

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**



**Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques  
Département de Biochimie-Microbiologie**

**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master II  
Filière : Biologie  
Spécialité : Microbiologie Appliquée

**Thème**

**Étude bibliographique sur la valorisation biotechnologique des  
cladodes du figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*)**

**Présenté par :**

**M<sup>elle</sup> REGGANE Lydia**

**Devant le jury :**

**M<sup>me</sup> CHEHRIT-HACID F.**

**Maitre de conférences B à l'UMMTO**

**Présidente**

**M<sup>lle</sup> DERMECHE S.**

**Maitre de conférences B à l'UMMTO**

**Promotrice**

**M<sup>me</sup> ASMANI K.**

**Maitre de conférences A à l'UMMTO**

**Examinatrice**

**Promotion : 2020-2021**

## Remerciements

*Je tiens à remercier en premier lieu le Bon **Dieu** tout-puissant pour le courage, la volonté et la santé qu'il m'a donné afin de pouvoir accomplir ce travail.*

*Je remercie également toutes les personnes qui m'ont soutenue, de près ou de loin notamment mes chers parents que Dieu les protège.*

*Je profite de cette heureuse occasion pour exprimé ma haute reconnaissance et gratitude à ma promotrice M<sup>lle</sup> DERMECHE S. qui m'a orienté, encouragé et soutenu pour réaliser ce travail.*

*J'exprime mes respectueuses salutations, aux membres du jury M<sup>me</sup> CHEHRIT-HACID F. et M<sup>me</sup> ASMANI K.*

*J'espère que mon travail trouve tout l'écho nécessaire auprès de leurs respectueuses appréciations.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail*

*A ma famille, qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce  
que je suis aujourd'hui ;*

*A mes plus beaux repères*

*Ma très chère mère,*

*Mon très cher père,*

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

*A mes très chers frères et sœurs, qui n'ont pas cessé de m'encourager tout au  
long de mes études, que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.*

*J'exprime une reconnaissance spéciale et fraternelle à mes sœurs Keltoum et  
Dounya qui étaient mes anges gardiens durant toute la période de mon travail.*

*Lydia*

## *Sommaire*

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

**Introduction générale.....1**

### **Chapitre I. Généralités sur le figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*)**

I. Origine et distribution géographique.....	3
II. Taxonomie et nomenclature.....	4
III. Description botanique.....	5
IV. Composition chimique des cladodes.....	8
V. Culture de figuier de barbarie.....	13
V.1. Exigences écologiques.....	13
V.1.1. Conditions climatiques.....	14
V.1.2. Facteurs biotiques.....	15
V.2. Reproduction et techniques de multiplication.....	16
V.2.1. Multiplication par graine (sexuée).....	16
V.2.2. Multiplication végétative (asexuée).....	17
V.3. Conduites et techniques culturales.....	18
V.3.1. Choix de l'espèce et de cultivar.....	18
V.3.2. Implantation.....	18
V.3.2.1. Préparation du sol.....	18
V.3.2.2. Saison de plantation.....	19
V.3.2.3. Densité et méthodes de plantation.....	19
V.3.2.4. Entretien de la culture.....	19
VI. Utilisation de figuier de barbarie.....	20

### **Chapitre II. Activité antimicrobienne des cladodes**

I. Activités antimicrobiennes des extraits des cladodes d' <i>OFI</i> .....	25
I.1. Activité antifongique.....	25
I.2. Activité antibactérienne.....	27

### **Chapitre III. Valorisation des cladodes d'*Opuntia ficus indica* par bioconversion**

I. Valorisation des cladodes d' <i>OFI</i> par voie microbienne.....	31
I.1. Procédés fermentaires.....	32
I.1.1. Effets des cladodes sur la production de l'acide lactique et l'acidification d'un produit laitier.....	32
I.1.2. Cladodes et production d'éthanol.....	33
I.2. Production de biogaz.....	36
I.2.1. Utilisation des déchets de <i>cactus</i> pour la production de biogaz.....	36
I.2.2. Procédés de production de biogaz .....	37
I.3. Fermentation des cladodes chez les ruminants.....	38
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>41</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>42</b>
<b>Résumé</b>	

## *Liste des figures*

<b>Figure 01</b> : Distribution géographique du figuier de barbarie dans le monde.....	4
<b>Figure 02</b> : Cladodes d' <i>OFI</i> .....	6
<b>Figure 03</b> : Fleurs d' <i>OFI</i> .....	6
<b>Figure 04</b> : Fruits d' <i>OFI</i> .....	7
<b>Figure 05</b> : Feuilles d' <i>OFI</i> .....	7
<b>Figure 06</b> : Formes épineuses et inermes de l' <i>OFI</i> (A : forme inerme / B : forme épineuse)....	8
<b>Figure 07</b> : Composition des cladodes d' <i>OFI</i> en glucides.....	12
<b>Figure 08</b> : Cochenilles d' <i>OFI</i> .....	16
<b>Figure 09</b> : Cératite d' <i>OFI</i> .....	16
<b>Figure 10</b> : Mildiou d' <i>OFI</i> .....	16
<b>Figure 11</b> : Rouille d' <i>OFI</i> .....	16
<b>Figure 12</b> : Schéma présentatif des activités biologiques et pharmacologiques des cladodes d' <i>OFI</i> .....	24
<b>Figure 13</b> : Schéma présentatif de la valorisation des cladodes d' <i>OFI</i> par bioconversion.....	31
<b>Figure 14</b> : Schéma présentatif d'une chaîne de production de biogaz.....	38

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 01</b> : Différents noms de l'espèce <i>OFI</i> .....	5
<b>Tableau 02</b> : Principaux composants des cladodes <i>d'OFI</i> .....	9
<b>Tableau 03</b> : Principaux minéraux contenus dans les cladodes <i>d'OFI</i> .....	9
<b>Tableau 04</b> : Principaux acides aminés des cladodes <i>d'OFI</i> .....	10
<b>Tableau 05</b> : Composition des cladodes <i>d'OFI</i> en acides organiques à deux moments de la récolte.....	11
<b>Tableau 06</b> : Composition en acides gras dans la cladode <i>d'OFI</i> .....	11
<b>Tableau 07</b> : Composition en vitamines dans les cladodes du figuier de barbarie.....	13
<b>Tableau 08</b> : Principaux ennemis et maladies des raquettes.....	15
<b>Tableau 09</b> : Utilisation des différentes parties <i>d'OFI</i> .....	20
<b>Tableau 10</b> : Formes d'utilisation de figuier de barbarie.....	21

## *Liste des abréviations*

**AGV:** Acides Gras Volatils

**CAM:** Crassulacean acid metabolism

**CP:** Protéines brutes

**DA:** Digestion Anaérobie

**GAE/g DW:** Gallic acid equivalents per 100g of dry weight

**IVDMD :** Digestibilité de la matière sèche in vitro

**MS :** Matière Sèche

**OA :** *Opuntia amyclae*

**OFI :** *Opuntia ficus indica*

**OPFB :** Sous-produits d'*OFI*

**Psi :** Pound per square inch (unité de pression)

**RL :** Radicaux libres

**SDA :** Gélose de Sabouraud

**SSF:** Saccharification et fermentation simultanées

**UTI :** Infection des voies urinaires

---

# **Introduction générale**

---

### *Introduction générale*

Depuis la nuit des temps, les plantes ont toujours fait partie de la vie quotidienne de l'homme, puisqu'il s'en sert pour se nourrir et se soigner. Encore de nos jours, elles entrent dans la composition de compléments alimentaires, de médicaments et de traitements les plus divers (Msaddak, 2018). De ce fait, les chercheurs du monde entier se sont investis dans l'optimisation de la technologie, de la production et de l'étude des potentialités de ces plantes avec un intérêt grandissant dans différents domaines (Moussaoui, 2020).

Pour la présente étude, nous avons choisi l'*Opuntia ficus indica* (*OFI*) appartenant à la famille des cactaceae, connu communément sous le nom du figuier de barbarie. Il s'agit d'une plante originaire du Mexique, mais elle s'est naturalisée dans différents pays du monde (Chougui et *al.*, 2015). En effet, l'*OFI* est un bon candidat pour lutter contre les changements climatiques et la sécheresse grâce à sa richesse en eau (varie de 80 à 90%) et donc un atout précieux en zones arides (Habibi, 2004).

Les cladodes sont une matière végétale contenant plusieurs composés lui conférant un grand nombre de propriétés multifonctionnelles (composés phénoliques, flavonoïdes, vitamines, caroténoïdes, etc.). Ces substances ont des activités biologiques et pharmacologiques intéressantes qui lui confèrent des avantages en matières de soins et de prévention de différentes maladies associées au stress oxydatif, comme le cancer, les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives ainsi que le soulagement des infections graves, etc. (Zerrouki, 2020).

Par ailleurs, l'*OFI* renferme des intérêts multiples : il est utilisé pour la consommation humaine en tant que fruit et légume (Abou-Elella et Ali, 2014), en alimentation du bétail durant les périodes de sécheresse et pour participer à la résolution des problèmes de l'érosion du sol (Arba, 2017). Encore, les cladodes d'*OFI* peuvent générer des produits à valeur ajoutée comme le bioéthanol, l'acide lactique et tout autre produit issu de leur fermentation.

L'objectif de ce travail, vise à établir une étude bibliographique sur la valorisation biotechnologique des cladodes du figuier de barbarie (*OFI*), en faisant une synthèse des recherches précédemment réalisées sur l'évaluation des activités antimicrobiennes des

cladodes d'*Opuntia ficus indica*, ainsi que d'explorer le potentiel d'*OFI* comme matière première pour la production de nouveaux produits par voies microbiennes.

L'ensemble de ce mémoire se décline en trois chapitres principaux :

- le premier chapitre regroupe des notions de bases en botanique sur l'*OFI* ;
  - le deuxième chapitre est dédié à l'activité antimicrobienne des cladodes ;
  - le troisième chapitre est focalisé sur la valorisation des cladodes d'*OFI* par bioconversion.
- Enfin, le présent travail se termine par une conclusion générale.

---

**Chapitre I.**

**Généralités sur le figuier  
de barbarie (*OFI*)**

---

## I. Origine et distribution géographique

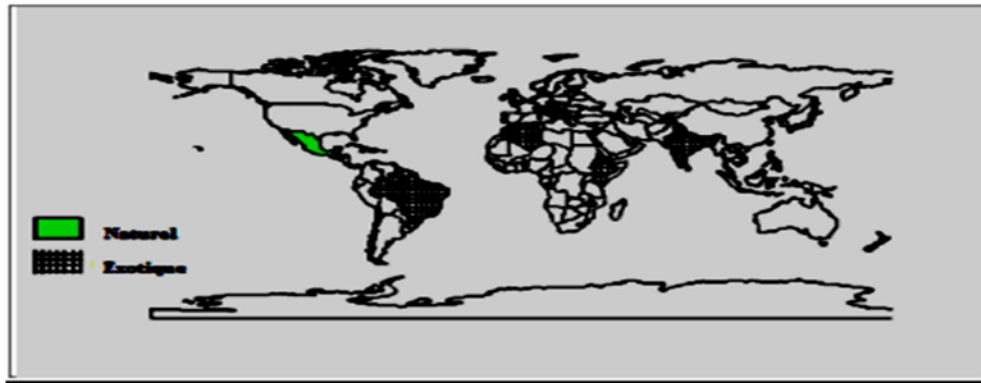
Le figuier de barbarie (*OFI*) est une plante tropicale, cultivée dans les climats arides et semi-arides (Ginestra et *al.*, 2009). Cette espèce ayant la plus grande importance économique dans le monde est originaire du Mexique, mais elle a été introduite dans le reste du monde, d'abord en Espagne et plus tard au 16<sup>ème</sup> siècle au nord et au sud de l'Afrique (Isaac, 2016).

L'*OFI* était inconnu en Europe avant les voyages de Christophe Colomb et fut décrit de façon précise pour la première fois en 1535 par l'Espagnol Gonzalo Fernández de Oviedo y Valdés dans son « Histoire des Indes occidentales » (Casas et Barbera, 2002). Sa distribution géographique est localisée principalement dans le Mexique, la Sicile, le Chili, le Brésil, la Turquie, la Corée, l'Argentine et l'Afrique du nord, ainsi que sur la partie ouest de la Méditerranée (Sud de l'Espagne et le Portugal) (Bendhifi et *al.*, 2013).

L'introduction du figuier de barbarie en Afrique du nord (Maroc, Tunisie, Algérie) a été favorisée par l'expansion espagnole durant le 16<sup>ème</sup> et le 17<sup>ème</sup> siècle (El Mannoubi et *al.*, 2008) et aussi, par le retour des Maures vers leur terre natale quand ils ont finalement été expulsés d'Espagne en 1610 (ONU, 2018).

En Algérie, la répartition géographique de l'*Opuntia* n'est pas bien déterminée, on le retrouve partout sous forme sauvage ou cultivée, depuis les régions côtières jusqu'aux zones arides et semi-arides (Bouayad, 2012), dont la meilleure cueillette des figues de barbarie, est celle qui se réalise sur les hauteurs des montagnes, spécialement en milieu rocailleux, à l'exception des montagnes et des zones sahariennes (Benattia, 2017).

Selon Orwa et *al.*, (2009), l'aire d'origine du figuier de barbarie (le Mexique) est présentée par la couleur verte et les nouvelles aires de distribution par la couleur noire : le Brésil, le Chili, les Etats Unies, l'Inde, l'Italie, l'Espagne, l'Erythrée, le Portugal, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, le Maroc, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie, le Soudan, la Tanzanie, le Kenya et l'Ouganda (figure 01).



**Figure 01.** Distribution géographique du figuier de barbarie dans le monde (Orwa et *al.*, 2009).

## II. Taxonomie et nomenclature

*Opuntia* est le genre le plus important et le plus répandu de la famille des cactacées qui sont des végétaux phanérogames, angiospermes, dicotylédones et dialypétales (Reyes-Aguero et Valiente-Banu, 2006). Elles font parties des plantes succulentes et xérophytes (Bhira, 2012). Les cactacées ont été classées près de la famille de la carotte (apiaceae), mais la découverte de bétalaïne les a placées dans l'ordre des « caryophyllales » (Lallouche, 2008).

### a. Classification

Plusieurs auteurs ont élaboré des classifications du genre *Opuntia*, et celle qui est considérée comme la plus valable à ce jour et sans doute celle du Britton et Rose (1963) (Mulas M et Mulas G, 2004). D'après Wallace et Gibson (2002), leur classification systématique est rappelée ci-dessous:

**Règne :** plantae

**Sous règne :** tracheobionta

**Division :** magnoliophyta

**Classe :** magnoliopsida

**Sous classe :** caryophyllidae

**Ordre :** caryophyllales

**Famille :** Cactaceae

**Sous-famille :** opuntioideae

**Tribu :** opuntieae

**Genre :** *Opuntia*

**Espèce :** *Opuntia ficus indica* (L.) Mill

### b. Appellation

Le nom *Opuntia* est l'appellation scientifique du nopal, qui est employé pour la première fois en 1558 par l'Italien Matthiolo en se référant à une plante à fleurs revêtue d'épines abondante dans la région d'Opononte ; de même, le terme «*cactus*» vient du grec «*kaktos*», désignant le chardon (Anaya-Père, 2001), mais la plante peut porter un nom différent selon l'idiome local, comme l'indique le tableau 01.

