

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohammed Seddik Benyahia- de Jijel
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de l'Environnement et Sciences
Agronomiques.

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم علوم المحيط والعلوم الفلاحية

Thèse
Présentée par
MAHDEB Amokrane

Pour l'obtention du

Doctorat 3eme cycle (LMD)

Spécialité : Sciences de l'Environnement et Sciences Agronomiques.

Option : Biologie Environnement et Santé : Biodiversité et Ecotoxicologie.

Thème

**Evaluation des teneurs en polyphénols totaux d'un sous-produit
(poudre de cladode) des écotypes identifiés du figuier de barbarie
conduits en monoculture dans deux régions de l'Est algérien
(Bejaia, Souk Ahras)**

Soutenu publiquement : le, 03 /03/2022

Devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------|--------------------|------------|---------------------------|
| Président : | Boualem MAYACHE | Professeur | Université de Jijel |
| Rapporteur : | Khodir MADANI | Professeur | Université de Bejaia |
| Examineurs: | Farid BEKDOUCHE | Professeur | Université de Batna 2 |
| | Abdelouahab YAHIA | Professeur | Centre Universitaire Mila |
| | Mohamed BOULDJEDRI | M.C.A | Université de Jijel |

Année universitaire : 2021/2022

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

En témoignage de mon affection et reconnaissance pour tout ce qu'ils m'ont donné.

A la mémoire de mon très cher défunt père, Asye3fu Rebbi.

Sans vous je ne serais jamais arrivé jusque-là.

Je vous remercie pour votre soutien et votre amour inconditionnel.

Vous n'avez jamais hésité à vous sacrifier pour ma réussite et mon bonheur.

A ma petite famille, Yacine et Célia

A tous mes frères et sœurs : Mahmoud, Slimane, Abderrahmane, Nora ; ainsi qu'à leurs petites familles. Sans oublier mes oncles.

A mes amis

Remerciements

Je tiens à remercier,

Monsieur le Professeur **MADANI Khodir**, Directeur de thèse, pour son soutien, son encadrement, son enthousiasme communicatif et sa confiance. Je suis également reconnaissant de son aide scientifique, de ses conseils et de la patience qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Je le remercie également pour son amitié et son respect envers les Doctorants. Je lui souhaite aussi pleine réussite en tant que Directeur du CRTAA de Bejaia.

Je tiens à remercier les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail :

Mr. **MAYACHE Boualem**, Professeur à l'université de Jijel d'avoir accepté de présider le jury

Mr. **BEKDOUCHE Farid**, Professeur à l'Université de Batna 2.

Mr. **YAHIA Abdelouahab**, Professeur au Centre Universitaire de Mila

Mr. **BOULDJEDRI Mohamed**, M.C.A à l'Université de Jijel.

Mes remerciements vont également à :

Mr. **LEGHOUCHI Said**, Doyen de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Jijel

Mr. **SIFOUR Mohamed**, Vice-Doyen chargé de la Post-Graduation. Université de Jijel.

Sans oublier de remercier :

Mme. **ADJROUD-ABDELATIF Nawel**, Enseignante à l'Université de Bejaia, pour son aide précieuse.

Mr. **MAZARI Azzeddine**, Chercheur à l'INRAA pour son soutien et sa collaboration fructueuse.

Mr. **TITOUH Kheirddine**, Chercheur à l'INRAA pour son aide et son soutien.

Et à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Liste d'abréviation

| | |
|--------------|--|
| AAE | Acide Ascorbique Equivalent |
| ABTS | 2, 2'-Azino-Bis (3-ethylbenzoThiazoline-6-Sulphonic acid) |
| ACP | Analyse en Composantes Principales |
| ANOVA | Analyse de Variance. |
| CAH | Classification Ascendante Hièrarchique. |
| CAM | Crassulassen Acide Metabolisme |
| CM | Carré Moyen |
| CPT | Composés Phénoliques Totaux |
| DDL | Degré De Liberté |
| DF | Diamètre géométrique du Fruit |
| DOF | Densité Optique finale |
| DOI | Densité Otique Initiale |
| EAU | Extraction Assistée par Ultrasons |
| EC | Electrocoagulation |
| EC | Epaisseur du cladode |
| EDTA | Acide éthylène Diamine Tétra-Acétique |
| EF | Electrofloculation |
| EFS | Extraction par Fluide Supercritique |
| ELP | Extraction par Liquide Pressurisé |
| FAO | Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| FT | Flavonoïdes Totaux. |
| GISC | Groupe International de la Systématique des Cactacées. |
| HCDS | Haut Commissariat au Développement de la Steppe |
| HP | Hauteur du Plant. |
| Kbr | Bromure de potassium. |

Liste D'abréviation

| | |
|---------------|---|
| Khz | Kilohertz. |
| IC | largeur du cladode. |
| LC | Longueur du cladode |
| LC/IC | Rapport ou Ration longueur du cladode sur largeur du cladode |
| LE | Longueur de l'épine le plus long. |
| LF | longueur du fruit. |
| MEB | Microscopie Electronique à Balayage. |
| MED | Moyens d'Existence Durables |
| O.A | <i>Opuntia amyclaea.</i> |
| O.F.I | <i>Opuntia ficus indica.</i> |
| O.M | <i>Opuntia megacantha.</i> |
| PEP | phosphoénolpyruvate |
| PF | Poids du Fruit |
| rpm | rotation par minute. |
| SCE | Somme des Carrés des Ecart |
| TEAC | Capacité Antioxydante en Equivalent Trolox |
| Trolox | Acide 3,4-dihydro-6-hydroxy-2,5,7,8-tétraméthyl-2H-1-benzopyran-2-carboxylique, |
| US | Ultrasons. |
| UV | Ultra-Violet. |

Liste des figures

- Figure 1:** *Modèle biogéographique de dispersion de l'Opuntia ficus-indica à partir du nouveau monde vers le vieux monde (P. GRIFFITH, 2004).....5*
- Figure 2:** *Composantes de l'Opuntia ficus-indica. A: port B: cladode; C: auréole du cladode; D: fleur ; E : auréole de la fleur ; F: coupe longitudinale de la fleur; G: fruit; H: vue dorsale de la graine; I: coupe ventrale de la graine.(Reyes-Agüero, Antonio 2005).6*
- Figure 3:** *Micrographie obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) d'une coupe transversale d'une cladode d'OFI. E : cellules épidermiques, A : auréoles, P : cellules du parenchyme, C : cellules du chlroenchyme. (Malainine M-E et al ,2001).....8*
- Figure 4:** *Synthèse globale du système CAM chez les cactacées. (Goldstein et al. 1991).....9*
- Figure 5:** *Classification de la famille des Cactaceae adoptée par (Griffith et Porter, 2009).....12*
- Figure 6:** *Squelette carboné de base des flavonoïdes (He et al, 2008).27*
- Figure 7:** *Situation géographique des zones de collecte d'espèces de figuier de Barbarie en Algérie : Souk-Ahras (côté est) : Opuntia ficus-indica (OFI) a été collecté à Sidi-fredj, Opuntia amyclae (OA) et Opuntia megacantha (OM) ont été récoltées à Merahna 1 et Merhana 2, respectivement. Bejaia (côté ouest) : l'OM a été collecté à Oued-Ghir, L'OA a été collectée à Amizour, et les espèces OFI ont été collectées à Bir-Essalam et Taourirt.32*
- Figure 8:** *Représentation schématique du phénomène de cavitation (Draye et al, 2009).....36*
- Figure 9:** *Représentation graphique de l'effondrement et de la libération du composant végétal par des bulles de cavitation : A) cellule végétale et bulles, B) Rupture de la paroi cellulaire et effondrement des bulles, C) Diffusion du solvant par rupture cellulaire et libération des composés (Shirah et al, 2012).....36*
- Figure 10:** *Préparation des échantillons de cladode (Photographies prises in-vitro).....38*
- Figure 11:** *Extraction conventionnelle des TPC sur plaque agitatrice39*
- Figure 12:** *Extraction aux Ultrasons des CPT : a) Mise en contact poudre de cladode-solvant(trois tests), b) Bain à Ultrasons, c) Les trois béchers placés dans le Bain à Ultrasons.40*

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 13: Piégeage du radical ABTS+ par un antioxydant donneur de H (Marc et al, 2004 ; Nenadis et al, 2004) (Modifiés)..... | 42 |
| Figure 14: Cladodes de cactus provenant de différentes accessions dans les régions de Béjaïa et de Souk-Ahras : <i>Opuntia amyclae</i> (a et e), <i>Opuntia megacantha</i> (b et f), <i>Opuntia ficus-indica</i> (c (Taourirt), d (Bir-Essalam), et g ((Sidi-Fredj)). | 46 |
| Figure 15: Accessions de cactus les plus courantes en Algérie. | 47 |
| Figure 16: Projection des variables sur le plan factoriel (1x2)..... | 52 |
| Figure 17: Projection des individus sur le plan factoriel (1x2)..... | 53 |
| Figure 18: Dendrogramme des variables étudiées..... | 54 |
| Figure 19: Influence de la concentration du solvant sur le taux des composés phénoliques de l'extrait de cladode d'OFI Bir-Essalam en extraction conventionnelle | 65 |
| Figure 20: Effet du temps de sonication sur la teneur totale en phénols (CPT) de la poudre de cladode <i>Opuntia ficus-indica</i> (OFI) de BirEssalam. Conditions UAE : 50 % ethanol à 20 °C..... | 67 |
| Figure 21: Effet de la température sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes totaux (FT) contenus dans les extraits de la poudre du cladode d' <i>O. ficus indica</i> de Bir-Essalem par la méthode d'extraction à l'Ultrasons (EAU). Les valeurs sont des moyennes \pm E-T de trois mesures. Les différentes lettres indiquent que les échantillons sont significativement différents ($p < 0,05$).2017). | 68 |
| Figure 22: Effet des techniques d'extraction sur le temps d'extraction et sur la teneur des composés phénoliques des extraits de cladode d'OFI Bir-Essalam..... | 70 |
| Figure 23: Effet de la température sur la concentration des flavonoïdes totaux des extraits de la cladode d'OFI Bir-Essalam. | 71 |
| Figure 24: Analyse des spectres infrarouges de la poudre de cladodes des espèces de figuier de Barbarie étudiées (de Béjaïa : <i>Opuntia ficus indica</i> de Bir-Essalam (OFI), OFI de Taourirt, <i>Opuntia amyclae</i> (OA) d'Amizour, et <i>Opuntia megacantha</i> d'Oued-ghir (OM), de Souk-Ahras : OFI (Sidi-Fredj), OA (Merhana 1) et OM (Merhana 2)..... | 78 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| <i>Tableau 1 : Comparaison entre trois espèces du genre Opuntia : Opuntia ficus indica, Opuntia megacantha, et Opuntia amyclae. (Agüero et al. 2005).....</i> | <i>13</i> |
| <i>Tableau 2 : Estimation des superficies occupées par la plantation de cactus, principalement Opuntia ficus indica, pour les fourrages et légumes (Nefzaoui, 2009).....</i> | <i>14</i> |
| <i>Tableau 3 : Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie (Stintzing et Carle, 2005).</i> | <i>16</i> |
| <i>Tableau 4 : Les principales classes des composés phénoliques (Harbone, 1980, Macheix et al, 1990).</i> | <i>25</i> |
| <i>Tableau 5 : Caractéristiques géographiques et climatiques des accessions du genre Opuntia spp.</i> | <i>30</i> |
| <i>Tableau 6 : Caractéristiques des espèces de cactus des deux régions.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tableau 7 : Analyse de la variance à un seul facteur (Anova).....</i> | <i>49</i> |
| <i>Tableau 8 : Contribution des variables quantitatives du plant, cladode, épine et fruit du figuier de barbarie dans l'inertie totale par Analyse en Composantes Principales (ACP).</i> | <i>51</i> |
| <i>Tableau 9 : Test de Newman-Keuls, Variable : largeur du Plant LP</i> | <i>55</i> |
| <i>Tableau 10 : Test de Newman-Keuls , Variable : Longueur du Cladode LC.....</i> | <i>56</i> |
| <i>Tableau 11 : Moyennes et écart-type des variables quantitatives continues.</i> | <i>57</i> |
| <i>Tableau 12 : Test de Newman-Keuls, variable : largeur du cladode lc.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Tableau 13 : Test de Newman-Keuls, variable : Epaisseur du Cladode EP.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tableau 14 : Test de Newman-Keuls, variable : CL/Cl.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tableau 15 : Test de Newman-Keuls, variable: LE.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Tableau 16 : Test de Newman-Keuls, variable : LF (longueur du fruit).....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tableau 17 : Test de Newman-Keuls, variable : Diamètre géométrique du Fruit DF.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Tableau 18 : Test de Newman-Keuls, variable : Poids du fruit PF.....</i> | <i>62</i> |

Liste des tableaux

Tableau 19 : *Caractéristiques des variables Qualitatives des espèces des deux régions.64*

Tableau 20 : *Capacité antioxydante de l'extrait de cladode *Opuntia ficus indica* de Bir-Essalam en tant que taux d'inhibition ABTS (acide 2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) et équivalent Trolox (TEAC) à diverses plages de températures.....73*

Tableau 21 : *Teneurs en polyphénols totaux et en flavonoïdes des cladodes de la poudre du cactus, traités par extraction assistée par ultrasons (UAE) à 60 et 40°C, concentration de solvant de 50% et temps d'extraction de 30 min, selon l'espèce et le site de collecte.75*

Tableau 22 : *Capacités antioxydantes des extraits de cladodes de cactus en tant que taux d'inhibition ABTS (acide 2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) et équivalent Trolox (TEAC).77*

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Références Bibliographiques

Annexes

Résumés

Introduction Générale 1

Chapitre I

Revue de littérature

| | | |
|---------|--|----|
| I. | Origine et distribution des cactacées à travers le monde | 4 |
| I.1. | Histoire et origine du cactus | 4 |
| I.2. | Provenance des accessions d’Afrique du Nord | 5 |
| II. | Morphologie et anatomie des principales composantes du figuier de barbarie | 6 |
| II.1. | Les organes du figuier de barbarie | 6 |
| II.1.1. | Le système racinaire | 6 |
| II.1.2. | Le cladode | 7 |
| II.1.3. | Le fruit | 8 |
| III. | Ecophysiologie et biologie cactus | 8 |
| IV. | Système de production du figuier de barbarie | 10 |
| V. | Taxonomie et systématique du genre <i>Opuntia</i> spp | 10 |
| V.1. | La famille des Cactacées et les problèmes de taxonomie qui y sont liés | 10 |
| VI. | Intérêt Agro-industriel et utilisations des différentes parties du figuier de barbarie | 13 |
| VI.1. | Fruits | 16 |
| VI.2. | Cladodes | 16 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| VI.3. Huile de graines du fruit | 17 |
| VII. Composés fonctionnels des figues de Barbarie (Opuntia spp) | 18 |
| VII.1.Fibres diététiques | 18 |
| VII.2.Mucilages | 20 |
| VII.3.Antioxydants | 20 |
| VIII. Contenus en produits phytochimiques | 21 |
| VIII.1.Pigments | 21 |
| VIII.2.Acide ascorbique | 23 |
| VIII.3.Tocophérols | 24 |
| IX. Avantages potentiels du figuier de barbaries liées à la santé | 24 |
| X. Focus général sur les polyphénols | 24 |
| X.1. Définition | 24 |
| X.2. Classification des polyphénols | 25 |
| X.3. Les Polyphénols dans les différentes parties du figuier de barbarie | 25 |
| X.4. Flavonoïdes | 26 |
| X.4.1. Définition | 26 |
| X.4.2. Structure et classification des flavonoïdes | 27 |
| X.4.2.1. Isoflavones et flavones | 27 |
| X.4.2.2. Flavonols | 28 |
| X.4.2.3. Anthocyanes | 28 |
| X.4.2.4. Flavanones | 28 |
| X.4.2.5. Flavanols | 28 |
| XI. Biosynthèse des polyphénols | 29 |
| XII. Rôle et intérêt des composés phénoliques | 29 |

Chapitre II

Matériels et Méthodes

| | | |
|--------------|---|----|
| I. | Caractéristiques des écotypes | 30 |
| I.1. | Choix des écotypes | 30 |
| I.2. | Collecte du matériel végétal et méthodologie adoptée | 31 |
| I.3. | Aperçu général sur l'état des accessions d' <i>Opuntia spp</i> | 33 |
| I.4. | Méthodes d'extraction des composés phénoliques | 33 |
| I.4.1. | Description des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail | 34 |
| I.4.1.1. | Extraction solide-liquide | 34 |
| I.4.1.2. | Extraction assistée par ultrasons (EAU) | 34 |
| I.4.1.2.1. | Historique | 34 |
| I.4.1.2.2. | Définition des Ultrasons | 35 |
| I.4.1.2.3. | Principe d'extraction par Ultrasons (US) | 35 |
| I.4.1.2.3.a. | Les paramètres influençant la cavitation | 37 |
| I.4.1.2.3.b. | Avantages de l'extraction assistée par ultrasons | 37 |
| I.5. | Partie expérimentale | 38 |
| I.5.1. | Protocole d'extraction des polyphénols | 39 |
| I.5.2. | Extraction conventionnelle | 39 |
| I.5.3. | Extraction assistée par ultrasons (EAU) | 40 |
| I.5.4. | Détermination de la teneur en composés phénoliques totaux (TPC) | 40 |
| I.5.4.1. | Principe | 40 |
| I.5.4.2. | Mode opératoire | 40 |
| I.5.5. | Détermination de la teneur en flavonoïdes totaux (FT) | 41 |
| I.5.5.1. | Principe | 41 |
| I.5.5.2. | Mode opératoire | 41 |
| I.5.6. | Evaluation de l'activité anti-oxydante par le test de l'ABTS | 41 |
| I.5.6.1. | Principe | 41 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.5.6.2. Mode opératoire | 42 |
| I.5.7. Analyse des poudres de cladodes par spectroscopie à transformée de Fourier (IRTF) | 43 |
| I.5.7.1. Principe | 43 |
| I.5.7.2. Mode opératoire | 43 |
| I.5.8. Etude statistique | 44 |

Chapitre III

Résultats et Discussions

| | |
|---|----|
| I. Identification des écotypes des deux régions | 45 |
| I.1. Classification des écotypes | 45 |
| I.1.1. Traits morphologiques des cladodes des accessions des deux régions | 46 |
| I.2. Traitement des Données et résultats. | 48 |
| I.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) | 48 |
| I.2.2. Analyse des Composantes Principales (ACP) et Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)..... | 50 |
| I.2.2.1. Analyse en composantes principales (ACP) | 50 |
| I.2.2.2. Classification Ascendante hiérarchique (CAH) | 54 |
| I.2.3. Test de Newman-Keuls (Groupes homogènes) | 55 |
| I.2.3.1. Largeur du Plant | 55 |
| I.2.3.2. Longueur du cladode (LC) | 55 |
| I.2.3.3. Largeur du cladode (IC) | 58 |
| I.2.3.4. Epaisseur du cladode | 58 |
| I.2.3.5. Le Ratio : CL/cl | 59 |
| I.2.3.6. Longueur de l'épine la plus longue | 60 |
| I.2.3.7. Longueur du fruit | 60 |
| I.2.3.8. Diamètre géométrique du fruit | 61 |
| I.2.3.9. Poids du fruit | 62 |
| I.2.4. Les variables qualitatives discontinues | 63 |

Sommaire

| | | |
|-----------|---|-----------|
| II. | Extraction des composés phénoliques totaux (CPT) | 65 |
| II.1. | Extraction Conventionnelle | 65 |
| II.2. | Extraction assistée par ultrasons (EAU) | 66 |
| II.2.1. | Détermination du temps d'extraction optimal | 66 |
| II.2.1.1. | Détermination de la température d'extraction optimale | 67 |
| III. | Comparaison entre les deux méthodes d'extraction | 69 |
| IV. | Détermination des flavonoïdes totaux | 70 |
| V. | Évaluation de l'activité antioxydante (test ABTS) | 72 |
| VI. | Teneur totale en polyphénols des espèces d' <i>Opuntia spp.</i> entre les deux régions | 74 |
| VII. | Comparaison des teneurs en Flavonoïdes totaux entre les espèces du genre <i>Opuntia</i> et entre région de collecte | 75 |
| VIII. | Activités antioxydantes parmi les espèces d' <i>Opuntia</i> des deux régions | 76 |
| IX. | Analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) | 77 |
| | Conclusion Générale | 80 |

Introducción General

Introduction Générale

Le changement climatique est un des plus importants défis auquel le monde doit faire face aujourd'hui et dans le futur. Les sécheresses prolongées et récurrentes, la désertification font partie des problèmes rencontrés par de nombreux pays, particulièrement en Afrique du Nord, où les populations sont les plus durement touchées. Si les populations doivent survivre dans des conditions encore plus extrêmes, leurs cultures doivent supporter la sécheresse, hautes températures et sols pauvres. De facto, La culture du figuier de barbarie apparaît comme une alternative prometteuse pour lutter et atténuer les effets de dégradation multiples des ressources naturelles (érosion des sols et de la biodiversité, désertification, baisse des rendements des cultures, pauvreté, rareté de l'eau...etc.). En raison de sa résistance aux milieux les plus extrêmes et ce grâce au mécanisme de photosynthèse de type CAM (Nobel, 1988), en effet, ce système physiologique constitue le véritable « réacteur » d'adaptation aux milieux les plus hostiles.

Cette culture suscite un intérêt croissant et bénéficie d'une attention croissante à travers le globe, l'*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. est l'espèce de cactus ayant la plus grande importance économique et écologique dans le monde (Kiesling, 1998). Le figuier ou cactus Mill (L.) est l'un des cactus les plus abondants en Algérie (Ksouri et al. 2007). Le genre *Opuntia* est largement représenté au Mexique et en Amérique centrale, avec 78 espèces originaires du Mexique, où l'on trouve de nombreuses espèces, à la fois sauvages et semi-domestiquées (Astello-García et al, 2015). La domestication du cactus (O.F.I) remonte à environ 8 000 à 9 000 ans (Callen, 1965, 1967 ; Bravo et Merojada, 1991). Suite à la découverte de l'Amérique, l'*Opuntia ficus-indica* a été amené en Espagne pour son rôle anti-scorbut. Il s'est ensuite propagé à d'autres parties du monde, principalement dans tout le bassin méditerranéen (Kiesling, 1998). En Algérie, les accessions sauvages d'espèces du figuier de barbarie ont montré une variabilité considérable en réponse aux conditions environnementales à travers l'apparition de variations dans les aréoles et les épines (Adli et al. 2017).

La forme inerme d'*Opuntia ficus indica* couramment cultivée, résulte d'un long processus de sélection naturelle. Le cactus est une espèce adéquate pour une agriculture durable en Algérie grâce à sa résistance à la sécheresse, la lutte contre la désertification et à son utilisation dans l'alimentation de l'Homme et du bétail. C'est une plante qui est économiquement importante, elle possède une production en biomasse très efficace, mais qui reste très peu exploitée. Elle peut être valorisée en produits agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques,etc. Ce sont des produits et sous-produits à haute valeur ajoutée pour les agriculteurs, populations locales et les circuits de transformations industrielles, ils jouent un rôle socio-économique important pour les agriculteurs et les populations rurales et contribuent au développement durable en milieu rural et au maintien de la

biodiversité (Arba, 2009). Ce qui permettra aussi de contribuer à la diversification de l'économie Nationale.

En raison de ses propriétés bénéfiques pour la santé, les cactus ont une grande importance économique et écologique en tant qu'aliments pour le bétail ou plantes médicinales (Angulo-Bejarano et al., 2014). Au Mexique, les jeunes cladodes (Nopalitos) sont consommées par les humains comme nourriture et transformées en plats de légumes (Griffith, 2004). Les fleurs, les fruits et les cladodes des cactus sont utilisés comme légumes, confitures, jus et tisanes dans différentes parties du monde (Kamble et al. 2017).

Les dérivés de cactus tels que le jus et le mucilage des jeunes cladodes sont des ingrédients importants et efficaces pour la purification de l'eau, seuls ou en combinaison avec des procédés de traitement des eaux usées (Adjroud et al., 2015, 2018). Plusieurs autres études ont été menées en Algérie sur l'extraction et la caractérisation du mucilage des cladodes de cactus (Felkai-Haddache et al. 2016 ; Lefsih et al., 2018 ; Adjroud et al., 2015, 2018, 2020). Une autre étude a rapporté la composition phytochimique et les propriétés physiques et l'activité antioxydante de la figue de barbarie d'Algérie cultivée dans la région Nord-Est du pays (Mazari et al. 2018), qui a également montré que le lieu de culture affecte de manière significative les paramètres biométriques du fruit, en particulier la taille et le poids.

Plusieurs études ont été réalisées pour examiner et réviser le profil et la richesse des teneurs en flavonoïdes de divers organes de cactus. Selon Del Socorro Santos Díaz et al. (2017), les composés les plus courants trouvés dans les tissus de cactus des espèces sauvages et cultivées comprennent le kaempférol, la quercétine, l'isorhamnétine et les glycosides d'isorhamnétine. Les fleurs d'*O. ficus-indica* contiennent des 3-glycosides d'isorhamnétine et leurs pétales jaunes produisent de la penduletine, du kaempférol, de la lutéoline, de la quercétine et de la rutine (Brinker, 2009). L'activité pharmacologique de l'extrait de fleur de cactus peut être liée à sa richesse en isorhamnétine 3-O-robinobioside (De Leo et al. 2010). Une analyse comparative récente de 15 cultivars de cactus, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha*, *O. albicarpa* et *O. ficus indica* cultivés dans les mêmes conditions environnementales et au même stade de développement, ont montré que la teneur en métabolites des cladodes était indépendante de la période de leur culture. Ainsi, ces différences dépendaient des caractéristiques biochimiques de chaque espèce (Astello-Garcia et al. 2015).

Le tissu cutané du fruit d'*Opuntia ficus-indica* semble être plus riche en flavonoïdes que la pulpe (Farang et al., 2017, El-Hawary et al., 2020), et 37 métabolites secondaires ont été identifiés

dans des extraits de différentes parties, Principalement des glycosides d'isorhamnétine (feuilles, peau et pulpe) d'*O. Ficus indica*.

