sont des dérivés hydroxylés de l'acide benzoïque (C6-C1) ou de l'acide cinnamique (C6-C3). Ces acides sont contenus dans un certain nombre de plantes agricoles et médicinales (Psotová et al., 2003).

Ils sont considérés comme substances phytochimiques avec des effets prebiotique, antioxydant, de chélation et anti-inflammatoire. Leur toxicité est faible et considéré non toxique. Pharmacologiquement, le mieux caractérisé est l'acide caféique (Psotová et al., 2003).

b.1. Acides hydroxycinnamiques (C6-C3)

Ils présentent une distribution très large dans le règne végétal, le plus souvent estérifiés, ils sont plus abondants que les acides hydroxybenzoïques et sont principalement composés de l'acide p-coumarique, caféique, férulique et sinapique.



R1 = R2 = H : Acide p-coumarique

R1 = OH ; R2 = Acide caféique

R1 = OCH3 ; R2 = Acide férulique

Figure 7: Acides hydroxycinnamiques (Boutakiout et al., 2015).

b.2. Acides hydroxybenzoïques (C6-C1)

Très présent dans le règne végétal soit sous forme libre ou sous forme combinée à l'état d'ester ou d'hétéroside.

Les structures varient selon les hydroxylations et les méthoxylations sur le cycle phénolique aromatique (Clifford, 2000).

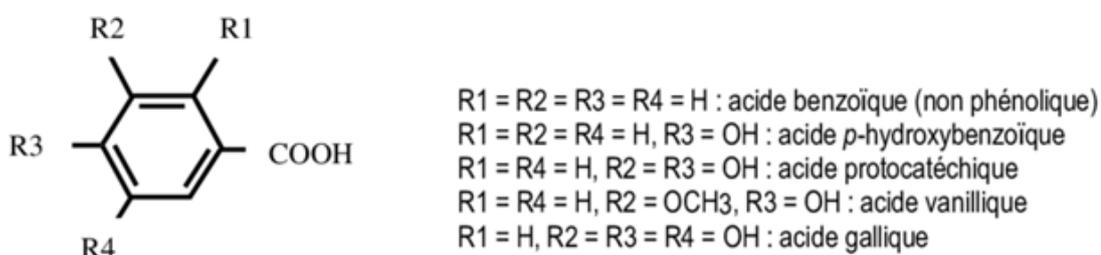


Figure 8 : Acides hydroxybenzoïques (Boutakiout et al., 2015).

c) Coumarines

Elles sont présentes dans de nombreux végétaux. Elles ont une structure de base (C6-C3) dérivant des acides ortho-hydrocinnamique. Elles sont produites en grande quantité en réponse à une attaque biotique ou abiotique et semblent constituer un moyen de défense de type phytoalexique. Elles sont connues pour leurs propriétés anticoagulantes (Vivas de Gauljac, 2001).

d) Tannins hydrolysables

Ce sont des esters d'acides phénoliques (acide gallique ou ellagique) associés à un polyol (habituellement le glucose) (Clifford, 2000). Ils sont divisés en ellagitannins et gallotannins (Figure 12) (Vivas de Gauljac, 2001).

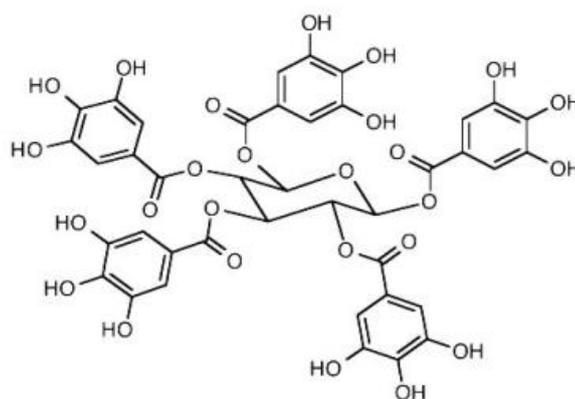


Figure 9 : Structure chimique d'un gallotannin (Boutakiout et al., 2015).

1.2. Teneur en polyphénols des cladodes

Les cladodes du figuier de Barbarie sont très riches en divers polyphénols (**Augulo Bejarano et al., 2014 ; Astello Garcia et al., 2015**), et principalement les flavonoïdes et les acides phénoliques (**El Mostafa et al., 2014**). Selon **Temagoult et al., 2017**, *Opuntia ficus-indica* est une importante source de composés antioxydants naturels, due à la forte teneur en flavonoïdes et caroténoïdes. Les composés phytochimiques présents dans les différentes structures du figuier de Barbarie peuvent inclure : quercétine, kaempférol, bétaxanthine, indicaxanthine, lutéoline, isorhamnetine et acide ascorbique parmi d'autres composants (**Stintzing, 2005 ; Feuganget al., 2006**).

Outre leurs effets bénéfiques sur la santé, dernièrement **Bouaouine et al., 2018** ont rapporté que certains polyphénols (lignine et tanins) des cladodes du Figuier de Barbarie (OFI) pourraient agir comme coagulants dans le traitement des eaux usées.

Tableau III : Composition en polyphénols des cladodes de l'OFI (**El-Mostefa et al., 2014**).

Polyphénols	Matière sèche(mg/100g)
Acide gallique	0,64-2,37
Acide coumarique	14,08-16,18
Acide 3, 4-dihydroxybenzoïque	0,06-5,02
Acide 4-hydroxybenzoïque	0,5-4,72
Acide ferulique	0,56-34,77
Isoquercétine	2,29-39,67
Isorhamnetin-3-O-glucoside	4,59-32,21
Nicotiflorine	2,89-146,5
Rutine	2,36-26,17
Narcissine	14,69-137,1

Les cladodes présentent de grandes quantités de composés flavonoïdes inhabituels tels que la nicotiflorine (146,5 mg /100 g) et la narcissine (137,1 mg/100 g), avec des valeurs de teneur élevée trouvées pour l'isoquercétine et l'acide férulique respectivement de 39,67 et 34 ,77mg /100 g (**Valente et al., 2010**). L'âge de la raquette, l'environnement, le type sol et le climat pourraient expliquer ces variations dans le contenu en polyphénols dans le cactus.

2. Les mucilages

Les mucilages sont des polysaccharides, de structure chimique parfois très complexe, que l'on rencontre dans plusieurs plantes supérieures. Ils trouvent beaucoup d'applications dans les domaines alimentaire et pharmaceutique pour leurs propriétés émulsifiantes. Ils font partie des fibres alimentaires et ont la capacité d'absorber de grandes quantités d'eau, se dissolvant et se dispersant et formant des colloïdes visqueux ou gélatineux. Concernant le mucilage d'OFI, il s'agit d'une substance épaisse et gommeuse qui fournit aux cactus une capacité naturelle à stocker de grandes quantités d'eau. Dans l'eau, le mucilage gonfle, produisant des propriétés tensioactives uniques observées dans de nombreuses gencives naturelles, donnant au mucilage une capacité à précipiter les particules et les ions des solutions aqueuses (**Saenz et al., 2000**).

2.1. Généralités

Les mucilages sont classés en deux types selon leur interaction avec l'eau. L'une des fractions serait une pectine avec des propriétés gélifiantes en présence de Calcium, et l'autre non gélifiante qui représente moins de 10% du mucilage soluble (**Majdoub et al., 2001 ; Goycoolea et Cárdenas, 2004**). La fraction soluble contient de groupement méthyle et elle est pauvre en acide galacturonique par rapport à la fraction gélifiante. Chez les *Opuntia* ce mucilage ne semble pas être chimiquement lié à la paroi cellulaire (**Lefsih et al., 2016**).

Le mucilage est produit principalement dans le parenchyme. Les parois cellulaires du parenchyme sont constituées de microfibrilles de cellulose associées entre elles en bandes, qui sont entrelacées les unes aux autres dans un réseau relativement peu coordonné (**Adjeroud et al., 2020**).

Le mucilage a une structure extrêmement poreuse. Il s'agit d'une structure caractéristique des adsorbants qui présentent une structure de réseau tridimensionnel. Leurs propriétés physiques leur permettent de capturer et de stocker l'eau et l'humidité dans leurs trous microscopiques, qui sont disposés en couches, pores et canaux. L'adsorption consiste en la fixation d'un élément à la surface des cavités internes d'un matériau poreux, ou en l'emprisonnement dans des nanotubes de carbone (Adjeroud-Abdellatif et al., 2020).

La capacité des *Cactaceae* à retenir l'eau dans des conditions climatiques défavorables est due à la capacité de liaison du mucilage avec l'eau. Le mucilage aide à réguler la teneur en eau cellulaire pendant la phase initiale de déshydratation (Cárdenas et al., 1997).

Le mucilage peut être utilisé comme additif épaississant dans les produits alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Il peut remplacer certains épaississants comme le carboxyméthylcellulose (CMC). Ces propriétés et applications ouvrent par conséquent des perspectives de valorisation et d'utilisation efficiente et économique de la plante (Sepulveda et al., 2003).

2.2. Composition chimique :

Le mucilage est constitué par une grande proportion de polysaccharides complexes et de divers métabolites dont les carbohydrates (glucose et le fructose) et les minéraux. Parmi les minéraux présents, le calcium et le potassium sont les plus représentés (Saenz et Montoya, 1999).

Le mucilage d'*Opuntia ficus indica* est composé de 55 résidus de sucre (Saenz et al., 2004). Ce sont des substances polymères complexes de nature glucidique, à structure très ramifiée, qui contient des proportions variables de L-arabinose, D-galactose, L-rhamnose et D-xylose, ainsi que l'acide D-galacturonique en différentes proportions (Figure 13). La structure du mucilage se présente comme une chaîne avec une répétition des motifs d'acide galacturonique liés en α (1-2) à la chaîne de n(rhamnose) dont les motifs sont lié entre eux en α (1-4) et aux chaînes latérales formés de galactose, arabinose, xylose (Saenz et al., 2004).

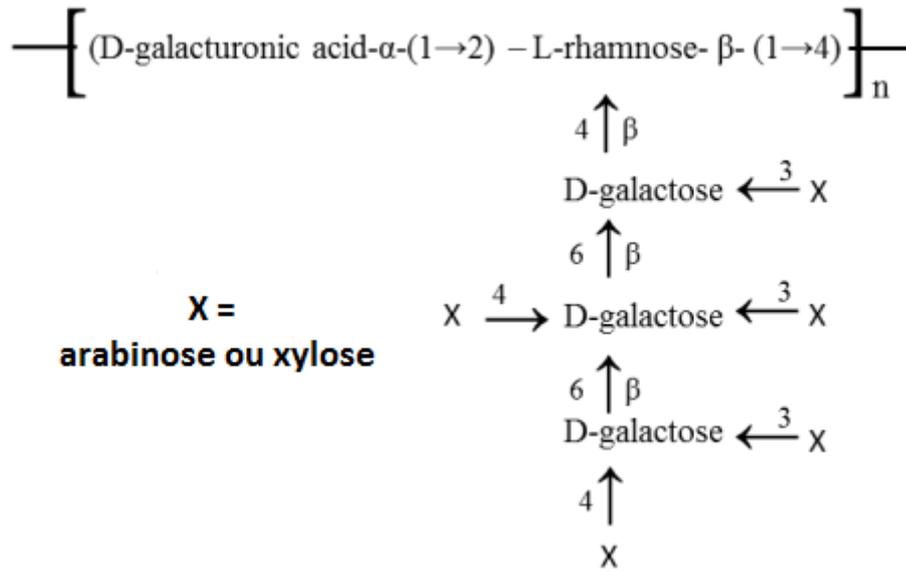


Figure 10 : Structure chimique du mucilage des cladodes du figuier de Barbarie

Le rendement en mucilage d'*Opuntia ficus indica*. Il s'est avéré être de 1,4 % à partir de cladode frais et de 17,95 % à partir de cladode séché (Naod, 2010).