**Tableau 01.** Différents noms de l'espèce *OFI* (Zirmi-Zembri et Kadi, 2016).

Nom scientifique	Nom commun en berbère	Nom commun en arabe	Nom commun en français	Nom commun en anglais	Noms vernaculaires
<i>Opuntia ficus indica</i>	- Akarmus - lahlu - Tihendit	- Hendi - Karmous-ensara (Al sebbar , El-tin-el-Choki)	- Figuier de barbarie	-Pricklypear - Indianfig	- Nopal - Tuna - Chardon d'Afrique - Devils tongue - Figuier des Chrétiens - Raketa, etc.

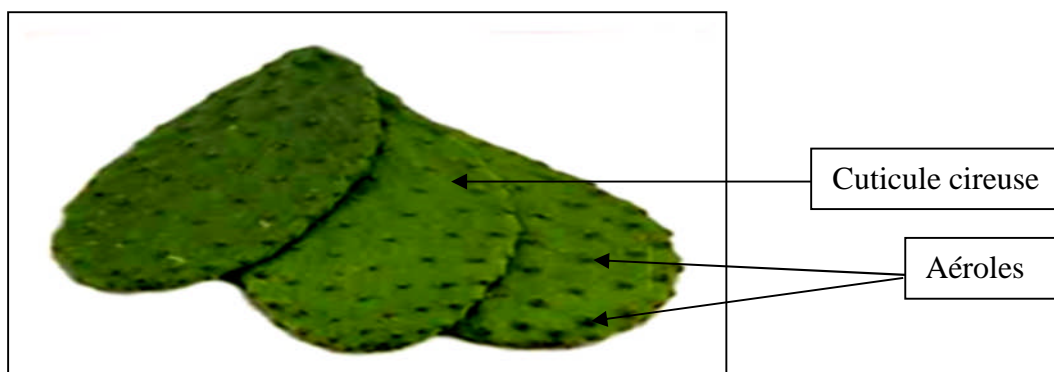
La taxonomie des espèces appartenant au genre *Opuntia* est encore un sujet de débat, ce qui s'explique par une classification incorrecte qui provient de la difficulté d'identification de tous les membres de ce genre (Hunt, 2000), ainsi que, la publication d'un grand nombre de noms d'espèces dont beaucoup sont des synonymes ou des attributions incorrectes (Labra et al., 2003).

### III. Description botanique

Le figuier de barbarie est une plante arborescente, succulente, appelée communément plante grasse (vivace), qui peut mesurer de 3 jusqu'à 5 mètre de hauteur (Bouayad, 2012). Il peut vivre très longtemps (permanent) grâce à sa capacité à emmagasiner l'eau dans ses racines ou dans ses tiges et feuilles de manière à limiter la transpiration (El Kharrassi, 2015). Chaque partie de la plante possède ses propres particularités que ce soit au niveau morphologique ou fonctionnel (Chougi et al., 2015) :

### a. Cladodes (Raquettes)

Les cladodes d'*OFI* sont des tiges modifiées de forme aplatie, érigées ou retombantes, de couleur verte mate, couramment appelées « raquettes », se caractérisent par des branches formées d'articles charnus de forme elliptique, la présence d'une cuticule cireuse (la cutine), du mucilage, d'épiderme et des stomates, ainsi que par la capacité d'assurer la fonction chlorophyllienne (figure 02).



**Figure 02.** Cladodes d'*OFI* (Chougi et *al.*, 2015).

### b. Fleurs

Les fleurs d'*OFI* sont des hermaphrodites de couleur jaune ou orange, elles deviennent rougeâtres à l'approche de la sénescence de la plante et se situent sur la face la plus exposée au soleil. Il n'y a qu'une seule fleur apparaît dans chaque aréole (uniloculaire) (figure 03).

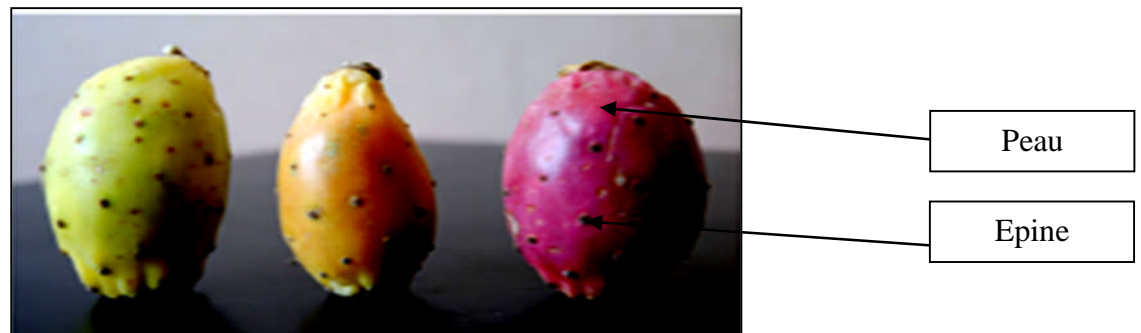


**Figure 03.** Fleurs d'*OFI* (Chougi et *al.*, 2015).

### c. Fruits

Les fruits d'*OFI* se caractérisent par la présence d'une baie de forme variable (ovoïde, sphérique, ronde, elliptique ou allongée), d'une couleur variable (jaune-orange au début de maturité et rouge-foncé ou pourpre en fin de maturité). Ils sont uniloculaires, couverts de

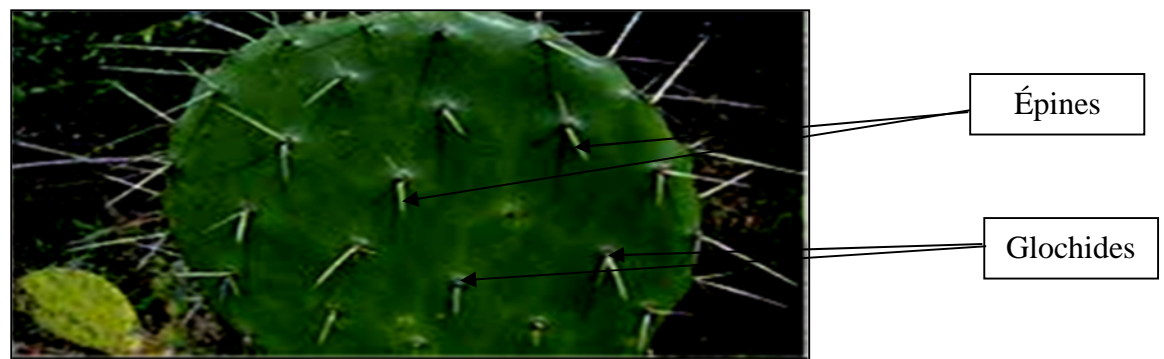
courtes épines, contiennent de nombreuses graines et constitués par : peau, pulpe (juteuse et sucrée), graine (libres ou adhérentes à la pulpe) (figure 04).



**Figure 04.** Fruits d'*OFI* (Chougi et *al.*, 2015).

#### d. Feuilles

Les feuilles d'*OFI* sont rudimentaires, de forme conique, éphémères. À leur base se trouvent les aréoles (bourgeons auxiliaires) qui produisent des épines (blanchâtres avec une surface rude) et des glochides (fines épines de couleur brunâtre, se décrochent facilement quand elles sont touchées ou soufflées par le vent, avec une surface lisse) (figure 05).



**Figure 05.** Feuilles d'*OFI* (Chougi et *al.*, 2015).

#### e. Racines

Les racines d'*OFI* sont généralement superficielles, elles ont une grande capacité d'absorption d'eau souterraine de faible consistance et elles peuvent être profondes mais assez étalées dans la partie supérieure du sol. La racine principale est courte, mais les racines latérales ont une très grande extension.

#### ❖ Variétés de figuier barbarie

D'après Araba et *al.*, (2000), les variétés de *cactus* se distinguent en deux groupes (figure 06):

- **Cactus inerme:** appelé «el karmous lahlou» en Kabylie. Il est souvent domestiqué et cultivé sur des surfaces limitées. Sa culture est en raison de ces caractéristiques : fruits plus gros et plus juteux que ceux de la variété épineuse, raquettes dépourvues d'épines souvent utilisées en tant que fourrage pour le bétail.
- **Cactus épineux :** ou «el karmous el kares» en Kabylie, est la variété la plus répandue grâce à sa résistance à la destruction par le bétail. Il forme des barrières infranchissables aux animaux sauvages.

Une variabilité à tous les niveaux (cladode, fruit, épine et graine) est présentée par les deux formes de *l'Opuntia ficus indica* inerme (A) et épineuse (B) (figure 06) (Gaspar dos Reis, 2018).



**Figure 06.** Formes épineuses et inermes d'*OFI* (A : forme inerme / B : forme épineuse)  
(Gaspar dos Reis, 2018).

#### IV. Composition chimique des cladodes

*OFI* est une plante très rafraichissante, connue par sa richesse en éléments nutritifs dont chaque partie qui la compose possède sa propre composition chimique. Cette dernière, dépend de l'âge de la plante, des facteurs climato-édaphiques, de l'endroit de la culture, le type de sol et la saison, d'où les teneurs en éléments nutritifs ne devraient pas être prises comme des valeurs absolues (El Kharrassi, 2015).

Selon Moussaoui, (2020), les cladodes *d'OFI* sont composées principalement : d'eau, de glucides, de fibres, de protéines et de lipides. La richesse en eau varie de 80 à 95 % (réserve d'eau importante) pour les raquettes fraîches (tableau 02).

**Tableau 02.** Principaux composants des cladodes *d'OFI* (Moussaoui, 2020).

Composant	Taux (g/100g MS)	Taux (g/100g PF)
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

Les raquettes sont réputées être riches en minéraux, en acides aminés, en acides gras, en acides organiques, en vitamines et en stérols ainsi que d'autres composants (Aragona et *al.*, 2018).

#### a. Minéraux

Dans la cladode, les principaux minéraux sont le calcium et le potassium, dont la prédominance est pour le potassium avec une quantité allant jusqu'à 55,20 mg/100 g suivi de calcium avec une teneur de 17,95 mg/100 g (tableau 03) (El-Mostafa et *al.*, 2014).

**Tableau 03.** Principaux minéraux contenus dans les cladodes *d'OFI* (El-Mostafa et *al.*, 2014).

Minéraux	Teneur (mg/100g MS)
Calcium	5.64-17-95
Oxalate de calcium	4.3-11.5
Magnésium	8.8
Sodium	0.3-0.4
Potassium	2.53-55.20
Fer	0.09
Phosphore	0.15-2.59
Zinc	0.08
Manganèse	0.19-0.29

#### b. Acides aminés

Selon Feugang et *al.*, (2006), parmi les 22 acides aminés du corps humain, 18 sont retrouvés dans la composition des cladodes du figuier de barbarie. D'après El-Mostafa et *al.*,

(2014), l'acide aminé présent majoritairement chez la cladode est la glutamine avec une teneur de 36,12 mg/100g, suivie par la valine, la sérine, l'acide glutamique, la lysine, l'arginine (tableau 04).

**Tableau 04.** Principaux acides aminés des cladodes *d'OFI* (El-Mostafa et *al.*, 2014).

Acides aminés	Teneur (mg/100g MS)
Alanine	1.25
Arginine	5.01
Asparagine	3.13
Acide aspartique	4.38
Acide glutamique	5.43
Glutamine	36.12
Cystine	1.04
Histidine	4.18
Isoleucine	3.97
Leucine	2.71
Lysine	5.22
Méthionine	2.92
Phénylalanine	3.55
Sérine	6.68
Thréonine	4.18
Tyrosine	1.46
Tryptophane	1.04
Valine	7.72

### c. Acides organiques

L'acidité des cladodes varie pendant la journée en raison de son métabolisme de type CAM (Crassulacean acid metabolism), qui est un type de photosynthèse permettant à certaines plantes terrestres chlorophylliennes de fixer le carbone, expliqué par l'effet du rythme diurne, ce qui a conduit aux variations des teneurs, dont la plus élevée, selon Abidi et *al.*, (2009), est celle de l'acide malique qui est de 985 mg/100g, suivi de l'acide citrique avec 178 mg/100g et pour les acides citrique, oxalique et malonique, on remarque qu'ils se

trouvent en deuxième rang en termes de présence. L'acide tartrique et succinique ont été trouvés seulement à l'état de traces (tableau 05) (Moussaoui, 2020).

**Tableau 05.** Composition des cladodes d'*OFI* en acides organiques à deux moments de la récolte (Abidi et *al.*, 2009).

Acides organique	Teneur (mg/100g PF)	
	6h (matin)	18h (après-midi)
Acide oxalique	35	35
Acide malique	985	95
Acide citrique	178	31
Acide malonique	36	Traces
Acide succinique	Traces	Traces
Acide tartrique	Traces	Traces

#### d. Acides gras

Selon Astello-García et *al.*, (2015), l'*OFI* a une faible teneur en matière grasse. L'analyse quantitative des lipides totaux réalisée à partir des extraits des cladodes montre que l'acide linoléique (C18: 2), l'acide linoléique (C18: 3), l'acide palmitique (C16: 0) ainsi que l'acide oléique (C18: 1) constituent 93 % de la teneur des lipides et que les principaux acides gras sont les acides linoléique et linoléique dont la prédominance et pour les acides linoléique (tableau 06) (Moussaoui, 2020).

**Tableau 06.** Composition en acides gras dans la cladode d'*OFI* (El-Mostafa et *al.*, 2014).

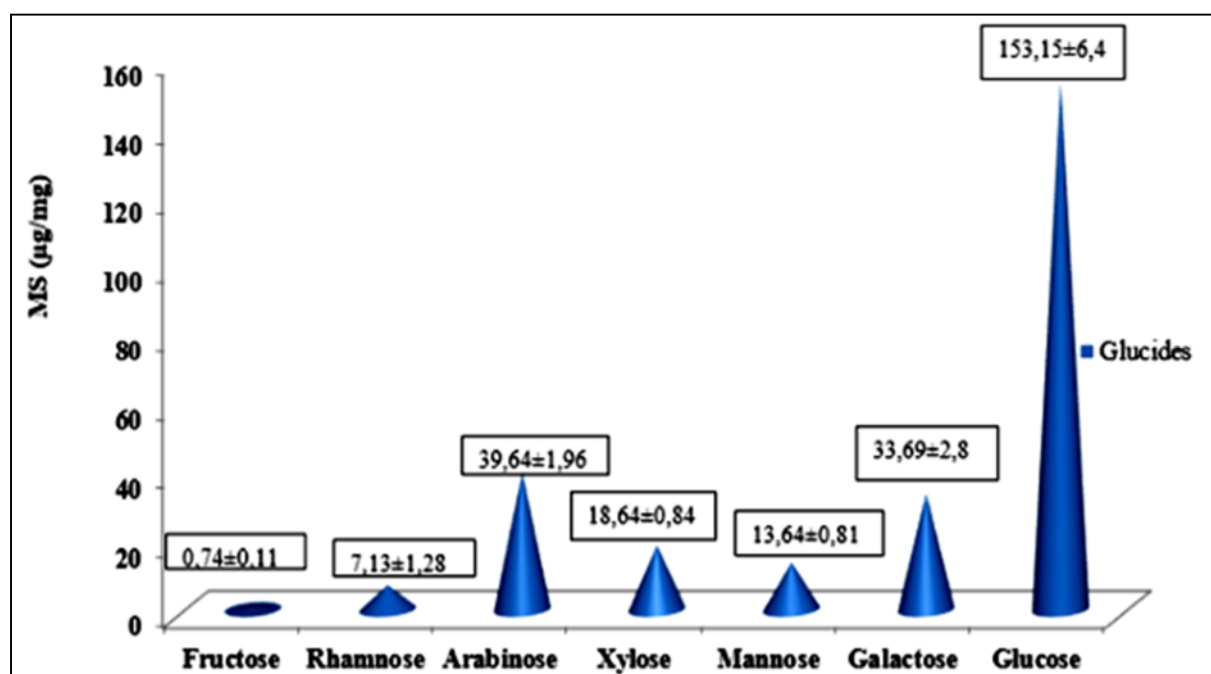
Acides gras	Teneur (mg/100g MS)
C12 :0	1.33
C14 :0	1.96
C16 :0	13.87
C16 :1	0.24
C18 :0	3.33

**Tableau 06.** Composition en acides gras dans la cladode d'*OFI* (El-Mostafa et *al.*, 2014)  
(suite).

Acides gras	Teneur (mg/100g MS)
C18 :1	11.16
C18 :2	34.87
C18 :3	33.23
C20 :0	----
C22 :0	----
C22 :1	----
C24 :0	----

### e. Glucides

Les glucides sont les macromolécules les plus abondantes dans les cladodes d'*OFI*, ils sont compris entre 64 et 80.9 % de poids sec. Cependant, ce taux est proportionnel aux variations agronomiques et environnementales ainsi qu'à l'âge des cladodes, car les jeunes cladodes sont les plus riches en glucides, dont la prédominance est pour le glucose (Belhadj Slimen et *al.*, 2016) (figure07).