L'extraction des composés phénoliques du matériel végétal est une étape très importante pour leurs applications industrielles. L'efficacité de l'extraction et le potentiel antioxydant peuvent être significativement affectés par certaines variables, telles que la nature et la concentration du solvant, la température et le temps d'extraction (Pradal et al. 2018). Cependant, certaines nouvelles méthodes d'extraction « écologiques », qui consomment généralement moins de solvant et d'énergie, ont été décrites pour pallier ces limitations (Chemat et al. 2012). Au cours des dernières années, plusieurs méthodes alternatives ont été utilisées, notamment l'extraction par liquide sous pression, l'extraction par fluide supercritique, l'extraction assistée par micro-ondes et l'extraction assistée par ultrasons (Dahmoune et al. 2013). Cette dernière est une méthode bien adaptée pour l'extraction des polyphénols des plantes (Pradal et al. 2018).

Les objectifs assignés à ce travail sont :

- i/** Identifier et analyser la variabilité morphologique des plants du figuier de Barbarie dans deux Régions d'Algérie (Bejaia et Souk-Ahras),
- ii/** Valoriser le figuier de Barbarie en optimisant les conditions d'extraction des composés phénoliques du cladode,
- iii/** Evaluer l'activité antioxydante de ces composés,
- iv/** Mesurer la teneur totale en flavonoïdes et comparer les rendements obtenus entre trois espèces à savoir (*Opuntia ficus-indica*, *Opuntia megacantha* et *Opuntia amyclaea*) des sites des régions d'étude.

La Thèse comporte un sommaire, une introduction générale, un premier chapitre consacré à l'état de l'art ou revue de littérature sur le figuier de barbarie, un deuxième chapitre dédié aux matériels et méthodes utilisées dans ce travail, suivi d'un troisième chapitre consacré aux résultats obtenus et l'analyse des résultats de recherche confrontés aux autres résultats des travaux académiques et enfin, une conclusion générale, perspectives de recherche et les références bibliographiques.

Chapitre I
Revue de littérature

I. Origine et distribution des cactacées à travers le monde

I.1. Histoire et origine du cactus

L'intérêt pour le genre *Opuntia* (famille des cactacées) et en particulier le figuier de barbarie ou cactus remonte à plusieurs milliers d'années. Son origine et son histoire sont intimement liés aux pratiques et civilisations Mésoaméricaines et plus particulièrement à la culture mexicaine des aztèques. Les études archéologiques réalisées ont montré clairement que les espèces du genre *opuntia* ont été cultivées déjà par les populations indigènes qui se sont installées au niveau du centre du Mexique essentiellement dans les régions arides et semi-arides (Diguët, 1928 ; Pimienta-Barrios, 1990). Selon (Bravo, 1978) sa domestication et sa culture ont commencé au Mexique il y a environ 8 000 ans.

Le noyau central qui est le centre du Mexique, semble-t-il ; représente le berceau et lieu de naissance du genre *Opuntia*, les ancêtres d'*Opuntia ficus-indica* ont été sélectionnés parmi les taxons arborescents aux fruits charnus (une ou plusieurs espèces comme : *O.leucotricha*, *O.hyptiacantha*, *O. megacantha* et *O. streptacantha*). Les plantes cultivées se propagent ensuite par le commerce à travers la Mésoamérique et les Caraïbes et éventuellement en Amérique du Sud (figure 1). En effet, selon (Diguët, 1928) ; le figuier de barbarie est introduit en Europe lors de la première expédition de Christophe Colomb, il s'est y rapidement naturalisée dans le sud de l'Europe, puis, il s'est répandu à l'état sauvage dans tous les endroits. L'autre fait marquant dans la dispersion du cactus est son introduction sur les terres les plus reculées qui s'est fait alors par l'entremise des navigateurs qui, entre le XVIe et le XVIIIe siècle, préconisèrent les raquettes jeunes et tendres du Nopal pour le traitement des affections scorbutiques qui sévirent sur les équipages des flottes faisant les longues expéditions de l'Océan Pacifique. Les voyageurs européens propagent par la suite ces plantes en Europe méditerranéenne et en Afrique du Nord, puis dans les régions arides et semi-arides du monde (Griffith, 2004) , Le figuier de barbarie et d'autres cactus faisaient certainement partie des plantes et des animaux apportés en Espagne par Christophe Colomb comme échantillons de la flore exotique du Nouveau Monde.

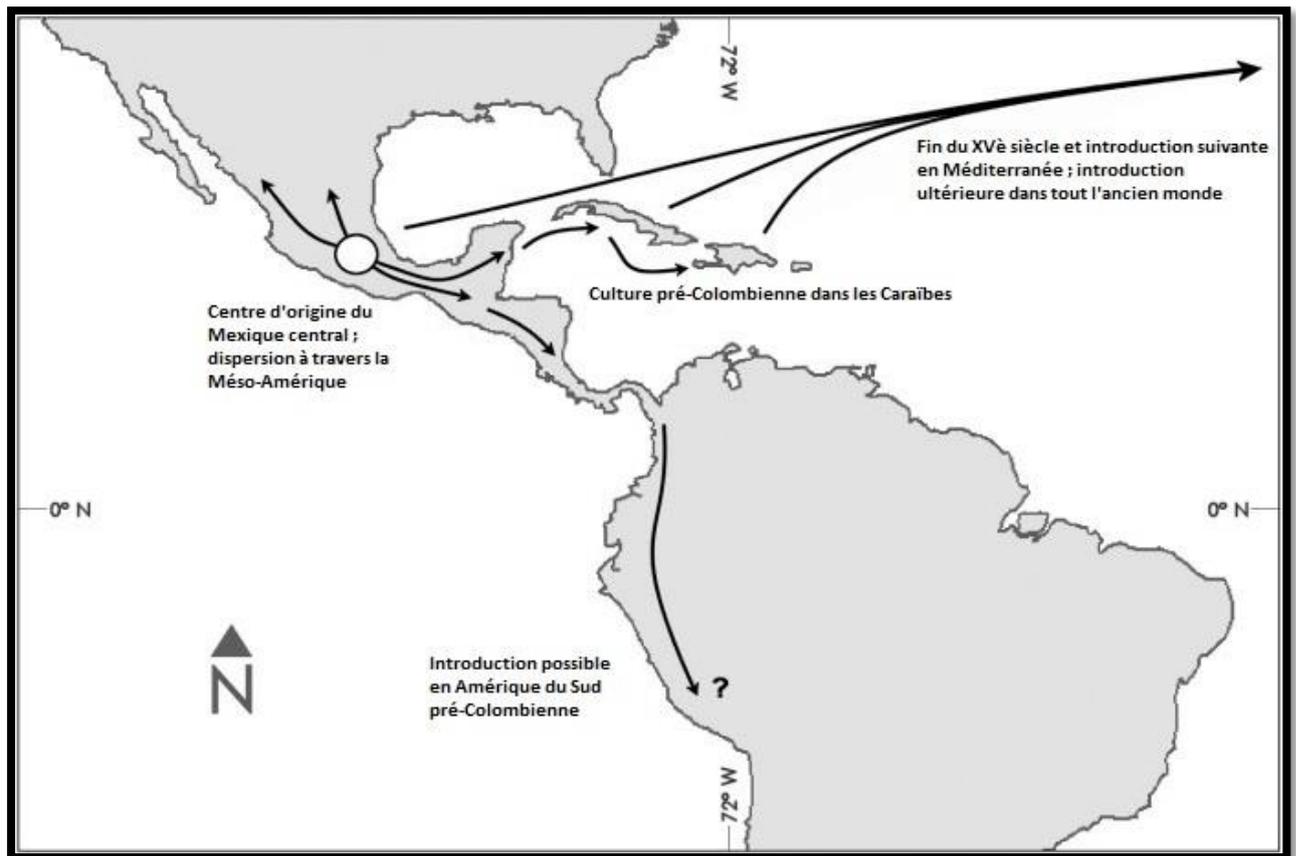


Figure 1: Modèle biogéographique de dispersion de l'*Opuntia ficus-indica* à partir du nouveau monde vers le vieux monde (Griffith, 2004)

I.2. Provenance des accessions d'Afrique du Nord

L'introduction du cactus en Afrique du Nord a deux origines : d'abord, elle a été favorisée par l'expansion espagnole au cours des XVI^e et XVII^e siècles et par le retour des Maures dans leur patrie lorsqu'ils ont finalement été expulsés d'Espagne en 1610. Ils ont pris avec eux le « figuier indien » avec ses fruits succulents et les ont plantés autour de leurs villages (Inglese et al. 2018). D'autre part, De Oviedo (1478-1577) a rapporté dans son livre (*Histoire naturelle et générale des Indes*, 1526) que les plantations de figuiers de Barbarie servaient de haies de défense contre l'invasion des Espagnols en pleine guerre vers la fin du XIV^e siècle en Afrique du Nord. De Oviedo a décrit la plante précisément pour la première fois. Il a cité que ses premières traces en Afrique du Nord datent d'environ 1505 à 1510 (Inglese et al. 2018), d'autres plantations ont été réalisées par les navigateurs marins sur les côtes du littoral (Diguet, 1928), la seconde origine correspond aux projets des années 1930 et 1940 où les plantations ont été réalisées dans le cadre de projets de la FAO, par la suite ; d'autres plantations ont été réalisées par les colons français en Algérie. Il s'est répandu rapidement par les populations rurales dans le bassin méditerranéen et s'y est naturalisé au point de devenir un élément caractéristique du paysage.

II. Morphologie et anatomie des principales composantes du figuier de barbarie

II.1. Les organes du figuier de barbarie

Le figuier de barbarie est composé d'un certain ensemble d'organes caractéristiques des plantes succulentes de la famille des cactacées (figure : 2) : le port est généralement dressé ou décombrant, des cladodes, des fruits, des fleurs, des graines à l'intérieur du fruit, des aréoles, des épines et glochides.

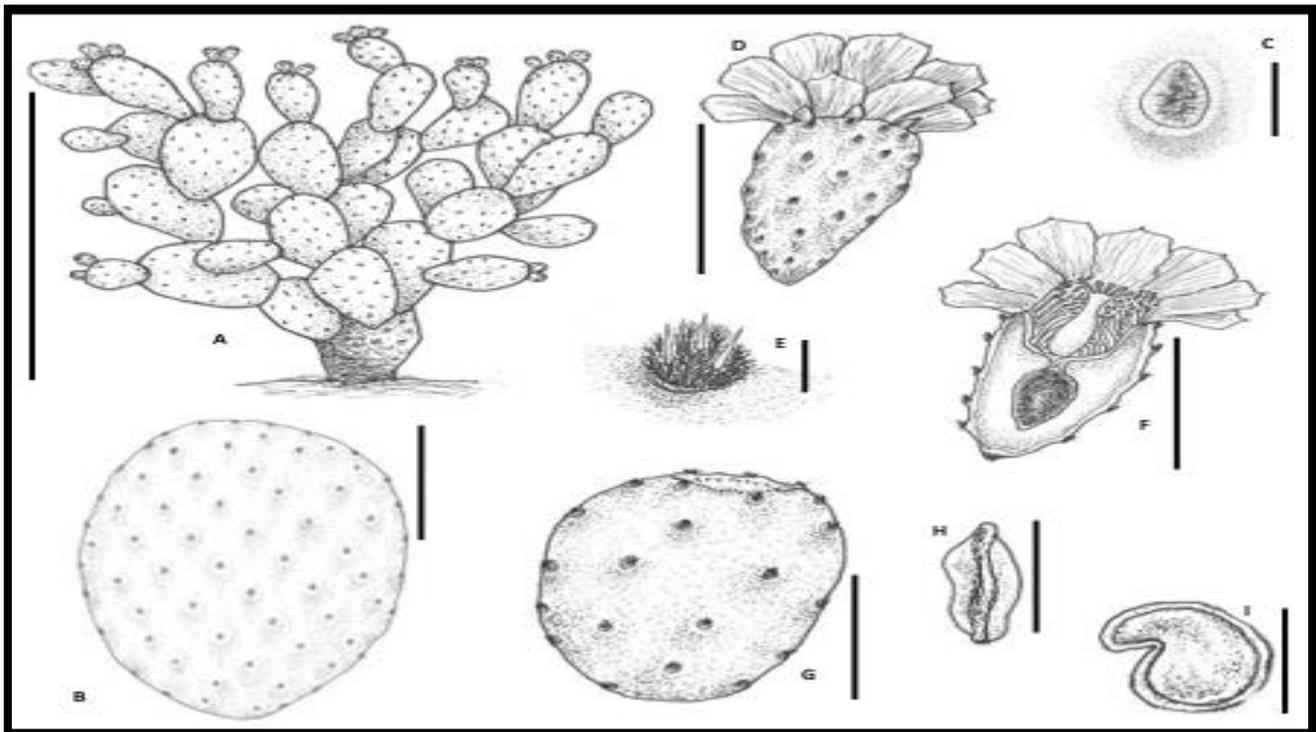


Figure 2: Composantes de l'*Opuntia ficus-indica*. **A:** port **B:** cladode; **C:** auréole du cladode; **D:** fleur ; **E :** auréole de la fleur ; **F:** coupe longitudinale de la fleur; **G:** fruit; **H:** vue dorsale de la graine; **I:** coupe ventrale de la graine. (Agüero, 2005).

II.1.1. Le système racinaire

L'*Opuntia ficus-indica* a un système racinaire superficiel et charnu, qui se répand horizontalement. La distribution racinaire peut dépendre du type de sol et de l'itinéraire cultural adopté (Snyman, 2005). Dans des conditions favorables de sol, une racine pivotante se développe, pénétrant presque 30 cm dans le sol. Dans des conditions de sécheresse, telles que celles rencontrées dans les régions arides et semi-arides, des racines secondaires charnues se développent depuis la racine pivotante pour absorber l'humidité du sol à une plus grande profondeur. Néanmoins, dans tous les types de sols, la majeure partie de la masse de racines absorbantes se trouvent dans les centimètres superficiels, à une profondeur maximale de 30 cm, mais se répandant horizontalement sur 4 à 8 m. On a aussi observé que les plantes fertilisées périodiquement avec du fumier développent des racines

succulentes non ramifiées, alors qu'elles développent normalement plus de racines latérales qui rapidement forment une couche d'écorce de surface lâche s'exfoliant (North et Nobel, 1992).

II.1.2. Le cladode

Selon Buxbaum (1955), les *cactaceae* sont généralement caractérisés par leurs rameaux courts "les raquettes » appelées cladodes, portant glochides et épines, une tige très rigide avec un cortex vert et l'absence de feuillage. Selon Hunt et Taylor (1986), les aréoles des *Opuntioideae* développent en plus ou à la place des épines, des courts dards rappelant des poils appelés glochides. Chez *Opuntia ficus-indica*, les organes connus sous le nom de cladodes ou (Nopalitos au Mexique), sont succulents et leur forme est typiquement oblongue, mesurant généralement 30-40 cm de longueur, quelques fois plus long (70-80 cm), et larges de 18-25 cm. Anatomiquement le cladode en coupe transversale est formée par : la peau ; le cortex ; les tissus vasculaires, disposés en cercle et composés de faisceaux collatéraux séparés par du tissu parenchymateux ; et la moelle qui est le tissu majeur (figure 3).

La peau est composée d'une couche de cellules épidermiques et 6-7 couches de cellules hypodermiques, avec une épaisse paroi cellulaire ressemblant à du collenchyme lamellaire. Les cellules épidermiques sont plates, fines et ont une forme proche de celle d'un pavé. L'épiderme et l'hypoderme forment une barrière efficace pour éviter les dommages physiques et maintenir la tension mécanique. Les cellules épaisses de l'hypoderme sont très résistantes et jouent le rôle de première ligne de défense contre les champignons, les bactéries et le broutage par de petits organismes. La peau reste intacte très longtemps et est finalement remplacée par de l'écorce (péri derme). Mauseth (2006) note aussi le fait que l'épiderme des *Cactaceae* présente une surface pliée, au lieu d'une surface lisse, affecte la force, la flexibilité et la capacité du rameau à se gonfler sans se déchirer. Une surface plissée signifie que, quand l'eau est absorbée et le volume du rameau augmente, les bases des cotes s'écartent et le volume de la cote est augmenté sans requérir quelque augmentation de superficie.

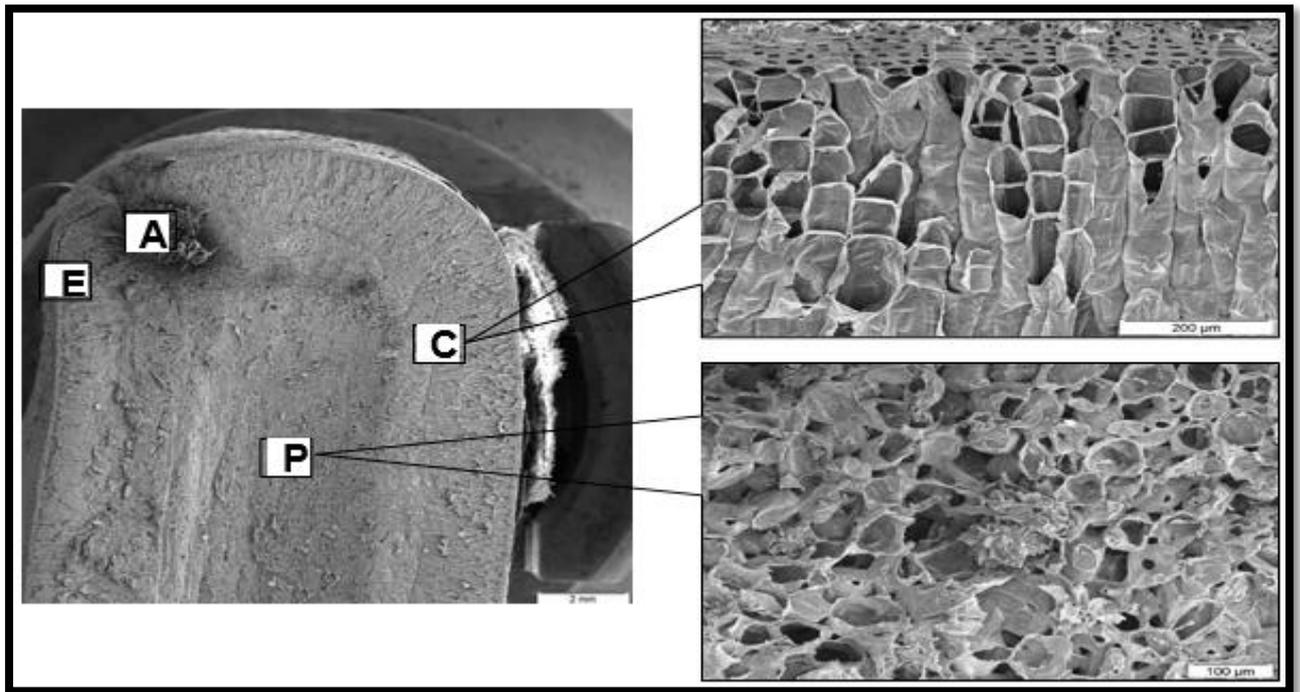


Figure 3: Micrographie obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) d'une coupe transversale d'une cladode d'OFI. **E** : cellules épidermiques, **A** : auréoles, **P** : cellules du parenchyme, **C** : cellules du chlorenchyme. (Malainine et al ,2001).

II.1.3. Le fruit

Le fruit d'*Opuntia ficus-indica* est une simple baie charnue issue d'un ovaire infère enfoncé dans les tissus de tige du réceptacle. La peau vient du réceptacle et a la même morphologie que le cladode. La pulpe est formée par le développement des trichomes qui viennent des cellules épidermiques du funicule et de l'enveloppe funiculaire (Pimienta-Barrios et Engelmann, 1985). La taille du fruit dépend du nombre d'ovules fécondés et du nombre de graines qui avortent (Archibald, 1935 ; Pimienta-Barrios, 1990 ; Barbera et al. 1994). On ne sait pas encore pourquoi des graines avortent.

III. Ecophysiologie et biologie cactus

Le figuier de Barbarie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill est une plante dont le métabolisme est de type CAM (métabolisme acide crassulassen) cultivée dans une large gamme d'environnements, donnant lieu à des différences majeures de survie et du développement des plantes, il s'adapte à presque tous les milieux abiotiques. Le succès écologique du genre *opuntia spp*, spécifiquement *Opuntia ficus-indica*, est largement dû à la particularité de leur mode quotidien d'assimilation du carbone et de perte d'eau. Le mécanisme d'adaptation aux conditions sont étroitement liées à son système typique de fonctionnement physiologique comme le montre la (figure 4).

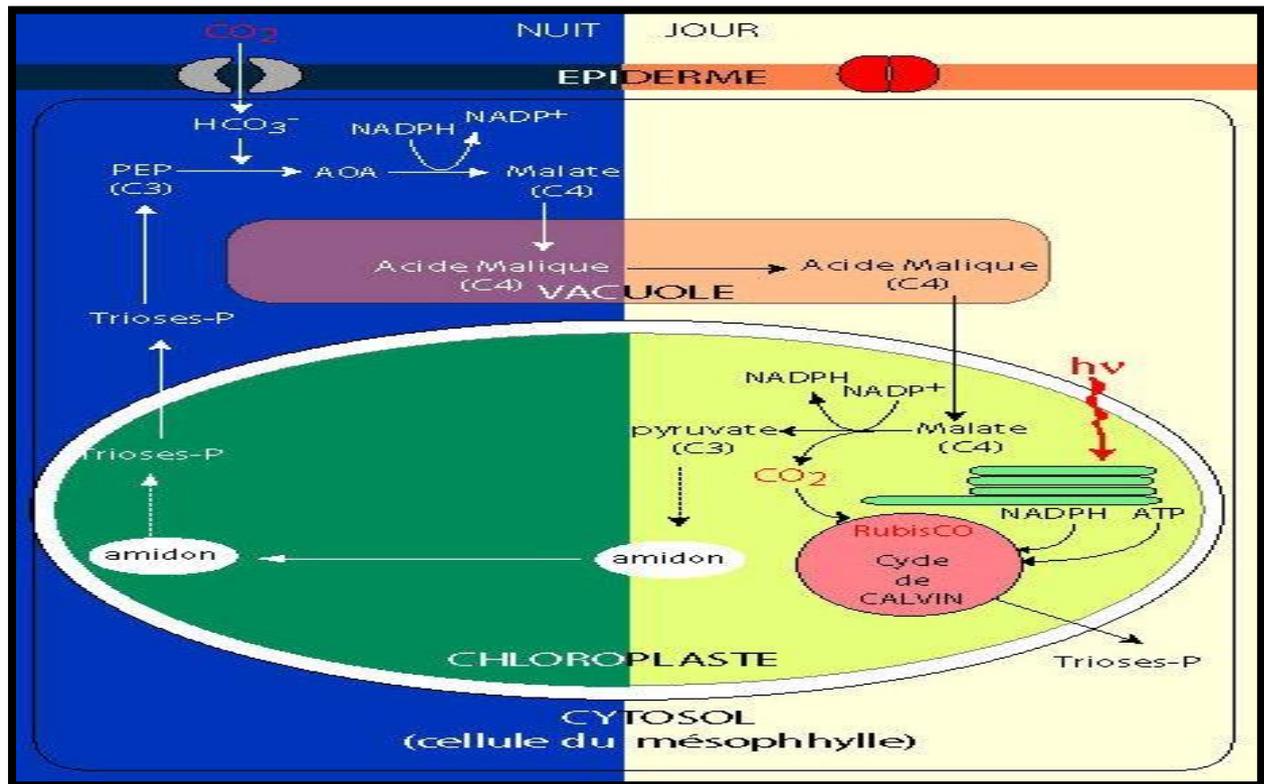


Figure 4: Synthèse globale du système CAM chez les cactacées. (Goldstein et al. 1991)

En effet, le mécanisme d'absorption du CO₂ s'effectue principalement pendant la nuit. Comme les autres plantes CAM, le figuier de Barbarie ouvre ses stomates la nuit pour fixer du CO₂. Cette fixation est réalisée par la phosphoénolpyruvate carboxylase (PEP), qui provient de la dégradation de l'amidon et du saccharose produit dans le chloroplaste le jour. Cette fixation permet de former de l'oxaloacétate, qui sera immédiatement réduit en malate, puis stocké dans une vacuole sous forme d'acide malique à l'intérieur des cellules du chlorenchyme, cette fixation nocturne est temporaire, puis, pendant la journée, la plante a besoin de la lumière pour compléter le cycle de Calvin et accomplir la photosynthèse (Goldstein et al. 1991). Puisque les températures nocturnes sont plus basses que les températures diurnes et que l'humidité relative est généralement plus élevée, la transpiration des plantes CAM est trois à cinq fois plus faible que celle des plantes C₃ et C₄ (Nobel, 1988). Il en résulte une énorme augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau et de la capacité de la plante à prospérer dans des environnements semi-arides caractérisés par des apports d'eau restreints (200-300 mm de précipitations annuelles) ou là où il y a de longues périodes de sécheresse et des températures relativement élevées, les mécanismes d'adaptation à l'aridité ne sont pas nécessairement dus aux températures élevées. Bien qu'elles se produisent la nuit, l'assimilation du CO₂ et l'accumulation d'acide malique sont fortement influencées par les variables environnementales telles que la température de l'air, la lumière, l'état hydrique de la plante, les nutriments et la salinité du sol (Nobel, 1988).

IV. Système de production du figuier de barbarie

La production de fruits par *Opuntia ficus-indica* est extrêmement variable en fonction des années : beaucoup de facteurs interfèrent notamment : la pluviométrie annuelle, la fertilisation, la durée de l'ensoleillement.....etc. Les rendements les plus importants sont enregistrés de de l'ordre de 20 à 30 tonnes par hectare ont été atteints en Israël et en Italie (Barbera et Inglese, 1993 ; Nerd et Mizrahi, 1993) et de 10-30 tonnes ha-1 en Afrique du Sud et en Afrique du Nord (Wessels, 1988 ; Brutsch et Zimmerman, 1993). La large variabilité des rendements dépend de la conception du verger (écart entre plantes), des pratiques culturales, des conditions environnementales et de la fertilité des cultivars. Les plantes commencent à produire 2 à 3 ans après la plantation ; elles atteignent leur potentiel maximum 6-8 ans après la plantation et restent productives durant 25-30 ans et même plus, en fonction de la taille et de le mode de la conduite en général ; ainsi que l'adoption ou non de bonnes pratiques agricoles du verger.