La teneur en mucilage augmente de façon sensible avec l'âge des cladodes et selon les conditions du milieu. Ce composé qui règle les échanges d'eau avec l'environnement, permet aussi la mise en réserve du calcium sous forme d'oxalate (Trachenberg et Mayer, 1982).

La teneur en mucilage des cladodes de cactus est influencée par certains effets associés à la gestion de cette culture. La température du climat, l'irrigation et la pluie peuvent aussi influencer la teneur en mucilage (Saenz, 2000).

La composition en sucres du mucilage de *Opuntia ficus indica* est résumée dans le Tableau ci-dessous :

Tableau IV : Composition en sucres du mucilage extrait des cladodes de *Opuntia ficus indica* (Goycoolea *et al.*, 2003).

Composants en sucres du mucilage	Extraction du mucilage à l'éthanol (%)
Galactose	20,99
Xylose	3,06
Arabinose	17,93
Glucose	0
Rhamnose	1,75
Acide uronique	11,0
Acide galacturonique	/

CHAPITRE IV :
Extractions des
composés bioactifs des
cladodes

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à évoquer les méthodes d'extraction existantes de substances végétales d'intérêt en général, leurs principes, leurs avantages et inconvénients, ainsi que celles qui ont été appliquées à l'extraction des polyphénols et du mucilage du figuier de Barbarie selon la bibliographie existante actuellement.

1. Méthodes d'extraction des composés bioactifs (mucilage et polyphenols) des cladodes d'*Opuntia ficus indica* :

L'extraction des composés phénoliques et du mucilage est une étape très importante avant leur analyse quantitative et qualitative. Elle est influencée par la méthode d'extraction choisie en fonction des composés phytochimiques à étudier. D'autres facteurs, comme le pH, la température, le rapport quantité de matière au volume du solvant, les intervalles de temps, le nombre et les étapes d'extractions individuelles, jouent également un rôle important dans cette procédure. Des étapes supplémentaires de purification des échantillons peuvent être nécessaires en vue d'éliminer des composés tels que les cires, les graisses, les terpènes et les chlorophylles (Naczki et Shahidi, 2004).

L'extraction des composés bioactifs peut être décrite comme étant un phénomène de transfert de masse où les solides solubles, contenus dans les structures végétales, migrent dans le solvant jusqu'à l'équilibre. Il existe plusieurs méthodes d'extraction des composés bioactifs comme l'extraction conventionnelle par solvant (Manthey et Grohmann, 1996 ; Jeong et al., 2004; Anagnostopoulou et al., 2006 ; Li et al., 2006 ; Ziaur- Rehman, 2006 ; Xu et al., 2007), l'extraction par eau chaude (Xu et al., 2008), l'extraction assistée par enzymes (Li et al., 2006) et l'extraction par fluide supercritique (Giannuzzo et al., 2003).

De nouvelles techniques combinant l'extraction conventionnelle avec d'autres facteurs accélérant l'extraction (extraction par micro-ondes, extraction par ultrasons, extraction sous haute pression hydrostatique, extraction par fluide supercritique ou par eau sous critique) sont utilisées pour pallier cette dégradation (Chemat et al., 2009 ; Rawson et al., 2011).

Certains auteurs suggèrent l'utilisation d'approches combinées appliquées de manière séquentielle telles que la technologie de chute de pression instantanée contrôlée et l'extraction assistée par ultrasons (DIC-UAE) ou de manière simultanée (extraction

enzymatique assistée par ultrasons, extraction par fluide supercritique assistée par ultrasons, extraction assistée par micro-ondes et ultrasons) pour intensifier l'opération d'extraction et améliorer le rendement d'extraction.

2. EXTRACTION SOLIDE LIQUIDE

2.1. Définition

L'extraction solide-liquide est une opération de transfert de matière entre une phase qui contient la matière à extraire «solide», et un solvant d'extraction «liquide». Le but de cette opération est d'extraire et de séparer un ou plusieurs composants mélangés à un solide dans un solvant (**Herzi, 2013**). C'est une opération ancienne utilisée pour retirer des plantes et de certains organes d'animaux, des produits alimentaires, pharmaceutiques ou odoriférants, sous formes de breuvages, drogues ou parfums. Les solvants utilisés dans ces procédés de séparation des produits végétaux sont généralement l'eau, les alcools, les solvants organiques et/ou chlorés, etc.

2.2. Principe

Dans les processus d'extraction et de séparation de molécules spécifiques (molécules actives) présentes dans un milieu solide, l'opération fait souvent appel, d'un point de vue technologique, à la diffusion au sein du solide d'un fluide (liquide) porteur, dit solvant d'extraction ; l'extraction se présente ainsi comme une interaction solide – liquide. Cependant, le solvant, capable de « mettre en solution » un ou plusieurs composants solides, cristallisés ou liquides, dénommé soluté (**Mafart and Béliard, 1993**), génère une solution ou un extrait (solvant+soluté) (**Figure 14**).

Le transfert de ces molécules actives recherchées, vers le milieu extérieur a lieu grâce à une diffusion ayant pour élément moteur le gradient de concentration en soluté entre la solution au voisinage intime de la phase solide (plus concentrée) et la phase liquide. A la fin de l'opération, le système tend vers l'équilibre et la diffusion est quasi nulle. Par contre si la phase liquide est continuellement renouvelée, la diffusion se poursuit jusqu'à épuisement de la phase solide (**Dibert, 1989**).

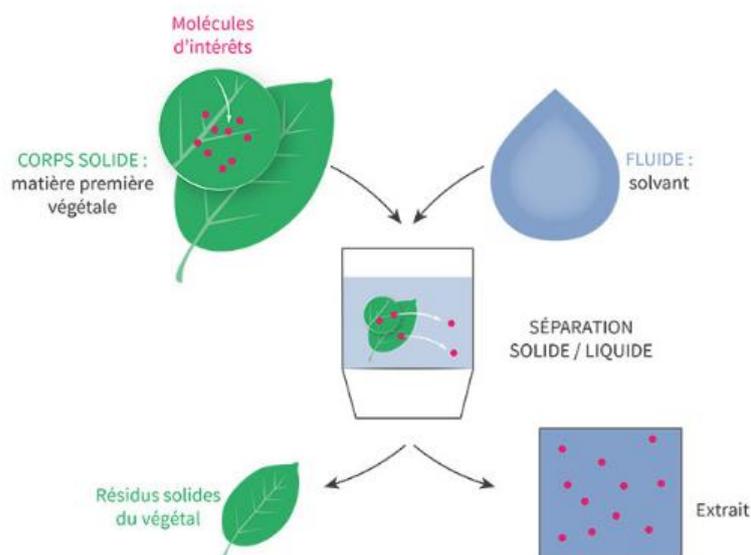


Figure 11 : Schéma générale de l'extraction solide-liquide (Anonyme 1).

3. Extraction des polyphénols :

3.1. Techniques conventionnelles :

3.1.1. La macération :

Cette technique est le plus souvent mise en œuvre avec des parties végétales (feuilles, fleur, racine, écorce...etc.) en utilisant un solvant qui peut-être de l'eau, de l'alcool et souvent une huile ou une autre matière grasse.

Elle consiste en la mise en contact du matériel végétal avec le solvant avec ou sans agitation (Handa, 2008). Généralement elle consiste surtout à laisser séjourner le broyat végétale dans un solvant pendant un certain temps qui peut aller de quelques heures à quelques jours pour extraire des principes actifs (composés phénoliques, flavonoïdes...) (Figure 15).

La macération est une extraction "à froid", ce qui ne signifie pas qu'elle s'accompagne d'un refroidissement mais tout simplement qu'elle se fait à température ambiante sans bénéficier d'une hausse de température qui accélère la plupart des phénomènes chimiques.

La dissolution est toujours plus rapide lorsque la substance solide est dispersée dans le solvant sous forme divisée (végétaux broyés, poudre...etc.) et elle peut aussi être accélérée en maintenant une agitation. A la fin du processus il est nécessaire de retirer du solvant les résidus solides, ils sont en général éliminés par filtration (Pierre et Lis, 2007).

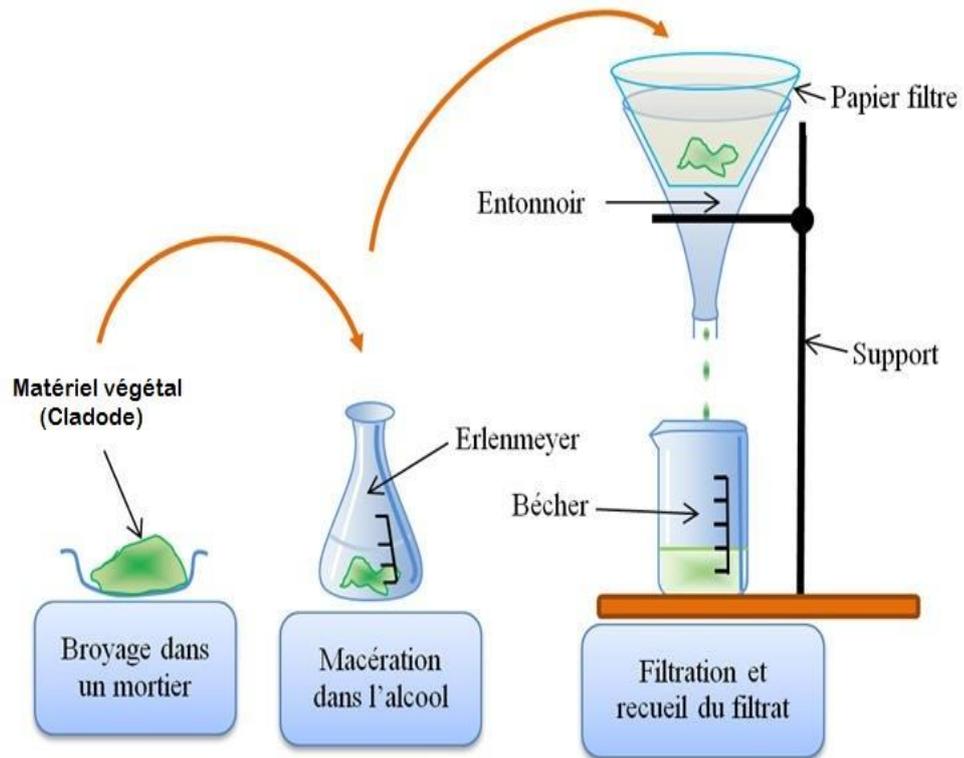


Figure 12 : Schéma générale de l'extraction par macération (Anonyme 2).