**Figure 07.** Composition des cladodes d'*OFI* en glucides (Ginestra et *al.*, 2009).

### f. Vitamines, caroténoïdes et chlorophylles

Les cladodes d'*OFI*, particulièrement celles du stade jeune, sont une bonne source de vitamines notamment la vitamine C dont la teneur s'élève à 22 mg (Tableau 07) (Moussaoui, 2020).

**Tableau 07.** Composition en vitamines dans les cladodes du figuier de barbarie (Moussaoui, 2020).

Vitamines	Pour 100 g de poids frais
<b>Vitamine C totale</b>	7-22 mg
<b>Niacine</b>	0.46 mg
<b>Riboflavine</b>	0.60 mg
<b>Thiamine</b>	0.14 mg
<b>B-carotène</b>	11.3-53 µg

En ce qui concerne les caroténoïdes, se sont des pigments naturels liposolubles de couleur jaune, orange et rouge (Voutilainen et *al.*, 2006). Le tableau 07, montre que la teneur en  $\beta$ -carotène qui est le précurseur de la provitamine A, n'excède pas 11.3 à 53.5 µg, alors que la teneur en chlorophylle totale est plus importante avec 12,5 mg pour 100 g de cladodes fraîches ou la chlorophylle (a) est dominante avec 9,5 mg/100g (Hadj Sadok, 2010).

## V. Culture de figuier de barbarie

Le figuier de barbarie est une plante facile à cultiver ; sa propagation à travers le monde est une procédure simple et accessible du moment où les conditions climatiques et édaphiques sont réunies et les moyens de reproduction dont elle dispose (graines et boutures) sont abondants (Arba, 2017).

### V.1. Exigence écologique

Le figuier de barbarie est considéré comme une culture tolérante aux changements climatiques, connu par sa tolérance à la sécheresse et son adaptation aux conditions désertiques les plus hostiles (El Kharrassi, 2015). Il pousse principalement dans les zones arides et semi-arides et dans des conditions extrêmes où il y a peu de concurrence avec d'autres plantes (Rebman and Pinkava, 2001). Ses remarquables caractéristiques morphologiques, physiologiques et biochimiques lui permettent de vivre sous différentes

conditions climatiques et d'être exposé à des facteurs biotiques divers (Stintzing et Carle, 2004).

### V.1.1. Conditions climatiques

- **Température**

Le figuier de barbarie est sensible à la température de congélation, mais extrêmement tolérant à la température élevée (Nobel and Bobich, 2002). Son extension est surtout limitée par les basses températures hivernales, son seuil de tolérance étant de -10 °C à -5 °C (El Kharrassi, 2015). Les besoins en chaleur de cette plante sont importants et pendant la phase de croissance du fruit, ils se situent entre 15 et 25 °C. Les températures moyennes annuelles de 15 à 18 °C lui conviennent parfaitement. Il peut supporter les fortes chaleurs qui dépassent 50 °C (Boutakiout, 2015).

- **Nature des sols**

Le figuier de barbarie n'a aucune exigence vis-à-vis de la nature chimique du sol, mais il présente une préférence pour les sols légers, sablonneux-limoneux et caillouteux (Neffar, 2012), généralement pauvres en matière organique, ayant des pH moyennement acides et à faible taux d'argiles (< 20%) afin d'éviter la pourriture des racines). Il peut également supporter sans dommage, des sols gypseux ou des sols légèrement salins, à condition qu'ils soient bien drainés (El Kharrassi, 2015). Il est rencontré même dans des sols calcaires et pour une production de fruit de bonne qualité, le sol doit contenir des taux élevés en potassium et en calcium (Abidi, 2010).

- **Précipitations**

Selon la nature des sols, les exigences en précipitations diffèrent (Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2010) :

- **Sols sableux et profonds** : le minimum de précipitation tourne autour de 300 à 400 mm/an ;
- **Sols vaseux et limoneux** : la moyenne des précipitations minimales requise est de 200 mm/an.

- **Humidité**

Le figuier de barbarie est éliminé des régions dont la moyenne relative de l'humidité est au-dessous de 40 % pour plus de 30 jours successifs, ce qui se traduit par un grand déficit de

saturation de l'atmosphère (humidité relative basse) (Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2010).

- **Drainage**

Classé parmi les plus importantes exigences écologiques. Il est déconseillé d'utiliser des sols argileux mal drainés, car ils affectent le figuier de barbarie qui est très sensible au manque d'oxygène au niveau des racines (Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2010).

### V.1.2. Facteurs biotiques

Les facteurs biotiques jouent aussi un rôle important dans la culture et dans la production du *cactus*. Les raquettes du figuier de barbarie sont exposées à de nombreuses maladies et parasites (Walali-Loudyi, 1995), dont les agents responsables et leurs manifestations ainsi que les moyens de traitements à appliquer sont décrits dans le tableau 08 ci-dessous.

**Tableau 08.** Principaux ennemis et maladies des raquettes (Walali-Loudy, 2004).

Types	Agents	Manifestations	Traitements
<b>Rouille</b>	<i>Phyllostica opuntiae</i>	Petites taches de couleur jaune rouille, circulaires, peuvent s'étendre en plaques irrégulières de couleur blanche et finir par se dessécher (figure 11).	-Traitement curatif à base de cuivre. -Ablation des cladodes parasités.
<b>Mildiou</b>	<i>Phytophthora cactorum</i>	Apparition de cloques soulevant l'épiderme et de taches brunâtres (figure 10).	Elimination des parties atteintes suivie de leur incinération.
<b>Cératite</b>	<i>Ceratitis Capitata</i> Wied	Altération des fruits (figure 09).	Utilisation des insecticides.
<b>Cochenilles</b>	<i>Dactylopius coccus</i>	Apparition de teinte rouge et dépérissement des cladodes (figure 08).	Application de parathion ou huile blanche.

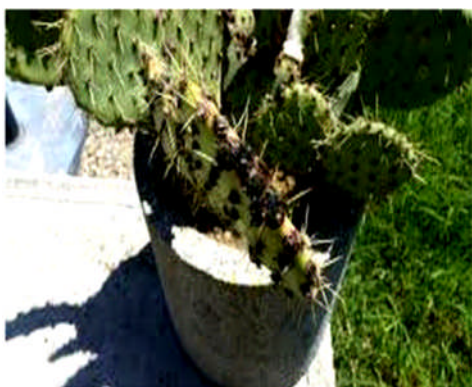
Les maladies mentionnées dans le tableau 08, sont illustrées dans les figures suivantes (Anonyme 01) :



**Figure 08.** Cochenilles d'*OFI*



**Figure 09.** Cératite d'*OFI*



**Figure 10.** Mildiou d'*OFI*



**Figure 11.** Rouille d'*OFI*

## V.2. Reproduction et techniques de multiplication

### V.2.1. Multiplication par graine (sexuée)

La multiplication à partir des graines n'est pas courante, mais favorise l'échange actif de gènes et aide à maintenir la variabilité génétique (Rebman et Pinkava, 2001).

Cette technique passe par les étapes suivantes (Hadjkouider, 2008) :

- ✓ **Ramassage** : les graines doivent être obtenues à partir des fruits entiers, sains, mûrs ou sénescents, bien lavés et tamisés. Elles sont ensuite séchées pendant deux jours afin de réduire l'humidité extérieure. On élimine alors à la main les résidus additionnels de la chair attachée à la graine.

- ✓ **Traitement** : il est souhaitable de traiter les graines contre les organismes responsables de la micro putréfaction des racines par l'application des insecticides et des fongicides.
- ✓ **Scarification** : consiste à éliminer la couche externe de la graine qui empêche leur germination (rupture mécanique).
- ✓ **Stockage** : les graines sont stockées dans des sacs en papier ou dans des récipients en plastique, dans des conditions fraîches et sèches.
- ✓ **Germination** : la température optimale pour la germination est généralement comprise entre 25 °C et 35 °C. La radicule peut percer l'enveloppe de la graine en trois à quatre jours. Elle peut commencer après une semaine ou peut s'étendre jusqu'à 02 mois après le semis.

### V.2.2. Multiplication végétative (asexuée)

La multiplication végétative du figuier de barbarie est réalisée par bouturage de raquettes dont la fructification commence à partir de la 2<sup>ème</sup> ou de la 3<sup>ème</sup> année après l'implantation, tandis que la pleine production est atteinte à la 7<sup>ème</sup> année (Msaddak, 2018).

Elle présente plusieurs avantages: elle est simple, rapide et économique, elle permet d'obtenir des plantes uniformes et identiques à la plante mère (Bouayad, 2012).

Elle passe par les étapes suivantes :

#### ✓ **Bouturage**

Forme de multiplication végétative, généralement emploie des raquettes de 2 ans ou bien une raquette de 2 ans avec 2 ou 3 raquettes d'un an.

Après la collection des cladodes, ces dernières devraient être stockées pendant quatre à six semaines dans un endroit sec et d'ombre, pour cicatriser la partie blessée où la coupe a été faite. Il faut éviter le séchage au soleil pour ne pas favoriser le recourbement de la cladode (Inglese et *al.*, 2002).

#### ✓ **Greffage**

Le greffage de l'*Opuntia* est utilisé pour des espèces exotiques et ornementales et pour avoir des formes décoratives. Le greffage des plantes adultes est utile pour des études phytopathologiques (Hadjkouider, 2008).

### ✓ **Micro propagation**

Appelée aussi « Culture in vitro », c'est une pratique qui consiste à produire un grand nombre de nouvelles plantes génétiquement identiques par multiplication rapide (taux élevé de multiplication) (Hadjkouider, 2008). Elle se réalise dans des conditions contrôlées (température, taux d'humidité et luminosité) et elle est utilisée même pour conserver les espèces rares.

### ✓ **Embryogenèse somatique**

Représente une méthode très prolifique de multiplication in-vitro des végétaux qui permet d'obtenir des plantules qui sont parfaitement identiques à la cellule mère. Les facteurs les plus importants pour une régénération réussie sont le milieu de culture et les conditions environnementales d'incubation (Hadjkouider, 2008). Elle permet le stockage à long terme des végétaux.

## **V.3. Conduites et techniques culturales**

### **V.3.1. Choix de l'espèce et de cultivar**

Le choix de la variété prend une certaine importance selon le but de l'implantation (Mulas M et Mulas G, 2004) :

- **Consommation directe** (production de fruit) : dans ce cas, il est important de connaître l'évolution du marché et d'évaluer le type de fruit préféré par les consommateurs pour faciliter sa commercialisation.
- **Utilisation fourragère** : dans ce cas, la production des fruits et le choix de la variété passent au second plan, mais il est préférable de choisir les variétés inermes, pour éviter l'élimination des épines avant la consommation de la part du bétail.

### **V.3.2. Implantation**

#### **V.3.2.1. Préparation du sol**

Consiste à réaliser des trous de plantation de 10 à 20 cm de profondeur et de 50 cm de diamètre, tout en procédant par un épierrage si le sol est très caillouteux et ceci pour ne pas empêcher le développement des racines (Derd, 2000). La préparation du sol consiste aussi à faire labourer le sol (60 à 80 cm de profondeur) et lui apporter des fertilisants tout en veillant à avoir un sol ameubli pour assurer un bon drainage (Hadjkouider, 2008).

### V.3.2.2. Saison de plantation

La saison de plantation varie d'une région à une autre selon la latitude et les conditions environnementales. Deux saisons sont considérées (Bhira, 2012) :

-**Automne** : de septembre à novembre pour les régions à hivers doux et de septembre à octobre dans les régions à hivers frais.

-**Printemps** : pendant les mois de février, mars et avril dans les zones à hivers doux et pendant le mois d'avril et mai dans les régions à hivers frais.

### V.3.2.3. Densité et méthodes de plantation

L'implantation peut être réalisée selon la nature et l'inclinaison du terrain et aussi en fonction de l'objectif principal. Dans le cas de production fourragère, il est important d'augmenter la densité de plantation.

Les méthodes les plus utilisées sont les suivantes (Hadjkouider, 2008) :

- Plantation en trous soit en utilisant une raquette unique où une raquette double ou bien trois raquettes (en bouquet).
- Plantation en rangs.

La forte densité n'est conseillée que pour les zones qui sont relativement bien arrosées et l'orientation N-S est importante pour fournir l'ensoleillement des plantes (Halimi, 2015).

### V.3.2.4. Entretien de la culture

La culture chez *l'Opuntia* a besoin des apports complémentaires en irrigation, des traitements phytosanitaires et des travaux superficiels du sol ainsi que des apports de fumier (Araba et al., 2000).

Pour une augmentation du rendement en matière verte et une meilleure productivité, la plantation requiert divers soins culturaux qui sont:

#### a. Fertilisation

D'après Araba et al., (2000), les recherches menées en Italie ont montré que l'utilisation de l'azote améliore la floraison et permet une production hors saison. Certains agriculteurs ont même ajouté du fumier à leurs plantations de figuier, ce qui traduit par une augmentation dans la productivité. La fertilisation a pour but non seulement l'augmentation de la production, mais aussi, l'augmentation de pourcentage de protéines (Hadjkouider, 2008).

### b. Irrigation

Le figuier de barbarie est une plante très peu exigeante en eau, il a deux périodes critiques durant lesquelles, il est recommandé de faire des apports d'eau : la floraison et le grossissement de fruits (Hadjkouider, 2008). Selon Arba (2017), l'irrigation se fait à partir du mois de juillet de la première année et le traitement irrigation une fois par semaine a donné les meilleurs résultats en ce qui concerne l'émission des pousses et le rendement en biomasse.

## VI. Utilisation du figuier de barbarie

*OFI* est une plante qui contient la majorité des éléments dont notre organisme a besoin pour son bon fonctionnement. Elle est utilisée dans différents domaines : en médecine, en pharmacologie, en agroalimentaire, en cosmétique ; elle est aussi utilisée comme clôture, dans le greffage, etc.

Le tableau suivant (tableau09) résume quelques utilisations de différentes parties de cette plante.