V. Taxonomie et systématique du genre *Opuntia* spp

V.1. La famille des Cactacées et les problèmes de taxonomie qui y sont liés

La classification de la famille des Cactacées reste aujourd'hui encore incertaine (Caruso et al. 2010). Depuis le milieu des années 1990, le système produit par le Groupe international de systématique des Cactacées (**GISC**) de l'Organisation internationale pour l'étude des plantes succulentes a servi de base à de nombreuses classifications publiées. Les traitements détaillés produits au 21e siècle ont divisé la famille en environ 125-130 genres et 1 400-1500 espèces, qui sont ensuite classés en plusieurs tribus et sous-familles (Bárcenas et al. 2011).

En 1923, Britton et Rose divisent le genre *Opuntia* en plusieurs séries, soulignant que la série *Ficus-indicae* (*O. ficus-indica*, *O. crassa* et *O. undulata*) ait été étroitement liée à la série *Streptacanthae* qui comprend 12 espèces, y compris (*O. amyclae*, *O. megacantha* et *O. streptacantha*), les deux séries ont été conservées pour des raisons de commodité (Inglese et al. 1998). Les deux groupes peuvent être différenciés selon la taille et la forme du cladode, le nombre d'aréoles et la distance qui les séparent et la longueur de la fleur. Le principal caractère d'identification d'*Opuntia ficus-indica* est son manque d'épines. De la divergence des caractéristiques végétatives et reproductives, Agüero et al. (2005) ont déduit que *Opuntia ficus-indica* est taxonomiquement distinct de *Opuntia megacantha* et *O. streptacantha*. De plus, Kiesling (1998) a indiqué que les variétés épineuses et sans épines sont des formes individuelles d'*Opuntia ficus-indica* (ex : *Opuntia megacantha* est une plante épineuse appartenant à série *sterptacanthae*, cette dernière est étroitement liée à la série *ficus indicae*).

La classification GISC de la famille, reconnaît quatre sous-familles (figure 5) : *Pereskoideae* (composée uniquement du genre *Pereskia*), *Opuntioideae*, *Maihuenioideae* (composée uniquement du genre *Maihuenia*) et *Cactoideae*. Les études phylogénétiques moléculaires suggèrent que le genre *Pereskia* n'est pas monophylétique (c'est-à-dire que son espèce n'est pas l'ensemble complet des descendants d'un ancêtre commun), bien que les trois autres sous-familles le soient.

Cinq tribus ont été reconnues au sein de la sous-famille *Opuntioideae* : *Tephrocactaeae*, *Pterocactaeae*, *Austrocylindropuntieae*, *Cylindropuntieae* et *Opuntieae*. Toutes, sauf la première, *Tephrocactaeae*, se sont révélées "essentiellement monophylétiques" lors d'une étude phylogénétique moléculaire en 2009.

Les premiers botanistes européens ont appelé le cactus "Ficus indica" (Donkin, 1977), bien que certains aient trouvé que ce nom ne convenait pas, car la plante ne ressemblait pas à la figue indienne (peut-être *ficus benghalensis* L.) déjà connue (Anderson, 2001). D'autre part, Miller a combiné ces deux "noms" pour aboutir à *l'Opuntia ficus-indica* en 1768 (Griffith, 2004). Le nombre d'espèces appartenant à la famille des cactacées est encore incertain et certains auteurs en dénombrent plus de 1600 (Gibson et Nobel, 1986 ; Barthlott et Hunt, 1993). Le nombre d'espèces appartenant au genre *Opuntia* est estimé à 300 et est réparti sur tous les continents (Scheinvar, 1995). Le nombre exact d'espèces au sein du genre *Opuntia* est encore inconnu et les chiffres varient selon les auteurs.

Aussi, il est à noter que chez l'espèce *Opuntia ficus indica*, il n'existe pas de profil de « référence – type » pour la distinguer des autres espèces du genre *Opuntia*.

La taxonomie des cactus est difficile pour plusieurs raisons : leurs phénotypes qui varient beaucoup en fonction des conditions écologiques ; leur polyploïdie, avec un grand nombre de populations qui se reproduisent végétativement et sexuellement ; et l'existence de nombreux hybrides, car presque toutes les espèces fleurissent à la même période de l'année et il n'y a pas de barrières biologiques qui les séparent (Mondragon-Jacobo, 2001). Il existe également un nombre limité de descripteurs morphologiques, une grande plasticité phénotypique, un niveau élevé d'hybridation intra- et interspécifique ainsi qu'une allopolyploïdie par rapport à l'autopolyploïdie (Mondragon et Chessa, 2013 ; Chessa et al, 2013). Plusieurs classifications ont été élaborées au début du siècle dernier, on peut en citer : la classification de (Britton et Rose, 1919), celle de (Bravo, 1978), aussi (Scheinvar, 1995) puis (Anderson, 2001) et enfin (Hunt, 2006). Ce sont généralement les plus acceptées et admises par la communauté scientifique, un exemple de classification adopté par Griffith et Porter, 2009 est donné en (figure 5).

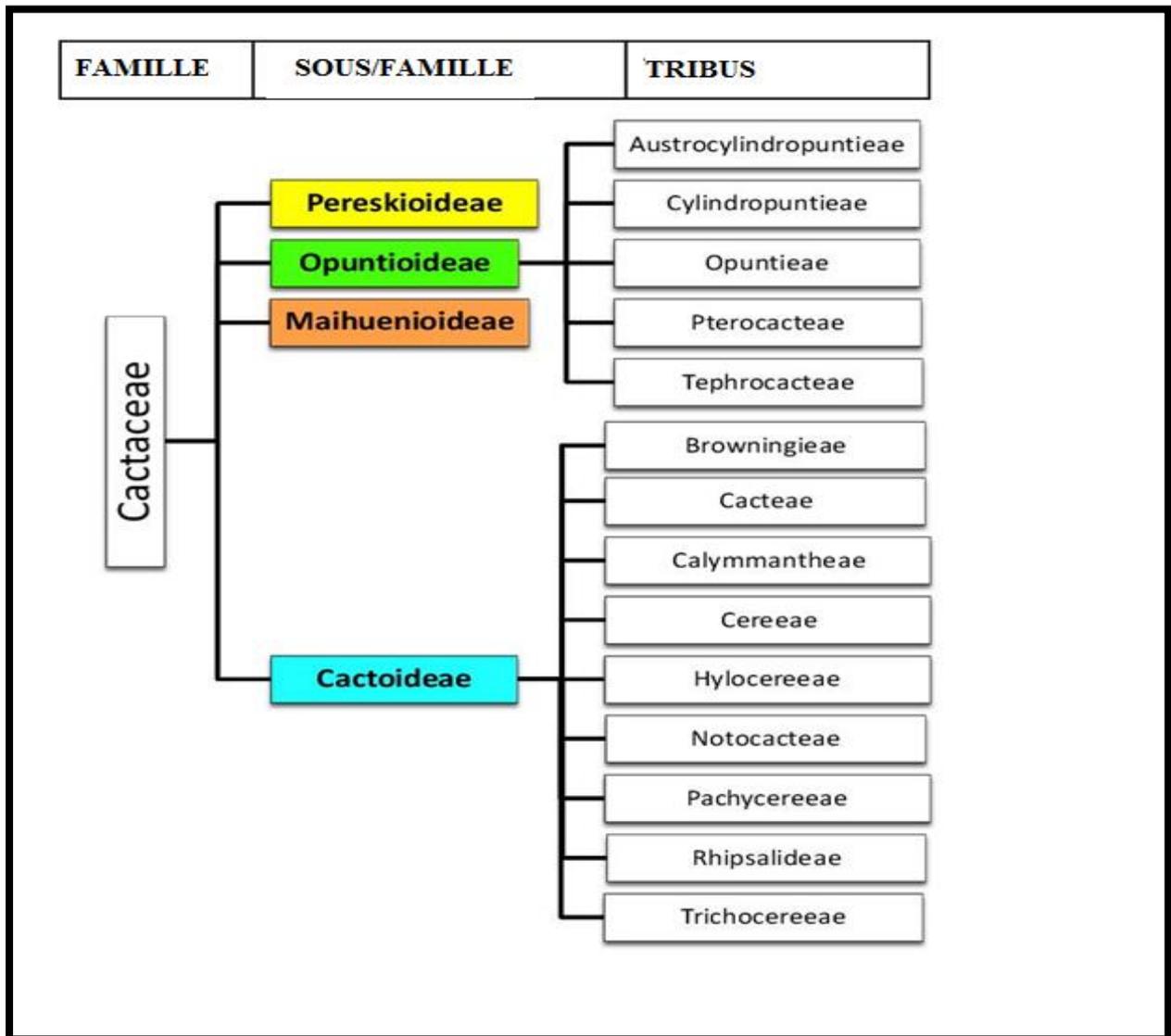


Figure 5: Classification de la famille des Cactaceae adoptée par (Griffith et Porter, 2009).

Les espèces du Figuier de barbarie les plus présentes en Algérie et qui renferment des potentialités importantes d'exploitation sur le plan Agro-industriel sont : *opuntia ficus indica*, *opuntia megacantha*, *opuntia amyclaea*. En effet L'*Opuntia ficus-indica* et l'*O. megacantha* sont parmi les cactées qui ont la plus grande importance agronomique et écologique, tant pour leur fruit comestible que pour les cladodes qui peuvent être utilisées comme fourrage ou comme légumes (Mulas et al, 2004).

Les différences entre les trois espèces selon (Agüero et al. 2005) sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 2 : Comparaison entre trois espèces du genre *Opuntia* : *Opuntia ficus indica*, *Opuntia megacantha*, et *Opuntia amyclae*. (Agüero et al. 2005).

| Organes du plant | <i>O. ficus indica</i> | <i>O. amyclaea</i> | <i>O. megacantha</i> |
|--|--|---------------------------|-----------------------------|
| Cladodes | | | |
| <i>Forme</i> | elliptique | Oblongue à elliptique | Obovale à oblongue |
| <i>Longueur (cm)</i> | 27-63 | 30-40 | 30-60 |
| <i>Largeur (cm)</i> | 14-31 | 15-20 | 18-19.5 |
| <i>Épaisseur (cm)</i> | 1-3 | | 1.5-2.5 |
| Aréoles | | | |
| <i>Nombre de lignes</i> | 6-19 | | 7-14 |
| <i>Longueur (mm)</i> | 2-8 | | 2-4 |
| <i>Distances entre les lignes (cm)</i> | 2.7-5 | | 5-8 |
| Epines | | | |
| | + Absents | Présents | Présents |
| <i>Nombre par aréole</i> | 0-1 | 1-4 | 1-7 |
| <i>Longueur (mm)</i> | 3-10 | à 30 | 20-35 |
| <i>Couleur</i> | Blanches | Blanches | Blanches ou marrons |
| Fruits | | | |
| <i>Couleur de l'écorce</i> | Jaune, vert-jaune, Jaune-rouge, rouge ou pourpre | | Jaune ou jaune rouge |
| <i>Longueur (cm)</i> | 5-10 | | 4.5-11 |
| <i>Diamètre (cm)</i> | 4-7 | | 3-4 |

VI. Intérêt Agro-industriel et utilisations des différentes parties du figuier de barbarie

Il y a un vaste éventail d'alternatives pour transformer les fruits, les cladodes et les graines du figuier de barbarie. En général, la technologie appliquée peut être utilisée dans de nombreuses petites industries agricoles, et elles peuvent utiliser cette nouvelle matière première pour diversifier leur production. En revanche, lorsque l'objectif est de créer une nouvelle industrie de transformation du cactus, des investissements sont nécessaires. Dans certains pays, des modèles de coopération peuvent être promus. L'immense variété de produits issus du figuier de Barbarie et de sous-produits peuvent générer de grands bénéfices à beaucoup de personnes, en particulier ceux vivant dans les zones arides et semi-arides du monde et améliorent considérablement les moyens d'existence durables (MEP). Nonobstant les recommandations sur la façon d'augmenter la productivité, faire pousser de meilleures récoltes et obtenir des rendements plus élevés.

Cependant, pour des fruits de petits calibres, une certaine quantité d'eau et de matières fertilisantes doivent être fournies pour augmenter les rendements et d'obtenir des fruits de bonne qualité (Mulas et D'hallewin, 1997). Les auteurs rapportent également que, sans irrigation, certaines

variétés (ex. Gialla, Sarda et Bianca) augmentent leur teneur en sucres réducteurs sans affecter la teneur en sucres totaux solides solubles. Dans certains pays, il existe deux saisons de floraison, qui conduisent à des récoltes d'été et d'hiver. Dans d'autres pays, la récolte prend lieu pendant l'été et l'automne ou seulement pendant l'été. La culture peut également être gérée de manière à allonger la période de récolte. Les fruits obtenus en été ont un plus grand nombre de graines. Là où il y a irrigation d'appoint, les graines sont plus grosses (D'hallewin, Mulas M, 1997). Ces informations font suite à celles des années 1990 où l'irrigation et l'éclaircissage des cladodes étaient recommandés pour augmenter et réguler le niveau de production (Berger, Munoz, Sudzuki ; 1993). Peu d'informations sur le plan international sont disponibles concernant les plantations commerciales d'*Opuntia* pour la production de fruits. Bien qu'*Opuntia* soit cultivé pour les fruits sur tous les continents, aucune statistique n'est disponible pour les pays producteurs : Algérie, Brésil, Colombie, Egypte, Grèce, Jordanie, Maroc, Pérou, Espagne, Tunisie et Turquie (Giugliuzza, Inglese et Liguori, 2004). Néanmoins, certains auteurs mentionnent des superficies importantes à l'instar de (Nefzaoui, 2009). Mais ces données concernent uniquement la production des fourrages et légumes (Tableau 2).

Tableau 3 : Estimation des superficies occupées par la plantation de cactus, principalement *Opuntia ficus indica*, pour les fourrages et légumes (Nefzaoui, 2009).

| Région /pays | Surface x 1000 ha |
|--|--|
| Brésil | 600 |
| Autres pays de l'Amérique du sud | 75 |
| Mexique | 230+ 3 million ha sauvages |
| Autres pays Nord-Américains | 16 |
| Afrique du Sud | 2 |
| Italie | 70 |
| Tunisie | 600 |
| Algérie | 150 |
| Autres pays de l'Asie orientale et Afrique du Nord | 300 |
| Total | 2 million ha cultivés+ 3 million ha sauvages |

Pour orienter le figuier de Barbarie comme culture pour la production de fruits, de prime abord ; il est essentiel d'estimer le niveau de fertilité du sol et de lutter contre les mauvaises herbes ; Cela aidera à déterminer si le désherbage et l'application d'engrais sont nécessaires avant la plantation. Comme recommandé par Inglese (1995) : il est important de déterminer si le terrain a un bon drainage ou, si nécessaire, pour le préparer en conséquence, car le figuier de barbarie est très sensible aux sols hydromorphes. Il y a généralement peu d'intérêt concernant les niveaux de fertilité et disponibilité des macroéléments dans le sol de la part des exploitants et selon le même auteur, seules quelques bonnes recommandations ont été suivies. La principale espèce utilisée pour la production de fruits dans le monde entier est *Opuntia ficus-indica*, bien que d'autres espèces sont cultivées au Mexique et d'autres pays, y compris *O. streptacantha*, *O. lindhemeiri*, *O. amyclaea*, *O. megacantha* et *O. robusta* (Pimienta et Muñoz, 2001).

Dans de nombreux pays comme l' Argentine, Chili, Pérou, Bolivie, Afrique du Sud, Égypte, Turquie, Éthiopie, Érythrée et d'autres pays d'Amérique du Sud et du Bassin méditerranéen c'est traditionnellement le fruit qui est consommé. Au Mexique, en plus du fruit, les tendres cladodes (Nopalitos) sont aussi consommés. Cependant, les fruits et Nopalitos sont périssables et des technologies de transformation sont nécessaires pour augmenter leur durée de conservation.

De plus, les fruits et les cladodes contiennent de nombreux composés bioactifs qui doivent être conservés pendant le traitement si les consommateurs voulaient avoir les pleins avantages. Le Fruit du cactus est polyvalent et une large gamme de produits et sous-produits peut en être dérivé. Il en est de même pour le cladodes (Saenz et al, 2006), ils présentent de nombreuses alternatives pour la transformation des fruits et cladodes. Au sein du genre *Opuntia* l'espèce la plus cultivée est *Opuntia ficus-indica*, caractérisée par fruits et pulpes sucrés et juteux de différentes couleurs : blanc, vert, jaune, orange, rouge ou violet. Les proportions de pulpe dans le fruit varient et la peau est généralement mince. Les écotypes colorés ont une double application : la production de colorants (bétalaïnes) ; Autres composés bioactifs présents dans les fruits sont la vitamine C, les caroténoïdes et les fibres alimentaires (Morales et al, 2009 ; Sáenz et al, 2009). Les cladodes de cactus ont une teneur élevée en eau, fibres et minéraux (Pimienta-Barrios, 1990 ; Sáenz et al, 2006). Les graines sont riches en acides gras essentiels polyinsaturés comme l'acide linoléique (Ennouri et al, 2005 ; Özcan et Al Juhaimi, 2011). Il existe des variations mineures dans la composition chimique des fruits colorés des figues de Barbarie ; les différences sont liées à la teneur en pigments.

V.2. Fruits

Outre la composition chimique et les composés bioactifs, il y a d'autres caractéristiques à considérer pendant le traitement. En général, les figues de Barbarie ont un PH élevé (5,3-7,1) et sont donc classés comme faiblement acides ; une exception concernant l'espèce *Opuntia xocconostle*, qui a une acidité plus élevée ($\text{pH} \leq 3,5$) (Mayorga et al. 1990). Il est bien connu que les températures de traitement thermique dépendent du PH (Casp et Abril, 1999). Pour cette raison, lorsque les aliments non acides sont pasteurisés ou en conserve. A moins que le pH soit réduit (par ajout d'acide citrique par exemple), une température plus élevée est nécessaire pour réduire les microbes à un niveau sûr de sécurité sanitaire par rapport au traitement des aliments acides ($\text{PH} \leq 4,5$). La sécurité sanitaire des aliments peut être comprise comme la mise en œuvre de mesures visant à réduire les risques liés aux contaminants biologiques, chimiques et physiques afin de protéger la santé des consommateurs (Roberts, 1999).

V.3. Cladodes

La composition chimique du cladode (Nopalitos) a été rapportée par Pimienta-Barrios (1990) et Maki Díaz et al. (2015). Comme pour les autres légumes, la teneur en eau et en fibres est élevée (voir composition du cladode tableau 3). Les polyphénols sont présents et ont une activité antioxydante importante dans la nutrition ; pendant la conservation, cependant, ils peuvent provoquer un brunissement dû à l'oxydation (Rodríguez-Felix, 2002). De plus, l'acidité des Nopalitos varie au cours de la journée. Au Mexique, les Nopalitos (jeunes raquettes) sont transformés en petits morceaux ou cubes dans du vinaigre et en variétés de salade, qui sont exportés essentiellement aux Etats-Unis et ceci permet d'absorber la surproduction des Nopalitos dans les marchés locaux, ainsi que l'utilisation des raquettes d'espèces sauvages telle qu'*Opuntia robusta* (Pimienta-Barrios, 1994).

Tableau 4 : Principaux composants des cladodes du figuier de Barbarie (Stintzing et Carle, 2005).

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

V.4. Huile de graines du fruit

Les fruits du cactus contiennent des quantités variables de graines, mais ils sont généralement présents en forte proportion (10-15 g /100 g). Dans la plupart des processus de production de figues de Barbarie, les graines sont séparées de la pulpe, ce qui donne de grandes quantités de graines jetées qui deviennent un déchet environnemental.

Pour cette raison, au cours des dernières décennies, les chercheurs dans différents pays ont étudié la composition des graines et ont recherché les différentes utilisations possibles. Certains chercheurs, à l'instar de (Sawaya et al. 1983) ont étudié la composition des graines et son utilisation potentielle en alimentation animale. Ils ont rapporté la présence 16,6 % de protéines, 17,2 % de matières grasses, 49,6 % de fibres et 3,0% de cendres. La teneur en minéraux est élevée en sodium (67,6mg /100 g), potassium (163,0 mg /100 g) et phosphore (152,0 mg /100 g). L'huile de pépins du cactus est comestible ; ça pourrait être un autre élément nutritif et produit fonctionnel d'intérêt potentiel pour l'alimentation, l'industrie cosmétique,...etc.

L'huile est généralement extraite dans les laboratoires de recherche en utilisant un solvant organique (4,4-14,10 %) (Sawaya et Khan, 1982 ; Sepúlveda et Sáenz, 1988 ; Ennouri et al. 2005 ; Bécerril, 1997 ; Tlili et al. 2011 ; Ouerghemmi et al, 2013 ; Chougui et al. 2013), en fonction de facteurs tels que les conditions de croissance, la variété et la maturité des fruits (Özcan, Juhaimi, 2011).

L'utilisation d'une presse à froid pour obtenir l'huile de graines était rapportée par (Gharby et al. 2015) avec un rendement de 6-7%. Ce type d'extraction est plus respectueux de l'environnement car il évite l'utilisation de solvants organiques. Les rendements en huiles comestibles sont de 6 à 17 %, ce qui, en termes de flux de déchets, se compare raisonnablement avec d'autres, couramment huiles de graines usagées. La production d'huile de pépins de figue de Barbarie comme l'huile comestible n'est viable qu'avec un traitement intégré, en utilisant toutes les parties de la plante (Sáenz et al, 2006). L'huile extraite à froid est très riche en acides gras polyinsaturés (Oméga 3, Oméga 6, Oméga 9), et d'autres composés chimiques naturels très recherchés dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique et autres utilisations potentielles.

VI. Composés fonctionnels des figues de Barbarie (*Opuntia spp*)

L'utilisation de diverses parties du figuier de Barbarie comme aliments, remonte à des centaines d'années, aussi bien dans le continent américain, que dans quelques pays européens, d'Afrique et du Moyen-Orient. Les diverses formes de consommation de cette espèce sont largement connues, en commençant par le fruit frais et les raquettes comme légume ; les fruits comme jus, sirops de fruit, ...etc. Par ailleurs, ces dernières années, les habitudes alimentaires se sont orientées vers les produits naturels et sur ce qui est bon pour la santé. Actuellement, les consommateurs privilégient les aliments faibles en calories, en cholestérol et en matières grasses (Sáenz et al., 2002), autrement dit : des « aliments sains » sans additifs de synthèse, notamment les colorants : ils recherchent donc plus de fibres, aliments riches en minéraux, antioxydants, vitamines et colorants naturels. Dans ce cas, des aliments dits fonctionnels sont apparus, qui non seulement apportent des composés nutritifs, mais sont également bénéfiques pour la santé et préviennent les maladies (Sloan, 2000).

Les *Opuntias* présentent un intérêt comme source de divers composés fonctionnels, qui peuvent être extraits et utilisés dans la fabrication de nouveaux aliments.

Les composés fonctionnels font partie de cette nouvelle gamme d'aliments qu'on connaît sous le nom d'aliments fonctionnels. Ce sont des aliments ou boissons qui fournissent un bienfait physiologique, qui fortifient la santé, aide à prévenir ou soignent des maladies, ou améliorent le rendement physique ou mental, par l'addition d'un ingrédient fonctionnel, par la modification d'un procédé, ou par l'utilisation de la biotechnologie (Sloan, 2000).

Tant les fruits que les raquettes du figuier de Barbarie sont une source intéressante de composés fonctionnels, parmi lesquels on distingue les fibres, les hydrocolloïdes (mucilages), les pigments (bétalaïnes et caroténoïdes), les minéraux (calcium, potassium), entre autres composés très appréciés du point de vue d'un régime, bon pour la santé et comme des ingrédients utilisables pour la fabrication de nouveaux aliments.

VI.1. Fibres diététiques

La relation qui existe entre fibre et santé (contrôle du cholestérol et prévention de quelques maladies telles que le diabète et l'obésité) (Sloan, 1994 ; Hollingsworth, 1996 ; Grijspaardt-vink, 1996) est bien connue par les consommateurs. Les fibres diététiques sont constituées de différents composés résistants aux enzymes digestives, parmi eux la cellulose, l'hémicellulose, la lignine etc. (Spiller, 1992 ; Periago et al. 1993).

Selon leur solubilité dans l'eau, les fibres se classifient comme solubles ou non solubles : la première est composée par les mucilages, des gommés, des pectines, des hémicelluloses (Atalah et Pak, 1997) et les fibres non solubles sont principalement constituées de cellulose, de lignine et d'une grande proportion d'hémicellulose. Ces types de fibres ont des effets physiologiques différents. C'est ainsi que les fibres solubles sont associées à la réduction des niveaux de glucose et de cholestérol et à la stabilisation du transit intestinal. En revanche, les fibres non solubles sont associées à leur capacité de retenir l'eau, à l'échange ionique, à l'absorption des acides biliaires, des minéraux, des vitamines et autres et à son interaction avec la flore microbienne (Periago et al. 1993). Une source intéressante de fibres est constituée par les raquettes du « nopal » dont la teneur en fibres crues, augmente avec l'âge (López, 1977, cité par Pimienta). La farine du « Nopal », obtenue par déshydratation des cladodes jeunes possède 42,99 % de fibres diététiques totales, dont 28,45 % correspondent aux fibres non solubles et 14,54 % aux fibres solubles (Sáenz et al. 1997). Parmi les minéraux on observe une teneur en calcium assez élevée (3,43 g /100 g), considérant que l'apport journalier recommandé pour un adulte est de 800 mg ; cependant pour ce produit, il faudrait faire des études de biodisponibilité.

L'étude publiée par (Mcconn et Nakata, 2004) montre que quoique les cladodes du « nopal » soient riches en plusieurs minéraux, le calcium n'est pas disponible pour l'organisme car il se trouve sous la forme des cristaux d'oxalate de calcium. En ce qui concerne les aliments qui contiennent du «nopal» déshydraté, provenant de farines comme celle qui a été décrite, il existe à présent quelques produits au Mexique, dans le commerce ; l'un est connu comme : « Cactu Fibra », qu'on prépare avec de la farine du « nopal » comme source de fibres, du son de blé, du sel (chlorure de sodium) et « Nutra Sweet », sans conservateurs, ni colorants artificiels. Ce produit possède 46,5 % de fibres diététiques, une haute teneur en calcium et β -carotène.