Tableau V : Extraction des polyphénols par macération

Titre	Mode opératoire	Résultats	Références
L'activité antioxydante des composés phénoliques des cladodes d' <i>Opuntia ficus-indica</i> du nord-ouest de l'Algérie	<p>L'extraction des polyphénols totaux a été réalisée avec de l'acétone - eau (70/30, v/v) par macération à température ambiante pendant 24 heures.</p> <p>Les flavonoïdes ont été extraits avec 100 mL de méthanol (MeOH) et 5 g de carbonate de calcium par ébullition pendant 1 heure.</p> <p>les tanins ont été extraits à l'aide de 200 mL d'un mélange d'acétone et d'eau (25/45, v/v) pendant 4 jours.</p>	<p>L'estimation quantitative a montré que les cladodes sont riches en polyphénols, dont la partie prédominante est représentée par des flavonoïdes (11.86 mgEC /gMS) suivie par les tannins (6.45 mg/g).</p>	<p>-DIB et al., 2013</p> <p>-Yue et Dahlgren et al., 2005</p> <p>-Dauguet et Foucher, 1982</p> <p>-Bruneton, 1999</p>
Extraction des composés phénoliques des cladodes du cactus (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	<p>Une grande quantité de (poly)phénols a été extraite à l'aide d'éthanol à 80 %.</p> <p>Une deuxième extraction à été réalisée par combinaison de solvants avec différentes polarités (méthanol, acétone et eau), en premier par du méthanol/eau (50/50) puis le résidu a été soumis à une seconde extraction d'acétone/eau (70/30) et une troisième extraction a été réalisée en agitant le résidu dans 50 mL d'eau distillée pendant 30 min.</p>	<p>La combinaison de solvants avec différentes polarités a favorisé l'extraction des flavonoïdes et la capacité antioxydante (DPPH et ABTS radicaux).</p> <p>L'extrait le plus riche en flavonoïdes est celui obtenu par extractions successives.</p>	<p>De Santiago et al., 2021</p>

3.2. Techniques innovantes :

3.2.1. Extraction assistée par ultrasons (EAU) :

a. Définition :

Les ultrasons sont des ondes vibrationnelles mécaniques de fréquence allant de 20 à 100 kHz pour l'extraction des composés bioactives (**Ghitescu et al., 2015**).

L'extraction assistée par ultrasons est une technologie émergente utilisée pour l'extraction des composés naturels. Ces composés sont souvent extraits par la méthode conventionnelle qui dure de nombreuses heures. L'utilisation des ultrasons permet d'effectuer des extractions en quelques minutes avec une reproductibilité élevée, ce qui simplifie l'opération et donne une plus grande pureté au produit final (**Chemat et al., 2011**).

b. Principe d'extraction par Ultrasons (US) :

L'extraction par US consiste à immerger la matière végétale dans un solvant, le tout sera soumis à l'action des ultrasons, elle peut se faire soit par sonde soit par bain à ultrasons (**Chemat et al., 2011**).

Les ultrasons interagissent avec le matériel végétal et modifient ses propriétés physiques et chimiques. Un effet de cavitation (**Figure16**) est créé, ce qui facilite la libération des composés extractibles et améliore le transfert de matière en perturbant les parois cellulaires des plantes (**Chemat et al., 2011**).

Les ondes sonores peuvent se propager dans une matière et elles impliquent des cycles d'expansion et de compression lors de leur propagation dans le milieu (**Luque-Garcia et Luque de Gastro, 2003**) ; des bulles sont formées de cette différence de pression et la répartition de ces cycles va conduire à leur implosion. Ce phénomène est appelé la cavitation (**Dolatowski et al., 2007**).

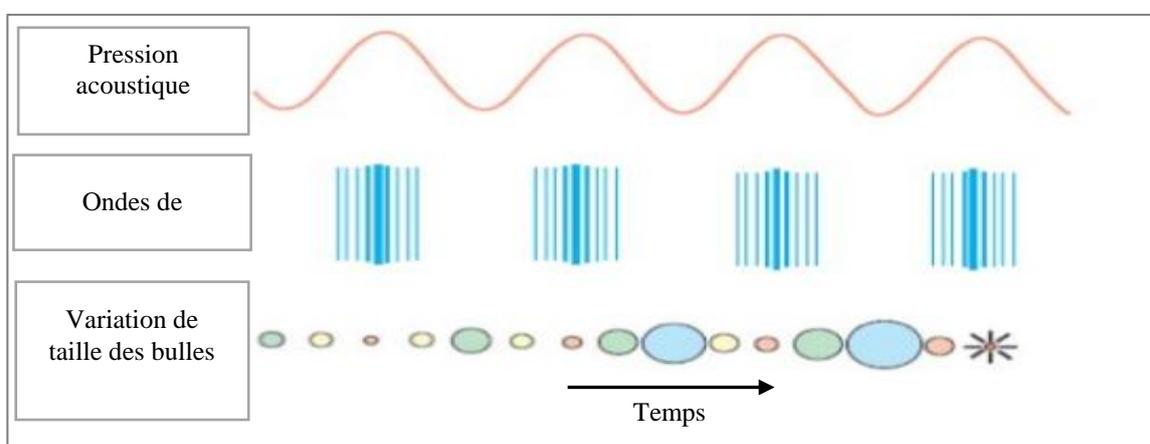


Figure 13 : Représentation schématique du phénomène de cavitation (Draye *et al.*, 2009).

La cavitation décrit l'oscillation non linéaire d'une bulle de gaz et/ou de vapeur dans un liquide (Leighton, 2007), elle peut améliorer la pénétration du solvant et détruit les membranes cellulaires lorsque des intensités élevées sont appliquées (Li *et al.*, 2004). (Figure 17).

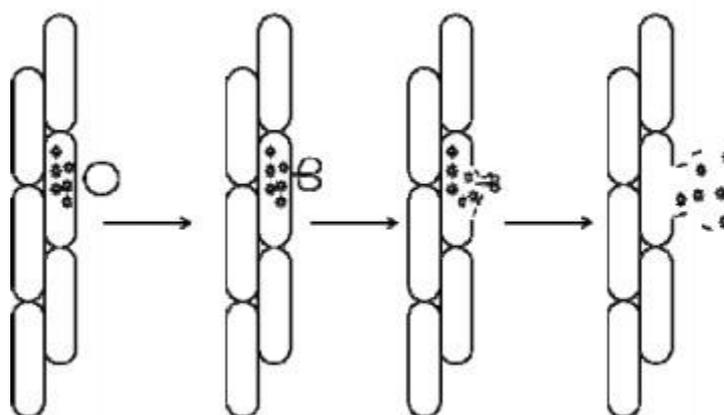


Figure 14 : Evolution d'une bulle de cavitation à proximité d'une cellule végétale (Sébastien, 2010)

c. Paramètres influant l'extraction assistée par ultrasons :

Le choix approprié du solvant et de la température permet une meilleure extractibilité des composés phénoliques. De plus, l'optimisation des paramètres d'extraction assistée par ultrasons tels que la fréquence, la puissance des ultrasons, le temps d'extraction ainsi que la distribution d'ondes ultrasonores permet aussi d'augmenter le rendement d'extraction (Wang et Weller, 2006).

d. Avantages et inconvénients de l'extraction assistée par ultrasons

L'utilisation des ultrasons favorise la rupture de la paroi cellulaire, avec l'augmentation ultérieure de la pénétration du solvant et accélère la diffusion des molécules ce qui améliore l'extraction (Medina-Torres *et al.*, 2017).

L'un des avantages de l'extraction assistée par ultrasons est la température modérée de travail qui permet une réduction de la consommation d'énergie et une préservation de l'intégrité des substances bioactives sensibles à la chaleur (Pradal, 2016), en plus de l'amélioration du rendement de l'extraction, c'est-à-dire une extraction plus courte et plus

efficace (Goula, 2013). Par contre, du point de vue inconvénients, cette méthode ne permet pas de renouveler le solvant pendant le processus d'extraction (Penchev, 2010).

Tableau VI : Extraction des composés phénoliques par ultrasons

Titre	Mode opératoire	Résultats	Références
Identification de quelques <i>Opuntia</i> spp. de deux régions algériennes et l'extraction assistée par ultrasons de leurs composés phénoliques.	L'extraction des composés phénoliques a été réalisée avec l'éthanol-eau (50 %, v/v) et soumis à une ultra sonication ($42 \pm 2,5$ KHz).	La teneur des polyphénols totaux a initialement augmentée et a atteint des valeurs maximales à 30 et 60 min, et a une température optimale de 60 °C. Le rendement en PTC le plus élevé a été enregistré pour l'espèce OFI, suivie des espèces OM et OA.	Mahdeb et al., 2021

3.2.2. Extraction accélérée par solvant ou extraction par liquide pressurisé

a. Définition et principe

L'extraction accélérée par solvant est une technique reconnue pour l'extraction des échantillons solides et semi-solides. Les systèmes d'Extraction Accélérée par Solvant (EAS) (Thermo Scientific™ Dionex™ ASE™ 150 et 350) utilisent l'association de la haute température et de la haute pression pour améliorer l'efficacité des protocoles d'extraction. Il en résulte des temps d'extraction plus courts et une réduction significative des volumes de solvant utilisés. Le contrôle précis de la température de la cellule d'extraction garantit une excellente reproductibilité et l'automatisation complète améliore la productivité du laboratoire. La technique établie d'extraction accélérée par solvant est radicalement plus rapide que le Soxhlet, la sonication, ou toute autre technique et nécessite moins de solvant et de main d'œuvre (Anonyme 3, Richter et al., 1996).

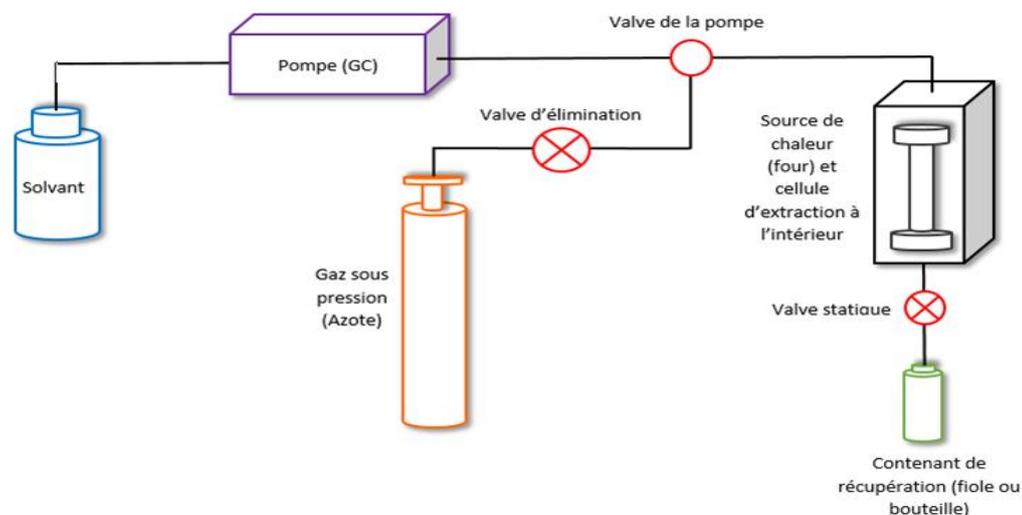


Figure 15 : Montage de l'extraction par liquide pressurisé (Anonyme 3).