**Tableau 09.** Utilisation des différentes parties d'*OFI*

Partie utilisée	Domaines d'utilisation	Références
<b>Fruit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Substitut de l'eau potable.</li> <li>-Aliment de base en cas de famine.</li> <li>-Fabrication de jus, concentrés, confitures et marmelades, etc.</li> <li>-Production de pectine.</li> <li>-Prévention des maladies telles que le diabète, certains troubles cardio-vasculaires, les infections de l'appareil urinaire et les troubles digestifs.</li> <li>-Utilisation comme colorant naturel et édulcorant.</li> </ul>	(Rabemanantsoa, 2010 ; Alimi et <i>al.</i> , 2010)
<b>Fleur</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Apiculture (source nutritive très appréciée par les abeilles).</li> <li>-Remède contre le dysfonctionnement de la prostate et contre les insuffisances rénales.</li> <li>-Le bouilli des fleurs séchées est utilisé en pharmacopée traditionnelle, aux brûlures et coups de soleil.</li> </ul>	(Rabemanantsoa, 2010 ; Ennouri et <i>al.</i> , 2005)

Tableau 09. Utilisation des différentes parties d'*OFI* (suite)

Partie utilisée	Domaines d'utilisation	Références
<b>Cladode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Production de conserves à base de vinaigre.</li> <li>-Utilisation en tant que légumes.</li> <li>-Complément alimentaire pour les bovins et les ovins.</li> <li>-Matière première pour la fabrication de shampooing, crèmes capillaires et laits hydratants pour le visage.</li> <li>-Production d'adhésif.</li> <li>-Barrière contre la désertification et l'érosion des sols.</li> <li>-Production d'éthanol par fermentation.</li> <li>-Transformé en farine pour remplacer celle de blé dans les cookies.</li> </ul>	(Del-Valle et <i>al.</i> , 2005; Hadj Sadok, 2010)
<b>Graine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Extraction d'huile utilisée dans les produits cosmétiques.</li> <li>-Production de farine.</li> <li>-Réduction des risques de maladies cardio-vasculaires et maladies coronariennes.</li> </ul>	(Ennouri et <i>al.</i> , 2006)

#### ❖ Formes d'utilisation

Le figuier de barbarie est généralement consommé frais, mais d'autres formes d'utilisations existent (tableau 10).

Tableau 10. Formes d'utilisation de figuier de barbarie (Temagoult, 2017)



Forme	Description	Photographies
<b>Jus</b>	-Obtenu du fruit sans ajout d'eau ni de sucre, donne une délicieuse boisson qu'il faut boire fraîche, le plus rapidement possible après sa production.	

Tableau 10. Formes d'utilisation de figuier de barbarie (Temagout, 2017) (suite)

Forme	Description	Photographies
<b>Fleurs séchées de figuier de barbarie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilisées dans la tradition berbère, comme infusion pour soulager les douleurs gastro-intestinales et prévenir les ulcères grâce à ses propriétés anti-inflammatoires.</li> <li>-En macérât ou en lotion, elles seront un soin cosmétique anti-âge.</li> </ul>	
<b>Huile de pépins</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Obtenue par pression à froid des graines de figue de barbarie.</li> <li>-Il est naturelle à 100 %, exceptionnelle pour la peau.</li> <li>- Réparateur, nourrissant et très hydratant.</li> <li>-Taux élevée en antioxydants et en Acides Gras (redonnent à la peau sa fermeté).</li> </ul>	
<b>Farine de cladode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Contient 16.5 % de protéines et 48 % de fibres.</li> <li>-Riche en acides gras essentiels, stérols et vitamine E.</li> <li>-Utilisée comme exfoliant, anti-âge et pour produire une macération précieuse</li> </ul>	
<b>Confiture</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Sélection rigoureuse de fruits de tout premier choix associée au sucre de canne.</li> </ul>	
<b>Vinaigre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Extrait de la pulpe de figue de barbarie.</li> <li>-Il a un arôme riche, savoureux et fruité avec une légère acidité et son goût très raffiné.</li> <li>-A plusieurs qualités nutritives et cosmétiques.</li> <li>-Stimule la flore intestinale.</li> <li>-Améliore la digestion et renforce les défenses naturelles.</li> </ul>	

**Tableau 10.** Formes d'utilisation de figuier de barbarie (Temagoult, 2017) (suite)

<b>Forme</b>	<b>Description</b>	<b>Photographies</b>
<b>Poudre de cladode</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Reconnue comme un complément alimentaire dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et équilibré.</li><li>-Constitue une source concentrée de nutriments.</li><li>-Riche en fibres ainsi qu'en acides aminés et en vitamines.</li></ul>	

---

# **Chapitre II.**

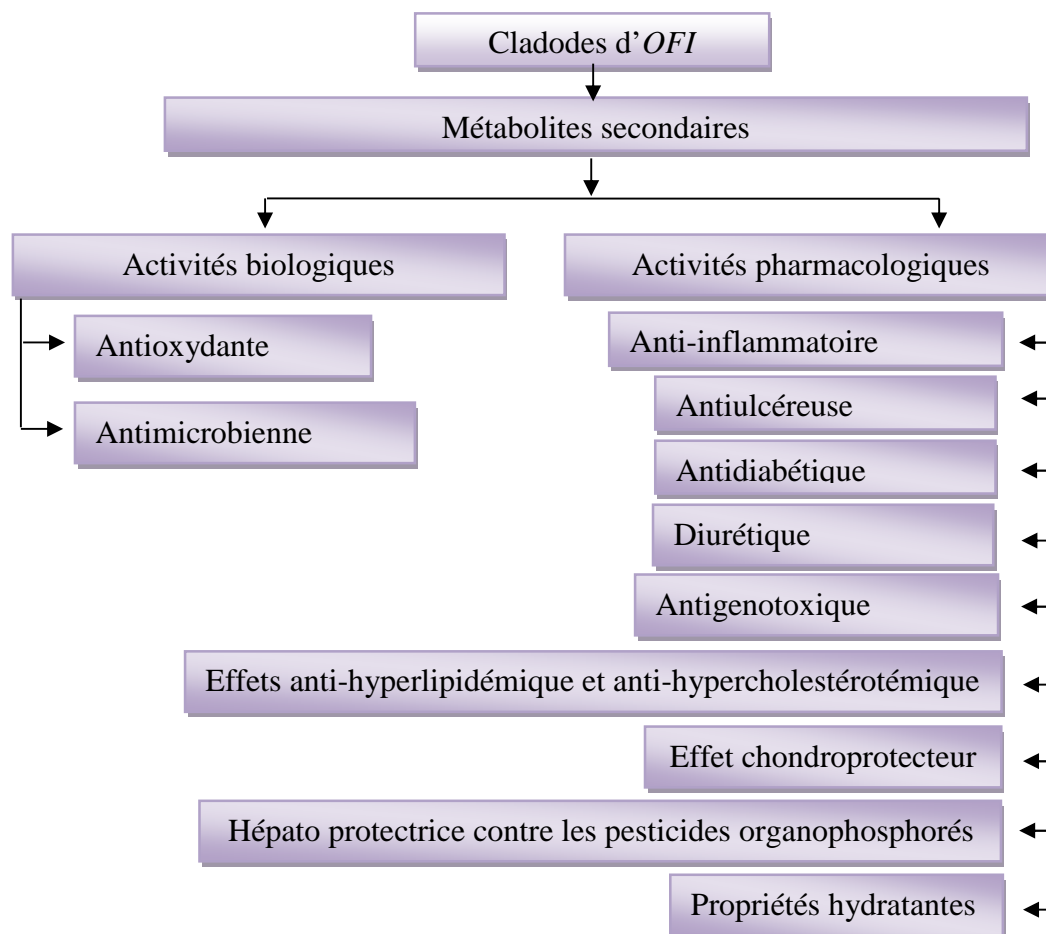
## **Activité antimicrobienne des cladodes**

---

## Introduction

D'après les recherches scientifiques, l'*OFI* a été utilisée en médecine traditionnelle pour le traitement de plusieurs maladies (Shetty et al., 2012) et cela grâce à ses cladodes riches en composés bio-fonctionnels et aux propriétés nutritionnelles et curatives souhaitables (Mena et al., 2018). En plus des métabolites primaires classiques qui assurent la survie de la plante (glucides, protides et lipides, protéines, vitamines), *OFI* accumule aussi des métabolites secondaires ayant des activités biologiques telles que les vitamines, les composés phénoliques, les flavonoïdes et les caroténoïdes (Núñez-Gastelum et al., 2018). Ces métabolites bioactifs dotés de propriétés antioxydantes et antimicrobiennes, sont nécessaires à la défense contre les agressions extérieures et le stress oxydatif qui résulte de la surproduction de radicaux libres (RL) (Zrira et al., 2016).

Ce chapitre illustre une synthèse de travaux réalisés à propos des biomolécules actives d'*OFI* et leurs activités biologiques (figure 12) et plus particulièrement les activités antimicrobiennes.



**Figure12.** Schéma présentatif des activités biologiques et pharmacologiques des cladodes d'*OFI*.

## I. Activité antimicrobienne des extraits de cladodes d'*OFI*

Depuis plusieurs années, des maladies infectieuses, transmissibles et invisibles à l'œil nu ont accompagné l'homme, mais leurs manifestations cliniques ont été tardivement distinguées et leurs causes étaient ignorées jusqu'au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle (naissance de la microbiologie) (Benkaddouri, 2011).

L'apparition de la microbiologie permet d'identifier et de caractériser des microorganismes, d'étudier leur origine, leur évolution, leurs activités et comprendre les relations qu'ils entretiennent entre eux et avec leur milieu et donc, de trouver des solutions ou des traitements pour ces infections. Pour cela, un grand rôle est attribué à l'utilisation de certaines plantes ayant des propriétés médicamenteuses pour la guérison humaine et qui peuvent avoir également des usages alimentaires. Dans le cas de l'*OFI*, de nombreux chercheurs ont étudié l'activité antimicrobienne d'extraits de cladodes.

L'activité antimicrobienne, peut être définie comme une activité biologique essentielle pour éliminer les infections, les maladies ou les effets indésirables causés par des microorganismes pathogènes, en utilisant des agents ou des extraits des parties des plantes médicinales (Ben Abdallah, 2019).

La thérapeutique des infections microbiennes se base principalement sur l'usage des antibiotiques, mais comme ils peuvent entraîner la sélection de souches multi-résistantes, les chercheurs se sont orientés vers l'utilisation d'autres agents antimicrobiens (Billing et Sherman, 1998).

### I.1. Activité antifongique

Des infections peuvent être causées par certains champignons en particulier le genre *Aspergillus* ou le *Candida*. Le taux de ces infections a augmenté, en raison de l'utilisation intensive d'antibiotiques à large spectre, en particulier par les patients immunodéprimés (Kousha et al., 2011). En outre, *Aspergillus fumigatus* est le deuxième agent pathogène humain après *Candida albicans*, suivi par *Aspergillus flavus* (Frisvad et Larsen, 2016).

Une étude est menée en 2019 par Hajar et al., dans le but de déterminer la teneur en composés phénoliques totaux des extraits méthanoliques pour trois parties de *cactus OFI* (cladodes, fleurs et fruits) et leur activité contre certains champignons pathogènes

(*Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus flavus*) par rapport à un antibiotique (fluconazole). Les extraits ont été préparés à des concentrations (125, 250, 500, 1000) mg/ml, tandis que la solution de fluconazole a été préparée à des concentrations (1,25, 2,5, 5, 10) mg/ml. Ensuite, 1 ml de chacune des concentrations a été ajouté à 10 ml de la culture Sabouraud Dextrose Agar (SDA) et bien agité, puis verser dans des plaques de pétri en plastique.

Sur la base des résultats, l'extrait de fruits a montré la teneur la plus élevée en composés phénoliques atteignant 31,516 mg d'équivalent en acide gallique (EAG)/g de matière sèche (MS), suivi des extraits des fleurs et des cladodes avec une valeur de 20,35 et 14,75 mg EAG/g MS respectivement. L'extrait méthanolique des fleurs était le plus efficace contre *Aspergillus fumigatus*, avec un taux d'inhibition de 100 %, suivi des extraits de cladodes et de fruits avec des pourcentages d'inhibition de l'ordre de 89,57 et 78,66 % respectivement. Cette différence d'efficacité des extraits étudiés pour inhiber la croissance des champignons étudiés, peut être expliquée selon Naczk et Shahidi, (2006), par la variabilité de la composition chimique des parties utilisées. Par ailleurs, l'inhibition de la croissance des deux champignons (*Aspergillus fumigatus* et *Aspergillus flavus*) par le fluconazole avec différents pourcentages a été moins efficace que celle de l'extrait méthanolique des parties étudiées (Belay et al., 2015).

Dans une autre récente étude, Noah Badr et al., (2020), ont évalué de nouveaux phytoconstituants qui offrent des propriétés anti-mycotoxinogènes. Pour cela, ils ont utilisé les pelures de fruits et les cladodes d'*OFI* sauvage comme matériaux bioactifs. Quatre souches de champignons toxigènes identifiés d'*Aspergillus spp* (*Aspergillus flavus* ITEM 698, *Aspergillus parasiticus* ITEM 11, *Aspergillus fumigatus* ATCC 1022 et *Aspergillus niger* ITEM 3856) ont été utilisées pour les expériences anti-mycotoxigéniques et antiaflatoxigènes. D'après les résultats, ils ont trouvé que l'extrait des cladodes a manifesté de meilleures caractéristiques antimycotiques et antimycotoxiques en raison de sa teneur élevée en phénols (deux fois en moyenne) par rapport aux pelures de fruits, ce qui indiquait aussi un potentiel antioxydant plus élevé de cet extrait.

L'utilisation des sous-produits d'*OFI* (SPOFI) (sous-produits d'*OFI* séparés avant la préparation de la partie comestible, comprennent les pelures de fruits, les graines, la tige et les cladodes) est considérée comme solution prometteuse pour la gestion des déchets, et ce, par leur exploitation en tant que riche réservoir bioactif présentant des activités pharmacologiques

contre diverses maladies chroniques (Osuna-Martínez et *al.*, 2014). En effet, les extraits d'SPOFI sont capables de dégrader les mycotoxines (activité contre le stress oxydatif) (Noah Badr et *al.*, 2020).

## 1.2. Activité antibactérienne

La résistance aux antimicrobiens est considérée parmi l'un des problèmes les plus graves dans le traitement des infections microbiennes, elle rend difficile le traitement et la prévention des infections bactériennes, fongiques, parasitaires et virales, ce qui cause des effets secondaires indésirables, parfois mortels sur l'hôte (Gupta et *al.*, 2015). Sur la base de ces enjeux, plusieurs expériences ont été réalisées (Kumar et Sharma, 2020).

Une étude sur le pouvoir antimicrobien des extraits de raquettes d'*OFI* (méthanolique, éthanolique), a été effectuée au laboratoire de bactériologie de l'institut des vétérinaires de l'université de Constantine, sur les bactéries (*Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* et *Escherichia coli*). Ils ont observé que tous les extraits de raquettes se sont avérés inactifs contre *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa* testées, car ces bactéries possèdent un potentiel de résistance très élevé, alors que la bactérie *staphylococcus aureus* a manifesté une résistance relative vis-à-vis des extraits (Benattia, 2017).

Par ailleurs, Gebrekidan et Aragaw, (2017) ont affirmé que les extraits de cladodes et de fruits d'*OFI* obtenus avec le chloroforme, le méthanol et l'éthanol, possèdent une grande activité antibactérienne contre les bactéries à Gram positif et à Gram négatif, en raison de la présence de divers constituants bioactifs dans ces extraits.

*Escherichia coli* est l'une des bactéries responsable des infections urinaires dans plus de 90 % des cas en particulier chez les femmes (Esmaeili et *al.*, 2019). Trouver des antimicrobiens contre les effets indésirables de ces infections est aujourd'hui inévitable (Blango et Mulvey, 2010). Pour cela, Pourmajed et *al.*, (2021), ont rapporté qu'une étude s'est déroulée en 2018, dont le but était d'évaluer l'effet antimicrobien des extraits à l'éthanol et à l'acétate d'éthyle d'*OFI* sur *Escherichia coli* isolé de patients atteints d'une infection des voies urinaires (UTI). Les résultats ont montré que l'extrait à l'éthanol d'*OFI* a plus d'activité antimicrobienne contre *Escherichia coli* que l'extrait à l'acétate d'éthyle.