La farine du nopal utilisée est préparée avec des raquettes jeunes (« nopalitos ») de 3 à 6 mois, plus riches en fibres solubles que les raquettes plus âgées. Les « tortillas » sont un type de pain typique au Mexique fait avec de la farine de maïs et mélangé avec de la farine de nopal pour augmenter la teneur en fibres. Cette farine de « nopal » a été utilisée pour le développement de divers aliments, tels que : des desserts comme les flans, des biscuits d'avoine, des crèmes de légumes (Sáenz et al. 1999, Sáenz, 2002) de façon à contribuer au développement de nouveaux aliments qui apportent des fibres au régime. En termes généraux, des pourcentages d'incorporation aux produits déjà mentionnés, supérieurs à 17-18 %, causent des problèmes technologiques de viscosité ou de saveurs herbacées. Cependant, des incorporations proches de 15 % comme celles qui ont été étudiées pour les produits

mentionnés ci-dessus, sont acceptées et on peut considérer cette proportion comme un bon apport supplémentaire en fibres et un bienfait pour la santé.

VI.2. Mucilages

Le mucilage du « nopal » est un polysaccharide complexe qui contient de l'arabinose, du galactose, du xylose, de l'acide galacturonique et du rhamnose. Il est considéré comme hydrocolloïde, pour sa grande capacité de capter et de retenir l'eau ; il fait partie également des fibres diététiques. Ces composés peuvent être utilisés, une fois extraits, comme épaississants pour des produits alimentaires. Des études récentes (Matsuhira et al. 2001) indiquent que les hydrocolloïdes provenant d'un extrait de fruits du « Nopal » possèdent 98 % de sucres, dont 47 % correspondent aux acides uroniques. Les mêmes auteurs n'ont pas trouvé la présence de protéines. Habibi et al. (2004) ont étudié les polysaccharides de l'écorce des fruits et ont trouvé qu'elle est composée de galactose et d'arabinose dans une proportion 6,3 / 3,3 avec des traces de rhamnose, de xylose et de glucose, mais pas d'acide galacturonique. Ils les classifient comme arabinogalactane. Les mêmes chercheurs, dans un autre travail (Habibi et al, 2004), ont étudié les pectines-polysaccharides de l'écorce des fruits.

Ces derniers ont réalisé une extraction avec de l'eau (60 °C) et de l'EDTA et ont obtenu une teneur en sucres neutres de 0,48 et 0,36 mol/mol d'acide galacturonique respectivement. Ces pectines - polysaccharides désestérifiées et fractionnées par chromatographie d'échange anionique ont donné cinq fractions qui, une fois purifiées, montrent que les parties solubles ont un squelette composé d'unités de dioside formé de rhamnose et d'acide galacturonique. Par ailleurs, en comparant l'effet du PH et des ions calcium et sodium sur la viscosité des polysaccharides entiers (sans fractionnement) des raquettes et des fruits d'*Opuntia ficus indica* on observe une augmentation de la viscosité avec le PH, atteignant pour le polysaccharide de la raquette un maximum, quoi que les valeurs maximales de viscosité aient lieu à différents pH, selon l'origine de l'hydrocolloïde (Arnhold, Campos, Landsmann, Zárate ; 2002). Les mucilages du « nopal », par leur pouvoir épaississant, peuvent remplacer quelques hydrocolloïdes largement utilisés actuellement, cependant une limitation est due au faible rendement atteint jusqu'à présent dans les procédés d'extraction. Des résultats intéressants vis-à-vis de leur application, se rapportent à la stabilité des mousses alimentaires (Espinosa, 2002) et à la substitution d'épaississants tels que la carboxyméthylcellulose, dans des nectars de fruits (Sepúlveda et al. 2003)

VI.3. Antioxydants

Des études récentes montrent que les figues de Barbarie de différentes couleurs ont, par la présence de vitamine C, de bêta-carotène, de flavonoïdes et aussi de bêta-laines, une activité antioxydante très intéressante (Galati et al. 2003 ; Kuti, 2004) ; le pouvoir antioxydant de la vitamine

C, des β -carotènes et des flavonoïdes est bien connu, mais celui des bétalaïnes commence à peine à être étudié (Butera et al, 2002). Dans les figues de Barbarie jaunes de Sicile (Italie) présente la plus haute concentration en bétalaïnes, dont l'indicaxanthine représente 89 %.

La bétanine est plus concentrée dans le figuier de barbarie rouge (66 % de bétalaïnes), et le cultivar blanc est le plus pauvre (Butera et al, 2002). L'extrait des fruits présente une activité antioxydante entre 4,20-5,31 $\mu\text{mol Trolox /g}$, pour les opuntias blancs et jaunes respectivement ; la bétanine pure présente une teneur de 20,0 équivalent Trolox et la b β ta xanthine de 1,76 équivalent Trolox. L'activité antioxydante totale de la figue de Barbarie est deux fois supérieure à celle de la poire, de la pomme, de la tomate, de la banane et du raisin blanc et semblable à celle du raisin rouge, de l'orange et du pamplemousse (Butera et al, 2002). Jaramillo-Flores et al. (2003) ont étudié la variation de l'activité antioxydante des jeunes raquettes (« Nopalitos ») avec des traitements thermiques, qui s'appliquent normalement avant la consommation de ce végétal. Les raquettes ont quelques caroténoïdes et des composés phénoliques ; dont les principaux sont l' α -cryptoxanthine, le β -carotène et la lutéine ; parmi ces trois, c'est le β -carotène qui se trouve en plus grande concentration. La présence de composés phénoliques est aussi observée. La concentration des deux types de composés augmente avec les traitements thermiques, et après 30 minutes à 93 °C atteint à la teneur maximale. Les caroténoïdes passent de 229 $\mu\text{g g}^{-1}$ m.s. dans les raquettes fraîches à 379 $\mu\text{g g}^{-1}$ m.s. après le traitement indiqué et leur activité antioxydante (exempte des composés phénoliques) de 109 à 134 $\mu\text{g /g}$ m.s. dans les mêmes conditions. La teneur en composés phénoliques baisse significativement après le traitement thermique parce qu'ils sont plutôt de type soluble et se dégradent à haute température.

Lee et al. (2003) ont étudié l'activité antioxydante d'un extrait éthanolique de raquettes d'*Opuntia ficus indica* et ont essayé d'identifier les composés actifs et les mécanismes d'action. Ils ont conclu que l'activité antioxydante de cet extrait n'est pas seulement due à un composé mais à plusieurs flavonoïdes (quercétine, myricétine) et à des vitamines. Les chercheurs proposent de poursuivre les études sur le rôle de ces produits dans la prévention du stress oxydatif sur les composés spécifiques responsables de l'activité antioxydante.

VII. Contenus en produits phytochimiques

VII.1. Pigments

Un des composants importants des fruits de cactus et d'autres produits sont les pigments, qui leur confèrent un attrait particulier sur les fruits et produits multivariés, entre autres fonctions (Sáenz, 2002 ; Piga, 2004). Les pigments de cactus les plus prédominants dans les fruits colorés se trouvent

les bétalaïnes ; ceux-ci sont azotés, chromo- alcaloïdes, les anthocyanes ayant une fonction dans la protection anti UV. Les bétalaïnes sont synthétisées à partir de l'acide aminé (tyrosine) scindés en deux groupes structuraux : les bêtacyanines rouge-violet et les bétaxanthines jaune-orange (Azeredo, 2009).

Le fruit de certains types de cactus contiennent deux pigments de bétalaïne, la bétanine de couleur rouge pourpre et l'indicaxanthine jaune, toutes deux avec des propriétés antiradicalaires et réductrices (Butera et al. 2002, Castellnos et Yahia, 2008) étaient parmi les auteurs qui ont suggéré que les bétalaïnes contribuent à l'activité antioxydante du figuier de Barbarie. Les auteurs ont mené une étude sur la bétanine et l'indicaxanthine de différents cultivars siciliens (fruits jaunes, rouges et blancs) de figuier de Barbarie (*O. ficus-indica*). Par la suite, divers études ont démontré que les bétalaïnes protègent contre les troubles liés au stress oxydatif (Tesoriere et al. 2004). Ces molécules sont sous formes conjuguées d'acide bétalamique et d'un acide aminé (acide γ -aminobutyrique, phénylalanine, isoleucine, sérine, et valine). De l'acide bétalamique libre a également été détecté. Les bétalaïnes de baies de cactus comestibles ont été largement caractérisées dans différents cultivars, mais il n'y a aucune information sur leur présence dans l'épicarpe du fruit qui présente également des couleurs intenses. Alors que les bétalaïnes dont la couleur orange, le rouge et le violet avec nuances de pelures et pulpes, pigments de peau verte, les cultivars se composent de chlorophylles et, vraisemblablement, d'énoïdes de carotte. Les composés lipophiles ont été décrit (Ramadan et Mörsel, 2003).

Le β -carotène a été trouvé en grande quantité dans *O. ficus-indica*, lipides (2,54 g/kg), et ce niveau élevé pourrait être responsable des teintes orangées des lipides d'écorce de figue de Barbarie. L'importance des pigments, cependant, dépendent du stade de maturité du fruit, du processus d'extraction et les conditions de stockage. Odoux et Domínguez-López (1996), ont été les premiers chercheurs à étudier les teneurs en bétalaïnes dans différentes parties du figuier de Barbarie (fruits rouges, violets et jaunes); ils ont étudié des fruits du Jardin botanique de Blaños (Espagne). Sepúlveda et al. (2003) ont étudié la proportion relative de bétanine dans la peau et la pulpe de 14 écotypes différents de fruits d'*Opuntia* cultivés en différents endroits du Chili ; les résultats ont montré qu'il y a est une grande variabilité entre les fruits dans leur teneur en bétanine, allant de la peau de 19,9 à 69,2 mg/100 g et de la pulpe de 17,5 à 60,1 mg/100 g. Castellanos et Yahia (2008) ont également signalé la présence des bétalaïnes dans les cultivars mexicains. Coria-Cayupán et al. (2011) ont étudié la teneur en bétalaïnes des fruits colorés d'*Opuntia* cultivé en Argentine, à savoir *O. megacantha* (jaune et orange), *O. ficus-indica* (violet foncé, violet et vert) et *Opuntia spp.* (violet et rosâtre) ; ils

ont rapporté que *O. ficus-indica* violet foncé a montré la teneur la plus élevée en bétalaïnes (484 µg/g).

Il est à noter que la valeur la plus élevée dans les fruits d'*O. robusta* (8,1 mg/g) est similaire à celle trouvée dans certaines betteraves rouges (8,6 mg/g). Les cultivars de couleur orange tels que *O. megacantha*, *O. albicarpa* ont montré des niveaux plus élevés de bétaxanthines que de bétacyanines, et ce dernier ne contient presque pas de bétalaïnes. Ces résultats sont importants et offrent une perspective de la possibilité d'utiliser le figuier de Barbarie comme source de colorants. Dans ce contexte, Cejudo-Bastanté et al. (2014) ont étudié différentes variétés de couleurs différentes d'Algérie (rouge, jaune, et rouge jaune) pour voir quelles sont les variétés les plus prometteuses pour une utilisation comme colorants naturels. Les auteurs ont conclu que la pulpe des variétés rouge et rouge-jaune peuvent être plus appropriées pour obtenir une intensité élevée en colorants. Avec ces recherches et d'autres, il sera plus facile de choisir les meilleurs fruits pour les processus industriels et encourager leur exploitation.

VII.2. Acide ascorbique

Selon plusieurs auteurs, la teneur en vitamine C des fruits de Barbarie présentent une large gamme de 4,6 à 53 mg/100 g (Askar et El-Samahy, 1981 ; Pimienta, 1993 ; Muñoz et al. 1995) ; par conséquent, ce composé apporte une contribution très variable à l'antioxydation, auxquels s'ajoutent le β-carotène. Les flavonoïdes et les bétalaïnes y contribuent également (Galati et al, 2003 ; Kuti, 2004). Butera et al. (2002) ont rapporté que l'activité antioxydante du fruit de la figue de Barbarie est semblable à celui du raisin rouge et pamplemousse et deux fois plus élevée que d'autres fruits communs tels que les poires, les pommes, les tomates, les bananes et les raisins blancs. Selon Guzmán-Maldonado et al. (2010) *O. xocnostle* est une bonne source d'acide ascorbique, plus que celui d'autres fruits communs et semblables. Les fruits d'*Opuntia* sont les plus couramment consommés du figuier de Barbarie (*O. ficus-indica*). Les plages de valeurs du contenu étaient 81,0 à 95,9, 200,3 à 229,2 et 7,6 à 10,2 mg d'acide ascorbique équivalent (AAE) pour 100 g pour la peau, la peau et la pulpe, respectivement. Lorsque la partie comestible est exprimée en poids frais, l'acide ascorbique de la peau est similaire à celui rapporté par d'autres auteurs dans le jus ou la pulpe de cactus Sáenz et (Sepúlveda et al 2003 ; Figueroa-cares et al. 2010). Pour 15 génotypes de *xocnostle*, López-Martínez et al. (2015) ont signalé une teneur en acide ascorbique dans les parties consommables comme aliments de 6,80 à 13,46 mg AAE/100 g. En outre, Rodríguez-Félix et Cantwell (1988) ont trouvé 11 mg/g de vitamine C dans des cladodes fraîches et tendres.

VII.3. Tocophérols

La vitamine E liposoluble se trouve dans la fraction lipidique des graines et pulpe du fruit du cactus (Ramadan et Mörsel, 2003). Mondragon et Yahia (2011) ont signalé de très faibles quantités de tocophérols dans les fruits de 10 cultivars et lignées cultivés au Mexique. La teneur en α -tocophérol était plus élevée que la teneur en δ -tocophérol dans tous les cultivars et lignées étudiés, proche de 2:1. L' α -tocophérol le plus élevé trouvé était d'environ 74 g/ 100 g dans plusieurs cultivars dont 'Cardona' et 'Naranjona' et la teneur la plus faible était de 11 μ g/100 g dans le cultivar 'Reyna'. La teneur en δ -tocophérol dans tous les cultivars et lignées étudiés étaient de 5 à 20 g/100 g. Barros, Buelga, Celestino, Ferreira, Morales, Moreno; 2014 ont exploré des composés bioactifs dans *O. joconostle* F.A.C.Weber ex Diguët, ont signalé une quantité plus importante de tocophérols dans l'épicarpe que dans l'endocarpe : 27,8 et 2,61 mg/100 g poids sec, respectivement. Les auteurs ont identifié les quatre isomères des tocophérols dans l'endocarpe et seulement trois dans l'épicarpe. Ainsi, l'épicarpe peut être considéré comme une bonne source de tocophérols.

VIII. Avantages potentiels du figuier de barbaries liées à la santé

Les propriétés bénéfiques pour la santé liées à l'utilisation des fruits et d'autres parties du cactus ont fait l'objet d'un grand intérêt, avec une attention particulière pour les composés phytochimiques antioxydants. La nutrition et les bienfaits pour la santé sont associés aux propriétés antioxydantes des composés tels que : les phénols, l'acide ascorbique, et pigments. *Opuntia ficus-indica* est utilisé comme produit médicinal populaire dans Mexique pour le traitement des brûlures, plaies, œdèmes, et l'indigestion (Kaur et al. 2012). Plusieurs études ont signalé que différentes parties de l'espèce *Opuntia* ont divers effets thérapeutiques, tels que : effet diurétique (Galati et al. 2002), anti-inflammatoire (Park et al. 2001), analgésique et antiulcéreux (Galati et al. 2001).

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet thérapeutique du du figuier de barbarie sur la santé humaine, ces études ont porté sur : activité anticancéreuse, effets antidiabétiques, effets Antihyperlipidémique et hypercholestérolémique, propriétés antivirales, propriétés antioxydantes, effets neuroprotecteurs, effets diurétiques, effets protecteurs gastriques...etc.

IX. Focus général sur les polyphénols

IX.1. Définition

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

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

IX.2. Classification des polyphénols

Les polyphénols se répartissent en de nombreuses classes chimiques, les premiers critères de distinction entre ces classes concernent le nombre d'atomes de carbone constitutifs et la structure de base du squelette carboné : Tableau 4 (Harbone, 1980, Macheix et al, 2005).

Tableau 5 : Les principales classes des composés phénoliques (Harbone, 1980; Macheix et al, 2005).

| Squelette carboné | Classe | Exemple | Origine |
|----------------------|--|---|--|
| C6 | Phénols simples | Catéchol | |
| C6-C1 | Acide hydroxy benzoïque | p-hydroxy benzoïque | Epices, fraises |
| C6-C3 | Acide hydroxy cinnamique Coumarines | Acide caféique | Citrus |
| C6-C4 | Naphtoquinones | Juglone | Noix |
| C6-C2-C6 | Stilbène | Resvératrol | Vigne |
| C6-C3-C6 | Flavonoides | Kaempférol, quercétine Cyanidine, pélargonidine Catéchine, épicatechine | Fruits, légumes, fleurs, pomme, raisin, citrus |
| (C6-C3) ₂ | Lingnanes | Pinorésinol | Pin |
| (C6-C3) _n | Lignines | | Bois, noyau des fruits |
| (C15) _n | Tannins | | Raisin rouge, kaki |

IX.3. Les Polyphénols dans les différentes parties du figuier de barbarie

La présence de plusieurs composés phénoliques a été détectée dans le fruit et d'autres parties de différentes variétés de cactus. Des composés phénoliques ont été détectés dans la pulpe et la peau du fruit du cactus (Tesorière et al. 2004).

Diverses études ont rapporté que la pulpe de l'écotype d'*O. ficus-indica* montre la concentration la plus élevée de composés phénoliques totaux, près de 660 mg/L dans le jus (Stinezing et Carle. 2005) et 900 mg/L dans la pulpe (Sáenz et al. 2009). Fernández et al. (2010) ont étudié les figues de Barbarie à peau rouge espagnole, rapportant que *O. ficus-indica*, *O. stricta* et *O. undulata* ont des teneurs en composés phénoliques totaux de 218,8, 204,4, et 164,6 mg/100 g respectivement. Cependant, Cejudo-Bastanté et al. (2014) ont signalé une teneur en phénols plus élevée dans le fruit entier d'une variété jaune-rouge d'Algérie (13,3 mg/L) par rapport à une variété rouge (6,6 mg/L) de la même localité. Le fruit de cactus (*O. ficus-indica*) est une source unique de glycosides, d'isorhamnétine, en particulier l'isorhamnétine-3-O rutinoside et les triglycosides d'isorhamnétine (Galati et al. 2003).

Un effet antioxydant a été attribué à des flavonoïdes (quercétine, kaempférol et isorhamnétine) dans tissus de fruits de quatre espèces différentes de figuier de Barbarie (*O. ficus indica*, *O. lindheimeri*, *O. streptacantha* et *O. stricta* var. *stricta*), suggérant que la quercétine est le principal flavonol dans toutes les espèces analysées (Kuti, 2004). Ayadi et al. (2013) ont étudié les flavonoïdes dans la peau et la pulpe de trois *Opuntia* formes de Tunisie (*O. ficus-indica* épineux et sans épines et *O. stricta*), constatant que les dérivés de l'isorhamnétine sont le glycoside de flavonol dominant identifié dans les écorces d'*O. ficus-indica* (épineuses : 65,25 µg/g ; sans épines : 77,03 µg/g) et *O. stricta* (19,22 µg/g). Ces composés se sont avérés être des antioxydants plus efficaces que les vitamines, car les composés phénoliques sont capables de retarder les effets de la pro-oxydation sur les biomolécules par inactivation des radicaux libres (Shahidi et al. 1992).

Des études sur les graines de fruits de cactus, particulièrement *O. ficus-indica* d'Algérie présentent une grande complexité dans le profil des composés phénoliques, avec des teneurs en composés phénoliques de 48 à 89 mg EAG/100 g ; certains ont été identifiés comme des dérivés des féruloyles (Chougui et al. 2013).

IX.4. Flavonoïdes

IX.4.1. Définition :

Le terme « flavonoïdes » proviendrait du terme flavedo, désignant la couche externe des écorces d'orange, cependant d'autres auteurs supposaient que ce terme a été plutôt prêté du flavus qui désigne jaune (Garon et Guéguen, 2014). Ce groupe comprend comme son nom l'indique des composés jaunes mais aussi d'autres composés colorés ou incolores. Les flavonoïdes constituent le plus grand groupe de composés phénoliques, avec plus de 6000 composés naturels qui sont quasiment universels chez les plantes vasculaires (Knežević. et al, 2012) et sont largement distribués dans les

feuilles, les graines, les écorces et les fleurs des plantes.

Plusieurs milliers des molécules ont été identifiées à ce jour. Ils jouent un rôle déterminant dans la protection de la plante des UV, de microorganismes pathogènes et des herbivores (Hein et al, 2002).

IX.4.2. Structure et classification des flavonoïdes

Les flavonoïdes possèdent un squelette de base (Figure 6) en C6-C3-C6, formé de deux cycles aromatiques (A et B) reliés par un pont de trois carbones, le plus souvent sous forme d'un hétérocycle C (Ignat et al, 2011).

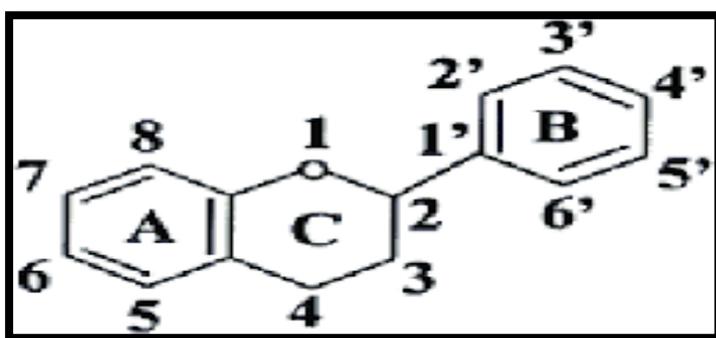


Figure 6: Squelette carboné de base des flavonoïdes (He et al, 2008)

En fonction du degré d'hydroxylation des différents cycles et le niveau de méthylation ainsi que le niveau de glycosylation, on peut distinguer différentes classes de flavonoïdes :

IX.4.2.1. Isoflavones et flavones

Structuralement, ils sont composés de deux anneaux aromatiques A et B liés à l'anneau hétérocyclique oxygéné (Luthria et al, 2007 ; Valls et al, 2009) ayant une double liaison entre C2 et C3 de l'anneau hétérocyclique (Fliegman et al, 2010).

La différence entre ces deux classes de flavonoïdes réside dans la position de l'anneau B :

- C1 de l'anneau B est lié à C2 de l'anneau C dans les flavones.
- C2 de l'anneau B est lié à C3 de l'anneau C dans les isoflavones.

De nombreuses études témoignent des propriétés importantes de ces composés, qui résident dans leurs aptitudes antivirales (Andres et al, 2009).

IX.4.2.2. Flavonols

Les flavonols portent un OH en position C3, ce sont les flavonoïdes les plus répandus, responsables de la couleur jaune claire (Khater, 2011). Ils sont caractérisés par la présence d'une fonction carbonyle sur l'hétérocycle. Ils peuvent être liés à un sucre, le plus souvent le glucose. Ce sont les constituants flavoniques les plus abondants des aliments, notamment, la quercétine, le kaempférol, la myricétine, l'apigénine sont des flavonols. Ils jouent un rôle de protection contre les UV (Lambert, 2011), ils possèdent un très fort pouvoir antioxydant en raison de leur structure chimique favorable au piégeage des radicaux libres (Liu et al, 2012).

IX.4.2.3. Anthocyanes

Les anthocyanes font partie de la famille des flavonoïdes, sont responsable de la pigmentation qui varie du bleu au rouge en fonction de leur environnement (Nanacy et Agnés, 2014). Elles sont présentes dans les feuilles et les fruits, où elles ont un rôle protecteur contre les UV et le stress oxydant. Les anthocyanes sont solubles et s'accumulent dans les vacuoles des cellules de l'épiderme des feuilles (Lambert, 2011). Elles ont été largement étudiées pour des propriétés antioxydantes mises en évidence lors de l'étude des activités biologiques (Castaneda- Ovando et al, 2008). Leurs structures se différencient par le nombre et la position des groupes hydroxyles et méthyles sur le noyau B. Les anthocyanidines sont le plus souvent glycosylées en position C3 et C5 avec le plus fréquemment des monosaccharides (glucose, galactose, rhamnose et arabinose) (Khater, 2011).

IX.4.2.4. Flavanones

Ce sont des molécules caractérisées par l'absence de double liaison en 2,3 et par la présence d'un centre d'asymétrie (Bruneton, 2015). Elles existent sous forme libre ou glycosylées. Incolores, elles absorbent fortement dans l'ultraviolet (Guinard, 1979). Les flavanones se retrouvent surtout dans les agrumes et les tomates. La menthe constitue également une source abondante (Benbrouk, 2005 ; Ignat et al, 2011).

IX.4.2.5. Flavanols

Les flavanols appelés également flavane-3-ols (Richter, 1993), ces composés se distinguent des flavanones par l'absence à la position 4 d'un atome d'oxygène relié au carbone par une double liaison la plus rencontrée est la catéchine (Furhman et al, 1995). Ils jouent un rôle primordial dans les mécanismes de défense des plantes, influent sur les propriétés organoleptiques et sont potentiellement bénéfiques pour la santé humaine (Aron et kenny, 2008 ; Kuhnle, 2018). Il est à noter que les composés phytochimiques présents dans les différentes structures du figuier de Barbarie peuvent inclure :

quercétine, kaempférol, bétaxanthine, indicaxanthine, lutéoline, isorhamnetin et acide ascorbique parmi d'autres composants (Stintzing et carle, 2005 ; Feugang et al,2006). Dernièrement Bouaouine et al, (2018) ont même impliqué certains polyphénols (lignine et tanins) dans le mécanisme d'adsorption pour le traitement des eaux usées.

X. Biosynthèse des polyphénols :

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

- Celle de l'acide shikimique qui est à l'origine de la formation des oses aux acides aminés aromatiques (phénylalanine et tyrosine) puis par désamination de ces derniers, aux acides cinnamiques (Richter, 1993 ; Croteau et al, 2002) et à leurs très nombreux dérivés : acide benzoïques, acétophénonnes, lignanes et lignines, coumarines (Bruneton, 1999).
- Celle de l'acétate qui conduit à des poly acétates de longueur variable menant par cyclisation à des composés polycycliques tels que les dihydroxy-1,8 anthraquinones ou les naphtoquinones (Richter, 1993 ; Martin et Andriantsitohaina, 2002). Ils peuvent être issus du shikimate et de l'acétate qui donnent naissance à toute une série de composés d'origine mixte tels que les flavonoides, stilbènes, xanthonnes...etc (Bruneton,2009).