Tableau VII : Extraction des polyphénols par méthode d'extraction accélérée par solvant.

Titre	Mode opératoire	Résultats	Références
La composition approximative des acides phénoliques et la caractérisation des flavonoïdes de deux espèces commerciales et de huit espèces sauvages d' <i>Opuntia spp.</i>	L'extraction des acides phénoliques et des flavonoïdes a été réalisée à l'aide du système d'extraction accélérée par solvant (ASE 200) (Dionex, Danemark) (Figure 19). Les flavonoïdes ont été récupérés et identifier avec 70 % de méthanol (HPLC) et les acides phénoliques à l'aide de 80 % de méthanol contenant 1 % d'acide acétique (HPLC).	Concernant la composition, les espèces sauvages avaient les teneurs les plus élevées des acides phénoliques tandis que les espèces commerciales avaient les teneurs les plus élevées en flavonoïdes. Six acides phénoliques (l'acide gallique, coumarique, 3,4-dihydroxybenzoïque, 4-hydroxybenzoïque, l'acide férulique et l'acide salicylique), ont été identifiés et cinq flavonoïdes (iso-quercitrine, isorhamnétine-3-O-glucoside, nicotiflorine, rutine et narcissine) ont été trouvés dans toutes les variétés.	Astello Garcia et al., 2015



Figure 16 : Le système Dionex ASE monoposte pour laboratoires traitant peu d'échantillons (**Anonyme 3**).

4. Extraction des mucilages

4.1. Techniques conventionnelles

4.1.1. Macération

Tableau VIII : Extraction du mucilage par macération

Titre	Mode opératoire	Résultats	Références
Extraction et caractérisation du mucilage d'opuntia spp.	l'extraction du mucilage à été réalisé avec un rapport tampon/eau (1:51:7), température d'extraction (40 ± 2 et 16 ± 2 °C) et temps d'extraction (4, 8 et 16 h).	Le rendement moyen de mucilage après séchage était de 1,48% sur une base de poids frais (pf) et de 19,4 % sur une base de poids sec (ps). Concernant la composition, le mucilage séché contenait en moyenne 5,6 % d'humidité, 7,3 % de protéines, 37,3 % de cendres, 1,14 % d'azote, 9,86 % de calcium et 1,55 % de potassium.	Sepúlveda et al., 2007
Effet d'un coagulant naturel extrait du cladode d'Opuntia ficus-indica sur l'électrocoagulation-électroflotation dans le processus de traitement des eaux	Extraction du mucilage par macération de la matière broyée dans de l'eau distillée et par agitation sur une plaque d'agitation (Velps Scientifica, France) à des temps d'extraction variés (60, 120 et 180 minutes), et à deux températures différentes : température ambiante (20-22 °C) et 80 °C.	Les résultats ont montré que l'augmentation de la température de 20 à 80 °C a un effet positif sur le rendement d'extraction. Le rendement d'extraction conventionnel a été amélioré après 180 min par 8,33 % (valeur optimale $54,16 \pm 1,54\%$ à 80 °C) par rapport à la valeur optimale de 45,83 % obtenue à température ambiante (20-22 °C).	Adjeroud Abdellatif et al., 2020

4.2. Techniques innovantes

4.2.1. Extraction assistée par microondes (EAM)

a. Définition

L'extraction assistée par microondes est un processus par lequel l'énergie microonde accélère l'extraction. Ce traitement accélère la rupture des cellules en provoquant une augmentation rapide de la température et de la pression interne dans les parois des cellules végétales (Inoue *et al.*, 2010 ; Jawad et Langrish, 2012).

b. Principe

Au cours du traitement par microondes (**Figure 20**), le chauffage provoque la rupture des liaisons hydrogène faibles par la rotation dipolaire des molécules. Une quantité considérable de pression s'accumule à l'intérieur du biomatériau, qui modifie les propriétés physiques des tissus biologiques et améliore la porosité de la matrice biologique. Ceci permet une meilleure pénétration du solvant d'extraction à travers la matrice (Kratchanova *et al.*, 2004 ; Yeoh *et al.*, 2008) ce qui facilite l'extraction.

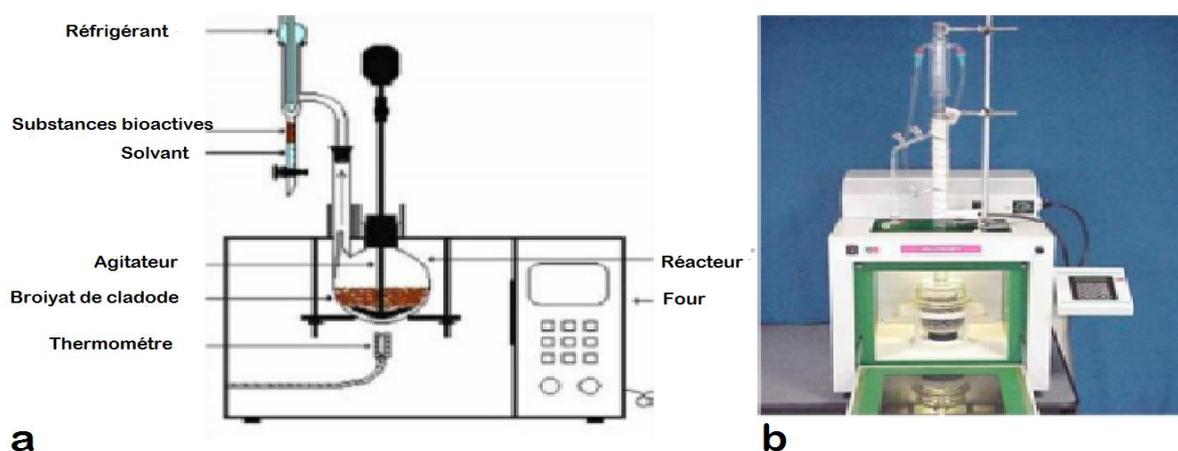


Figure 17 : (a) : Montage d'extraction assistée par microonde, (b) : appareillage de l'extraction assistée par microonde

c. Paramètres de l'EAM

Les principaux paramètres de l'extraction assistée par micro-ondes sont : le type de solvant, la puissance microondes et le temps d'extraction.

d. Avantages et inconvénients de l'extraction assistée par microonde

L'extraction par micro-onde présente plusieurs avantages, à savoir : la rapidité (temps d'extraction d'ordre de secondes), la réduction de la consommation du solvant et l'amélioration du rendement d'extraction (Grigonis *et al.*, 2005 ; Wang et Waller, 2006).

Tableau IX : Extraction du mucilage par microondes

Titre	Mode opératoire	Résultats	Références
Effet du mucilage d' <i>Opuntia ficus indica</i> sur l'élimination du cuivre de l'eau par technique d'électrocoagulation-électroflottation	Les cladodes ont été coupés en petits morceaux et mélangés à une solution d'eau distillée (rapport masse/volume de 1:1) pour l'extraction assistée par micro-ondes réalisée dans une micro-onde domestique (2,45 GHz, Samsung Modèle NN-S674MF, Kuala Lumpur, Malaisie)	Le rendement était d'environ 18,8% ± 0,2 de poudre de mucilage sec pour 100 g de matière sèche. La procédure d'extraction a été effectuée selon une version modifiée de Cárdenas et al., 1997 et Felkai-Haddache et al., 2015 .	Adjeroud Abdellatif et al., 2018
Optimisation de l'extraction des mucilages de cladodes d' <i>Opuntia ficus indica</i> par microondes	l'extraction a été réalisée dans un four à microondes domestique (2,45 GHz, modèle Samsung NN-S674MF). La puissance des microondes était réglable linéairement de 100 à 1000 W. Le four a été modifié afin de condenser dans l'échantillon les vapeurs générées pendant l'extraction. Pour l'EAM, l'échantillon a été placé dans une fiole volumétrique de 500 mL.	Les résultats indiquent que les conditions d'extraction optimales ont été déterminées comme suit : puissance des micro-ondes : 700 W ; temps d'extraction : 5,15 min et rapport eau/matière première : 4,83 mL/g à pH 11 fixe. Dans ces conditions d'extraction optimales, le rendement en mucilage s'est avéré être égale à 25,6 %. L'intérêt de la technique dans ce travail réside principalement dans un gain de temps considérable ce qui est un facteur majeur pour les industriels.	Felkai haddache et al., 2016

5. Comparaison entre les différentes méthodes d'extraction du mucilage et des composés phénoliques

- La macération par l'éthanol et par l'acétone sont les meilleures techniques d'extraction des polyphénols totaux et des flavonoïdes alors que la décoction aqueuse est préférable pour l'extraction des tanins condensés (**Mahmoudi et al., 2013**).
- **Naima et al., 2005** ; **Quy Diem Do et al., 2014** indiquent que la quantité des composés phénoliques et des flavonoïdes extraits par macération dans le méthanol aqueux est la plus élevée que celles des deux autres méthodes (infusion et décoction).
- L'EAU améliore le rendement d'extraction en composés phénoliques de 14.6 % comparée à l'Extraction conventionnelle, comme signalé par **Rodriguez-perez et al., 2015**.
- Les ultrasons ont l'avantage de réduire considérablement le temps d'extraction et d'augmenter les teneurs en composés phénoliques (**Bourgou et al., 2016**).
- **Carrera et al., 2012** ont rapporté que l'EAU prenait 10 fois moins de temps que la macération pour l'extraction des polyphénols à partir de raisins.
- **Dahmoune et al., 2013** ont comparé 3 méthodes d'extraction des composés phénoliques des écorces de citron : ECS, EAU et EAM. Les auteurs ont rapporté qu'il n'y a pas de différence significative entre les teneurs en PT des extraits obtenus par les différentes méthodes d'extraction par contre, l'extrait obtenu par EAM présente l'activité antioxydante la plus élevée, suivie par ECS et EAU.
- **Hayat et al., 2009** ont comparé ECS, EAU, EAM pour l'extraction des acides phénoliques des écorces de mandarine. L'EAM donne la teneur la plus élevée en acide phénolique.
- Les EAU sont plus adaptées pour l'extraction de molécules thermosensibles car la température d'extraction utilisée est plus basse que celle de EAM, et cette dernière consomme jusqu'à 5,7 fois plus d'énergie que EAM (**Pradal, 2016**).
- D'après **Jacotet Navaroo et al., 2015**, l'extraction des polyphénols totaux de Romarin par EAM donne le rendement le plus élevé comparativement à la méthode EAU.

- Dans le travail de **Adjeroud Abdellatif et al., 2020** le rendement d'extraction du mucilage a été amélioré et les deux paramètres : le temps d'extraction (min) et l'amplitude (%), ont été optimisés après l'utilisation de l'EAU par rapport à la méthode d'extraction conventionnelle.
- Dans le travail de **Felkai-Haddache et al., 2015** les rendements maximaux d'extraction variaient de 5,38 à 7,60 % pour l'EAM et de 4,22 à 4,63 % pour l'extraction conventionnelle (EC), par rapport à 100 g de cladodes séchés. En considérant le mucilage brut le rendement d'extraction indique clairement que l'EAM est plus efficace pour l'extraction des molécules de polysaccharides que l'EC, et qu'elle devrait être préférée en raison de son temps d'extraction et de la qualité de l'extractibilité.