Plusieurs chercheurs ont essayé d'étudier et d'évaluer la composition phytochimique, ainsi que les activités antimicrobiennes d'*OFI* ; citant Welegerima et *al.*, qui ont contribué en 2018 à présenter cette richesse par leur étude sur les extraits de cladodes d'*OFI* contre certains isolats bactériens sélectionnés (*Escherichia coli*, *Streptococcus pneumonia*, *Salmonella typhi* et *Bacillus subtilis*), en utilisant la méthode de diffusion en puits d'agar. Pour ce faire, ils ont préparé des extraits en mélangeant la poudre fine de cladodes avec de l'éthanol, du méthanol et du chloroforme pour une analyse qualitative des composés phytochimiques de ces extraits. Ensuite, les activités antibactériennes ont été évaluées en mesurant le diamètre de la zone d'inhibition formée.

L'analyse qualitative a montré la présence de substances phénoliques, tanins, glycosides, alcaloïdes, flavonoïdes, saponines, stéroïdes, alcaloïdes et acides aminés, comme composants phytochimiques des extraits de cladodes. Ainsi, ils ont remarqué que la zone d'inhibition la plus élevée enregistrée était celle obtenue avec l'extrait au méthanol contre *Streptococcus pneumonia* ( $10,29 \pm 0,96$ ) suivi d'un extrait au chloroforme contre *Bacillus subtilis* ( $10,23 \pm 0,66$ ). En revanche, une zone d'inhibition minimale a été montrée par des extraits au méthanol contre *Salmonella typhi* ( $4,50 \pm 0,89$ ). Cela, suggère que les cladodes d'*OFI* ont une grande activité antibactérienne contre les bactéries Gram (+) et Gram (-), mais la zone d'inhibition contre Gram (+) était de loin supérieure à celle des Gram (-), ce qui peut être expliqué par la présence d'une seule couche externe de peptidoglycane dans les bactéries à Gram positif.

Une étude approfondie a été menée par El Feghali et *al.*, en 2018, pour tester le potentiel d'extraits bruts, aqueux et méthanoliques d'*OFI* (*cactus*) comme inhibiteurs de la croissance de quatre isolats bactériens cliniques multi-résistants: *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* et *Pseudomonas aeruginosa*.

Comme résultats, cette étude a montré que les extraits bruts et aqueux d'*OFI* ont enregistré une inhibition totale de la croissance de toutes les souches bactériennes testées à une concentration de 0,1 mg/ml (extrait aqueux autoclavé), alors que l'extrait brut autoclavé a marqué une inhibition totale de la croissance de *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Klebsiella pneumoniae*, et partielle de la croissance de *Pseudomonas aeruginosa*.

En outre, à une concentration de 0,05 mg/ml d'extrait brut ou aqueux non autoclavé d'*OFI*, aucune des bactéries utilisées dans l'expérience n'a été inhibée, cependant, à la même

concentration, mais lorsque les deux extraits ont été autoclavés, une inhibition partielle de toutes les bactéries utilisées dans l'expérience a été observée. Par contre, aucune inhibition de la croissance d'aucune des bactéries n'a été observée à des concentrations de 0,025 mg/ml et 0,05 mg/ml, mais lorsque la concentration a augmenté à 0,1 mg/ml, l'*OFI* était partiellement capable d'inhiber la croissance de *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli* mais incapable d'inhiber la croissance de *Klebsiella pneumoniae* ou de *Pseudomonas aeruginosa*. Ainsi, à des concentrations de 0,15 mg/ml, 0,18 mg/ml et 0,25 mg/ml, *OFI* étaient capable d'inhiber partiellement la croissance de toutes les bactéries utilisées dans l'expérience.

D'après El Feghali et *al.*, (2018), les résultats obtenus avec les extraits aqueux et bruts d'*OFI* ont montré que le rendement en extrait aqueux est significatif ; ce qui est expliqué par la capacité de dissolution élevée de l'eau, c'est-à-dire que cette eau présente un indice de polarité, une constante diélectrique et une énergie de cohésion élevée, par rapport aux autres solvants, ce qui lui assure une forte liaison avec les composés polaires du soluté, provoquant leur dissolution. Ainsi, l'analyse des constituants des cladodes d'*OFI* a montré des quantités importantes de cristaux d'oxalate de calcium qui avaient un rôle important dans la rétention d'eau des tissus succulents et aidait à réguler la pression osmotique dans les cellules. Ceci explique probablement l'effet antibactérien observé de l'extrait aqueux d'*OFI* contre toutes les souches bactériennes testées.

D'une part, les résultats obtenus avec des extraits bruts sont dus au fait que l'autoclavage expose les extraits à des températures très élevées (121 °C) et à une pression élevée (15 psi) qui entraînent une dénaturation et une dégradation complètes de presque toute la matière organique présente. D'autre part, les résultats obtenus avec des extraits méthanoliques ont été associés à la présence des phénols et des flavonoïdes dans l'*OFI* ayant la capacité de réduire la formation et de piéger les radicaux libres. Ces molécules instables sont donc facilement oxydées par l'air et la lumière et peuvent par conséquent perdre leur activité. Enfin, ils ont conclu que les extraits aqueux d'*OFI* sont utilisés couramment sans aucun effet secondaire et donc ils peuvent être exploités *in vivo*.

En 2020, Bahis et *al.*, ont étudié les cladodes d'*OFI* pour leurs activités antimicrobiennes en utilisant un extrait brut et des nanoparticules d'argent synthétisées contre des souches microbiennes pathogènes pour l'homme, à savoir *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella oxytoca*, *Proteus mirabilis* et *Candida albicans*. Dans cette

expérience, tous les extraits ont démontré une activité modérée contre les bactéries testées, dont l'activité d'inhibition la plus faible était obtenue contre *S. aureus* et celle la plus élevée était contre *K. pneumoniae*.

Concernant les nanoparticules d'argent synthétisées, l'activité maximale a été enregistrée contre *K. oxytoca*, tandis que la plus faible était contre *P. mirabilis*. Le criblage antibactérien a montré que tous les extraits obtenus à partir des cladodes séchées ont des effets inhibiteurs contre *K. pneumoniae* et que tous les extraits des cladodes fraîches ont des effets inhibiteurs contre *C. albicans*. D'autre part, tous les extraits de cladode fraîches ont montré des effets inhibiteurs contre le *Candida* testé. Cette différence d'activité entre les différents extraits organiques est expliquée par les variations entre les composés extraits des cladodes.



---

## **Chapitre III.**

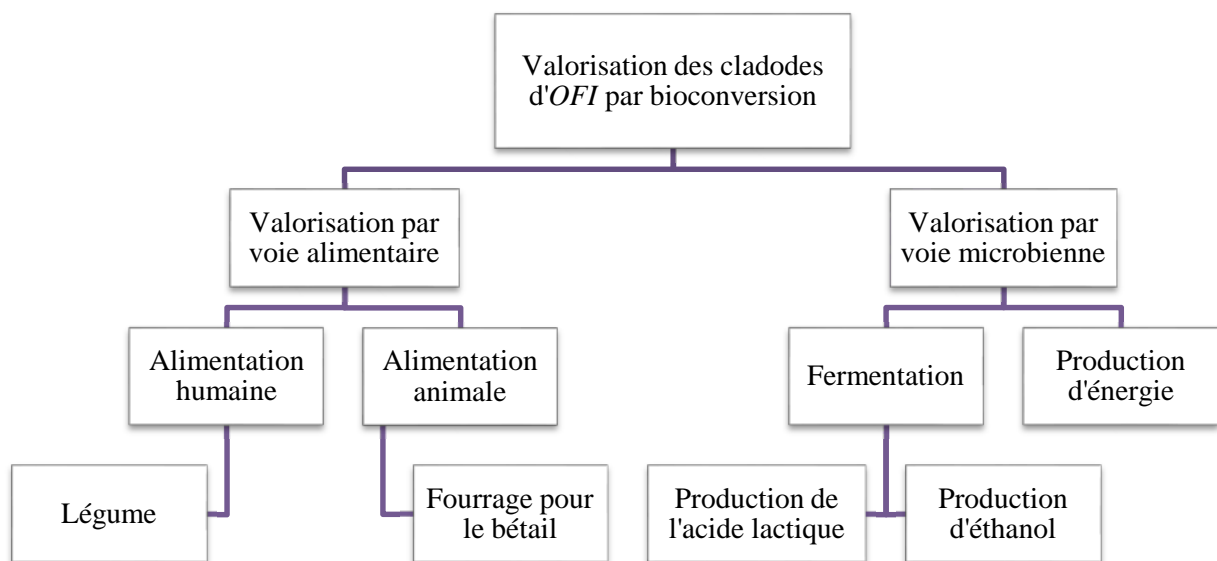
# **Valorisation des cladodes d'*OFI* par bioconversion**

---

## Introduction

Le figuier de barbarie est entièrement utilisé ; toutes ses parties sont utiles de la racine jusqu'à la raquette comme nous l'avons cité précédemment. Sa richesse en élément nutritifs, ses activités biologiques ainsi que sa grande capacité de s'adapter aux zones arides caractérisées par des conditions de sécheresse, des précipitations irrégulières et des sols pauvres sujets à l'érosion lui en permet d'être une source à intérêts multiples importante, utilisée en tant qu'une culture utile pour l'homme, la faune, la flore, la biodiversité et l'environnement (FAO, 2001). Pour cela, plusieurs pays dont de nombreux chercheurs se sont intéressés à la culture de cette matière d'une manière qui permet de l'exploiter, de la transformer et de la valoriser en donnant des techniques pour une utilisation appropriée dans divers domaines, soit alimentaires, cosmétiques, thérapeutiques et énergétiques, ainsi que d'autres utilisations améliorant les revenus des agriculteurs (Bouayad, 2012).

Dans ce chapitre, nous nous sommes orientés vers la valorisation par bioconversion des cladodes d'*OFI* (figure 13) et donc, vers la transformation de cette matière végétale en vue de la réintroduire sur le marché à titre de nouveaux ingrédients ou comme nouveaux produits.



**Figure 13.** Schéma présentatif de la valorisation des cladodes d'*OFI* par bioconversion

### I. Valorisation des cladodes d'*OFI* par voie microbienne

Ces dernières années, les réglementations environnementales sont devenues de plus en plus exigeantes, afin de réduire la charge polluante des industries agroalimentaires. Ainsi, l'exploitation des coproduits générés par cette dernière dans les bioprocédés, constitue une

alternative pour remplacer les matières coûteuses par des sources organiques, naturelles, renouvelables, abondantes et disponibles partout sur la planète (Haque et *al.*, 2014).

L'OFI est l'une de ces sources considérées comme matière première potentielle, dont les constituants intéressants de cette espèce sont transformés par conversion microbienne pour être valorisés dans le domaine énergétique (production du biogaz) et par fermentation en biomolécules d'intérêt (production de l'acide lactique, du bioéthanol) (Tamine et *al.*, 2018).

## I.1. Procédés fermentaires

### I.1.1. Effet des cladodes sur la production de l'acide lactique et l'acidification d'un produit laitier

La fermentation est une transformation d'un aliment par un microorganisme, dont la fermentation lactique est l'une des biotechnologies les plus anciennes utilisées dans la bioconservation des aliments (Filannino et *al.*, 2016). En outre, l'utilisation des bactéries lactiques est importante dans la fabrication des aliments fermentés comme les produits laitiers (yaourts et fromages) (Widyastuti et *al.*, 2014). Ces bactéries déclenchent une acidification rapide et adéquate dans les matières premières, à travers la production de divers acides organiques à partir des sucres fermentescibles, notamment l'acide lactique qui est le principal composant de tous les produits laitiers acidifiés (Bayitse, 2015).

Les cladodes d'OFI font l'objet d'un intérêt croissant avec leur profit comme potentiel nutritif et médicinal (Hadj Sadok et *al.*, 2008). Plusieurs travaux s'inscrivent dans cette perspective, en abordant leur composition en molécules bioactives, selon le stade de développement et les possibilités de leur incorporation sous forme de jus pour enrichir les aliments, particulièrement les produits laitiers. Ainsi, des études sont menées sur leur effet sur la croissance des bactéries lactiques et probiotiques d'une part, et sur le procédé de fabrication et les caractéristiques sensorielles du produit d'autre part (Hadj Sadok et *al.*, 2014).

En effet, Hadj Sadok et *al.*, (2014) ont utilisé le jus extrait des cladodes d'OFI (inerte) à moins de 3 mois d'âge et les ferments lactiques (*Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*) dans le cas de la fabrication du yaourt, ainsi qu'un mélange de souches lactiques et probiotiques (*Bifidobacterium infantis*, *Bifidobacterium breve* et *Bifidobacterium*

*longum*) pour la préparation de produits probiotiques. Ils ont constaté que la croissance et la survie des bactéries, *Bifidobacterium*, *Lactobacillus bulgaricus*, et *Streptococcus thermophilus* est toujours plus élevée lorsque ces espèces sont cultivées dans le lait additionné de jus de cladodes qu'en son absence. Cependant, leur sensibilité aux constituants et le volume du jus est différente, les moins affectées étaient *Lactobacillus bulgaricus*, *Bifidobacterium longum* et notamment *Bifidobacterium infantis*. Le test sensoriel a montré que le goût du yaourt a été peu modifié par le jus, la texture apparue légèrement grumeleuse et seule la coloration qui a connu une légère modification en raison de la présence des particules de cladodes. Par conséquent, l'addition de jus des cladodes peut être considérée comme un gain économique non négligeable, car il accélère la cinétique de fermentation du yaourt et il réduit la durée de fabrication.

### I.1.2. Cladodes et production d'éthanol

Parmi les éléments ayant reçu un intérêt particulier en tant que substrat alternatif pour la production d'éthanol, la lignocellulose qui est un composant principal de la paroi cellulaire des plantes, possédant une teneur élevée en sucres fermentescibles et largement distribuée sur la planète en tant que source de carbone très abondante (Barnette et al., 2011).

En 2019, une expérience a été élaborée par López-Domínguez et al., dans le but d'isoler et d'évaluer des micro-organismes pour la production de bioéthanol à partir de biomasses lignocellulosiques. Ils ont alors étudié l'effet de trois facteurs : pH, température et type de micro-organisme sur la libération de sucres et la production d'alcool, et ce, en utilisant un milieu de culture à base de sels minéraux additionnés de cladodes d'OFI (variété *Atlixco*) de 12 mois à 20 % comme source unique de carbone.

Deux isolats de micro-organismes ont été utilisés : une bactérie *Acinetobacter pittii* isolée de cladodes en décomposition (pourris) et *Kluyveromyces marxianus* une levure isolée de l'estomac de termite. D'après López-Domínguez et al., (2019), les concentrations en glucose et en saccharose diffèrent et sont parfois similaires selon les températures et le pH utilisés. Les deux micro-organismes exploités se sont donc avérés prometteurs pour l'hydrolyse et la fermentation, en raison de la similarité des valeurs de l'activité hydrolytique quantifiées. Par ailleurs, il a été observé qu'*Acinetobacter pittii* avait la croissance la plus élevée par rapport à la levure. Ils ont aussi conclu qu'*Acinetobacter pittii* doit être utilisée, en premier, dans les meilleures conditions pour la libération des glucides et que la levure *Kluyveromyces*

*marxianus* doit être exploitée pour la fermentation alcoolique dans un procédé simultané ou semi-simultané (López-Domínguez et al., 2019).