XI. Rôle et intérêts des composés phénoliques

Le rôle des composés phénoliques est maintenant reconnu essentiellement dans les différents aspects de la vie et cycles végétatifs des plantes, mais aussi dans l'utilisation que fait l'homme de ces divers végétaux. Ils peuvent intervenir dans les critères de qualité, qui aident l'homme à choisir les organes végétaux (fruits, légumes...) destinés à la consommation, ils sont impliqués dans les relations des plantes avec leurs environnements (Macheix et al, 2005), en particulier contre les radiations UV, les attaques microbiennes (Moheb et al, 2011). De plus, ils peuvent s'engager dans plusieurs processus physiologiques comme la croissance cellulaire, la germination des graines et la maturation des fruits (Merghem, 2009). Ces composés prennent une importance croissante, particulièrement à cause de leurs effets bénéfiques sur la santé humaine (Stanley et al, 2003). En effet, leurs rôles d'antioxydants naturels suscitent de plus en plus d'intérêt pour la protection de l'homme contre certaines maladies telles que le cancer. Ils ont été décrits également comme étant des neuroprotecteurs, antiviraux, chimio préventifs (Hanhineva, 2010). Ils sont utilisés en industrie agro-alimentaire, pharmaceutiques, cosmétiques comme additifs (Hennebelle et al, 2004).

Chapitre II
Matériels et Méthodes

I. Caractéristiques des écotypes

I.1. Choix des écotypes

Les différents écotypes du genre *Opuntia spp* sont sélectionnés sur la base de la qualité de leurs fruits et grâce à l'aide des agriculteurs, 36 accessions d'opuntia ont été prospectées et 07 accessions ont été retenues dans la cadre de ce travail dans deux régions à savoir : la région de Bejaia (Taourirt, Oued-Amizour, Oued-Ghir, Bir Essalam), située dans l'étage bioclimatique subhumide avec une pluviométrie avoisinant 718 mm de pluie par an et la région de Souk ahras (Sidi-fredj et Merahna1 et Merahna2) qui fait partie du semi-aride avec une pluviométrie de l'ordre de 265 mm de pluie par an (tableau 5), l'échantillonnage a été réalisé en avril et Aout 2017, chaque espèce est représentée par cinq écotypes , avec trois répétitions pour chaque site.

Tableau 6 : Caractéristiques géographiques et climatiques des accessions du genre *Opuntia spp*.

| Région | T (°C) | Altitude (m) | pluie (mm) | Latitude | Longitude | Nom vernaculaire | Nom botanique |
|---------------------------|-----------|-----------------|---------------|---------------|--------------|---------------------|------------------|
| Bejaia | | | | | | | |
| <i>Bir-Essalam</i> | 15.8 | 28 | 892* | 36°43'20.95"N | 4°03'23.81"E | Imeslem | (<i>O.F.I</i>) |
| <i>Oued-ghir</i> | 14.15 | 99 | 892* | 36°43'08,7"N | 4°58'51,2"E | Arrumi | (<i>O.M</i>) |
| <i>Amizour (El hamma)</i> | 18 | 204 | 892* | 36°38'54.3"N | 4°55'57.0"E | Arrumi | (<i>O.A</i>) |
| <i>Taourirt</i> | 19.21 | 300 | 540* | 36°39'28.97"N | 4°72'71.23"E | Imeslem | (<i>O.F.I</i>) |
| Souk-Ahras | | | | | | | |
| <i>Merahna1</i> | 15.1 | 805 | 254** | 36°11'49.1"N | 8°10'11.6"E | Chouak 1 | (<i>O.A</i>) |
| <i>Merahna2</i> | 15.1 | 843 | 238** | 36°12'53,1"N | 8°13'12,5"E | Chouak 2 | (<i>O.M</i>) |
| <i>Sidi-Fredj</i> | 15 | 747 | 221** | 36°10'23,2"N | 8°12'17,8"E | Imeslem | (<i>O.F.I</i>) |

* Source :B.N.E.D.E.R, 2005 ** source : Plan de développement local de la commune de Sidi-Fredj, souk Ahras (Projet : Algérie-Belgique, N° :05/2010 ALG/153).

I.2. Collecte du matériel végétal et méthodologie adoptée

Un inventaire des écotypes locaux s'impose vu le manque d'informations sur leur diversité génétique et morphologique. Une étude des traits de distinction morphologique est réalisée sur 07 accessions du genre d'*Opuntia spp* en utilisant le descripteur (UPOV, 2006). Au total, 27 données ont été recueillies et observées : dix données quantitatives continues (**port (cm)** : hauteur et largeur, **cladodes** : longueur, largeur et épaisseur ; **rapport ou Ratio** Longueur/largeur du cladode ; **épine** : longueur de l'épine la plus longue ; **Fruit** : poids (g), la longueur (cm) et le diamètre géométrique (cm)). Et 17 variables qualitatives discontinues: **Plant** (port), **Cladode** (forme, épaisseur, couleur, pilosité de surface, ondulation de bord, nombre d'aréoles dans la rangée centrale, couleur des aréoles, nombre d'épines par aréole), **Epines** (couleur principale, nombre de couleur, surface, port), **Aiguillon central** (Flexibilité, Couleur « sauf la base », Torsion, Forme en vue dorsale, Forme en vue transversale).

Bejaia est située dans la région centre nord de l'Algérie, précisément dans le bassin versant de l'Oued Soummam. Le climat est de type méditerranéen, qui est généralement humide avec un léger changement de température, tandis que Souk-Ahras, qui est située dans la région intérieure orientale du pays, se caractérise par un climat chaud et tempéré. A Sidi-Fredj (Souk-Ahras), la température moyenne annuelle est proche de 15 °C, avec une amplitude prononcée pouvant aller jusqu'à -7 °C entre décembre et mars (hiver très froid) et > 35 °C en été (mois chauds et secs). Le climat de la région de Bejaia est chaud et tempéré. En été, les précipitations sont moins qu'en hiver, et la température moyenne est supérieure à 25 °C en août, et plus de 10,1 °C en Janvier. Les sites de collecte ont été présentés dans des accessions (Figure7).

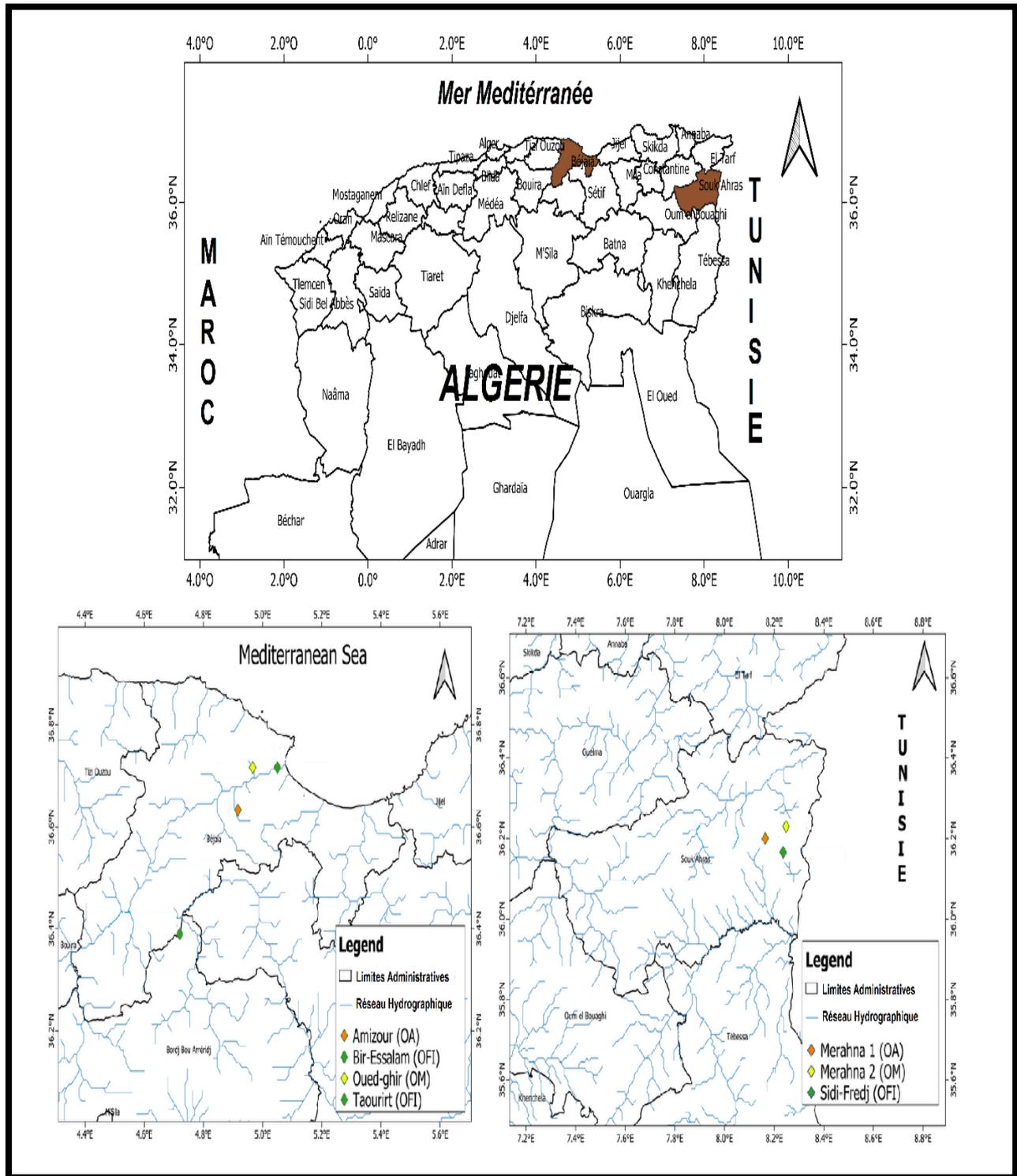


Figure 7: Situation géographique des zones de collecte d'espèces de figuier de Barbarie en Algérie : Souk-Ahras (côté est) : *Opuntia ficus-indica* (O.F.I) a été collecté à Sidi-fredj, *Opuntia amyoclea* (O.A) et *Opuntia megacantha* (O.M) ont été récoltées à Merahna 1 et Merhana 2, respectivement. Bejaia (côté ouest) : l'O.M a été collecté à Oued-Ghir, L'O.A a été collectée à Amizour, et les espèces O.F.I ont été collectées à Bir-Essalam et Taourirt.

I.3. Aperçu général sur l'état des accessions d'*Opuntia spp*

Bien que cultivé en Algérie depuis des décennies, voire plusieurs siècles dans certaines régions, le cactus s'y peu développé. A l'exception des zones semi-arides et des montagnes dont l'altitude ne dépasse pas les 700m. Le cactus est largement représenté dans le paysage rural Algérien ; en plantations anarchiques (sous forme de clôture en lignes) dans presque tous les villages et en haies limitant les parcelles de cultures, les vergers ou les sentiers. Des plantations très anciennes réalisées sur des milliers d'hectares par les agriculteurs et continuent à ce jour de jouer un rôle majeur non seulement dans la sauvegarde des populations locales et leur cheptel mais aussi dans la lutte contre l'érosion des sols et la préservation de la biodiversité. La culture du cactus est généralement conduite de façon traditionnelle et ne bénéficie presque d'aucune attention ni soins de la part des agriculteurs, elle demeure ainsi tributaire des aléas climatiques et fournis par conséquent des rendements en fruits inférieurs aux potentialités réelles aussi bien en qualité qu'en quantité. Notons qu'à Souk ahras, la culture du figuier de barbarie a bénéficiée d'une attention particulière ces dernières années (implantation de nouveaux vergers de cactus), grâce à un important programme de plantation initié par le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) en 1994, environ 07 mille hectares ont été plantés par le figuier de barbarie, particulièrement dans la commune de Sidi-Fredj (zone semi-aride typique). Les superficies ne cessent de s'accroître en raison de la forte valeur ajoutée de la culture et les revenus conséquents qu'ils génèrent, ce qui a permis d'améliorer considérablement les moyens d'existence durables (MED) des populations locales.

I.4. Méthodes d'extraction des composés phénoliques :

Afin d'analyser et extraire les composants bioactifs des plantes médicinales au sein de la matrice cellulaire, La méthode d'extraction « idéale » doit être quantitative, non destructive et rapide (Dahmoune et al. 2013). En plus du procédé traditionnel d'extraction par solvant (Proestos et al, 2006) qui est habituellement utilisé pour récupérer les composés phénoliques, des méthodes non conventionnelles, plus rapides et automatisées sont maintenant utilisées, telles que : l'extraction par fluide supercritique (EFS), l'extraction par liquide pressurisé (ELP), Extraction assistée par micro-ondes (MAE) et Extraction assistée par ultrasons (EAU) (Aybaster et al. 2013). En fait, les travaux dans ces domaines ont montré que les ultrasons et les rayonnements micro-ondes peuvent accélérer le processus d'extraction en améliorant l'extraction de composés biologiquement actifs, en particulier les composés phénoliques.

I.4.1/Description des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail :

I.4.1.1. Extraction solide-liquide :

L'extraction solide-liquide est une opération de transfert de matière entre la phase contenant la matière « solide » à extraire et le solvant d'extraction « liquide ». Le but de cette opération est d'extraire et de séparer un ou plusieurs composants mélangés à des solides dans le solvant (Herzi, 2013). L'extraction est une étape nécessaire qui existe dans de nombreux procédés de fabrication dans divers domaines industriels liés aux industries pharmaceutique, cosmétique, de la parfumerie et alimentaire (Chemat, 2011). Le processus de réalisation du « macérât » est également une méthode traditionnelle d'extraction solide-liquide à température ambiante qui peut durer 30 minutes (Lehmann ; 2013). Elle consiste à mettre en contact le matériel végétal avec le solvant (ou sans agitation) (Handa, 2008). Habituellement, il s'agit de laisser d'abord la matière végétale (matière de broyage) dans le solvant pour en extraire les principes actifs (composés phénoliques, flavonoïdes,..... etc.)

Cette méthode permet d'en extraire en douceur les principes actifs, notamment lorsqu'ils ne résistent pas à la chaleur (thermolabiles), Chabrier, (2010), elle convient à la plupart des racines, rhizomes et écorces (Lehman, 2013), et est principalement utilisée pour les gommages ou les mucilages végétaux, un macérât en est donc obtenu (Perry, 2013). Elle est basée sur la solubilité des ingrédients actifs dans le solvant d'extraction et est affectée par une série de facteurs, tels que : la nature du matériel végétal ; la concentration en soluté de l'échantillon, la nature du solvant et le temps d'extraction. Cette méthode débute par le choix du bon solvant d'extraction.

Une fois ce processus déclenché, le solvant d'extraction diffuse dans la cellule végétale, provoquant la dissolution du composé bioactif, qui migrera de la matrice végétale vers le solvant environnant jusqu'à ce que le partage d'équilibre soit atteint (Handa, 2008). L'extraction de molécules à partir de matières végétales ou ligneuses par des techniques traditionnelles s'est avérée délicate en raison des inconvénients suivants : méthodes longues, consommation élevée de solvant, le risque de dégradation des matériaux traités, le taux d'extraction est réduit (Wang et al. 2006).

I.4.1.2. Extraction assistée par ultrasons (EAU)

I.4.1.2.1. Historique

Les ondes à ultrasons ont été introduites pour la première fois dans les années 1830, mais ; leur utilisation dans la transformation des aliments a commencé aux États-Unis dans les années 1920. Depuis les années 1950, les États-Unis utilisent des ondes sur les équipements industriels pour nettoyer, homogénéiser et couper les aliments par ultrasons. Dans les années 1990, le scellage des matériaux d'emballage et le soudage des plastiques sont également apparus. Le développement de

capteurs piézoélectriques a conduit à des recherches plus approfondies sur les ultrasons, et l'application des ultrasons a ensuite été utilisée dans l'atténuation, l'homogénéisation et l'extraction de matériaux (Mawson et Knoerzer, 2007).

L'EAU est une technologie émergente utilisée pour extraire des composés biologiquement actifs des substrats végétaux. Il a été développé pour améliorer l'efficacité et le rendement de l'extraction et raccourcir le temps d'extraction (Chemat et al, 2011). Cette technique est simple à mettre en place et permet plusieurs extractions en même temps (Achat, 2013). Peut être utilisé pour obtenir différents composés phytochimiques, tels que les composés phénoliques ; ces derniers sont privilégiés par divers secteurs des industries alimentaires et pharmaceutiques, grâce à leurs propriétés antibactériennes, anti-inflammatoires et anticancéreuses, principalement leur capacité antioxydante (Parisi et al, 2014). Les principales applications rapportées des ultrasons incluent : l'émulsification, la cristallisation, la cinétique de réaction, la fermentation et l'extraction de composés (Kadam, 2015), Parmi les principales applications rapportées pour les ultrasons figurent : l'émulsification, la cristallisation, la cinétique des réactions, les fermentations et l'extraction de composés (Kadam, 2015), c'est la dernière application qui fait l'objet de notre intérêt.

I.4.1.2.2. Définition des Ultrasons

Ce sont les mêmes ondes mécaniques que les ondes sonores, mais les humains ne peuvent pas les entendre. La fréquence des ultrasons varie de 40 kHz à 100 kHz. Leur propagation est rectiligne et très directionnelle, et elles peuvent être qualifiées de propagation quasi-optique car elles peuvent être concentrées dans une très petite zone pour obtenir une énergie et une puissance de haute densité. Ils ont besoin d'un milieu de propagation, notamment aux hautes fréquences, car leur efficacité de propagation dans l'air est faible. De plus, le carré de la distance va diminuer, ce qui signifie qu'elles seront plus efficaces lorsqu'elles seront très proches de la surface à éclairer (Kuttruff, 1991). L'irradiation US peut être appliquée de deux manières : contact direct avec l'échantillon (sonde à ultrasons) ou contact indirect avec l'échantillon, où l'échantillon est isolé par une paroi (bain à ultrasons) (Pico, 2013). Le principal inconvénient du bain à US est qu'il fonctionne généralement à une seule fréquence (20 ou 40 khz), en revanche les systèmes à US couplés à une sonde sont très efficaces et permettent de développer une puissance jusqu'à 100 fois supérieur à celle fournie par le bain à ultrasons (Pico, 2013).

I.4.1.2.3. Principe d'extraction par Ultrasons (US)

L'extraction par US consiste à immerger la matière végétale dans un solvant, le tout sera soumis à l'action des ultrasons (Chemat, et al 2011). Les ondes sonores peuvent se propager dans une

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

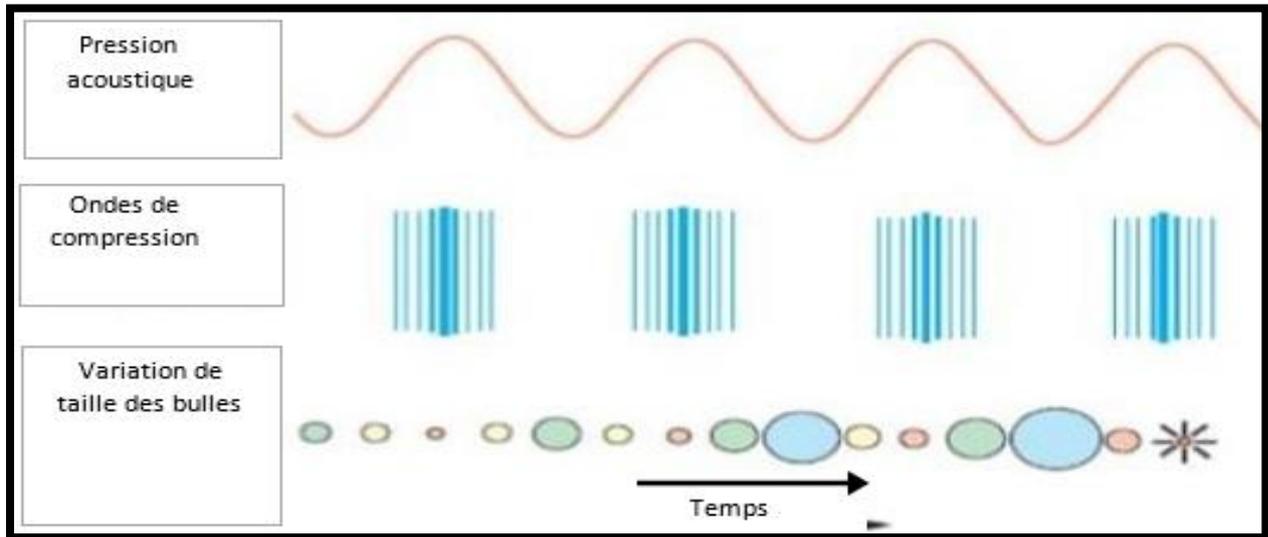


Figure 8: Représentation schématique du phénomène de cavitation (Draye et al, 2009)

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

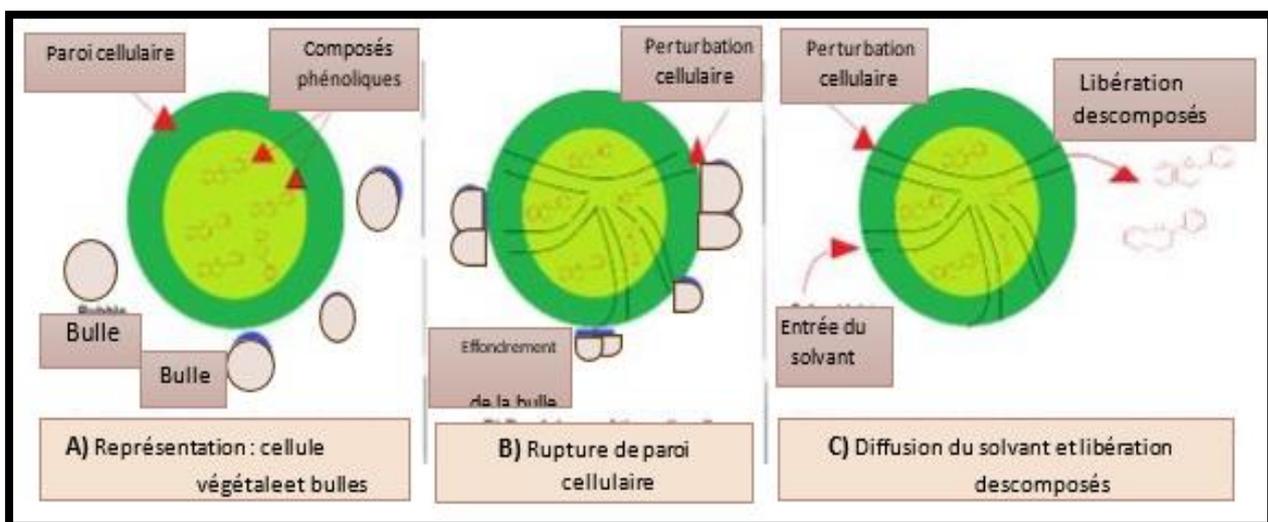


Figure 9: Représentation graphique de l'effondrement et de la libération du composant végétal par des bulles de cavitation : **A)** cellule végétale et bulles, **B)** Rupture de la paroi cellulaire et effondrement des bulles, **C)** Diffusion du solvant par rupture cellulaire et libération des composés (Shirah et al, 2012).

I.4.1.2.3.a. Les paramètres influençant la cavitation

Dans le cas de l'EAU, il est nécessaire de prendre en considération l'influence de certains paramètres, tel que les dimensions des réacteurs, le solvant, le ratio solide-liquide, la structure et la taille des particules (Romdhane et Gourdon, 2002). Parmi d'autres qu'on cite :

- **La fréquence des ondes ultrasonores** : La haute fréquence réduira l'effet de la cavitation, à une plus basse fréquence, des cavitations plus violentes seront produites ayant pour résultats une augmentation de la température et de la pression (Wu et al, 2013).
- **La puissance des US** : Il s'agit d'un paramètre qui a l'effet le plus marqué. Une puissance minimale est requise pour que la cavitation ait lieu (seuil de cavitation). L'effet des US augmente avec la puissance injectée. Cependant il existe une limite physique : lorsque la cavitation devient trop intense, un bouclier des bulles de cavitation se forme sur la surface émettrice, l'onde est fortement amortie par le coussin de bulles, ce qui diminue l'effet des US (Laugier, 2007).
- **La température** : Une augmentation de la température diminue la solubilité des gaz dans les liquides, et augmente la tension de la vapeur du solvant, donc le seuil de cavitation est abaissé (Izella, 2009). Cependant il est prouvé qu'une augmentation de la température diminue l'efficacité des US (Mason, 1988).
- **L'interaction solvant/échantillon** : Le choix de solvant est généralement basé sur l'obtention d'une grande affinité moléculaire entre le solvant et le soluté (Li et al, 2004).
- **Le temps** : est un paramètre important car il influence le processus d'extraction ; c'est pour cela qu'il est important de l'optimiser afin de réduire le coût énergétique du procédé (Gálvan, 2012).

I.4.1.2.3.b. Avantages de l'extraction assistée par ultrasons

Les techniques innovantes telles que l'extraction assistée par ultrasons ou micro-ondes, l'extraction par fluide supercritique et l'extraction par solvant accéléré sont des techniques rapides et efficaces pour extraire les principes actifs des plantes. Ces techniques peuvent fonctionner à haute température et/ou à haute pression améliorant nettement la cinétique d'extraction (Wang et al, 2006). Généralement les avantages sont :

- Récupération des composés d'intérêt à partir de différentes matrices végétales, par rapport aux méthodes classiques d'extraction.
- Extraction plus courte et plus efficace.
- Réduction de la température de fonctionnement, ce qui permet l'extraction des composés thermolabiles (Chemat et al, 2004), et réduction de la consommation de l'énergie.

- Possibilité d'utilisation de n'importe quel solvant, ce qui permet d'intervenir dans l'extraction d'une large variété de substances naturelles (Chemat et al, 2004).
- Un faible coût de l'appareillage (Chemat et al, 2004).

I.5. Partie expérimentale

Les cladodes ont été lavés à l'eau distillée, puis découpés en petits morceaux pour séchage rapide, par la suite la cuticule (la partie supérieure) a été retirée délicatement à l'aide d'un couteau de cuisine. Ces morceaux ont été découpés et séchés à l'air libre dans un endroit sec pendant une nuit ensuite à l'étuve à température de 40 °C pendant maximum 12 jours dans le but d'éliminer toute trace d'humidité tout en préservant le maximum de ses composés.