CHAPITRE V :
Valorisation des
substances bioactives du
cladode du figuier de
Barbarie

Dans ce chapitre nous allons développer les utilisations potentielles du mucilage et des polyphénols contenus dans les cladodes du figuier de Barbarie ainsi que d'autres intérêts et les domaines d'application correspondants.

Pour l'étude des extraits des composés bioactifs des cladodes du figuier de Barbarie, il existe une variété de moyens utilisés pour tirer bénéfice et exploiter leurs composants, que ça soit pour les utilisations en industries agroalimentaire, cosmétologique, médicales, ou bien pour le traitement des eaux usées.

Les cladodes sont une riche source de substances bioactives et fonctionnelles qui en font des candidats importants pour la production d'aliments sains.

1. Valorisation et utilisation des polyphénols

1.1. Utilisation médicinale

Plusieurs, sinon toutes les espèces d'*Opuntia* contiennent des quantités élevées de composés phénoliques avec des propriétés antioxydantes. Un groupe de recherche a rapporté que OFI atténue la stéatose hépatique et le stress oxydatif chez les rats obèses Zucker (fa/fa) (Morán-Ramos S et al., 2012).

Les contenus phénoliques et flavonoïdes de l'OFI protègent de manière significative les lipides et les protéines contre les modifications oxydatives par l'inhibition des réactions en chaîne des radicaux libres ou par l'amélioration de l'activité antioxydantes endogène (Alimi H, et al 2013 cité par Angulo Bejarano et al., 2014).

L'OFI a été utilisée pour la biosynthèse de nanoparticules colloïdales à base d'argent. La plante contient une large gamme de composés phénoliques sous forme de flavonoïdes et de terpénoïdes. A part ceux-là, la quercétine, généralement présente à haute concentration, est responsable de la formation de ces nanoparticules. En outre, les nanoparticules ont montré une remarquable activité antibactérienne. Ainsi, les nanoparticules se sont avérées être de meilleurs systèmes d'administration de médicaments en raison de leur biocompatibilité et leur nature biogénique (Gade et al., 2010).

Les plantes du Nopal présentent des niveaux élevés de composés phénoliques, qui sont associés à la prévention des métastases cancéreuses (Shahidi F, 2002).

L'utilisation potentielle des polyphénols totaux et des flavonoïdes des cladodes d'OFI comme agent anticancéreux semble augmenter rapidement au cours de la dernière

décennie et cela pour leurs propriétés anticancérigènes (effets sur le cancer du sein humain) (Yoon JA, 2009 cité par Angulo Bejarano et al., 2014).

Les flavonoïdes présents dans les cladodes ont montré qu'ils possèdent des propriétés antioxydants (Gil et al., 2000) et antimutagènes (Kuti, 2004), Parmi ces flavonoïdes, la quercétine 3-methyl, présente dans les fruits et cladodes ; apparaît comme un potentiel neuroprotecteur. (Dok-Go et al., 2003 cité par Feugang, 2006).

1.2. Intérêts économiques et industrielle

Les polyphénols détectés dans l'extrait de cladodes de l'*Opuntia ficus-indica*, étaient principalement responsables des propriétés antioxydantes, comme le montre la forte corrélation entre les classes phénoliques et les scores antioxydants (Gabriele Rocchetti et al., 2018). La capacité antioxydante des polyphénols est utilisée dans l'alimentation pour lutter contre la peroxydation lipidique et ainsi permettre une meilleure stabilisation des denrées alimentaires.

Guevara-Arauz et al., 2011 (cité par Angulo Bejarano et al., 2014) ont évalué l'activité biofonctionnelle des barres et tortillas enrichies en Nopal après leur prise par des volontaires sains. L'addition du Nopal a amélioré la teneur en polyphénols dans les deux tortillas et barres et le statut oxydatif humain a augmenté. De plus, la concentration des triglycérides, le glucose et le cholestérol a diminué dans le plasma. De même, la supplémentation de Nopal a amélioré l'activité de l'eau, suggérant un risque moindre de croissance microbienne, aussi la réactivité enzymatique et chimique a diminuée, ce qui offrirait une meilleure conservation des produits pendant le stockage.

Les cladodes dont les teneurs en polyphénols et tanins sont relativement peu élevés, contribuent déjà à la production de viande et lait des élevages modernes et améliore la digestion (Stintzing et al., 2005).

La présence de composés phénoliques et d'activités antioxydantes *in vitro* dans des extraits de cladodes de cactus pourraient recommander leurs nouvelles applications au niveau industriel dans le domaine des produits nutraceutiques, aussi en les incorporant éventuellement dans des aliments, des cosmétiques ou des produits pharmaceutiques (Gabriele Rocchetti et al., 2018).

Toutefois, Bouaouine et al., 2018 rapportent que la capacité des composants du cladode d'agir comme biocoagulant est peut-être due à certains composés phénoliques

(tanins). Bien que toutes les recherches encouragent l'application à l'échelle industrielle mais actuellement, ça n'a pas encore vu le jour en raison de l'accessibilité de coagulants chimiques dans le monde (Aluminium). Néanmoins, l'utilisation de l'*Opuntia* comme bio-coagulant intensifie le traitement sans surcoût notable

2. Valorisation et utilisation du mucilage

2.1. Utilisation industriel et économique

Les mucilages qui constituent un apport en fibres alimentaires, présentent également un intérêt pour l'industrie alimentaire grâce à leur propriétés gélifiantes et épaississantes (Trachtenberg et Mayer, 1981; Sepúlveda et al., 2007). Le mucilage contenu possède des propriétés visqueuses et est utilisé en industrie alimentaire (Saenz et al., 2006).

Complétant ces travaux, Medina-Torres et al., 2000 ajoutent que ces polysaccharides (ou mucilage) en solution dans l'eau à 10 % et le xanthane à 2% ont des propriétés rhéologiques comparables. A une concentration de 5% et à une température de 35°C la solution tend fortement vers la formation d'un gel comme c'est le cas pour les i- et j-carraghénane (Medina-Torres et al., 2003).

Beaucoup de ces polysaccharides, comme ceux d'*Opuntia ficus-indica*, ont été utilisées pour ajuster et améliorer les propriétés rhéologiques de certains produits en industries agro-alimentaires. Ces polysaccharides sont devenus courants dans la technologie alimentaire, non seulement pour leur épaisseur et/ou leurs propriétés gélifiantes, mais aussi comme agents de capture qui retiennent l'humidité et empêchent son évaporation à partir de denrées alimentaires, comme mousses et émulsions stabilisantes, agents d'enrobage dans la confiserie et aliments frits, adhésifs dans les glaçages de boulangerie, agents de clarification dans le bière et le vin, agents opacifiants dans les jus, agents floculants dans le vin, agents d'encapsulation en poudre d'arômes fixes ou certains huiles, ainsi que comme substituts de graisse dans la viande et les produits laitiers (Felkai-Haddache et al., 2015).

Les mucilages peuvent constituer un film d'enrobage comestible (emballage) de qualité appréciable, comme l'a montré Del-Valle et al., 2005, après des essais de conservation des fraises.

D'autres travaux qui ont abordés l'effet des mucilages sur les émulsions (Rwashda cité par Garti, 1999) ont montré qu'ils stabilisaient les émulsions huiles/eau. Adsorbés à

l'interface eau-huile ils ne modifient pas de façon sensible la viscosité du système, et ne provoquent pas de floculation. **Garti et Leser, 2001** cités par le même auteur, ont précisé plus tard que le mucilage d'*Opuntia ficus indica* a une bonne capacité émulsifiante et stabilisante, s'il est utilisé dans des émulsions eau/huile diluées. Alors que les travaux d'**Espinosa, 2002** sur les propriétés moussantes ont montré que l'addition de 0,5 à 0,8% de mucilage a un effet stabilisant sur les mousses d'œufs et réduit au minimum la synérèse. Son addition limite aussi la cristallisation et peut former des gels (**Anon, 1991 cité par Saéñz et al., 2004**).

Mc Carthy cité par Cardenas et al., 1997 qui a observé des propriétés liantes des arômes par les mucilages, prévoit même une possibilité d'utilisation comme fixateurs d'arômes.

Le mucilage contribue par un apport calorique de 4cal/g. Cette fraction qui est fermentée à 100 %, contribue ainsi au transit intestinal (**Pak, 1996 cité par Saenz et al., 2004**).

Ainsi, de larges possibilités d'utilisation de l'*Opuntia ficus indica* sont ouvertes grâce aux cladodes par les procédés d'extraction du mucilage. Leur emploi s'est diversifié grâce à leurs propriétés épaississantes.

2.2. Utilisation environnementale

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**).

L'utilisation des mucilages comme agent de purification de l'eau selon **Saéñz et al., 2004** citant une récente étude menée à Cuba par **Lopez, 2000**. Ce traitement permet aussi d'éliminer les métaux (Fe_2^{++} , Al_3^+ , Mn_2^+), les coliformes totaux, sans laisser d'odeur désagréable. Les paramètres : turbidité (NTU), couleur et l'index de Willcom confirment le rôle clarifiant des mucilages.

Plusieurs auteurs ont reporté l'efficacité du mucilage d'*Opuntia ficus-indica* pour l'activité antimicrobienne, pour la réduction des métaux (As, Cd, Cu et Fe), pour l'élimination de colorants, ainsi que pour l'élimination de la turbidité (**Butticeet al., 2010 ; Fox et al., 2012 ; Torres-Bustillos et al., 2013**). Ces travaux considèrent que le mucilage

d'OFI a le potentiel de remplacer le Fe ou l'Al dans le processus de coagulation–floculation, et donc peut être utilisé comme coagulant naturel afin de remplacer les floculants chimiques conventionnellement utilisés en industries.

Ce sont les polysaccharides qui composent le mucilage qui agissent comme adsorbants ou biocoagulants dans le traitement de l'eau (Miller *et al.*, 2008), notamment par les groupes carboxyles, hydroxyles, sulfates, phosphates, aldéhydes, cétones et autres groupes chargés, comme l'acide carboxylique (Barka *et al.*, 2013).

La structure extrêmement poreuse du mucilage permet de capturer et stocker l'eau dans des cavités microscopiques. C'est une structure caractéristique des adsorbants qui possèdent une structure de réseau tridimensionnelle (Adjeroud-Abdellatif *et al.*, 2020).

2.3. Utilisation cosmétologique

Cependant, les Indiennes préparaient du savon et des onguents à base de mucilage des raquettes et de jus des figues de Barbarie pour soigner leurs mains malmenées par les rudes travaux. Elles préservaient de la même manière leur visage agressé par le soleil (Bhira, 2012).

Le mucilage du cactus peut trouver des applications dans les cosmétiques et les produits pharmaceutiques (Saenz *et al.*, 2000).

Le mucilage des cladodes est utilisé dans la fabrication des shampoings, des assouplissants des cheveux, des crèmes dermiques et des laits hydratants. Il est également utilisé depuis longtemps par les femmes rurales au Maroc pour assouplir leurs cheveux (Fernandez *et al.*, 1990).

2.4. Utilisation médicinale

D'après Galati *et al.*, 2001, en recouvrant la surface des muqueuses gastriques, le mucilage stimule la réponse des muqueuses pour la synthèse de mucus (pansement gastrique) et parvient à brider la production excessive d'acidité et préserve la muqueuse gastro-intestinale.