Dans le même contexte, kuloyo et al., (2014), ont mené des expérimentations pour déterminer la possibilité d'utiliser les cladodes d'OFI comme matière première pour la production d'éthanol. Une analyse chimique complète de la biomasse des cladodes est effectuée et l'étude de l'effet d'une aération limitée sur les profils des sucres et de fermentation a été réalisée. L'étude a été conduite avec un isolat de *Kluyveromyces marxianus* et une souche de *Saccharomyces cerevisiae* dans des conditions non aérées pour les deux levures ainsi que dans des conditions limitées en oxygène pour *K. marxianus*.

Un prétraitement à l'acide dilué de la biomasse lignocellulosique des cladode d'OFI a été effectué avant l'hydrolyse enzymatique et la fermentation (Hahn-Hägerdal et al., 2006). De plus, les performances des deux souches de levures ont été évaluées initialement dans un milieu contenant un mélange de sucres de composition similaire à l'hydrolysats enzymatique des cladodes d'OFI, et ce, comme référence avant de procéder à la fermentation des cladodes proprement dit.

Les deux procédures d'hydrolyse enzymatique et de la fermentation des matières premières prétraitées peuvent être effectuées soit en séquence, c'est-à-dire en hydrolyse et fermentation séparées, soit en une seule étape en tant que procédé simultané de saccharification et de fermentation permettant de réduire les coûts d'exploitation, car les deux sont effectuées dans un seul réacteur (Garca- Aparicio et al., 2011). De même, la fermentation à des températures élevées est également souhaitable, pour minimiser le risque de contamination microbienne et pour faciliter également la récupération continue de l'éthanol (Abdel-Banat et al., 2010).

Cette étude a montré que *K. marxianus* présente des avantages qui lui offrent un bon potentiel de production de bioéthanol comme alternative à *S. cerevisiae*. Il s'agit du taux de croissance élevé, de la tolérance à haute température et la large gamme d'utilisation du sucres lignocellulosiques (Lane et Morrissey, 2010), ainsi que la capacité de consommer complètement le galactose dans les conditions limitées en oxygène en présentant presque le double de la productivité en éthanol par rapport aux cultures non aérées. Cependant, Fonseca et al., (2008), ont remarqué que contrairement à *S. cerevisiae*, *K. marxianus* ne peut pas se

développer dans des conditions strictement anaérobies et la production d'éthanol est presque exclusivement liée à des conditions limitées en oxygène.

Pérez-Cadena et *al.*, (2018), ont testé la capacité de trois levures (*Candida intermedia*, *Zygo saccharomyces bailii* et *Saccharomyces paradoxus*) isolées de cladodes de 12 mois d'OFI var. *Atlixco*, en tant que micro-organismes de fermentation pour la production d'éthanol. Un prétraitement acide a été effectué pour les cladodes d'OFI afin de détruire la matrice cellulosique et éliminer les sucres fermentescibles (Lipnizki, 2010).

Selon les résultats trouvés, la souche *Z. bailii* présente la croissance la plus élevée avec 4,12 g/L par rapport aux autres souches étudiées, qui présentaient jusqu'à 1 g/L. Cela est expliqué par sa capacité à métaboliser les sources de carbone pour la formation de la biomasse.

En revanche, *C. intermedia* a permis d'obtenir un rendement plus élevé en éthanol (0,299 g d'éthanol /g de biomasse). Pérez-Cadena et *al.*, (2018), suggèrent, qu'étant donné que la production d'éthanol a été observée à la fois dans le milieu synthétique et dans les hydrolysats des cladodes comme milieu de culture, la levure *C. intermedia* est un bon candidat pour la production d'éthanol, notamment dans de meilleures conditions de culture menant vers une augmentation de la libération de sucres fermentescibles afin d'améliorer les rendements.

D'après Haghghi-Mood et *al.*, (2013), les biomasses lignocellulosiques de deux espèces du figuier de barbarie (*OFI* et *Nopalea cochenillifera*) ont été testées pour la production d'éthanol, sous l'effet de différentes stratégies de prétraitements pour fournir, après l'hydrolyse enzymatique, des sucres fermentescibles pour la production d'éthanol (rapporté par de Souza Filho et *al.*,(2016). Pour cela, deux procédures ont été utilisées : la saccharification et la fermentation simultanées (SSF) afin de réduire le potentiel de contamination microbiologique, les coûts d'équipement et pour empêcher l'inhibition enzymatique par le sucre et les cello-oligosaccharides produits.

D'après cette recherche rapportée par de Souza Filho et *al.*, (2016), un bon potentiel de production d'éthanol à partir des cladodes d'OFI a été enregistré après les analyses de la composition, de la cristallinité et de l'hydrolyse enzymatique qui ont été effectuées sur le matériau avant et après prétraitement. D'autre part, des souches de *S. cerevisiae*, souche LNF CA-11 et souche PE-2, ont été utilisées pour évaluer le rendement de production sur les deux

espèces d'*OFI*. Les résultats obtenus ont montré que les valeurs de rendement maximum pour *Opuntia* étaient bien inférieures à celles obtenues pour *Nopalea* et que la souche PE-2 s'est montrée plus efficace que la souche LNF CA-11 dans tous les cas étudiés en termes de conversion du glucose généré par l'hydrolyse de la cellulose en éthanol. Donc, *OFI* et *Nopalea cochenillifera* sont des matières premières potentielles pour la production d'éthanol de deuxième génération.

## I.2. Production de biogaz

L'énergie provenant des sources combustibles fossiles (pétrole) est insuffisante à l'heure actuelle et en raison de l'impact négatif de ces sources sur l'environnement (émissions de gaz à effet de serre), des chercheurs ont mis au point la production du biogaz comme une source d'énergie renouvelable, moins polluante et moins coûteuse, qui remplacera petit à petit l'énergie fossile (Hawa, 2018).

En termes de définition, le biogaz est un biocarburant obtenu par la transformation des déchets organiques par fermentation anaérobie (FAO et ICARDA, 2018). Il se compose principalement du méthane ( $\text{CH}_4$ ), du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et peut contenir de petites quantités de sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ), d'humidité et de siloxanes (Chynoweth et *al.*, 2001).

### I.2.1. Utilisation des déchets de *cactus* pour la production de biogaz

D'après Treviño-Amador et *al.*, (2013), toute matière organique riche en énergie et facilement fermentescible, peut être décomposée pour produire du biogaz, mais certaines fonctionnent mieux que d'autres, prenant l'exemple du fumier de bétail ; il est peu énergétique, se digère lentement, d'où la nécessité d'ajouter une matière première viable soit directement, soit par le biais de certains de ses sous-produits dérivés.

L'*OFI* est l'une de ces matières, caractérisée par sa production de biomasse supérieure et une grande teneur en cellulose (Homer et *al.*, 2020), qui une fois ajoutée, améliore la production de biogaz à partir de la fermentation du fumier bovin ou de la bouse de vache et pourrait également être utilisée comme matériau unique pour la production de biogaz (Treviño-Amador et *al.*, 2013). Outre, il est possible d'obtenir un déchet stabilisé, appelé digestat riche en nutriments, qui peut être incorporé comme engrais pour améliorer la qualité et l'état du sol (Homer et *al.*, 2020).

### I.2.2. Procédés de production de biogaz

La conversion de la biomasse en biogaz par le procédé de digestion anaérobie (DA) est primordiale pour la production de bio-méthane (Comparetti *et al.*, 2017). Ce procédé est appelé « méthanisation », il se passe dans des conditions d'anoxie (un espace exempt d'oxygène), à un pH neutre et sous un potentiel redox inférieur à 330 mV, avec l'utilisation des populations bactériennes responsables de la dégradation de la matière organique dans le digesteur, ainsi que des températures mésophiles (autour de 37°C) ou thermophiles (autour de 55°C) (Anonyme 02).

De plus, deux types de digesteurs sont distingués (FAO, 2011) :

- **Digesteurs continus**

Ils sont utilisés lorsqu'il y a une production constante de matières pour la bio-digestion où lorsque les déchets ménagers sont ajoutés comme matières premières.

- **Digesteurs discontinus**

Ils sont utilisés lorsque les matières premières présentent des problèmes de manipulation dans les systèmes continus, les matières sont difficiles à digérer par fermentation méthanogène ; ou lorsque les matières premières sont disponibles par intermittence.

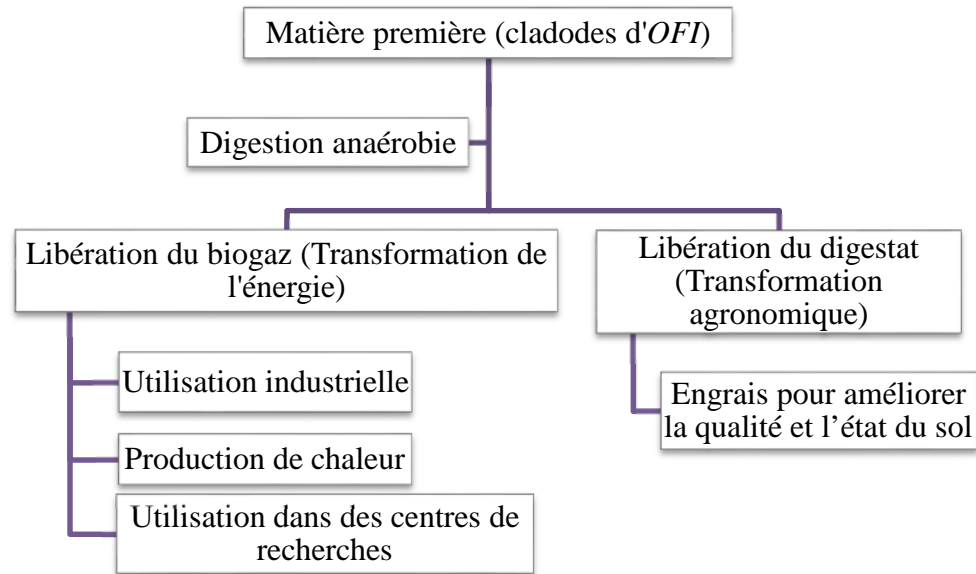
Les cladodes matures (1 an) peuvent être introduites directement dans les digesteurs, dès qu'elles ont été broyées, afin d'améliorer l'efficacité de la production de biogaz et de bio-fertilisants (Homer *et al.*, 2020).

➤ **Etapes de fabrication du biogaz**

Le processus de fabrication du biogaz comprend (figure 14) (Anonyme 03) :

- Apport de la matière première (matière organique de haute qualité) ;
- Stockage des déchets dans un espace exempt d'oxygène ;
- Fermentation des déchets, constituée de l'hydrolyse, l'acétogénèse, l'acidogénèse et la méthanogénèse ;
- Libération du biogaz et le digestat ;
- Purification du biogaz avant de l'utiliser (élimination des impuretés).

Autre que le méthane, la qualité du biogaz dépend du type de déchets utilisés et de leur composition, mais aussi des conditions dans lesquelles a été réalisé le procédé (Anonyme 03).



**Figure 14.** Schéma présentatif d'une chaîne de production de biogaz.

### I.3. Fermentation des cladodes chez les ruminants

Pendant plusieurs années, le figuier de barbarie a été apprécié et utilisé pour remplacer de manière complète ou partielle des aliments de faible qualité dans l'alimentation des ruminants (Pinos-Rodríguez et *al.*, 2010), notamment la variété inerme d'OFI qui d'après Guevara et *al.*, (2009), constitue un investissement rentable dans plusieurs régions arides et semi-arides du monde. La maturité des cladodes a un effet sur leur utilisation comme fourrage pour le bétail, en effet, des preuves ont été suggérées par certains chercheurs comme Pinos-Rodríguez et *al.*, (2006), où ils ont rapporté que la maturité du *cactus* inerme affecte la digestibilité de la matière sèche *in vitro*.

Deux expériences ont été faites par Abidi et *al.*, (2009), dont le but est d'évaluer le potentiel fourrager de *cactus* inerme (OFI *f. inermis*) et des cladodes de *cactus* épineux, *Opuntia amyclae* (OA), en utilisant des cladodes terminaux des deux espèces récoltées en été et en hiver 2004, en brûlant les épines de l'OA. La première expérience était de déterminer la valeur nutritive des *cactus* sans épines et épineux. Pour ce faire, les deux espèces OFI et OA ont été incubées (0,2 g de MS) dans des seringues en verre calibrées, chacune contenant 30 ml de solution tampon et de liqueur de rumen provenant de deux béliers Barbarine fistulés dans le rumen et le volume de gaz produit après 2, 4, 6, 8, 10, 24, 48 et 72 h a été enregistré.

Concernant la deuxième expérience, ils ont déterminé la fermentation ruminale et la croissance bactérienne dans des fermenteurs à culture continue. Pour cela, quatre fermenteurs ont été utilisés, chacun a été inoculé avec 700 ml de liquide ruminal provenant de trois chèvres Granadina canulées dans le rumen, nourris avec du foin de luzerne et un mélange de minéraux et de vitamines. Puis, des échantillons d'OFI et d'OA et d'effluents lyophilisés ont été analysés pour leur teneur en matière sèche, en cendres et en N.

A la fin de cette étude, Abidi et *al.*, (2009), ont trouvé que le contenu des deux expériences in vitro possède une valeur nutritive ainsi qu'un pH similaire pour les deux espèces OFI et OA. Également, la production de gaz en hiver était analogue, mais en été le taux était plus élevé pour l'OFI que pour l'OA. Ils ont également remarqué que la saison a un effet sur le *cactus* épineux et inerme en leurs faisant des variations dans la composition (les valeurs sont plus élevées en hiver qu'en été).

Vazquez-Mendoza et *al.*, (2016) ont rapporté qu'une étude a été réalisée, au cours du mois de mars 2013, afin de mesurer la teneur en nutriments, la cinétique de fermentation et la digestibilité in vitro des déchets de cladodes de onze cultivars de figuier de barbarie. Ces derniers ont été cultivés à San Sebastian Villanueva, Acatzingo, Puebla, Mexique, dont dix échantillons entre 1 et 3 ans ont été prélevés au hasard. Cette expérience a montré qu'au cours des 24 premières heures, 50 % du gaz total a été produit et une digestibilité supérieure à 80 % a été marquée, ils ont conclu que les cladodes de figuier de barbarie de différents cultivars peuvent être utilisées dans l'alimentation animale en raison de leurs bonnes caractéristiques de fermentation.

Par ailleurs, Del Razo et *al.*, (2015), ont comparé la cinétique de la production de gaz par fermentation in vitro, la digestibilité in vitro de la matière sèche, la concentration de l'azote ammoniacal (N-NH<sub>3</sub>) et la synthèse des acides gras volatils (AGV) entre les cladodes (*Opuntia spp* notamment OFI) séchés, de foins d'avoine et de luzerne. L'inoculum utilisé a été extrait de deux moutons canulé dans le rumen, puis mélangé avec 0,5 g de MS de chaque substrat, ensuite filtré à travers quatre couches de gaze.

Del Razo et *al.*, (2015) ont remarqué que la V-max était similaire entre les substrats mais le taux de production de gaz et de digestibilité de la matière sèche in vitro était plus élevé pour les cladodes sèches que pour les foins de luzerne et d'avoine, ce qui a été expliqué par la rapidité de l'hydrolyse après la colonisation microbienne. Ainsi, les concentrations d'acide

acétique et d'AGV (source d'énergie chez les ruminants) totaux étaient similaires pendant la fermentation des cladodes séchées et du foin de luzerne, mais supérieure à celle obtenue pour le foin d'avoine et cela grâce à l'aptitude des microorganismes du rumen à fermenté in vitro les cladodes sèches.