A l'aide d'un broyeur électrique domestique de type Philips, les cladodes ont été broyées jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. Cette dernière a été tamisée à l'aide d'un tamis de 250 µm de diamètre afin de récupérer une poudre fine qui sera utilisée par la suite pour la préparation des extraits bruts.

Les poudres ont été conservées dans des flacons en verre fermés hermétiquement et stockés à l'abri de la lumière pour éviter la photo-oxydation des substances bioactives.

Les poudres ont été séchées par exposition au soleil à l'air libre d'abord, puis par séchage à l'étuve aérée à 56 °C pendant 48h. Le tamisage a été réalisé avec un tamis de 200 µm de diamètre (maille), les poudres fines obtenues (figure 10) ont fait l'objet d'expérimentation.



Figure 10: Préparation des échantillons de cladode (Photographies prises in-vitro)

I.5.1. Protocole d'extraction des polyphénols

L'extraction de polyphénols a été faite à partir de la poudre préparée d'OFI Bir-Essalam par procédé conventionnelle et innovant (par Ultrasons) en variant certains facteurs afin d'améliorer les rendements d'extractions. Ensuite les conditions optimales obtenues ont été appliquées à l'extraction de polyphénols à partir des poudres de cladodes collectés des autres régions.

I.5.2. Extraction conventionnelle

Le procédé d'extraction conventionnelle solide-liquide sous agitation des composés phénoliques a été réalisé selon la méthode décrite par Guevera-Figueroa et al, (2010) en y apportant quelques modifications, et aussi celle de Dahmoune et al, (2013).

Afin d'optimiser l'extraction 0.5 g de la poudre d'OFI Bir-Essalam ont été ajoutés à 50 mL d'éthanol à concentration de 20, 50 et 100 %, dans un bécher de 80 mL. Les mélanges ont été agités soigneusement sur une plaque agitatrice (600-700 rpm) (Figure 11) pendant deux heures et demi à température ambiante (20-22 °C) et centrifugés à 5000 tr/10 min. Chaque extraction a été répétée trois fois. Les surnageants ont été récupérés et conservés à 4° C jusqu'à utilisation.



Figure 11: Extraction conventionnelle des TPC sur plaque agitatrice

I.5.3. Extraction assistée par ultrasons (EAU)

Une quantité de 0.5 g de la poudre de chaque espèce a été ajoutée à 50 mL de solvant d'extraction (éthanol 50%), les mélanges sont placés dans un bain à ultrason (Puissance et fréquence fixes de 100 W et 42 ± 6 %, respectivement) Les extraits sont récupérés après centrifugation à 5000 tr/10 min (Figure 12), chaque extraction est répétée trois fois. Pour optimisation des rendements d'extraction, l'EAU a été réalisée à différents temps d'extraction (1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 et 80 min) à température fixe de 20 °C. Ensuite après détermination du temps optimal, la température a été variée (30, 40, 50 et 60 °C). Cette démarche vise à déterminer le temps et la température optimale d'extraction des polyphénols par EAU.

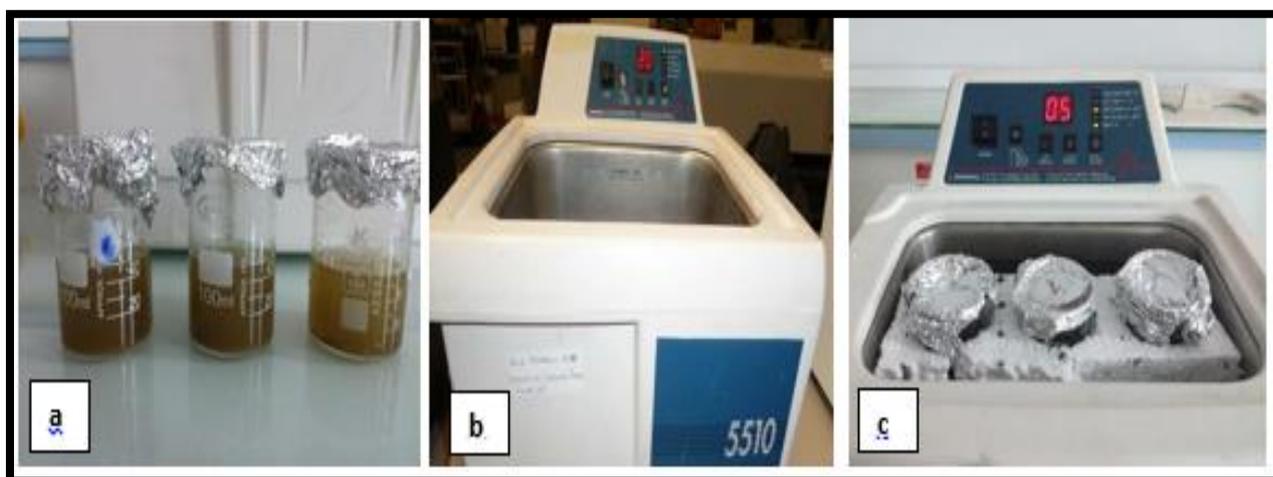


Figure 12: Extraction aux Ultrasons des CPT : a) Mise en contact poudre de cladode-solvant (trois tests), b) Bain à Ultrasons, c) Les trois béchers placés dans le Bain à Ultrasons.

I.5.4. Détermination de la teneur en composés phénoliques totaux (CPT)

I.5.4.1. Principe

Le réactif du Folin-Ciocalteu est constitué d'un mélange d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique qui est réduit lors de l'oxydation des phénols en mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène (Boizot et Charpentier, 2006). La coloration bleue produite est proportionnelle au taux de polyphénols contenu dans l'extrait.

I.5.4.2. Mode opératoire

La teneur en TPC des extraits a été effectuée en utilisant le protocole décrit par (George et al, 2005) : dans 250 μ L de chaque extrait a été ajouté 1.25 mL de la solution de Folin-Ciocalteu (1/10),

après 2 min d'incubation à l'obscurité, 1mL de la solution de carbonate de sodium (7.5%) est ajouté, ensuite le mélange est agité au vortex et incubé à une température de 50 °C pendant 15 min au bain marie. Les absorbances ont été ensuite lues à une longueur d'onde de 760 nm au spectrophotomètre UV-Visible.

La teneur en CPT de chaque extrait est calculée à partir de la courbe d'étalonnage (Annexes, Appendice :1) préparée avec l'acide gallique (utilisé comme standard), et elle est exprimée en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG /g de MS). Le blanc a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction.

Après extraction des polyphénols par le procédé d'extraction assistée par ultrasons (EAU), le dosage des flavonoïdes et l'évaluation de l'activité anti-oxydante ont été effectués sur les extraits obtenus aux conditions optimales comme expliqué dans les sections suivantes.

I.5.5. Détermination de la teneur en flavonoïdes totaux (FT)

I.5.5.1. Principe

Les flavonoïdes possèdent un groupement OH libre en position 5 susceptible de donner en présence de chlorure d'aluminium ($AlCl_3$), un complexe jaunâtre par chélation de l'ion (Al^{3+}). La coloration jaune produite est proportionnelle à la quantité de flavonoïdes présents dans l'extrait (Ribereau-Gayon, 1968).

I.5.5.2. Mode opératoire

La teneur en FT des extraits a été déterminée selon la méthode décrite par (Djeridane et al, 2006) : un volume de 1 mL d'extrait a été ajouté à 1 mL d'une solution d' $AlCl_3$ (2%), après 15min d'incubation à l'obscurité l'absorbance est mesurée à 430 nm.

La teneur en FT a été exprimée en milligramme équivalent de quercétine par gramme de matière sèche (mg EQ/g MS) et déterminée en se référant à la courbe d'étalonnage (Annexes, Appendice : 2) réalisée avec de la quercétine préparée dans l'éthanol (50%). Le blanc a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction.

I.5.6. Evaluation de l'activité anti-oxydante par le test de l'ABTS

I.5.6.1. Principe

La méthode de radical ABTS⁺ est l'un des tests les plus utilisés pour la détermination de la concentration des radicaux libres. Il est basé sur la neutralisation d'un radical cation (Jiri et al,2010). Ce radical cationique est facilement formé par oxydation, en présence de persulfate de potassium pour

donner une solution colorée en vert-bleu (Prouillac, 2006).

L'addition d'un antioxydant à la solution d'ABTS⁺ entraîne la réduction de ce radical et une diminution de l'absorbance. Cette diminution dépend de l'activité anti-oxydante des composés testés, du temps et de la concentration (Re et al, 1999).

I.5.6.2. Mode opératoire

Le pourcentage d'inhibition du radical ABTS⁺ est évalué par la méthode décrite par (Re et al, 1999). Le radical ABTS⁺ à 7 mM est obtenu par la dissolution de 38,4 mg d'ABTS, 6,62 mg de persulfate de potassium et de 10 mL d'eau distillée. La solution est solubilisée pendant 5 min à température ambiante et incubée pendant une nuit à température ambiante et à l'abri de la lumière. La solution d'ABTS (Annexes, Appendice : 3) est diluée avec l'éthanol 96 % jusqu'à l'obtention d'une densité optique initiale (DOI) à 734 nm de 0.7 ± 0.02 . 200 μ L d'extrait à doser sont additionnés à 1800 μ L de la solution d'ABTS, après 6 min d'incubation à l'obscurité on mesure la réaction de réduction de la solution d'ABTS⁺ à 734 nm, qui sera considérée comme la densité optique finale (DOF). La capacité anti-oxydante des extraits testés est exprimée par rapport aux concentrations du standard Trolox. Le blanc a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction.

Le pouvoir anti radicalaire de l'extrait est exprimé en pourcentage d'inhibition du radical ABTS⁺ :

$$\text{Le pourcentage d'inhibition (\%)} = (\text{DOI} - \text{DOF} / \text{DOI}) \times 100$$

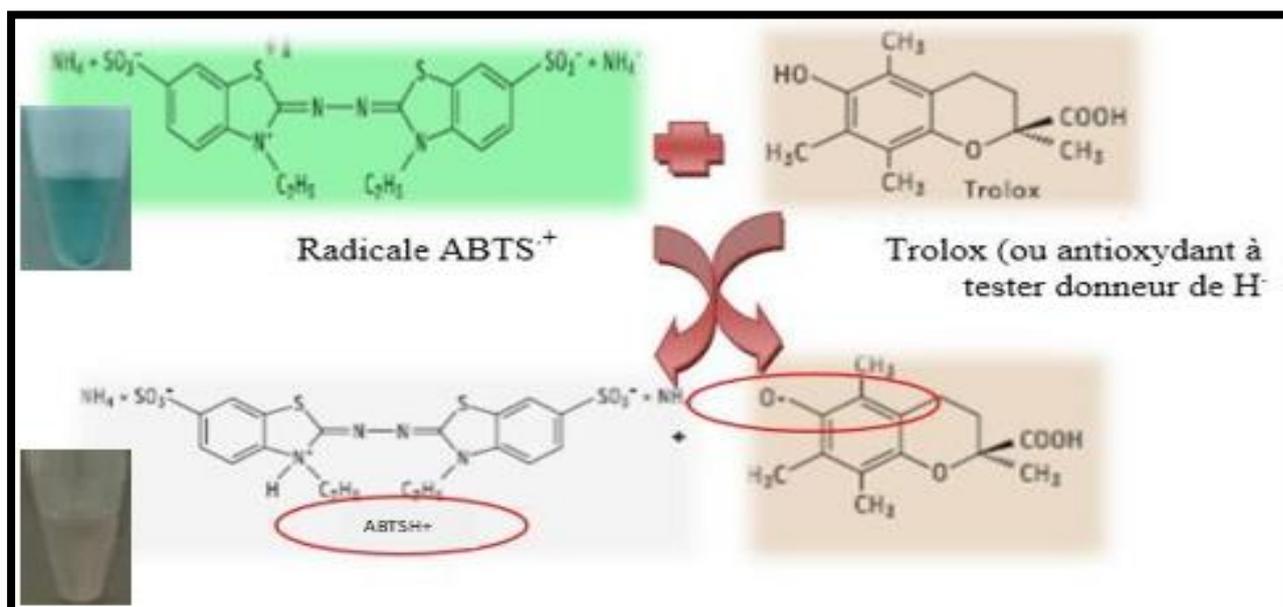


Figure 13: Piégeage du radical ABTS⁺ par un antioxydant donneur de H (Marc et al, 2004 ; Nenadis et al, 2004) (Modifié).

I.5.7. Analyse des poudres de cladodes par spectroscopie à transformée de Fourier (IRTF)

Les poudres de cladodes préparées, ainsi que les extraits bruts liquides obtenus après extraction de sept espèces ont été analysées par IRTF, afin de mettre en évidence principalement la nature polyphénolique des échantillons.

I.5.7.1. Principe

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet, via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimique, d'effectuer l'analyse des fonctions chimique présentes dans le matériau. Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et une diminution de l'intensité réfléchi ou transmise est enregistrée. Le domaine de l'infrarouge entre 400 et 4000 /cm (2.5-25 μ m) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules. Toutes les vibrations ne donnent pas lieu à une absorption, cela va dépendre aussi de la géométrie de la molécule et en particulier de sa symétrie pour une géométrie donnée, les modes de vibration actifs en infrarouge peuvent être déterminés grâce à la théorie des Groupes. La position de ces bandes d'absorption va dépendre en particulier de la différence d'électronégativité des atomes et de leur masse. Par conséquent, à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant de l'identifier (Anthoni, 2007).

I.5.7.2. Mode opératoire

L'analyse spectrale a été enregistrée dans un spectrophotomètre infrarouge dans la plage de 500 à 4000 cm^{-1} . L'échantillon a été préparé sous forme de pastilles faites d'un mélange de 2 g de poudre de chaque espèce avec 80 mg de Bromure de potassium KBr qui est transparent au rayonnement infrarouge dans la zone 4000 à 500 cm^{-1} . Le tout finement broyé et mélangé dans un mortier de manière à être homogène. Le mélange est pressé sous une pression de 60 Bar dans une pastilleuse pendant une minute.

Pour l'analyse des extraits liquides, l'analyse spectrale a été enregistrée dans un spectrophotomètre infrarouge dans la plage de 200 à 1800 /cm. La méthode est comme suit :

Environ 150 μ L sont prélevés de chaque extrait et déposés sur une plaque KBr, ensuite la plaque KBr est placée dans le spectrophotomètre infrarouge afin d'analyser les composés présents dans les extraits liquides.

I.5.8. Etude statistique

Un test statistique a été effectué entre autres : (ANOVA) suivie du test HSD de Tukey utilisant le logiciel JMP (SAS, USA), pour démontrer s'il existe des différences significatives entre les extractions. Les évaluations sont basées sur le niveau de signification $p < 0,05$. Les résultats sont rapportés comme moyenne \pm Ecart-type.

Chapitre III
Résultats et Discussions

I. Identification des écotypes des deux régions

L'identification des écotypes s'est basée sur les traits morphologiques ou variables quantitatives et qualitatives. La caractérisation morphologique est fortement recommandée comme première étape avant de tenter une évaluation avancée par des marqueurs moléculaires (Hoogendijk et Williams, 2001).

L'outil (Descripteur) utilisé pour les variables quantitatives et qualitatives est le document élaboré par (UPOV, 2006).

Vu la complexité et la confusion entre les espèces et comme le genre *Opuntia spp.* Interagit fortement avec l'environnement (Xingnong et al. 1997), il arrive fréquemment que certains caractères varient largement dans la même espèce, montrant des formes diverses qui conduisent à l'identifier comme des espèces différentes. Cette diversité est due à la pollinisation, les plantes générées entraînent une ségrégation extraordinaire de caractères ; autre point à considérer est la fréquence élevée de l'hybridation permettant des combinaisons extraordinaires. Plusieurs études ont été menées sur cette espèce, mais les résultats sont encore incomplets et fragmentaires, notamment en ce qui concerne son origine, sa nomenclature commune, ses niveaux de ploïdie et sa biologie reproductive (Agüero et al, 2005). Les espèces du genre *Opuntia* d'Algérie demeurent méconnues sur le plan typologique et morphologique, à part quelques travaux menés par (Le Houérou, 1965 ; Neffar,2012 ;Adli et al.2017), c'est pourquoi, il est impératif de faire l'inventaire des écotypes existants par l'identification et la description morphologique et compléter par la suite par la biologie moléculaire particulièrement, la caractérisation et l'étude du polymorphisme de l'ADN de l'ensemble des écotypes, Cette étape est capitale pour la planification des stratégies de préservation et de diversification des ressources génétiques.

I.1. Classification des écotypes

Opuntia ficus-indica (sensu stricto) est espèce sans épines ; cependant, au sens latino-américain, les espèces épineuses sont acceptées (Portillo et Arreola, 1994; Kiesling, 1998) car ce caractère aide à identifier les sous-espèces.

D'après Kiesling (1998), il n'y a que deux formes, toutes deux appartenant à *Opuntia ficus-indica* ; une avec des épines (forme *amyclaea*) (Figure a et b) et la seconde sans épines (forme *ficus-indica*) (Figure c et d). Dans la littérature, ces deux formes sont synonymes d'*Opuntia megacantha* et *Opuntia ficus-indica*, respectivement (Bravo, 1978) et sont présentes et constituent la grande majorité des plantations en Algérie (Figure 14).

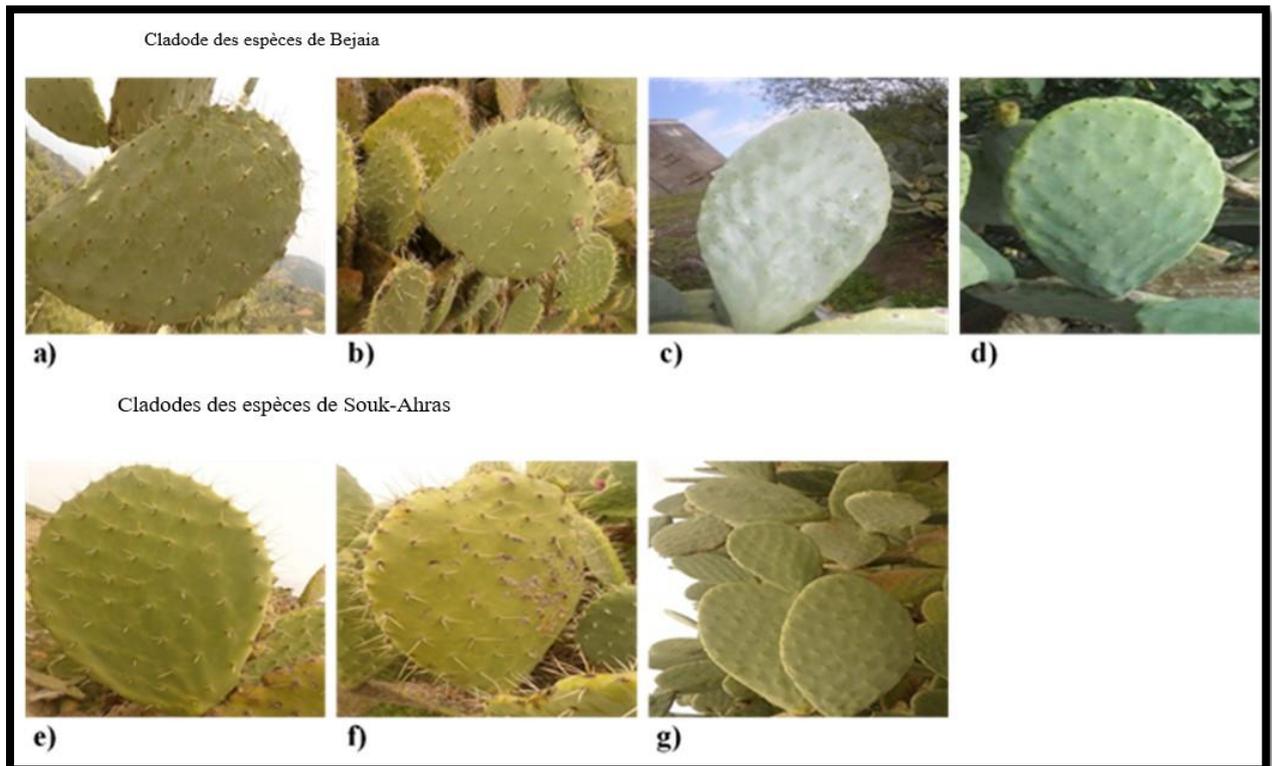


Figure 14: Cladodes de cactus provenant de différentes accessions dans les régions de Béjaïa et de Souk-Ahras : *Opuntia amyclae* (a et e), *Opuntia megacantha* (b et f), *Opuntia ficus-indica* (c (Taourirt), d (Bir-Essalam), et g ((Sidi-Fredj)).

I.1.1. Traits morphologiques des cladodes des accessions des deux régions

La famille des cactacées est caractérisée par une très grande variabilité morphologique, surtout la forme des cladodes, d'ailleurs beaucoup d'espèces sont reconnaissable à travers les formes des cladodes (exemple : *Opuntia robusta*)

Dans les accessions des deux régions, nous avons retrouvé plusieurs formes portant des épines et également sans épines (Figure 15)

Les accessions de la région de Souk – Ahras, sont des vergers avoisinant trois à quatre hectares, on retrouve des parcelles d'*Opuntia ficus indica* sans épines clôturées par les espèces épineuses.

Dans la région de Bejaia, le figuier de Barbarie sert de clôture aux vergers et habitations.

Le port du plant est soit dressé ou étalé. Les formes du cladodes (Tableau 6) les plus observées sont de couleur vert, vert foncé, vert jaunâtre, d'épaisseur moyenne à épaisse, de forme elliptique ou obovale le plus souvent.



Figure 15: Accessions de cactus les plus courantes en Algérie.

Tableau 7 : Caractéristiques des espèces de cactus des deux régions.

| Nom de l'Accession | Plant | | Cladode | |
|---|---------------|--------------------|-----------|----------------------------|
| | Port du Plant | Forme | Épaisseur | Couleur |
| Bejaia | | | | |
| Opuntia amyacleae | Dressé | obovale étroite | épaisse | Vert moyen (2,5 G 5/4) |
| Opuntia ficus indica (Bir-Essalam) | Dressé | elliptique moyenne | moyenne | vert foncé (5 G 5/4) |
| Opuntia ficus indica (Taourirt) | Dressé | elliptique moyenne | medium | vert foncé (5 G 5/4) |
| Opuntia megacantha | Étalé | obovale étroite | épaisse | vert jaunâtre (7,5 GY 6/2) |
| Souk-Ahras | | | | |
| Opuntia amyacleae | Étalé | elliptique moyenne | épaisse | vert jaunâtre (7,5 GY 6/4) |
| Opuntia megacantha | Étalé | losangique | épaisse | Vert (2,5 G 6/6) |
| Opuntia ficus indica | Étalé | elliptique large | épaisse | vert jaunâtre (7,5 GY 6/4) |

I.2. Traitement des Données et résultats.

Une étude statistique a été réalisée avec les données recueillies (données quantitatives continues) sur le terrain lors des prospections dans les deux régions en Avril 2017. Les données brutes sont ensuite traitées avec le logiciel R, l'échantillonnage s'est fait d'une façon aléatoire (choix des cladodes et fruits) des différents plants étudiés.

Les données brutes et le traitement des données statistiques figurent dans la rubrique Annexes (Appendice 4, Appendice 5, Appendice 6, Appendice 7)

I.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) :

L'analyse de la variance (Tableau 7) indique l'existence d'une différence significative entre les différents écotypes prospectés dans les deux sites de l'étude et ce pour la majorité des paramètres mesurés à l'exception de la hauteur du plant dont aucune différence significative n'a été observée entre les différents individus des deux régions. Indépendamment de la région d'origine, l'espèce OFI se différencie significativement par la largeur de son plant tandis que les deux autres espèces identifiées ont des plants d'une largeur presque similaire à l'exception du phénotype O.AM_Be présentant la plus faible largeur (1.1 cm) toutefois avec des cladodes plus longues (40.3 cm) alors que les autres espèces possèdent des cladodes d'une longueur d'environ 36 cm. De même, le phénotype O.AM indépendamment de la région d'origine (Béjaïa ou Souk ahras) présente les cladodes les plus larges (jusqu'à plus de 22 cm) tandis que les cladodes des deux autres espèces O.F.I et notamment O.MG sont plus étroites (moins de 20 cm). Par conséquent, l'espèce O.MG présente des rapports Longueur/largeur des cladodes le plus faible (1.79) tandis que l'O.MG de Béjaïa ayant des cladodes étroites et longues possède le rapport le plus élevé (2.06).

L'espèce O.F.I ne présente pas d'épines alors que les deux autres écotypes (O.MG et O.AM) possèdent des épines pouvant atteindre 2.9 cm de longueur. Concernant les fruits des différentes espèces identifiées dans les sites étudiés, ce sont les espèces de Souk ahras qui présentent des fruits plus allongés dépassant 10 cm de longueur et d'un diamètre élevé (plus de 7 cm) ainsi qu'un poids dépassant 144 g alors qu'à Béjaïa les fruits des différentes espèces sont plus légers (moins de 87 g) et ne dépassent pas les 9 cm de long et d'un diamètre moins de 5.5 cm. Le poids moyen des fruits de Souk Ahras et particulièrement à Sidi- Fredj est 150g (HCDS, 2015).