Cet effet tampon tempère la naissance des colites, ces douloureuses inflammations du colon éprouvées par les intestins fragiles (Schweizer, 1997).

Le rôle des polysaccharides des cladodes dans le secteur des médicaments est intéressant comme la réduction du cholestérol et son action préventive des diabètes et les thérapies adipeuses (Boutakiout *et al.*, 2015).

Certaines études ont déjà révélés que la présence de composés tels que l'arabinose, le xylose, le fructose, le glucose, l'acide galacturonique et le rhamnose présentent divers propriétés fonctionnelles, parmi lesquelles des effets protecteurs contre les dommages induits par H₂O₂, piégeage des radicaux libres, anti-inflammatoire et activité antitumorale, effets hypolipémians et activité cicatrisante (**Zhao M et al., 2007 ; Zhao LY et al., 2011 cité par Angulo Bejarano et al., 2014**).

CONCLUSION

Conclusion

Aujourd'hui, le monde semble de plus en plus intéressé par les avantages des aliments et a commencé à regarder au-delà de la nutrition de base, en prenant en compte les avantages des denrées alimentaires pour la prévention des maladies.

Le Figuier de Barbarie présente spontanément ou faisant partie de programme de plantations, a été trop longtemps négligé dans notre pays, et est entrain de susciter ces dernières années l'intérêt de beaucoup d'agriculteurs, de spécialistes, de chercheurs scientifiques, et notamment des autorités étatiques vu l'importance économique qu'elle peut engendrer. De plus, sa croissance rapide, ses besoins en eau moindres et son adaptation aux sols pauvres en nutriments ont fait du figuier de Barbarie une culture bien en vue dans le monde entier.

Dans le cadre de la valorisation du figuier de Barbarie, à travers ce travail nous sommes intéressées à la cladode du figuier de Barbarie tout en essayant d'apporter les meilleures conditions d'extraction des composés phénoliques et des mucilages, à travers les travaux présentés nous avons conclu que les méthodes innovantes sont les plus efficaces pour l'extraction des composés bioactifs, car elles permettent d'améliorer le rendement et de réduire le temps d'extraction.

L'utilisation du mucilage et des polyphénols comme alternative de valorisation d'une partie des composants de cette plante compte tenu de leur valeur biologique, médicinal et alimentaire ; peut s'avérer d'un grand intérêt, dans la mesure où l'on s'oriente de plus en plus vers la valorisation de ces substances.

À l'avenir, la diminution des ressources en eau et la désertification mondiale pourraient même augmenter l'importance des *Opuntia* spp. en tant que système de production alimentaire efficace comprenant à la fois des fruits et des légumes. En Algérie le Nopal est pratiquement délaissée pourtant cette source de richesse à une véritable valeur ajoutée qui peut constituer un créneau d'investissement à part entière. Dans ce sens, il existe aujourd'hui une réflexion en investissement pour révolutionner le secteur agricole liée à la filière du figuier de Barbarie dans le pays. Des efforts sont apparus et sont entrain de voir le jour sur le plan agroalimentaire (sociétés privées et coopératives, station de culture à Souk-Ahras, et potentiels d'employabilité pour les habitants locaux...).

Le présent travail peut s'avérer utile pour aider les futures chercheuses à connaître les différentes méthodes d'extraction existantes et les plus convenables pour l'extraction du mucilage et des composés phénoliques du figuier de Barbarie. En outre ce travail montre aussi les différents cas d'application dans différents domaines ce qui rentre dans le cadre de la valorisation de la plante.

Liste des références

A

Abidi S., Ben Ssaïem H., Vasta V., Priolo A., 2009. Supplementation with barley or spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) cladodes on digestion, growth and intramuscular fatty acid composition in sheep and goats receiving oaten hay. *Small Rumin. Res.* 87, 9–16

Adjeroud Abdellatif N., Belkacem M., Leclerc J.P., Madania K., Dahmoune F. 2015. Improvement of electrocoagulation–electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice. *Separation and Purification Technology* 144. 168–176

Adjeroud Abdellatif N., Elabbas S., Belkacem M., Hammouid Y., Felkai-Haddache L., Reminia H., Leclerc J.P., Madania K. 2018. Effect of *Opuntia ficus indica* mucilage on copper removal from water by electrocoagulation-electroflotation technique. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 811. 26–36

Adjeroud-Abdellatif N., Hammoui Y., Boudria A., Agab S., Choulak F., Leclerc J-P., Merzouk B., Madani K., 2020. Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus indica* cladode on electrocoagulation-electroflotation water treatment process. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* P 4.

Alimi H, Hfaeidh N, Bouoni Z, Sakly M, Rhouma KB. 2013 Ameliorative effect of *Opuntia ficus indica* juice on ethanol-induced oxidative stress in rat erythrocytes. *Exp Toxicol Pathol.* 65: 391-6.

Amin E.S., Awad O.M., El-Sayed M.M.,1970. *Carbohydrate Research*, 15 159-161.

Anagnostopoulou M.A., Kefalas P., Kokkalou E., Assimopoulou A.N., Papageorgiou F.P., 2005. Analysis of antioxidant compounds in sweet orange peel by HPLC–diode array detection–electrospray ionization mass spectrometry. *Biomedical Chromatography.* 19, 138-148.

Anderson E.F., 2001. *The Cactus Family*, Timber Press, Portland, p. 15–72

Angulo-Bejarano P.I., Martínez-Cruz O., and 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.

Angulo-Bejarano P.I., Paredes-López, O. 2011. Development of a regeneration protocol through indirect organogenesis in prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill). *Sci Hort.* 128 : 283-8.

Astello-Garcia M.G, Cervantes I., Nair V., Santos-Diaz M.S., Reyes-Aguero A., Guéraud F., Negre-Salvayre A., Rossignol M., Cisneros-Zevallos L., Barba de la Rosa A.P. 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.

Araba M. 2009. Le cactus *opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. *Agriculture durable en région Méditerranéenne AGDUMED.* Rabat. Maroc. 215-223

Ayadi M.A., Abdelmaksoud W., Ennouri M., Attia H., 2009. Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making, *Industrial Crops and Products* 30 40–47.

B

Barka N., Ouzaouit 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.

Bayar N., Bouallegue T., Achour M., Kriaa M., Bougatef A., Kammoun R. 2017. Ultrasonic extraction of pectin from *Opuntia ficus-indica* cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties. *Food Chemistry.* 235: 275-282.

Benattia F.K. 2017. Analyse et application des extraits de pépins de figues de barbarie. Thèse de doctorat en Chimie Université Aboubekr Belkaid- Tlemcen. pp. 152.

BEN-THLIJA A. Nutritional value of several *Opuntia* species. Master Thesis, Oregon State University, Corvallis/USA, 1987; cit. in: Nefzaoui, A., Ben Salem,

H., Forage, fodder, and animal nutrition, in: Nobel, P. S. (Ed.), *Cacti. Biology and Uses*, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, 2002, p. 199–210.

Bhira O. 2012. Potentialités thérapeutiques d'*Opuntia ficus-indica* au maroc et en tunisie. Thèse du doctorat université Mohammed faculté de médecine et de pharmacie Rabat, Maroc. pp.83.

Bouaouine O., Bourven I., Khalil F., Baudu M. 2018. Identification of functional groups of *Opuntia ficus-indica* involved in coagulation process after its active part extraction. Environmental Science and Pollution Research. 25: 11111-11119.

Bourgou S., Serairi Beji R., Medini F., et 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 science, Agriculture and Biotechnology, 28 (12) :1649-1654.

Boutakiout A., Elothmani D., Mahrouz M., Hanine H., 2015. Phytochemical constituents and *in vitro* radical scavenging activity of different cladodes juice of cactacea cultivars from different areas in Morocco. 3: 56-64.

Bruce E Richter., Brian A Jones., John L Ezzell and Nathan L Porter., 1996. Accelerated Solvent Extraction: A Technique for Sample Preparation. Anal. Chem. 68, 1033-1039.

Bruckner H., Westhauser T., 2003. Chromatographic determination of L- and Damino acids in plants. Amino Acids, 24, 43–55.

Bruneton J., 1999. Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales, 3ème éd. Lavoisier, Paris. 1120 p.

Bruneton J., 2009. Pharmacognosie : phytochimie, plantes médicinales. 4ème édition, Tech & Doc, Paris. pp.262.

Buttice A.L., Joyce M Stroot., Daniel V Lim., Peter G Stroot and Norma A., 2010. Removal of sediment and bacteria from water using green chemistry. Environ. Sci. Technol. 44: 3514–3519.

C

Candelario Mondragon Jacobo., 2000. Cactus pear domestication and breeding. *Plant breeding reviews*, 20 :135–166.

Cárdenas A., Higuera-Ciapara I., Goycoolea F., 1997 ; Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus indica*) mucilage in solution, *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 2, pp. 152–157.

Chemat F., Abert-Vian M., Zill-e-Huma., 2009. Microwave assisted-separations: green chemistry in action. In: Pearlman, J.T. (Ed.), *Green Chemistry Research Trends*. Nova Science Publishers Inc., United States. 1-30.

Chemat F., Huma Z., Khan M.K., 2011. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonincs Sonochemistry*. 18, 813-835.

Chira K., Suh J.H., Saucier C., 2008. "Les polyphénols du raisin".6, France, 75-82.

Clifford M.N., 2000. Anthocyanins-nature, occurrence and dietary burden. *J.Sci. Food Agric.*, 80, 1063-1072.

Collin S., Crouzet J., 2011. Polyphénols et procédés: Transformation des polyphénols au travers des procédés appliqués à l'agro-alimentaire. Agence universitaire de la francophonie, Edition Lavoisier, p.1-300.

Croteau R., Kutchan M.T., Lewis N.G., Buchanan B., Gruissem W and Jones R., 2002. Natural products (secondary metabolites) in *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Edition American society of plant physiologists. pp. 1250-1318.

D

Dauguet J.C., Foucher J.P., 1982. *Plantes médicinales et phytothérapie*. 16 (3)., pp 185-191.

Dahmoune F., Boulekbache L., Moussi K., Aoun O., Spigno G., and Madani K., 2013. Valorization of citrus limon residues for the recovery of antioxidants: evaluation and optimization of microwave and ultrasound application to solvent extraction. *Industrial Crops and Products.*, 50, 77-87.

De Santiago E., Isabel J., Concepción C., María-Paz D., 2021. Extraction of (Poly) phenolic Compounds of Cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) Cladodes. *Food Analytical Methods* 14:1167–1175.