Concernant le contenu en protéines (CP) dans les cladodes, celui-ci varie selon les espèces et l'âge et est 40 % supérieur à celui du foin d'avoine et 40 % inférieur à celui du foin de luzerne comme rapporté par Andrade-Montemayor et *al.*, (2011). D'après Anaya-Pérez et Bautista-Zane (2008), cela indique une faible concentration en lignine et donc un avantage pour une fermentation efficace des cladodes par rapport aux foins de luzerne et d'avoine.

Au final, selon les résultats de cette étude et ceux trouvés par d'autres chercheurs, les cladodes d'OFI peuvent être exploiter pour l'alimentation des ruminants en remplaçant complètement le foin d'avoine et partiellement le foin de luzerne sans aucun risque qui peut toucher les performances du bétail et cela, va contribuer à une gestion améliorée et respectueuse de l'environnement de cette biomasse.

---

# **Conclusion générale**

---

### *Conclusion générale*

Longtemps utilisé par l'homme, le figuier de barbarie (*OFI*) revient donc sur le devant de la scène et se place parmi les principales plantes médicinales étudiées par les chercheurs. Malgré que cette plante renferme beaucoup de caractéristiques qui sont mal exploitées où qui sont encore inconnues, la mise à jour de ces potentialités peut donner un nouvel essor pour une nouvelle découverte. Les chercheurs sont arrivés à la conclusion, qu'une bonne gestion écologique peut améliorer notablement la compétitivité de la culture de cette plante, ainsi que son exploitation dans divers domaines tout en préservant l'environnement. L'intégration d'une partie de cette plante (fruit, graines, cladodes, etc.) dans l'alimentation humaine, animale ou dans le domaine pharmaceutique, cosmétique ou autre, vise à faire des profits et donc d'être rentable, la diminution des coûts ainsi que l'amélioration de la performance, de la fonctionnalité et des propriétés sensorielles des aliments. Ceci est vrai avec une plantation correcte de cette espèce qui doit être accompagnée par une technologie adéquate.

Au terme de la présente étude bibliographique concernant la valorisation biotechnologique des cladodes du figuier de barbarie (*OFI*), nous sommes arrivées aux conclusions suivantes :

- La composition des jeunes cladodes leur confère la possibilité de les utiliser comme légumes ou dans diverses préparations alimentaires (Hadj Sadok, 2010) ;
- Des quantités importantes des métabolites secondaires ayant des activités biologiques telles que les vitamines, les composés phénoliques, les flavonoïdes et les caroténoïdes accumulés dans l'*OFI* (Núñez-Gastelum et al., 2018), sont responsables des propriétés antioxydantes et antimicrobiennes. Les extraits des cladodes, obtenus avec le méthanol et l'éthanol, ont une grande activité antibactérienne contre les bactéries à Gram positif et à Gram négatif ;
- Des activités antifongiques ont été attribuées aux extraits des cladodes d'*OFI*. Ces activités constituent une barrière contre les infections causées par certains champignons pathogènes comme le genre *Aspergillus* ;
- L'exploitation de cette matière végétale via le bioprocédé de fermentation pourrait créer d'autres produits à usages multiples, tels que l'acide lactique et l'éthanol, ainsi que l'amélioration des produits laitiers.

---

# Références bibliographiques

---

*Références bibliographiques*

**Abdel-Banat B., Hoshida H., Ano A., Nonklang S., Akada R., (2010).** High-temperature fermentation: how can processes for ethanol production at high temperatures become superior to the traditional process using mesophilic yeast? *Appl Environ Microbiol*, 85: 861-867.

**Abidi S., Ben Salem H., Martín-García A.I., Molina-Alcaide E., (2009).** Ruminant fermentation of spiny (*Opuntia amyclae*) and spineless (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) *cactus* cladodes and diets including *cactus*. *Animal Feed Science and Technology*, 149: 333-340.

**Abidi S., (2010).** Potentiel nutritionnel de quelques génotypes de *cactus* et voies d'amélioration et d'utilisation en alimentation animale. Institut National Agronomique de Tunisie, université du 7 Novembre de Carthage, 12-16.

**Abou-Elella F.M. and Ali R.F.M., (2014).** Antioxidant and anticancer activities of different constituents extracted from Egyptian prickly pear *cactus* (*Opuntia ficus-indica*) Peel. *Biochemistry and Analytical Biochemistry* 3 (2): 1.

**Alimi H., Hfaiedh N., Bouoni Z., Hfaiedh M., Sakly M., Zourgui L., Rhouma K.B., (2010).** Antioxidant and antiulcerogenic activities of *Opuntia ficus indica* f. *inermis* root extract in rats. *Phytomedicine* 17: 1120-1126.

**Anaya-Pérez M. & Bautista-Zane R., (2008).** El nopal forrajero en México: del siglo XVI al siglo XX. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 5 (2): 167-183.

**Anaya-Pérez M.A., (2001).** «History of the use of *Opuntia* as forage in Mexico», In: Mondragon. J and Perez. G.S, (Eds.), *cactus* (*Opuntia spp.*) as storage. Rome Italy, FAO, pp 5-12.

**Andrade-Montemayor H.M., Cordova Torres A.V., García-Gasca T. & Kawas J.R., (2011).** Alternative foods for small ruminants in semiarid zones, the case of Mesquite (*Prosopis laevigata spp.*) and Nopal (*Opuntia spp.*). *Small Rumin. Res*, 98: 83-92.

**Anonyme 01:**

[https://www.google.com/search?q=rouille%2C++du+figuier+de+barbarie&tbm=isch&ved=2ahUKEwjM\\_5j6oZv1AhUUgc4BHdnFAUMQ2cCegQIABAA&oq=rouille%2C++d](https://www.google.com/search?q=rouille%2C++du+figuier+de+barbarie&tbm=isch&ved=2ahUKEwjM_5j6oZv1AhUUgc4BHdnFAUMQ2cCegQIABAA&oq=rouille%2C++d)

[u+figuier+de+barbarie&gs\\_lcp=CgNpbWcQA1DxLVjxLWCeQmgAcAB4AIABmAGIAaMCkgEDMC4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&ei=sObVYcznDJSCur4P2YuHmAQ&bih=639&biw=1366#imgrc=7nBn\\_wA8GYWRNM](https://www.researchgate.net/publication/352811111), consulté le 09/06/2021.

**Anonyme 02** : <https://www.chaplainenergie.fr/biogaz/>, consulté le 20/10/2021.

**Anonyme 03** : <https://www.chaplainenergie.fr/biogaz/>, consulté le 22/10/2021.

**Araba A., Elaich A., Sarti B., Belbahri L., Boubekraoui A., Ait Hammou A., Zemmouri A., Sbaa H., (2000).** Valorisation du figuier de barbarie en élevage, Bull. Mens.Inf.et de liaison du PNTTA, 68 : 1-4.

**Aragona M., Lauriano E.R., Pergolizzi S. and Faggio C., (2018).** *Opuntia ficus-indica* (L.) miller as a source of bioactivity compounds for health and nutrition. Natural product research, 32 (17): 2037-2049.

**Arba M., (2017).** Effets de la fertilisation NP et de l'irrigation à des périodes critiques sur le rendement et la qualité des fruits du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). Thèse de doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech. France.

**Astello-García M.G., Cervantes I., Nair V., del Socorro Santos-Díaz M., Reyes-Agüero A., Guéraud F., Negre-Salvayre A., Rossignol M., Cisneros-Zevallos L. and de la Rosa, A.P.B., (2015).** Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia spp.* cultivars with different domestication gradient. Journal of Food Composition and Analysis, 43:119-130.

**Bahis I., Moustafa M. and AL-Wadi H., (2020).** Antimicrobial activities of crude solvent extract and synthesized silver nanoparticles of *Opuntia ficus-indica* l. cladodes. Bangladesh J. Bot, 49 (4): 1085-1093.

**Barnette A.L., Bradley L.C., Verest B.D., Schreiner E.P., Park Y.B., Park J., Park S., Kim S.H., (2011).** Selective detection of crystalline cellulose in plant cell with sum-frequency-generation (SFG) vibration spectroscopy, Bio-macromolecules, 12 (7): 2434-2439.

**Bayitse R., (2015).** Lactic acid production from biomass: prospect for bioresidue utilization in Ghana: Technological Review. Int J Appl Sci Technol, 5: 164-174.

- Belay K., Abisa Z., Abraha T., Mebrat W. and Bedassa S., (2015).** Physicochemical properties, phyto-chemical screening, antimicrobial activities and nutritional values of *cactus* (*Opuntia ficus-indica*) around Adigrat. International Journal of Informative and Futuristic Research, 3 (2): 1697-2347.
- Belhadj Slimen I., Najar T., Abderrabba M., (2016).** *Opuntia ficus-indica* as a Source of Bioactive and Nutritional Phytochemicals. J. Food. Nut .Sci, 4: 162-169.
- Ben Abdallah R., Frikha D., Maalej S. et Sassi S., (2019).** Evaluation in vitro de l'activité antibactérienne et antifongique de quatre espèces algales marines in vitro evaluation of the antibacterial and antifungal activities of marine algae. J.I. M. Sfax, 31: 38-44.
- Benattia F.K., (2017).** Analyse et application des extraits de pépins de figues de barbarie. Thèse de doctorat en chimie bio-organique et thérapeutique. Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- Bendhifi M., Baraket G., Zourgui L., Souid S., Salhi-Hannachi A., (2013).** Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. Scientia Horticulturae, 158, 1-7.
- Benkaddouri A., (2011).** Etude des huiles essentielles de l'*Opuntia ficus-indica* Région de Mascara. Mémoire de magister en Chimie. Université d'Oran. Algérie.
- Bhira O., (2012).** Potentialités thérapeutiques d'*Opuntia ficus indica* au Maroc et en Tunisie. Thèse de doctorat en pharmacie. Université Mohammed V-Rabat. Maroc.
- Billing J., Sherman P.W., (1998).** Antimicrobial Functions of Spices: Why some like it hot. Q. Rev. Biol, 73: 3-49.
- Blango M.G., Mulvey M.A., (2010).** Persistence of uropathogenic *Escherichia coli* in the face of multiple antibiotics. Antimicrob Agents Chemother, 54: 1855-63.
- Bouayad N., (2012).** Écologie, systématique et phénologie, de l'*Opuntia*, possibilité d'utilisation dans le développement et la préservation de la biodiversité. Mémoire de Magister en Écologie et environnement. Université des Sciences et de la Technologie « Houari Boumediene », Algérie.

**Boutakiout A., (2015).** Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit: jus de cladode du figuier de Barbarie marocain (*Opuntia ficus-indica* et *Opuntia megacantha*). Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Université d'Angers, France.

**Casas A. and Barbera G., (2002).** Mesoamerican domestication and diffusion. In: Cacti Biology and Uses. Pp, 143-162. (Nobel, P.S. ed.). University of California Press, Berkeley, California, United States of America.

**Chougui N., Djerroud N., Naraoui F., Hadjal S., Aliane K., Zeroual B., Larbat R., (2015).** Physicochemical properties and storage stability of margarine containing *Opuntia ficus-indica* peel extract as antioxidant. Food chemistry, 173, 382-390.

**Chynoweth David P., Legrand Robert O.J.M., (2001).** Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. Renewable Energy, 22: 1-8.

**Comparettia A., Feboa P., Grecoa C., Mammanob M.M., Orlando S., (2017).** Potential Production of Biogas from Prinkly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) in Sicilian Uncultivated Areas. Chemical Engineering Transactions, Vol. 58.

**de Souza Filho F.P., Ribeiro V.T., dos Santos E.S., de Macedo G.R., (2016).** Simultaneous saccharification and fermentation of *cactus* pear biomass-evaluation of using different pretreatments. Industrial Crops and Products, 89: 425-433.

**Del Razo O.E., Almaraz I., Espinosa V., Soriano R., Miranda L.A., Arias L., Guan L., Buendía G. and Pelaez A., (2015).** Comparative analysis of the in vitro fermentation of wasted cladodes (*Opuntia spp.*), lucerne and oat hays. South African Journal of Animal Science, 45 (No. 5).

**Del Vall V., Hernandez Munoz P., Guarda A., Galotto M.J., (2005).** Development of a *cactus* mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragara ananassa*) shelf-life. Food chemistry. 91, 571-756.

**Derd M., (2000).** Transfert de technologie en agriculture, valorisation de figuier de barbarie en élevage, N°68, P4.

**El Feghali P.A.R., Ibrahim R., Nawas T., (2018).** Antibacterial activity of *Curcuma longa*, *Opuntia ficus indica* and *Linum usitatissimum*. MOJ Toxicolgy, 4(3): 214-220.

**El kharrassi Y., (2015).** Mise en évidence de la diversité des populations de cactus (*Opuntia spp.*) au Maroc et de la modulation du métabolisme lipidique par des extraits naturels et de phytostérols issues de cactus ou d'huile d'Argan dans les cellules micro-gliales BV2. Thèse de doctorat en biochimie, biologie Moléculaire et Cellulaire. Université Hassan I-Settat, Université Bourgogne –Dijon.

**El-Mostafa K., El Kharrassi Y., Badreddine A., Andreoletti P., Vamecq J., El Kebbaj M., Cherkaoui-Malki M., (2014).** Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*. 19(9), 14879-14901.

**Ennouri M., Evelyne B., Laurence M., Hammadi A., (2005).** Fatty acid composition and rheological behaviour of prickly pear seed oils. *Food Chemistry*. Pp 431-437.

**Ennouri M., Fetoui H., Bourret E., Zeghal N., Guermazi F. and Attia H., (2006).** Evaluation of some biological parameters of *Opuntia ficus indica*: 1. Influence of seed supplemented diet on rats. *Bioresource Technology*, 97, 2136-2140.

**Esmaeili D., Daymad S.F., Neshani A., (2019).** Alerting prevalence of MBLs producing *Pseudomonas aeruginosa* isolates. *Gene Reports*, 16:100-460.

**Feugang M.J., 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: 2574-2589.

**Filannino P., Cavoski I., Thlien N., Vincentini O., De Angelis M., Silano M., Gobbetti M., Di Cagno R., (2016).** Lactic acid fermentation of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica* L.) generates flavonoid derivatives with antioxidant and anti-inflammatory properties. *PLoS ONE* 11(3): e0152575.

**Fonseca G., Heinzle E., Wittmann C., Gombert A., (2008).** The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential. *Appl Microbiol Biotechnol*, 79: 339-354.

**Food and Agriculture Organization of the United Nations., (2001).** *Cactus (Opuntia spp.)* as forage. Italy. ISBN 92-5-104705-7.

**Food and Agriculture Organization of the United Nations., (2011).** Manual de biogás. FAO Regional Office for Latin America and the Caribbean, Santiago.

**Frisvad J.C. and Larsen TH.O., (2016).** Extrolites of *Aspergillus fumigatus* and Other Pathogenic Species in *Aspergillus* Section *Fumigati*. *Frontiers in Microbiology*, 6: 1-14.

**Garcia-Aparicio M.P., Oliva J.M., Manzanares P., Ballesteros M., Ballesteros I., Gonzalez A., Negro M.J., (2011).** Second-generation ethanol production from steam exploded barley straw by *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875. *Fuel*, 90: 1624-1630.

**Gaspar dos Reis C.M., (2018).** Characterization and evaluation of Portuguese *Opuntia spp.* Germplasm. Thesis presented to obtain the PhD degree in Biology. University of Évora.

**Gebrekidan W., Aragaw Z., (2017).** Antibacterial activity of *Opuntia ficus indica* skin fruit extracts. *Biotechnology International*, 10 (3): 74-83.