Tableau 8 : Analyse de la variance à un seul facteur (Anova).

| Variables | SCE-Ecotype | DDL- Ecotype | CM- Ecotype | SCE-Erreur | DDL-Erreur | CM-Erreur | F | P | Signification |
|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|------------|-----------|--------|-------------|-------------------------|
| HP | 4474,5 | 6 | 745,75 | 393958,9 | 245 | 1607,99 | 0,4638 | 0,86 | Non significatif |
| LP | 59936,0 | 6 | 9989,33 | 194567,7 | 245 | 794,15 | 12,57 | 0,00 | significatif |
| LC | 676,9 | 6 | 112,82 | 7547,9 | 245 | 30,80 | 3,66 | 0,00 | significatif |
| lc | 258,4 | 6 | 43,07 | 2479,7 | 245 | 10,12 | 4,25 | 0,00 | significatif |
| LC/lc | 1,9 | 6 | 0,31 | 26,2 | 245 | 0,10 | 2,89 | 0,00 | significatif |
| EC | 282,5 | 6 | 47,09 | 9328,8 | 245 | 38,07 | 1,23 | 0,00 | significatif |
| LE | 395,3 | 6 | 65,88 | 17,5 | 245 | 0,07 | 924,55 | 0,00 | significatif |
| LF | 335,9 | 6 | 55,98 | 34,4 | 245 | 0,14 | 398,83 | 0,00 | significatif |
| DF | 282,3 | 6 | 47,06 | 20,9 | 245 | 0,08 | 552,54 | 0,00 | significatif |
| PF | 239951,4 | 6 | 39991,90 | 15953,1 | 245 | 65,11 | 614,17 | 0,00 | significatif |

I.2.2. Analyse des Composantes Principales (ACP) et Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

I.2.2.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Pour évaluer le degré de similitude entre les attributs analysés des *Opuntias* et comprendre les relations entre eux, les données ont été soumises à une analyse en composantes principales (ACP) (James et McCulloch, 1990). Ces variations peuvent être attribuées à l'emplacement des plantes, le climat, la variété considérée, l'évolution thermo-pluviométrique au cours de l'année et de nombreux facteurs agronomiques comme l'irrigation et le type de sol (Muñoz et al., 1995; Sáenz, 2013). Les cultivars d'*Opuntia* diffèrent amplement en ce qui concerne leur rendement potentiel en fruits, leurs caractéristiques de qualité et leur adaptabilité aux conditions environnementales. Tous les cultivars ne sont pas adaptés pareillement à une zone particulière. En effet, la plupart des cultivars présentent une forte interaction génotype-environnement ($G \times E$) et par conséquent doivent être choisis judicieusement (Potgieter et al., 2017. Selon Barbera et al. 1995), les grandes variations dans le rendement du cactus sont dues à une incompréhension et une maîtrise insuffisante de l'interaction plante / environnement.

L'analyse en composantes principales (ACP) des caractères quantitatifs des différentes parties des espèces identifiées dans les deux sites d'études, indique que les deux premiers axes (Figure 16) expliquent 74,23 % de la diversité observée. Le premier axe, expliquant seul 46,62 % de la diversité totale, est corrélé positivement avec les caractéristiques du fruit ainsi que l'épaisseur du cladode et le rapport entre sa longueur et largeur ; tandis que la deuxième composante défini par les dimensions du plant (Hauteur et largeur) ainsi que la longueur des épines, explique 27,6 % de la variabilité morphologique. Cependant, la longueur et la largeur des cladodes sont expliquées respectivement par le 3^{ème} et 4^{ème} axe de l'ACP. De plus, des corrélations positives marquantes ont été observées entre l'épaisseur du cladode et l'ensemble des caractéristiques du fruit. En fait, l'axe 1 symbolise l'axe variétal et l'axe 2 symbolise l'axe bioclimat (figure 17).

Concernant la contribution des caractéristiques quantitatives dans l'inertie totale (Tableau 8), l'analyse révèle que les paramètres (PF, LF, DF) du fruit (Figure 17) contribuent plus (59,73 %) que ceux du cladode (38,18 %) dans la discrimination entre les individus (espèces). En effet, le diamètre et la longueur du fruit sont les caractères quantitatifs les plus discriminants avec plus de 20 % de l'inertie totale pour chacun alors que la largeur du plant contribue à moins de 0,1%. La projection des individus sur les deux axes de l'ACP permet une distinction nette de 4 groupes de génotypes : OFI Béjaïa, O.F.I Souk ahras, O.AM et O.MG Béjaïa ainsi que l'O.AM et O.MG de Souk-Ahras.

Tableau 9 : Contribution des variables quantitatives du plant, cladode, épine et fruit du figuier de barbarie dans l'inertie totale par Analyse en Composantes Principales (ACP).

| Organe | Caractère | Contribution l'inertie totale (%) | dans Classement du pouvoir discriminant des variables étudiées | Contribution de l'organe (%) |
|----------------|------------------|--|---|-------------------------------------|
| Plant | Hauteur (HP) | 1.58 | 8 | 1.66 |
| | Largeur (LP) | 0.07 | 10 | |
| Cladode | Longueur (LC) | 6.68 | 6 | 38.18 |
| | Largeur (IC) | 2.38 | 7 | |
| | Rapport (LC/IC) | 9.77 | 5 | |
| Epines | Epaisseur (EC) | 19.36 | 4 | 0.43 |
| | Longueur (LE) | 0.43 | 9 | |
| Fruit | Longueur (LF) | 20.05 | 2 | 59.73 |
| | Diamètre (DF) | 20.15 | 1 | |
| | Poids (PF) | 19.53 | 3 | |

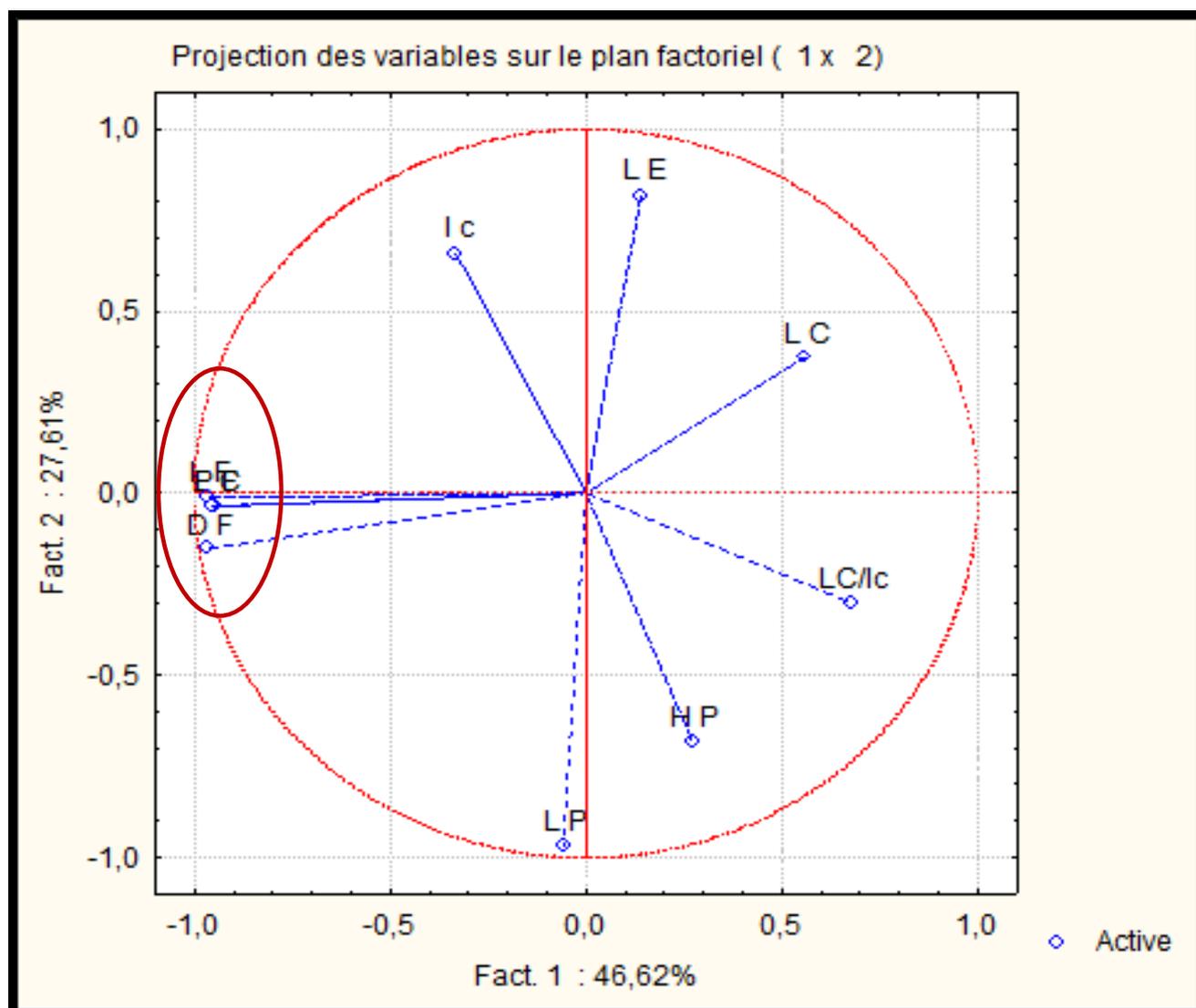


Figure 16: Projection des variables sur le plan factoriel (1x2)

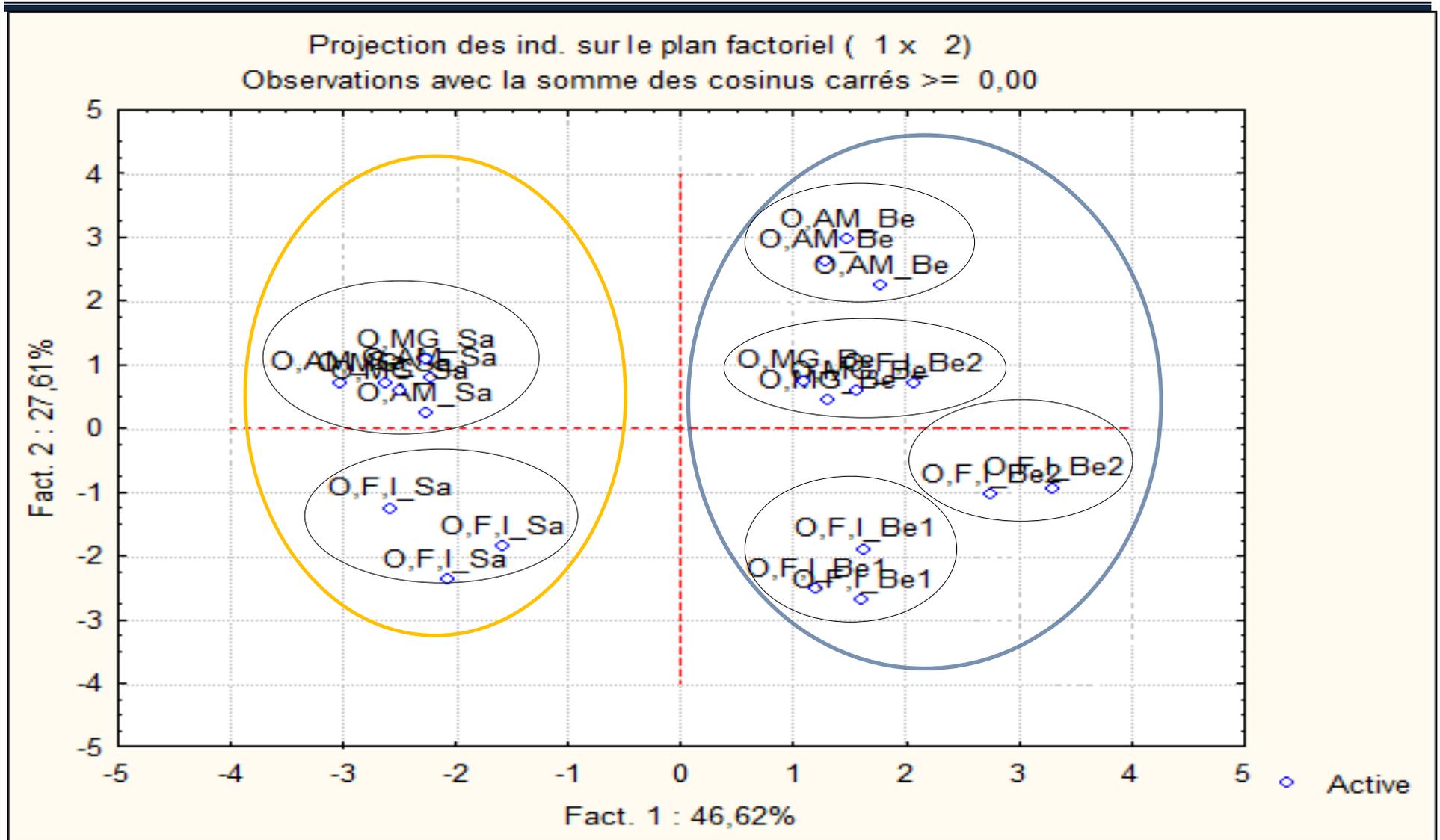


Figure 17: Projection des individus sur le plan factoriel (1x2)

I.2.2.2. Classification Ascendante hiérarchique (CAH)

Une Classification ascendante hiérarchique a été réalisée afin de mettre en évidence les relations entre les accessions étudiées, un dendrogramme (Figure 18) a été construit avec des données évaluées par dissimilarité (indice de dissimilarité basé sur les distances euclidiennes : matrice des distances, méthode d'agregation : méthode de Ward et non complet linkage, indice d'agregation (regroupement)=1.77, toutes les variables sont intégrées).

Ce travail a permis de mettre en évidence une variabilité importante intra et inter-formes de cactus. Il a permis de distinguer 02 groupes d'Opuntia en fonction des caractéristiques étudiées.

Sur la base des 10 variables utilisées pour la description des plants le test a permis d'identifier 02 groupes différents mettant l'accent beaucoup plus sur l'effet de la région que sur les caractéristiques des espèces :

- Groupe 1 : composé de O.MG et O.AM Béjaïa ainsi que O.F.I_Be 2 (Taourirt, Bejaia) et O.F.I_Be 1 (Bir Essalam).
- Groupe 2 : les trois espèces identifiées à Souk ahras (O.AM_Sa, O.MG_Sa, O.F.I_Sa).

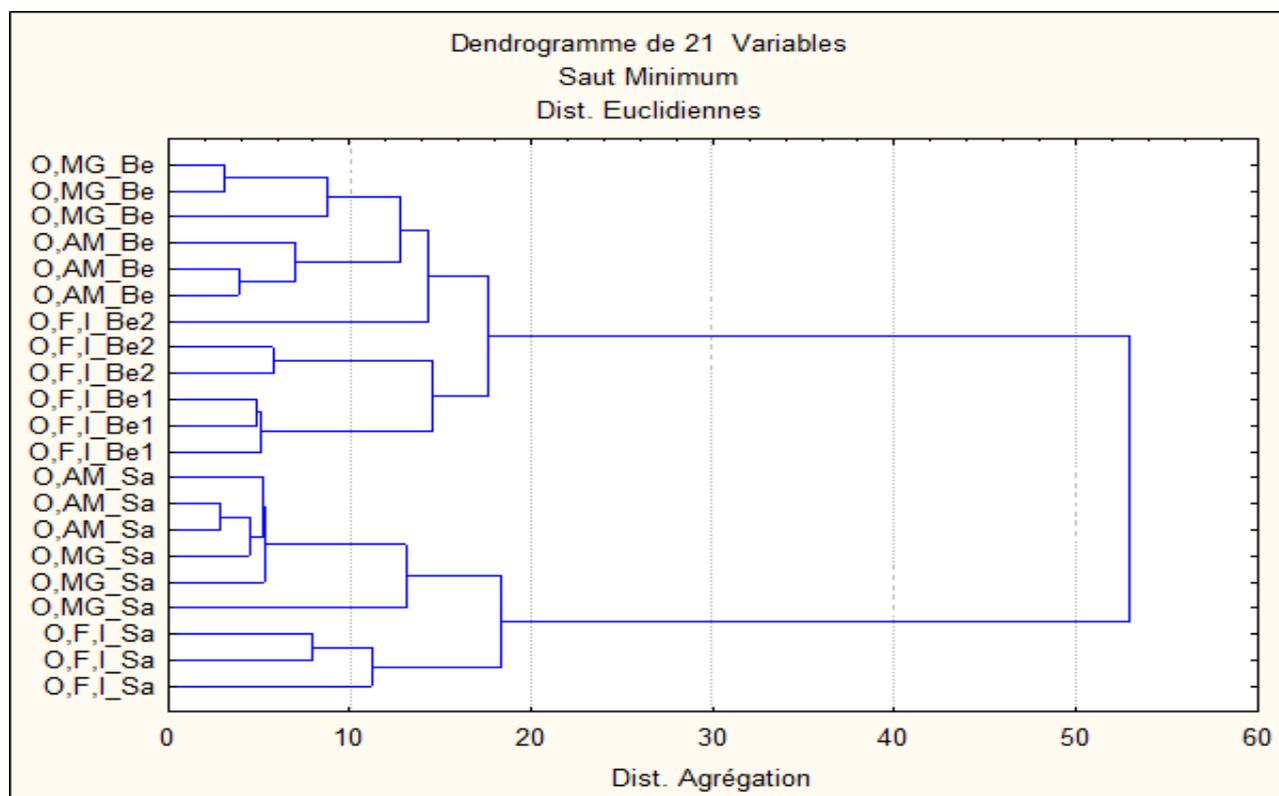


Figure 18: Dendrogramme des variables étudiées.

I.2.3. Test de Newman-Keuls (Groupes homogènes)

Un test post – Hoc (**test de Newman-Keuls**) après l'ANOVA, ce test a été réalisé afin de déterminer les groupes homogènes en fonction des variables moyennes étudiées (tableau 11), ce test classe les individus soit dans l'ordre croissant ou décroissant et en groupes homogènes.

I.2.3.1. Largeur du Plant

Les groupes sont constitué selon le tableau 9 de :

Groupe **A** : *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia ficus indica* (souk ahras)

Groupe **B** : *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt, Bejaia) -*Opuntia amyclae* (Souk ahras)-*Opuntia megacantha* (Bejaia)-*Opuntia megacantha* (Souk ahras)

Groupe **C**: *Opuntia amyclae* (Bejaia).

Tableau 10 : Test de Newman-Keuls, Variable : largeur du Plant.

| Test Newman-Keuls ; variable LP | | | | |
|---------------------------------|---------|------|------|------|
| Espèces | Moyenne | B | A | C |
| 2 O.AM_Be | 109,44 | | | **** |
| 6 O.MG_Sa | 123,94 | **** | | |
| 1 O.F.I_Be 1 | 125,36 | **** | | |
| 5 O.AM_Sa | 131,86 | **** | | |
| 3 O.F.I_Be 2 | 138,75 | **** | | |
| 7 O.F.I_Sa | 154,33 | | **** | |
| 4 O.F.I_Be | 155,11 | | **** | |

I.2.3.2. Longueur du cladode (LC)

Les groupes sont constitués selon le tableau 10 de :

Groupe **A**: *Opuntia amyclae* Bejaia

Groupe **AB**: *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt, Bejaia)

Groupe **B**: *Opuntia amyclae* Souk Ahras – *Opuntia ficus indica* Souk ahras- *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia megacantha* Souk Ahras – *Opuntia megacantha* Bejaia.

Tableau 11 : Test de Newman-Keuls, Variable : Longueur du Cladode

| Test Newman-Keuls ; variable: LC | | | | |
|----------------------------------|------------|---------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | B | A |
| 1 | O.F.I_Be 1 | 36,30 | **** | |
| 6 | O.MG_Sa | 36,30 | **** | |
| 4 | O.F.I_Be | 36,30 | **** | |
| 7 | O.F.I_Sa | 36,611 | **** | |
| 5 | O.AM_Sa | 36,69 | **** | |
| 3 | O.MG_Be | 39,75 | **** | **** |
| 2 | O.AM_Be | 40,33 | | **** |

Tableau 12 : Moyennes et écart-type des variables quantitatives continues.

| Variables/Espèces | O.F.I_Be1 | O.AM_Be | O.MG_Be | O.F.I_Be2 | O.AM_Sa | O.MG_Sa | O.F.I_Sa | Prob. | Sign. |
|---------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|-------|
| Hauteur du plant (cm) | 197,52 ± 38,38 | 196,16±33,01 | 204,97±42,12 | 207,38±27,39 | 200,52±50,35 | 195,41±47,63 | 202,36±36,91 | 0,86 | N.S |
| | B | C | B | A | B | B | A | | |
| Largeur du plant (cm) | 125,36 ± 17,95 | 109,44±18,66 | 138,75±23,99 | 155,11±29,73 | 131,86±39,48 | 123,94±28,84 | 154,33±32,21 | 0,00 | *** |
| | B | C | B | A | B | B | A | | |
| Longueur du cladode (cm) | 36,30±6,07 | 40,33±6,10 | 39,75±3,57 | 36,30±7,45 | 36,69±4,91 | 36,30±4,46 | 36,61±5,37 | 0,00 | *** |
| | B | A | AB | B | B | B | B | | |
| Largeur du cladode (cm) | 19,63±2,76 | 22,16±3,98 | 19,44±2,45 | 19,41±3,54 | 21,63±3,31 | 20,22±3,24 | 20,22±2,68 | 0,00 | *** |
| | C | A | C | C | AB | BC | BC | | |
| Rapport Lc/lc | 1,85±0,29 | 1,84±0,31 | 2,06±0,27 | 1,89±0,38 | 1,79±0,38 | 1,80±0,23 | 1,83±0,36 | 0,00 | *** |
| | B | B | A | B | B | B | B | | |
| Épaisseur du cladode (cm) | 0,66±0,00 | 0,65±0,05 | 0,64±0,05 | 0,63±0,05 | 1,06±0,15 | 0,77±0,06,32 | 1,01±0,12 | 0,00 | *** |
| | C | C | C | C | A | B | A | | |
| Longueur de l'épine (cm) | 0,00±0,00 | 2,87±0,21 | 2,86±0,24 | 0,00±0,00 | 2,57±0,50 | 2,75±0,29 | 0,00±0,00 | 0,00 | *** |
| | D | A | A | D | C | B | D | | |
| Longueur du fruit (cm) | 8,39±0,45 | 8,42±0,42 | 8,10±0,33 | 8,16±0,42 | 10,61±0,26 | 10,55±0,32 | 10,61±0,35 | 0,00 | *** |
| | B | B | C | C | A | A | A | | |
| Diamètre du fruit (cm) | 5,14±0,27 | 4,92±0,29 | 4,86±0,28 | 5,56±0,24 | 7,40±0,27 | 7,25±0,33 | 6,97±0,33 | 0,00 | *** |
| | E | F | F | D | A | B | c | | |
| Poids du fruit (g) | 80,58±10,57 | 86,58±10,3 | 85,11±9,42 | 80,22±6,25 | 144,83±6,70 | 145,38±4,71 | 145,77±6,50 | 0,00 | *** |
| | C | B | B | C | A | A | A | | |

Les *** indique l'appartenance d'une observation (individus) à un groupe homogène. Les individus appartenant à même groupe (A par exemple) ne sont pas différents du point de vue de la variable quantitative mesurée. Lorsqu'un individu appartient à deux groupes, ce cas apparaît lorsque la différence n'est pas trop importante pour permettre une séparation parfaite des groupes

I.2.3.3. Largeur du cladode (IC)

Les groupes sont constitués selon le tableau 12 de :

Groupe **A**: *Opuntia amyclae* (Bejaia).

Groupe **AB**: *Opuntia amyclae* (Souk ahras).

Groupe **BC**: *Opuntia megacantha* (Souk ahras) - *Opuntia ficus indica* (souk ahras).

Groupe **C**: *Opuntia ficus indica* 1(Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia megacantha* (Bejaia) - *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt, Bejaia).

Tableau 13 : Test de Newman-Keuls, variable : largeur du cladode.

| Test Newman-Keuls; variable IC (largeur du cladode) | | | | | |
|---|------------|---------|------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | C | B | A |
| 4 | O.F.I_Be 1 | 19,41 | **** | | |
| 3 | O.MG_Be | 19,44 | **** | | |
| 1 | O.F.I_Be 2 | 19,63 | **** | | |
| 7 | O.F.I_Sa | 20,22 | **** | **** | |
| 6 | O.MG_Sa | 20,22 | **** | **** | |
| 5 | O.AM_Sa | 21,63 | | **** | **** |
| 2 | O.AM_Be | 22,16 | | | **** |

I.2.3.4. Epaisseur du cladode

Les groupes sont constitués selon le tableau 13 de :

Groupe **A** : *Opuntia amyclae* (Souk ahras)- *Opuntia ficus indica* (souk ahras)-

Groupe **B** : *Opuntia megacantha* (Souk ahras).

Groupe **C** : *Opuntia ficus indica* 1(Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia amyclae* (Bejaia)- *Opuntia megacantha* (Bejaia)- *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt, Bejaia).

Tableau 14 : Test de Newman-Keuls, variable : Epaisseur du Cladode

| Test Newman-Keuls ; variable :EC | | | | | |
|----------------------------------|------------|---------|------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | A | C | B |
| 7 | O.F.I_Be 2 | 0,63 | | **** | |
| 4 | O.MG_Be | 0,64 | | **** | |
| 5 | O.AM_Be | 0,65 | | **** | |
| 1 | O.F.I_Be 1 | 0,66 | | **** | |
| 6 | O.MG_Sa | 0,77 | | | **** |
| 3 | O.F.I_Sa | 1,01 | **** | | |
| 2 | O.AM_Sa | 1,06 | **** | | |

I.2.3.5. Le Ratio : CL/cl

Les groupes sont constitués selon le tableau 14 de :

Groupe **A** : *Opuntia ficus indica* (Taourirt, Bejaia).

Groupe **B** : *Opuntia ficus indica* 1(Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia ficus indica* (Akbou, Bejaia)-
Opuntia megacantha (Bejaia)- *Opuntia amyclae* (Bejaia)-

- *Opuntia ficus indica* (souk ahras) - *Opuntia megacantha* (Souk ahras) -*Opuntia amyclae* (Souk ahras).

Tableau 15 : Test de Newman-Keuls, variable : CL/Cl

| Test Newman-Keuls; variable CL/Cl | | | | |
|-----------------------------------|------------|---------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | B | A |
| 5 | O.AM_Sa | 1,79 | **** | |
| 6 | O.MG_Sa | 1,80 | **** | |
| 7 | O.F.I_Sa | 1,83 | **** | |
| 2 | O.AM_Be | 1,84 | **** | |
| 1 | O.F.I_Be 1 | 1,85 | **** | |
| 4 | O.F.I_Be 2 | 1,89 | **** | |
| 3 | O.MG_Be | 2,06 | | **** |

I.2.3.6. Longueur de l'épine la plus longue

Les groupes sont constitués selon le tableau 15 de :

Groupe A: *Opuntia amyclae* (Bejaia) - - *Opuntia megacantha* (Bejaia).

Groupe B: *Opuntia megacantha* (Souk ahras).

Groupe C: *Opuntia amyclae* (Souk ahras).

Groupe D: *Opuntia ficus indica* (souk ahras) - *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia) - *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt, Bejaia).