Defelice M.S., 2004. Prickly pear cactus, *Opuntia* spp. Aspinetingling tale. *Weed Technology.* 18: 869-877

Del-Valle V., Hernández-Muñoz P., Guarda A. and Galotto M.J., 2005. Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life ; *Food Chemistry*, 91, (4), p. 751-756

DIB H., Beghdad M., Belarbi C., Seladji M., Ghalem M., 2013. Antioxidant Activity of Phenolic Compounds of the Cladodes of *Opuntia ficus-indica* Mill. from Northwest Algeria. *International Journal of Medicine and Pharmaceutical Sciences (IJMPS).* 3, 147-158

Djerroud N., Adjeroud N., Felkai-Haddache L., Hammoui Y., Remini H., Dahmoune, F., Merzouk B., Madani K., 2018. *Water Environ J.* 32, 321. Doi: 10.1016/j.foodchem.2014.10.025

Dolatowski Z., J, Stadnik J, Stasiak D., 2007. Applications of ultrasound in food technology. *Acta Sci Pol, Technol. Aliment*, 6 (3), 89-99

Draye M., Estager J., Malacria M., Goddad JP., Ollivier C. 2009. *Sonochimie organique (K1250)*, Editions Techniques de l'ingénieur, France.

E

El Mannoubi I., Barrek S., Skanji T., Zarrouk H., 2008. Etude de la composition de la fraction volatile des graines du figuier de Barbarie. *Journal de la société chimique de Tunisie.* 10: 61-67.

El-Mostafa K., El Kharrassi Y., Badreddine A., Andreoletti P., Vamego J., El Kebbaj M.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.

Espinosa S., 2002. Estudio de algunas propiedades físicas de hidrocoloides provenientes de la semilla de algarrobo (*Prosopis chilensis* Mol.) Stuntz) y de cladodios de nopal (*Opuntia ficus indica* L. Mill.). Tesis de Grado. Magister en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agronomicas. Universidad de Chile, 71pp.

F

Felkai-Haddache L., Dahmoune F., Remini H., Lefsih K., Mouni L., Madani K., 2015a. Microwave optimization of mucilage extraction from *Opuntia ficus-indica* Cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules*. 84: 24-30.

Felkai-Haddache L., Remini H., Dulong V., Mamou-Belhabib K., Picton L., Madani K., Rihoue, C., 2015b. Conventional and Microwave-Assisted Extraction of Mucilage from *Opuntia ficus-indica* Cladodes: Physico-chemical and rheological properties. *Food bioprocess technol*. 9: 481-492.

Fernandez M.L., Trejo A., Mcnamara D.J., 1990. Pectin isolated From Prickly pear (*Opuntia* sp) modifies low density lipoprotein metabolism in cholesterol-fed guinea pigs. *J.Nutr*. 120: 1283-1290.

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*. 11: 2574-2589p.

Fox D.I., Pichler T., Yeh D.H., Alcantar N.A., 2012. Removing heavy metals in water: the interaction of cactus mucilage and arsenate (As (V)), *Environ. Sci. Technol*. 46: 4553-4559.

G

Gabriele Rocchetti., 2018. Italian *Opuntia ficus-indica* Cladodes as Rich Source of Bioactive Compounds with Health-Promoting Properties.

Gade A., Gaikwad S., Tiwari V., Yadav A., Ingle A., Rai M. 2010. Biofabrication of silver nanoparticles by *Opuntia ficus-indica*: in vitro antibacterial activity and study of the mechanism involved in the synthesis, *Curr. Nanosci.* 6: 370-375.

Galati E. M., Monforte M. T., Tripodo M. M., d'Aquino A., Mondello M. R. 2001. Antiulcer activity of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (Cactaceae): ultrastructural study, *Journal of Ethnopharmacology*, 76, 1, 1-9

Garon D., et Guéguen J.C. 2014. Biodiversité et évolution du monde végétal. France : EDP Sciences. 289p.

Garti N., 1999. Hydrocolloids as emulsifying agents for oil-water emulsions. *Journal of Dispersion and Science Technology* .20 (1&2), 327–355.

Garti N., Leser M.E., 2001. Emulsification properties of hydrocolloids. *Polymers for Advanced Technologies* 12, 123–135.

Gil M.I., Tomas-Barberan F.A., Hess-Pierce B., Holcroft D.M., Kader A.A. 2000. Antioxidant activity of pomegranate juice and its relationship with phenolic composition and processing. *Journal of Agricultural & Food Chemistry* 48, pp. 4581–4589.

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.). 57: 10323–10330.

Goycoolea F.M., Cárdenas A., 2003. Pectins from *Opuntia* spp.: a short review, *J. Professional Asso. Cactus Devel.* 5: 17-29.

Goycoolea F.M., Cárdenas A., 2003. *Professional Asso. Cactus Devel* 5, 17

Guevara-Arauza J.C., Paz J.J.Ó., Mendoza S.R., Guerra R.E.S., Maldonado L.M.T.P., González D.J.P. 2011. Biofunctional activity of tortillas and bars enhanced with nopal. Preliminary assessment of functional effect after intake on the oxidative status in healthy volunteers. *Chem Cent J.* 5: 10-20.

Guevara-Figueroa T., Jimenez-Islas H., Reyes-Escogido M.L., Mortensen A. G., Laursenc B.B., Lin L., Leon-Rodriguez A., Fomsgaard I.S., Barba De La Rosa A.P. 2010. Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23, 525–532.

H

Habibi Y. 2004. Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux: caractérisation et modification chimique. Thèse du doctorat Université Joseph Fourier – Grenoble I Sciences & Géographie Université Cadi Ayyad Faculté Des Sciences Semlalia – Marrakech. pp. 222.

Halmi S., 2015. Etude botanique et physicochimique : approche biologique et pharmacologique d'*Opuntia ficus indica*, Thèse de doctorat. Université Des Frères Mentouri De Constantine, P 4.

Handa SS., 2008. An Overview of extraction Techniques for Medicinal and Aromatic Plant. In *Extraction Technologies for Medicinal and Aromatic Plants* (book). Editors: Khanuja S.P.S., Longo G., Rakesh D.D. International Centre for Science and High Technology, Trieste, Italy, pp. 21-54

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 2013. Extraction et purification de substances naturelles : comparaison de l'extraction au CO₂-supercritique et des techniques conventionnelles. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). 148p.

Hiram M.Falcão, Marciel T.Oliveira, Adália C.Mergulhão, Márcia V.Silva, Mauro G.Santos. 2013. Ecophysiological performance of three *Opuntia ficus-indica* cultivars exposed to carmine cochineal under field conditions, Volume 150, P 15.

I

Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui A., Saenz C. 2018. Ecologie, Culture Et Utilisations Du Figuier De Barbarie. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture et le Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides Rome. pp. 208.

K

Knežević S.V. Blazekwic B. Stefan M.B. and Babac M. 2012. Plant polyphenols as antioxidants influencing the human health. In "Phytochemicals as nutraceuticals-global approaches to their role in nutrition and health. Edition Venketeshwer Rao.pp.155-180.

Konkon N G., Simaga D., Adjoungova A. (2006) Etude phytochimique de mitragyna inermis (willd.) o. ktze (rubiaceae), plante a feuille antidiabetique», *Pharm Méd Trad*

Ksouri R., Megdiche W., Jallali I., Debez D., Magné M., Hiroko I., Abdelly C.H. 2012. Medicinal halophytes: potent source of health promoting biomolecules with medical, nutraceutical and food applications, **Critical Reviews in Biotechnology**, 32(4),289-326.

Kuti O.Joseph , 2004. Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear fruit varieties. *Food Chemistry*, 85, (4) , P 527-533.

L

Lefsih K., Delattre C., Pierre G., Michaud P., Aminabhavi T.M., Dahmoune F., Madani K., 2016. Extraction, Characterization and gelling behavior enhancement of pectins from the cladodes of *Opuntia ficus indica*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 82: 645-652.

Leighton T.G. 2007. What is Ultrasound. *Prog Biophys Mol Biol*. 93: 3-83.

Li B. B., Smith B., Hossain Md. M., 2006a. Extraction of phenolics from citrus peels. I. Solvent extraction method. *Separation and Purification Technology*. 48, 182-188.

Li H Prodesino L, Weiss J., 2004. High intensity ultrasound-assisted extraction of oil from soybeans. *Food Res Int* 37: 731-738.

Lugasi A., Hóvári J., Sági K.V., Biról. 2003. The role of antioxidant phytonutrients in the prevention of diseases. *Acta. Biol. Szeged.*, 47, 119-125.

Luque-Garcia J., L. and M.D.Luque de Gastro. 2003. Ultrasound: A powerful tool for leaching. *Trends in Analytical chemistry* 22: 41-47.

M

Macheix JJ., Fleuriet A., and Jay-Allemand C. 2005. Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. p. 192

Majdoub H., Roudesli S., Deratini A. 2001. Polysaccharides from prickly pear peel and nopals of *Opuntia ficus-indica*, extraction, characterization and polyelectrolyte behaviour. *Polymer Int.*, 50, 552–560.

Mahdeb A., Adjeroud-Abdellatif N., Mazari A., Portillo L., Ait Abdelouhab K., Ait Maamer D., Madani k. 2021. Identification of some *Opuntia* spp. from two Algerian regions and ultrasound assisted extraction of their phenolic compounds. *JPACD* 23: 94-121.

Mahmoudi S., Khali M., Mahmoudi N. 2013 Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*cynara scolymus* l.). *Nature & technologie. b- sciences agronomiques et biologiques*, N° 09: 35-40. *Afr. Vol. 14* , pp 73-80.

Malainine M. E., Dufresne A., Dupeyre D., Mahrouz M., Vuong R., Vignon M. R. 2003. Structure and morphology of cladodes and spines of *Opuntia ficus-indica*. Cellulose extraction and characterisation. *Carbohydr. Polym.* 51, 77–83.

Manthey J.A., Grohmann K., 2001. Phenols in Citrus Peel Byproducts. Concentrations of Hydroxycinnamates and Polymethoxylated Flavones in Citrus Peel Molasses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49, 3268-3273

Martin S. et Andrintsitohainia R. 2002. Mécanisme de la protection cardiaque et vasculaire des polyphénols au niveau de l'endothélium. *Journal Annale de cardiologie*, 51: 304-315.

Mc Garvie, D. Parolis, H. 1979. Carbohydrate Research, 69. 171-179.

Mc Garvie, D. Parolis, H. 1981. Carbohydrate Research, 94. 57-65.

Medina-Torres L., E. Brito-De La Fuente, B. Torrestiana-Sanchez, R. Katthain. 2000. Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*), Food Hydrocolloids. 14:417-424.

Medina-Torres, L., Brito-de-la-Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., Alonso, S., 2003: Mechanical properties of gels formed by mixtures of mucilage gum (*Opuntia ficus-indica*) and carrageenans. Carbohydr. Polym., 52, 143–150.

Medina-Torres N., Ayora-Talavera T., Espinosa-Andrews H., Sánchez-Contreras A., and Pacheco N. 2017. Ultrasound Assisted Extraction for the Recovery of Phenolic Compounds from Vegetable Sources, 19.

Miller, S.M., Fugate, E.J., Craver, V.O., Smith, J.A., Zimmerman, J.B., 2008. Toward Understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. Environmental science & technology. 42: 4274-4279.

Morán-Ramos S, Avila-Nava A, Tovar AR, Pedraza-Chaverri J, López-Romero P, Torres N.2012.*Opuntia ficus-indica* (nopal) attenuates hepatic steatosis and oxidative stress in obese Zucker (*fa/fa*) rats. J Nutr ; 142: 1956-63.

Mulas M, Mulas G., 2004. Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR, p 112.

N

Naczki M, Shahidi F., 2004. Extraction and analysis of phenolics in food. Journal of Chromatography A, 1054: 95 – 111.