**Ginestra G., Parker M.L., Bennett R.N., Robertson J., Mandalay G., Narbad A., Waldron K.W., (2009).** Anatomical chemical and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.], *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(21): 10323-10330.

**Gupta A., Mahajan S., Sharma R., (2015).** Evaluation of antimicrobial activity of *Curcuma longa* rhizome extract against *Staphylococcus aureus*. *Biotechnol Rep (Amst)*, 6:51-55.

**Habibi Y., (2004).** Contribution à l'étude morphologique, ultra-structurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux: caractérisation et modification chimique, Thèse de doctorat. l'université Josef Fourier et l'université Cadi Ayyad.

**Hadj Sadok T., (2010).** Composition chimique des jeunes cladodes d'*Opuntia ficus indica* et possibilités de valorisation alimentaire. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Algérie.

**Hadj Sadok T., Aid F., Doumandji A. et Bellal M., (2014).** Effet du jus de cladodes d'*Opuntia ficus indica* sur la fermentation du lait et la croissance des bactéries lactiques et pro-biotiques. *Revue « Nature & Technologie »*. B- Sciences Agronomiques et Biologiques, 11: 29-40.

**Hadj Sadok T., Aid F., Bellal M., Stela M., Hussain A., (2008).** Composition chimique des jeunes cladodes d'*Opuntia ficus indica* et possibilité de valorisation alimentaire. *Agricultura, agricultural practice and science journal*, 65 : 1-2.

**Hadjkouider B., (2008).** Approche de caractérisation et d'identification des espèces du genre *Opuntia* (sous genre *platy opuntia*) dans les zones steppiques et perspectives d'amélioration. Mémoire de Magister en Amélioration des productions végétales. Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

**Haghighi Mood S., Hossein Golfeshan A., Tabatabaei M., Salehi Jouzani G., Najafi G. H., Gholami M. and Ardjmand M., (2013).** Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. *Renew. Sust. Energ. Rev*, 27: 77-93.

**Hahn-Hägerdal B., Galbe M., Gorwa-Grauslund M.F., Lidén G., Zacchi G., (2006).** Bioethanol - the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends Biotechnol*, 24: 549-556.

**Hajar N., Nawal A. and Amjad D., (2019).** A study to determine total phenolic content of *Opuntia ficus-indica* extracts and their activity against some pathogenic fungi. *World journal of pharmacy and pharmaceutical sciences*, Volume 8, Issue 1: 98-109.

**Halmi S., (2015).** Etude botanique et phytochimique : Approche biologique et pharmacologique d'*Opuntia ficus indica*. Thèse de doctorat en Biotechnologies Végétales. Université des Frères Mentouri de Constantine, Algérie.

**Haque M., Epplin F.M., Biermacher J.T., Holcomb R.B., Kenkel P.L., (2014).** Marginal cost of delivering switchgrass feedstock and producing cellulosic ethanol at multiple biorefineries. *Biomass Bioenergy*, 66: 308-319.

**Hawa M., (2018).** Anaerobic digestion of spineless *cacti* (*Opuntia ficus-indica* (L.) mill) biomass in tanzania: the effects of aerobic pre-treatment. Doctoral thesis of Science in Molecular Biology and Biotechnology. Pan African University Institute.

**Homer I., Varnero M.T., Bedregal C., (2020).** Nopal (*Opuntia ficus-indica*) energetic potential cultivated in arid and semi-arid zones of Chile: an assessment. *IDESIA (Chile)*, 38 (2): 119-127.

**Hunt D.R., (2000).** Cactaceae. In: Flora of Ethiopia and Eritrea, Vol. 2, Part I. pp. 259-263. (Edwards, S., Mesfin Tadesse, Sebsebe Demissew and Hedberg, I. eds.). Addis Ababa University, Ethiopia.

**Inglese P., Basile F. and Schirra M., (2002).** *Cactus* pear fruit production. In: Cacti Biology and Uses. pp. 163-183. (Nobel, P.S. ed.). University of California Press, Berkeley, California, United States of America.

**Isaac A.A., (2016).** Overview of *cactus (Opuntia Ficus-Indica)* (L): a myriad of alternatives. Journal of Ethno Medicine, 10(2): 195-205.

**Kousha M., Tadi R. and Soubani A., (2011).** *Pulmonary aspergillosis*: a clinical review. European Respiratory Review, 20: 156-174.

**Kuloyo O.O., du Preez J.C., Kilian S.G., Steyn L., Garci'a-Aparicio M.P., Gorgens J., (2014).** *Opuntia ficus-indica* cladodes as feedstock for ethanol production by *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae*. World J Microbiol Biotechnol, 30: 3173-3183.

**Kumar D., Sharma K.P., (2020).** A Review on *Opuntia* Species and its Chemistry, Pharmacognosy, Pharmacology and Bioapplications. Current Nutrition & Food Science, 16: 1-18.

**Labra M., Grassi F., Bardini M., Imazio S., Guiggi A., Citterio S., Banfi E., Sgorbati S., (2003).** Genetic relationships in *Opuntia* Mill. genus (*Cactaceae*) detected by molecular marker. Plant Sci. 165, 1129 -1136.

**Lallouche B., (2008).** Hybridation de l'*Opuntia ficus indica* Mill .F. inermis par quatre espèces d'*Opuntia* (*O. Robusta* var. *Robusta* ; *O. Engelmannii* var. *Languiformis* ; *O. ficus indica* Mill. F. *Amyclea* ; *O. Streptacantha* Lem.) dans les zones arides et semi-arides. Mémoire de Magister en Amélioration des productions végétales. Université Saad Dahleb de Blida, Algérie.

**Lane M.M., Morrissey J.P., (2010).** *Kluyveromyces marxianus*: yeast emerging from its sister's shadow. Fungal Biol Rev, 24: 17-26.

**Lipnizki F., (2010).** Membrane process opportunities and challenges in the bioethanol industry, Desalination, 250(3): 1067-1069.

**López-Domínguez C.M., Ramírez-Sucre M.O., Rodríguez-Buenfil I.M., (2019).** Enzymatic hydrolysis of *Opuntia ficus-indica* cladode by *Acinetobacter pittii* and alcohol fermentation by *Kluyveromyces marxianus*: pH, temperature and microorganism effect. *Biotechnology Reports*, 24, e00384.

**Moussaoui B., (2020).** Les propriétés biologiques d'extraits des cladodes d'*Opuntia ficus indica* (L.).Thèse de doctorat en Sciences Biologiques. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie.

**Msaddak L., (2018).** Propriétés techno-fonctionnelles et substances bioactives de deux ingrédients alimentaires: cladodes du figuier de barbarie et feuilles de vigne. Thèse de doctorat en biologie. Université de Gabès, Tunisie.

**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 Sassari; groupe de recherche sur la désertification, Italie. 112p.

**Nacz M. and Shahidi F., (2006).** Phenolics in cereals, fruits and vegetables: occurrence, extraction and analysis. *J. Pharm Biomed Anal*, 41: 1523-1542.

**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, 236 p.

**Noah Badr A., Gromadzka K., Gamal Shehata M., Stuper-Szablewska K., Drzewiecka K., Abdel-Razek A.G., (2020).** Prospective antimycotoxigenic action of wild *Opuntia ficus-indica* by-products. *Czech Journal of Food Sciences*, 38, (5): 308-314.

**Nobel P.S. and Bobich E.G., (2002).** Environmental biology. In: Nobel P.S. (Editor): *Cacti: Biologie and uses*. University of California Press, California. p. 57-74.

**Núñez-Gastelum J.A., González-Fernández R., HernándezHerrera A., Campas-Baypoli O.N., Rodríguez-Ramírez R., Lobo-Galo N., Valero-Galván J., (2018).** Morphological

characteristics, chemical composition and antioxidant activity of seeds by four wild *Opuntia* species from North of Mexico. J. Prof. Assoc. Cactus Dev, 20: 23-33.

**Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture et le Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides Rome, (2018).** Ecologie, culture et utilisations du figuier de barbarie. Université Nationale de Santiago del Estero, Argentine b Université de Palerme, Italie.

**Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., Anthony S., (2009).** Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0. World Agroforestry Centre, Kenya.

**Osuna-Martínez U., Reyes-Esparza J. and Rodríguez-Fragoso L., (2014).** *Cactus (Opuntia ficus-indica)*: A review on its antioxidants properties and potential pharmacological use in chronic diseases. Nat Prod Chem Res, 2: (153), 2329-6836.

**Pérez-Cadena R., Solares T.E., Medina-Moreno S.A., Martínez A., Lizardi-Jiménez M.A., Téllez-Jurado A., (2018).** Production of ethanol by three yeasts in defined media and hydrolyzed cladodes of *Opuntia ficus-indica* var. Atlixco. International Journal of Agriculture and Forestry, 8(1): 26-34.

**Pinos-Rodríguez J.M., Duque-Briones R., Reyes-Agüero J.A., Aguirre-Rivera J.R., García-López J.C. and González-Muñoz S., (2006).** Effect of species and age on nutrient content and in vitro digestibility of *Opuntia spp.* J. Appl. Anim. Res. 30: 13-17.

**Pinos-Rodríguez J.M., Velázquez J.C., González S.S., Aguirre J.R., García J.C., Álvarez G. and Jasso Y., (2010).** Effects of cladode age on biomass yield and nutritional value of intensively produced spineless *cactus* for ruminants. South African Journal of Animal Science, 40 (3).

**Pourmajed R., Jabbari Amiri M., Karami P., Khaledi A., (2021).** Antimicrobial effect of *Opuntia Ficus-Indica* extract on *Escherichia coli* isolated from patients with Urinary Tract Infection. Iran J Public Health, 3: 634-636.

**Rabemanatsoa N.A., (2010).** Action pour une meilleure valorisation des *cactus Opuntia*. Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Antananarivo Madagascar, 45p.

**Rapport du Ministère De L'agriculture Et De La Pêche Maritime. (2010).** Etude du marché national et international des produits issus du cactus (fruits frais, raquettes pour aliments de bétail, huiles) et l'exploration des opportunités offertes pour l'exportation. Midfac, p. 6-53.

**Rebman J.P. and Pinkava D.J., (2001).** *Opuntia* cacti of North America: An overview. Flor. Entom, 84(4): 474-482.

**Reyes-Aguero J.A., Aguirre J.R., Valiente-Banuet A., (2006).** Reproductive biology of *Opuntia*: A review. Journal of Arid Environments. 64, Pp 549-585.

**Sáenz C., Sepúlveda E., Matsuhira B., (2004).** *Opuntia spp* mucilage's: a functional component with industrial perspectives. Journal of Arid Environments. 57, 275-290.

**Shetty., Anoop A., Rana M.K. and Preetham S.P., (2012).** *Cactus*: A Medicinal Food. Journal of Food Science and Technology, 49 (5): 530-36.

**Stintzing F.C., Carle R., (2004).** Functional properties of anthocyanins and bétalaines in plants, food, and in human nutrition. Trends in food science & technology, 15, pp: 19-38.

**Tamine M., Nancib A., Nancib N. and Boudrant J., (2018).** Prickly pear *cactus* as a raw material for lactic acid production by *Lactococcus lactis subsp. Lactis*. Malaysian Journal of Microbiology, 14 (1): pp. 16-24.

**Temagoult A., (2017).** Caractérisation et transformation de la figue de barbarie (*Opuntia ficus indica* L.), Elaboration d'une confiture et d'une gelée extra. Mémoire de magister en Génie des Procédés Alimentaires. Université Hadj Lakhdar- Batna 1, Algérie.

**Treviño-Amador I.A., Méndez-Llorente F., López-Carlos M.A., Aguilera-Soto J.I., Ramírez-Lozano R.G., Núñez-González M.A., Zuñiga E.J.C. and Fuentes-Rodríguez J., (2013).** Biogas Production from *Opuntia ficus-indica* and Dairy Cattle Manure. Acta Hortic. 995, 44.

- Vazquez-Mendoza P., Miranda-Romero L.A., Aranda-Osorio G., Burgueño Ferreira J.A., Salem A.Z.M., (2016).** Evaluation of eleven Mexican cultivars of prickly pear *cactus* trees for possibly utilization as animal feed: in vitro gas production. *Agroforest Syst*, 91: 749-756.
- Voutilainen S., Nurmi T., Mursu J., Rissonen T.H., (2006).** Carotenoids and cardiovascular health *American Journal of clinical Nutrition*. 83, pp: 1265-1271.
- Walali-Loudy., (2004).** Le figuier de barbarie. Espèce fruitière d'intérêt cultivée au Maroc.
- Wallace R.S. and Gibson A.C., (2002).** Cacti evolution and systematics. In: *Cacti, Biology and Uses*. Pp.1-21 (Nobel, P.S. ed.). University of California Press, Berkeley, California, United States of America.
- Wallali Loudyi D., (1995).** Quelques espèces fruitières d'intérêt secondaire cultivées au Maroc. *CIHEAM-Options Méditerranéennes*, 48-62.
- Welegerima G., Zemene A. and Tilahun Y., (2018).** Phytochemical composition and antibacterial activity of *Opuntia ficus indica* cladodes extracts. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6(2): 243-246.
- Widyastuti Y., Rohmatussolihat, Febrisiantosa A., (2014).** The role of lactic acid bacteria in milk fermentation. *Food Nutr Sci*, 5: 435-442.
- Zerrouki K., (2020).** Profil phénolique de quelques ressources végétales et pouvoir antioxydant. Thèse de doctorat en Nutrition et santé. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem. Algérie.
- Zirmi-Zembri N. et Kadi S.A. (2016).** Guide for preparation of papers: Nutritive value of the main forage resources used in Algeria, the herbaceous natural fodders. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. Algérie, 6p.
- Zrira S., Petretto G.L., Saidi B., Salaris M. and. Pintore G., (2016).** Volatile constituents and polyphenol composition of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill from Morocco. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 4: 5-11.

## **Résumé**

*Opuntia ficus indica* est une espèce largement cultivée dans le monde, notamment dans les terres marginales et les zones arides et semi-aride. C'est une plante ayant de nombreux avantages pour la santé humaine, ainsi que pour son intérêt croissant dans plusieurs secteurs (agro-alimentaire, médicinale, etc.). C'est dans cette optique que nous avons entrepris de faire une étude bibliographique sur la valorisation biotechnologique des cladodes du figuier de barbarie (*OFI*). La démarche consiste à étudier les activités antimicrobiennes de ces raquettes, ainsi que leur potentiel de bioconversion, et ce, en s'appuyant sur les résultats des expériences déjà réalisées par de nombreux chercheurs. Il ressort de cette recherche, que les cladodes d'*OFI* peuvent être un atout pour l'amélioration de la qualité des aliments ; de plus, ils ont un grand intérêt résidant dans leurs activités antimicrobiennes d'une part et leur biotransformation en différents produits d'intérêt d'autre part.

**Mots clés :** Figuier de barbarie, *Opuntia ficus indica*, cladodes d'*OFI*, activité antimicrobienne, biotransformation.

## **Abstract**

*Opuntia ficus indica* is a widely cultivated species in the world, especially in marginal lands and arid and semi-arid areas. It is a plant with many advantages for human health, as well as for its growing interest in several sectors (agro-food, medicinal, etc.). Around this context, the present bibliographic study was conducted about the biotechnological valorization of prickly pear cladodes (*OFI*). This study reports the antimicrobial activities of these cladodes, as well as their bioconversion potential, based on the results of experiments already carried out by numerous researchers. It was found that *OFI* cladodes could be used for quality improvement of foods as well as exploited for their interesting antimicrobial activities and biotransformation potential into different valuable products.

**Key words :** Prickly pear, *Opuntia ficus indica*, *OFI* cladodes, antimicrobial activity, biotransformation.