Naod, G.S. 2010. Physico-chemical characterization and evaluation of two local cactus mucilages (*Opuntia* spp.) as suspending agents. Under the supervision of Prof. Tsige Gebre

Mariam, Department of Pharmaceutics, School of Pharmacy, Addis Ababa University. pp. 55

Neffar S., 2012. Etude de l'effet de l'âge des plantations de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica* L. Miller) sur la variation des ressources naturelles (sol et végétation) des steppes algériennes de l'Est. Cas de Souk- ahras et Tébessa .thèse de doctorat en biologie végétale. Université BADJI MOKHTAR. Annaba.16- 236 p

Nharingo, T., Moyo, M. 2016. Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review, J. Environ. Manage. 166: 55-72.

Nobel P. S., Cavelier J., Andrade J. L.1992. Mucilage in cacti: Its apoplastic capacitance associated solutes, and influence on tissue-water relations. J. Exp.Botany, 43, 641–648.

P

Pierre M., Lis .M. 2007 Secrets des plantes. Editions Artemis, Paris 1: 463.

Pradal D. 2016. Eco-procédés d'extraction de polyphénols antioxydants à partir d'un coproduit agro-alimentaire. Thèse de doctorat. Université Lille 1. 216p.

Psotová J. Lasousky J. Vičar J. 2003. Metal-chelating properties. Electrochemical behaviour, scavenging and cytoprotective activities of six naturel phenolics. *Biomed. papers*, 147, 147-153.

R

Rawson, A., Patras, A., Tiwari, B.K., Noci, F., Koutchma, T., Brunton, N., 2011. Effect of thermal and non thermal processing technologies on the bioactive content of exotic.

Remesy C., Manach C., Demigne C., Texier, O., Regeat F. 1996. Nutritional interest of flavonoids. *Med. Nutr.*, 32, 17-27.

Retamal N. Duran J. M., Fernandez J. 1987. Seasonal variations of chemical composition in prickly pear (*Opuntia ficus-indica*(L.) Miller). J. Sci.Food Agric., 38, 303–311.

Richter G. 1993. Composés phénoliques. In « Métabolisme des végétaux : physiologie et Biochimie ». Edition Presses polytechnique et universitaires romandes. pp. 317-339.

Rodriguez-Felix A. 2002. Postharvest physiology and technology of cactus pear fruits and cactus leaves. *Acta. Hort.* 581,191–199.

Rodriguez-Pérez C., Quirantes-Piné R., Fernández-Gutiérrez A., and Segura-Carretero A., 2015. Optimization of extraction method to obtain a phenolic compounds-rich extract from *Moringa oleifera* Lam leaves. *Ind. Crops Prod.*, 66 : 246–254.

S

Sáenz C., Montoya L.C., 1999. Nopalitos: Nueva hortaliza para Chile, *El Campesino* 130, (6), pp. 4–7.

Saenz, C. 2000. Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. *Journal of Arid Environments.* 46: 209-225.

Saenz Carmen, Sepulveda E, Matsuhira Betty, 2004. *Opuntia* spp mucilage"s: A functional component with industrial perspectives, *J. of Arid Environments* 57, 275–290

Saenz, C., Berger, H., Corrales Garcia, J., Galletti, L., Garcia de Cortazar,V., Higuera, I., Mondragon, C., Rodriguez Feliz, A., Sepulveda, E., Varnero M.T. 2006. Utilizacion agroindustrial del nopal. Rome, FAO Plant Production and protection.

Schweizer, M. 1997. Docteur Nopal Le Médecin Du Bon Dieu. rue du Faubourg Saint Honoré F-75008 Paris, France.

Sepulveda, E., Saenz, C., Aliaga, E., Aceituno, C. 2007. Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia*. *Journal of Arid Environments.* 68: 534–545.

Sepúlveda, E., Gorena, T., Chiffelle, I., Sáenz, C., Catalán, E. 2013. Effect of the Cactus Cladodes Peeling in the Functional, Technological and Chemical Characteristics and Bioactive Compounds in Cactus Cladodes Powders. *ISHS Acta Horticulturae.* 995: 269-272.

Sébastien V. 2010. Enrichissement nutritionnel de l'huile d'olive : Entre Tradition et Innovation - Chapitre 4 : Enrichissement exogène de l'huile d'olive par ultrasons .Thèse de doctorat, Université d'Avignon, France.

Shahidi F. 2002. Antioxidants in plants and oleaginous seeds. In: Morello MJ, Shahidi CT, Ho CT, Eds. Free radicals in food: chemistry, nutrition and health effects. ACS symposium series 807; ACS: Washington DC; p. 162-75.

Stintzing F. C., Herbach K. M., Mosshammer M. R., Carle R., Yi, W., Sellappan S. 2005. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 53(2), 442–451.

Stintzing, F.C., Schieber, A., Carle, R. 2005. *Cactus stems (Opuntia spp.): A review on their chemistry, technology, and uses.* *Mol. Nutr. Food Res.* 49: 175-194.

Sutton B. G., Ting I. P., Sutton R., 1981. Carbohydrate metabolism of cactus in a desert environment. *Plant Physiol.*, 68, 784–787.

Su Y & Zhao H., 2003. Soil properties and plant species in an age sequence of Caragana microphylla plantations in the Horqin Sandy land, North China. *Ecological Engineering*, 20: 223-235.

T

Teles F. F. F., Stull J. W., Brown W. H., Whiting F. M. 1984. Amino and organic acids of the prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica* L.). *J. Sci. Food Agric.*, 35, 421–425.

Temagout A., Zitouni, B., Noui, Y. 2017. Algerian Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) Physicochemical Characteristics. *International Journal of Scientific Research.* 5: 14-17.

Torres-Bustillos, L.G., Carpinteyro-Urban, S., Orozco, C., 2013. Production and characterization of *Opuntia ficus-indica* mucilage and its use as coagulant-flocculant aid for industrial wastewaters. *Int. J. Biotechnol. Res.* 3: 38-45.

Trachtenberg S., Mayer A. M., 1981. Composition and properties of *Opuntia ficus indica* mucilage. *Phytochemistry* 20, p. 2665–2668.

Trachtenberg S., Mayer A. M., 1982. Biophysical properties of *Opuntia ficus indica* mucilage. *Phytochemistry*: 21:28-35p.

U

Urquiaga I. N. E. S. and Leighton F. E. D. E. 2000. Plant Polyphenol Antioxidants and Oxidative Stress. *Biol. Res*, 33: 55-64.

V

Valente, L.M.M., da Paixão D., do Nascimento, A.C, dos Santos, P.F.P., Scheinvar, L.A., Moura, M.R.L., Tinocod, L.W., Gomes, L.N.F., da Silva, J.F.M. 2010. Antiradical activity nutritional potentiel and flavonoids of the cladodes of *Opuntia monacantha* (cactaceae). *Food Chem.* 123: 1127-1131

Vivas De Gaulejac N. 2001. Vin et santé. Les bases scientifiques du French Paradox. Editions Féret, p.198.

W

Wallace RS., Gibleson AC. 1997. Evolution and systematic Biology and Uses, P.S.Nobel Ed.,pp. 1-21.

Waldron K. W., Parr A. J., NG A., Ralph J. 1996. Cell wall esterified phenolic dimers: Identification and quantification by reverse phase high performance liquid chromatography and diode array detection. *Phytochem. Anal.*, 7, 305–312.

Wang L. and Weller, C.L. 2006. Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science and Technology*, 17: 300-312

Waksmundzka-Hajnos M., ET Sherma J. 2011. High Performance Liquid :Chromatography in Phytochemical Analysis. *Chromatographic Science Series.* pp. 477-478.

Y

Yu, Z. & Dahlgren, R.A. 2005. Evaluation of methods for measuring polyphenols in copper foliage. *J.Chem.Ecol.*, 26,2119-2140.

Z

Zia-ur-Rehman., 2006. Citrus peel extract-A natural source of antioxidant. *Food Chemistry*. 99, 450-454.

Webographie

Anonyme 1. <https://www.berkem.com/fr/expertise/extraction-vegetale> (consulté le 24/08/2021).

Anonyme 2. <https://www.maxicours.com/se/cours/les-differentes-techniques-d-extraction/> (consulté le 24/08/2021).

Anonyme 3. <https://www.chemeurope.com/fr/produits/127465/extraction-acclre-par-solvant-ase-la-meilleure-faon-de-prparer-vos-chantillons-de-gc-et-lc.html>. (Consulté le 01/09/2021).

Résumé :

Le Figuier de Barbarie, est une plante originaire des régions arides et semi-arides du Mexique. Son nom scientifique est *Opuntia ficus-indica*, il appartient à la famille des *Cactacées*. Le figuier de Barbarie comprend les parties suivantes : fruit, fleur, graine (aréoles), feuille (cladode), et appareil racinaire, il présente deux variétés : une variété inerme (issue de la domestication) et une variété épineuse (variété sauvage). Les cladodes sont réputés être riches en minéraux, en mucilage, en eau, en composés phénoliques et en vitamine A. Ils sont consommés en tant que légumes car ils sont tendres et riche en fibres. Les mucilages sont des polysaccharides, tandis que les composés phénoliques sont des dérivés aromatiques hydroxylés non azotés. Le mucilage et les composés phénoliques des cladodes du figuier de Barbarie peuvent être extraits à l'aide des différentes méthodes d'extraction conventionnelles ou innovantes. Les résultats ont démontré que les méthodes d'extraction innovantes s'avèrent meilleures que les méthodes conventionnelles en raison de l'amélioration du rendement d'extraction, de la qualité de l'extractibilité et du gain de temps. Outre les anciennes utilisations traditionnelles de par le monde, actuellement les cladodes représentent de multiples intérêts : écologiques, économiques, pharmaceutiques, nutraceutiques, cosmétologiques, environnementaux, biotechnologiques et bien d'autres surprenantes utilisations de par leurs richesses en composés bioactifs. Ils sont aussi valorisés en produits agroalimentaires.

Mots clé : Figuier de Barbarie, cladode, polyphénols, mucilage, extraction, applications et valorisation.

Abstract:

The prickly pear is a native plant to the arid and semi-arid regions of Mexico. Its scientific name is *Opuntia ficus-indica*, it belongs to the *Cactaceae* family. The prickly pear includes the following parts: fruit, flower, seed (areola), leaf (cladode), and root system, it has two varieties: a spineless variety (from domestication) and a thorny variety (wild variety). Cladodes are known to be rich in minerals, mucilage, water, phenolic compounds and vitamin A. They are consumed as vegetables because they are tender and rich in fiber. Mucilage is a polysaccharide, while phenolic compounds are non-nitrogenous hydroxylated aromatic derivatives. The mucilage and phenolic compounds of prickly pear cladodes can be extracted using different conventional or innovative extraction methods of bioactive compounds, the results showed that the innovative extraction methods are better than the conventional methods because of the improvement of the extraction yield, the quality of the extractability and time saving. Besides the old traditional uses all over the world, nowadays cladodes represent multiple interests: ecological, economical, pharmaceutical, nutraceutical, cosmetological, environmental, biotechnological and many other surprising uses due to their richness in bioactive compounds. They are also valorized in agri-food products.

Key words: Prickly pear, cladode, polyphenols, mucilage, extraction, applications and valorization.