Tableau 16 : Test de Newman-Keuls, variable: LE

| Test Newman-Keuls ; variable :LE | | | | | |
|----------------------------------|---------|------|------|------|------|
| Espèces | Moyenne | A | C | B | D |
| 7 O.F.I_Sa | 0,00 | | | | **** |
| 4 O.F.I_Be 2 | 0,00 | | | | **** |
| 5 O.AM_Sa | 2,57 | | **** | | |
| 1 O.F.I_Be 1 | 0,00 | | | | **** |
| O.MG_Sa | 2,75 | | | **** | |
| 3 O.MG_Be | 2,86 | **** | | | |
| 2 O.AM_Be | 2,87 | **** | | | |

I.2.3.7. Longueur du fruit

Les groupes sont constitués selon le tableau 16 de :

Groupe A : *Opuntia amyclae* (Souk ahras) - *Opuntia ficus indica* (souk ahras) - *Opuntia megacantha* (Souk ahras).

Groupe B: *Opuntia amyclae* (Bejaia) - *Opuntia megacantha* (Bejaia).

Groupe C: *Opuntia ficus indica* (Taourirt, Bejaia)- *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia).

Tableau 17 : Test de Newman-Keuls, variable : LF (longueur du fruit).

| Test Newman-Keuls ; variable : LF : Longueur du Fruit | | | | | |
|---|------------|---------|------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | A | C | B |
| 4 | O.F.I_Be 2 | 8,10 | | **** | |
| 3 | O.MG_Be | 8,16 | | **** | |
| 1 | O.F.I_Be 1 | 8,39 | | | **** |
| 2 | O.AM_Be | 8,42 | | | **** |
| 6 | O.MG_Sa | 10,55 | **** | | |
| 7 | O.F.I_Sa | 10,61 | **** | | |
| 5 | O.AM_Sa | 10,61 | **** | | |

I.2.3.8. Diamètre géométrique du fruit

Les groupes sont constitués selon le tableau 17 de :

Groupe A: *Opuntia amyclea* (Souk ahras).

Groupe B: *Opuntia megacantha* (Souk ahras).

Groupe C: *Opuntia ficus indica* (souk ahras).

Groupe D: *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia).

Groupe E: *Opuntia megacantha* (Bejaia).

Groupe F: *Opuntia amyclea* (Bejaia) - *Opuntia ficus indica* 2 (Taourirt , Bejaia).

Tableau 18 : Test de Newman-Keuls, variable : Diamètre géométrique du Fruit.

| Test Newman-Keuls ; variable : Diamètre du fruit | | | | | | | | |
|--|------------|---------|------|------|------|------|------|------|
| | Espèces | Moyenne | F | E | D | C | B | A |
| 3 | O.MG_Be | 4,86 | **** | | | | | |
| 2 | O.AM_Be | 4,92 | **** | | | | | |
| 1 | O.F.I_Be 1 | 5,14 | | **** | | | | |
| 4 | O.F.I_Be 2 | 5,56 | | | **** | | | |
| 7 | O.F.I_Sa | 6,97 | | | | **** | | |
| 6 | O.MG_Sa | 7,25 | | | | | **** | |
| 5 | O.AM_Sa | 7,40 | | | | | | **** |

I.2.3.9. Poids du fruit

Les groupes sont constitués selon le tableau 18 de :

Groupe A : *Opuntia ficus indica* (souk ahras)- *Opuntia megacantha* (Souk ahras) - *Opuntia amyclae* (Souk ahras).

Groupe B: *Opuntia amyclae* (Bejaia) - *Opuntia ficus indica* (Taourirt, Bejaia).

Groupe C: *Opuntia megacantha* (Bejaia) - *Opuntia ficus indica* 1 (Bir Essalam, Bejaia).

Tableau 19 : Test de Newman-Keuls, variable : Poids du fruit.

| Test Newman-Keuls; variable : Poids du fruit | | | | |
|--|---------|------|------|------|
| Espèces | Moyenne | A | C | B |
| 4 O.F.I_Be 2 | 80,22 | | **** | |
| 1 O.F.I_Be 1 | 80,58 | | **** | |
| 3 O.MG_Be | 85,11 | | | **** |
| 2 O.AM_Be | 86,58 | | | **** |
| 5 O.AM_Sa | 144,83 | **** | | |
| 6 O.MG_Sa | 145,38 | **** | | |
| 7 O.F.I_Sa | 145,77 | **** | | |

Ces ensembles importants de groupes homogènes confirment la grande variabilité génétique et morphologique qui existe chez le genre *Opuntia spp* dans les deux régions, cette variabilité peut-être exploitée pour un programme d'amélioration en fonction des objectifs définis au préalable (production de gros fruit avec peu de graines, résistance au froid, teneur élevée en sucres, résultant principalement de la variabilité génétique associée à un large distribution et diverses conditions environnementales : humidité atmosphérique, pluviométrie annuelle, durée et intensité de l'ensoleillement, nature du sol, exposition du versant,.....etc).

La caractérisation morphologique de toute espèce est un premier indicateur de son statut de diversité et une étape clé vers sa valorisation et conservation en collection spécifique. Notre résultats indiquent clairement une grande diversité entre les accessions de figues de barbarie qui devraient être soumises à une confirmation plus approfondie par une analyse ADN conformément aux SSR marqueurs préalablement identifiés chez cette espèce (Helsen et al,2007) et utilisé pour évaluer la diversité génétique du figuier de Barbarie (Caruso et al, 2010). Ces marqueurs génétiques sont utiles, non seulement pour éviter les doublons ou les erreurs d'étiquetage des génotypes étudiés, mais aussi pour préciser leur origine géographique et de mettre en évidence l'influence des conditions

environnementales et les pratiques agricoles sur la variabilité des espèces épineuses (Caruso et al, 2010).

Enfin, basée sur les critères morphologiques, moléculaires et caractérisation agronomique des accessions de figue de barbarie, une stratégie de diversification pourrait être mise en œuvre afin de promouvoir sa culture dans le pays comme un polyvalent prometteur comme culture résistante à la sécheresse et la diversification des produits agricoles sans oublier l'amélioration des conditions d'existences durables des communautés rurales qui y vivaient.

I.2.4. Les variables qualitatives discontinues

Une étude sur les variables qualitatives a été également réalisée selon toujours les directives du descripteur (UPOV, 2006).

L'ensemble de ces variables concernant les différentes parties (Plant, Cladode, épines, aiguillon central) des espèces sont consignées dans le tableau 19, les caractéristiques des variables sont :

- **Plant** : Il est souvent dressé dans la région de Souk-Ahras, étalé dans la région de Bejaia.
- **Cladode** : De forme elliptique ou obovale dans la région de Bejaia, elliptique à losangique dans la région de Souk-Ahras, l'épaisseur : moyenne à épaisse dans l'ensemble des deux régions, de couleur verte majoritairement à verte-foncé rarement verte- jaunâtre, absence de pilosité de surface dans l'ensemble des espèces, sans ondulation de bord, on note aussi le nombre élevé d'aréoles qui portent peu d'épines à l'instar de l'espèce *Opuntia amyclaea* dans les deux régions et de très nombreuses épines chez l'espèce *Opuntia megacantha* des deux régions ; on note l'absence d'épines chez l'espèce *Opuntia ficus indica* dans les deux régions.

Nos résultats sont conformes aux travaux de nombreux auteurs particulièrement (Aguero, 2005), voir Tableau 1.

Tableau 20 : Caractéristiques des variables Qualitatives des espèces des deux régions.

| | <i>O.F.I_Be 1</i> (<i>Bir-Essalam</i>) | <i>O.AM_Be</i> | <i>O.MG_Be</i> | <i>O.F.I_Be2</i> (<i>Taourirt,</i> <i>Bejaia</i>) | <i>O.AM_Sa</i> | <i>O.MG_Sa</i> | <i>O.F.I_Sa</i> |
|------------------------------|---|----------------------|---------------------------|---|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Plant | | | | | | | |
| -Port | Dressé | Dressé | Etalé | Dressé | Etalé | Etalé | Etalé |
| Cladode | | | | | | | |
| - Forme | elliptique moyenne | Obovale étroite | Obovale étroite | Elliptique moyenne | Elliptique moyenne | Losangique épaisse | Elliptique large moyenne |
| -Epaisseur | Moyenne | Epaisse | Moyenne | | | | |
| -Couleur | Vert jaunâtre | Verte jaunâtre | Verte | Verte foncé | Verte | verte | Verte foncé |
| -pilosité de surface | Présent | Absente | Absente | Présent | Absente | Absente | Présent |
| -Ondulation de bord | Absente | Absente | Présent | Absente | Absente | Présent | Absente |
| -Nombres d'Aréoles | faible | Importante | Importante | Importante | Importante | Importante | Importante |
| -Couleur d'aréoles | grise | Marron jaune | Grise | Grise | Marron | Grise | Grise |
| -Nombre d'épines par aréoles | Aucune ou très rare | Peu nombreuses | Très nombreuses | Aucune ou très rare | Peu nombreuses | Très nombreuses | Aucune ou très rare |
| Epine | | | | | | | |
| -Couleur principale | | Blanche | Blanche | | Blanche | Blanche | |
| -Nombre de couleurs | | Deux | Deux | | Deux | Deux | |
| -surface | | Lisse | Lisse | | Lisse | Lisse | |
| -Port | | Horizontale Ferme | Horizontale Demi érigé | | Horizontale Demi érigé | Horizontale Demi érigé | |
| Aiguillon central | | | | | | | |
| -Flexibilité | | Ferme | Ferme | | Ferme | Ferme | |
| -Couleur sauf la base | | Blanche | Blanche | | Blanche pâle | Blanche | |
| -Torsion | | Présent | Présent | | Présent | Absente | |
| -Forme en vue dorsale | | En forme d'aiguille | En forme d'aiguille | | En forme d'aiguille | En forme d'aiguille | |
| -Forme en vue transversale | | Elliptique | Elliptique | | Elliptique | Elliptique | |

II. Extraction des composés phénoliques totaux (CPT)

Afin d'optimiser l'extraction des composés phénoliques des cladodes de figuier de Barbarie, certains facteurs ont été pris en considération, à savoir la méthode d'extraction, le solvant, la concentration, le temps et la température d'extraction.

II.1. Extraction Conventiennelle :

L'extraction conventionnelle solide-liquide sous agitation a été effectuée à température ambiante (20-22°C) sur l'extrait de cladode d'OFI Bir-Essalam. Les effets des différentes concentrations d'éthanol (20,50, 96 %) sur l'efficacité de l'extraction, qui a duré deux heures et demi, ont été étudiés, et les résultats sont montrés ci-dessous :

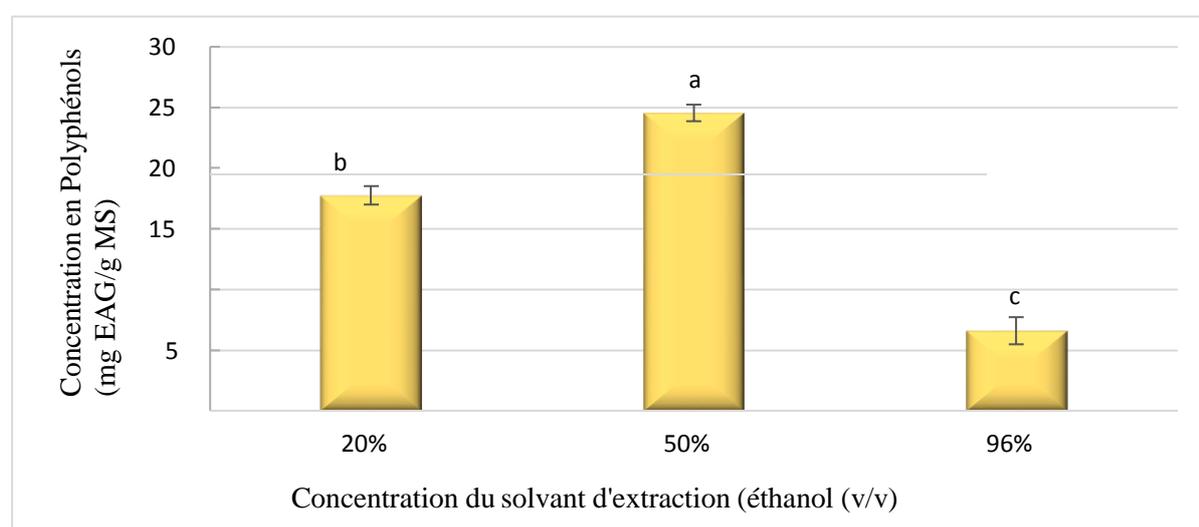


Figure 19: Influence de la concentration du solvant sur le taux des composés phénoliques de l'extrait de cladode d'O.F.I Bir-Essalam en extraction conventionnelle

Les résultats des rendements obtenus par Extraction solide-liquide donnés par (la Figure 19) montrent que la plus forte teneur est enregistrée en utilisant l'éthanol à 50% (24.54 ± 0.68 mg EAG/g P.S) suivi par l'éthanol à 20% (17.75 ± 0.76 mg EAG/g P.S), tandis que l'extrait obtenu avec l'éthanol à 96% a révélé la plus faible valeur (6.59 ± 1.11 mg EAG/g P.S).

L'addition de l'eau distillée à l'éthanol augmente de façon remarquable son pouvoir d'extraction. Les résultats sont en accord avec ceux de plusieurs auteurs qui ont révélé que les solvants mixtes sont très efficaces pour extraire les composés phénoliques. Selon Mohammedi et Arik (2011) l'utilisation de solvants mixtes aboutit à un fort enrichissement des extraits en composés phénoliques. Cette supériorité des solvants mixtes est due à l'augmentation de la solubilité des composés phénoliques dans les extraits obtenus par des solvants mixtes comparés à celui obtenu par un solvant

pur (Trabelsi et al. 2010). Cette augmentation peut être due à l'augmentation de la basicité et de l'ionisation des polyphénols dans de telles solutions.

Par contre, des études antérieures ont montré que l'utilisation de solvants organiques très purs peut entraîner la déshydratation et l'effondrement des cellules végétales, ainsi que la dénaturation des protéines de la paroi cellulaire, rendant ainsi l'extraction des composés phénoliques difficile (Garcia et al, 2015). Dans ce contexte, Sahin et Samli (2013) ont rapporté que le meilleur rendement d'extraction des composés phénoliques étant obtenu en utilisant un mélange 50% - 50% d'éthanol-eau. Ces auteurs soulignent un effet de synergie entre les solvants, puisque l'eau agit comme un agent gonflant de la matrice végétale, tandis que l'éthanol induit la rupture du lien entre les solutés et la matrice.

Il apparaît dans notre travail que l'éthanol à 50% soit la meilleure concentration du solvant d'extraction choisi, ainsi cette concentration sera utilisée pour la suite des extractions.

II.2. Extraction assistée par ultrasons (EAU)

II.2.1. Détermination du temps d'extraction optimal

L'extraction assistée par ultrasons a été appliquée pour l'extraction des CPT de la poudre de cladode de Bir-Essalam OFI en utilisant 50 % d'éthanol, à température ambiante (20 à 22 °C) et à différents temps d'extraction (de 1 à 80 min). Lorsque le temps d'extraction augmente, les CPT augmentent et atteignent des valeurs maximales de $34,84 \pm 1,70$ et $36,41 \pm 1,33$ mg EAG/g Poids sec à 30 et 60 min, respectivement (Figure 20). Cependant, le rendement en CPT a diminué avec l'augmentation des temps de sonication et les niveaux les plus bas ont été observés à 70 et 80 min. Il a été rapporté que la teneur en composés phénoliques extraits par ultrasons augmente d'une manière dépendante du temps suivant un processus comportant deux étapes principales (Şahin et Şamlı, 2013). La première, appelée étape de lavage, couvre les 10 à 20 premières minutes d'extraction. Les composants solubles sont dissous sur les surfaces de la matrice. Dans cette étape, jusqu'à 90 % de l'ensemble la teneur en composés phénoliques peut être récupérée. Le transfert de masse réalisé par diffusion dans la deuxième étape de ce processus, appelée extraction lente, peut durer de 60 à 100 minutes (Şahin et Şamlı, 2013). Plusieurs études ont montré qu'un temps de contact prolongé entre le solvant et la matière végétale peut conduire à la dégradation de certains Ingrédients actifs. La longue durée du traitement par ultrasons peut dégrader les composés phénoliques, réduisant ainsi le rendement d'extraction (Carrera et al. 2012 ; Odabaş et Koca, 2016). En outre, l'irradiation ultrasonore à long terme peut altérer la stabilité des composés sensibles à la chaleur (Ma et al, 2008). Les résultats n'ont montré aucune différence substantielle entre les temps de sonication de 1-20 min et 80 minutes.

Cependant, les meilleurs rendements en CPT ont été obtenus à 30 et 60 min. Ainsi, le temps de sonication de 30 min a été choisi comme temps optimal pour le reste de l'étude.

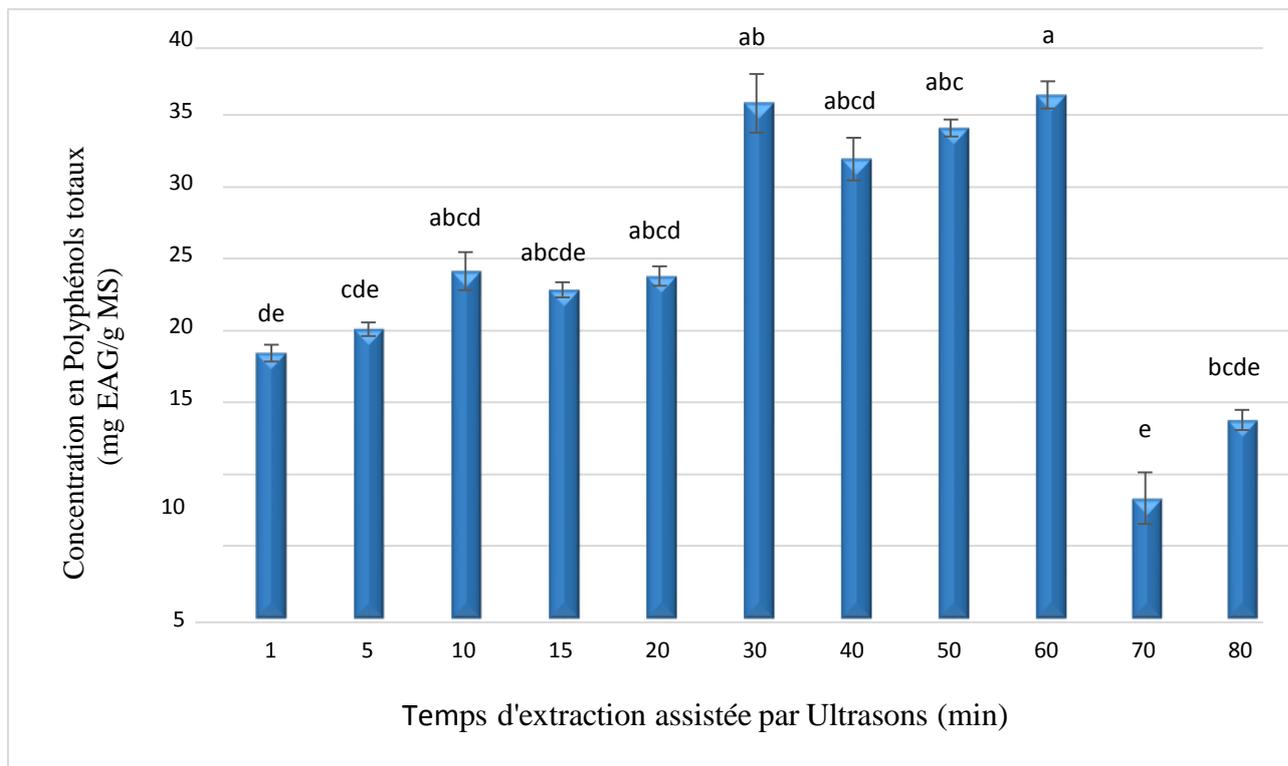


Figure 20: Effet du temps de sonication sur la teneur totale en phénols (CPT) de la poudre de cladode *Opuntia ficus-indica* (OFI) de BirEssalam. Conditions UAE : 50 % ethanol à 20 °C.

Les valeurs sont des moyennes \pm ET de trois mesures. Les différentes lettres indiquent que les échantillons étaient significativement différents ($p < 0,05$).

II.2.1.1. Détermination de la température d'extraction optimale

L'effet de la température sur les CPT a été évalué entre 30 et 70 °C, avec les paramètres fixes suivants : temps d'extraction de 30 min et concentration en éthanol de 50 %. Les résultats ont indiqué que les rendements en CPT ont augmenté avec l'augmentation des températures (figure 21). En effet, la concentration en polyphénols a atteint un équilibre de désorption et de solubilité à 60 °C avec un rendement en CPT de $39,15 \pm 1,78$ mg EAG/g poids sec, tandis que la valeur la plus faible a été obtenue à 30 °C ($28,02 \pm 1,86$ mg EAG/g poids sec). La teneur en CPT a baissé jusqu'à $32,12 \pm 2,83$ mg EAG/g poids sec à 70 °C. Par conséquent, la température de 60°C a été considérée comme la meilleure température pour l'extraction des polyphénols. Jaramillo-Flores et al. (2003) ont rapporté qu'un traitement thermique de 30 minutes augmentait l'extractibilité des caroténoïdes et des composés phénoliques des cladodes de figuier de Barbarie.

Le rendement en CPT a augmenté avec l'augmentation de la température d'extraction. L'augmentation de la température pourrait modifier la structure de la matrice végétale, et donc faciliter le processus d'extraction (Prasad et al. 2009). Ainsi, des températures élevées peuvent accélérer le ramollissement et le gonflement des matières premières, augmentant la solubilité des composés extraits (Vilkhu et al. 2008) et leur diffusivité dans le solvant et améliore le transfert de matière. Cependant, si la température continue d'augmenter, cela pourrait altérer les propriétés de la cavitation ultrasonore et oxyder les composés phénoliques (Vilkhu et al. 2008 ; Tchabo et al. 2015) provoquant une dénaturation des produits à extraire, ce qui peut affecter la solubilité des composés phénoliques. De plus, une température élevée entraînera une consommation d'énergie élevée.

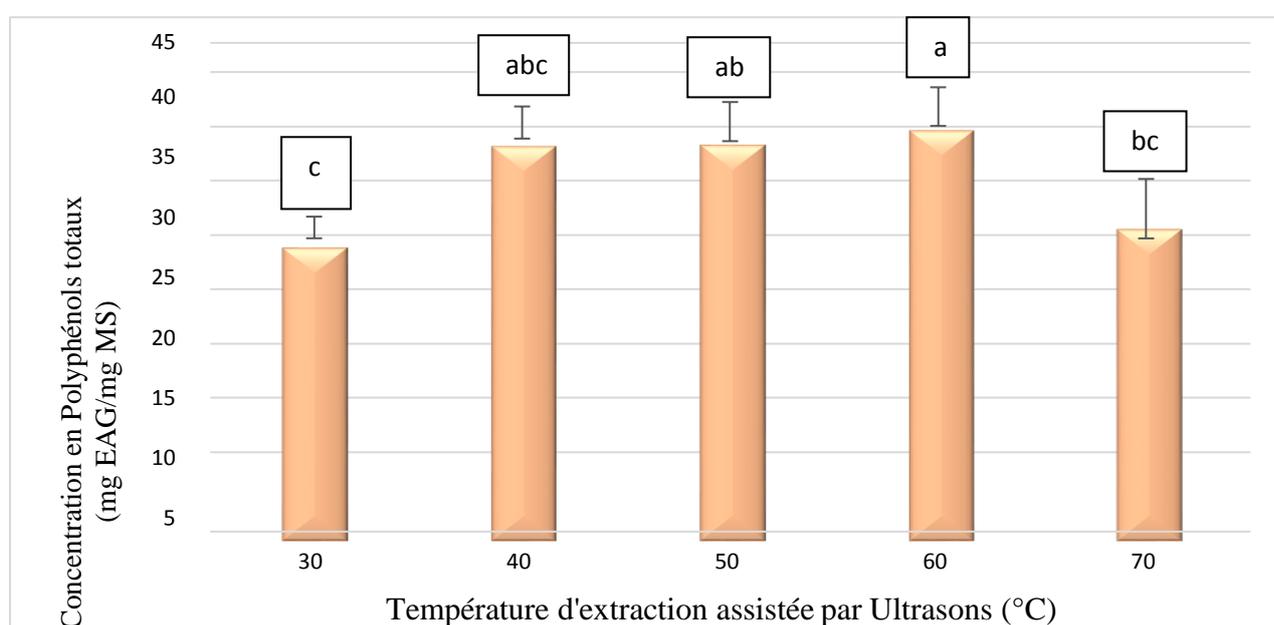


Figure 21: Effet de la température sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes totaux (FT) contenus dans les extraits de la poudre du cladode d'*O. ficus indica* de Bir-Essalem par la méthode d'extraction à l'Ultrasons (EAU). Les valeurs sont des moyennes \pm ET de trois mesures. Les différentes lettres indiquent que les échantillons étaient significativement différents ($p < 0,05$).

Ma et al. (2008) ont observé une réduction du rendement d'extraction des polyphénols à des températures élevées. Cela a également été démontré également par Carrera et al. (2012), lorsque des températures supérieures à 75 °C entraînent une dénaturation, ce qui a potentiellement diminué la teneur en phénols. L'application à des hautes températures implique la limitation et la réduction de l'intensité de la cavitation, à la suite de la diminution de la tension superficielle et de l'augmentation de la pression de vapeur des bulles de cavitation (Chemat et al. 2017 ; Tao et Sun, 2015). De plus, (Angulo-Bejarano et al, 2014) ont rapporté plusieurs niveaux de CPT : 562-905 μ g de EAG/g, 0,57-

2,3 mg EAG/g et 2,7-3,7 g EAG/100g P.S pour la farine de Nopal O.F.I, le Nopal déshydraté et les sous-produits du Nopal, respectivement.

Les extraits obtenus avec différents solvants peuvent se comporter différemment. Selon Allai et al, (2017), la teneur en phénols de l'extrait éthanolique du cladode d'*Opuntia ficus-indica* est de l'ordre de $111,2 \pm 5,8$ mg d'acide gallique dans 1 g d'extrait lyophilisé ; alors que l'extrait à l'acétone a fourni une teneur de $73,1 \pm 2,1$ g d'acide gallique/mg d'extrait de lyophilisat. La nature du solvant utilisé, la partie de la plante, la méthode d'extraction, la situation géographique et le stade de maturation de l'échantillon de cactus au moment de la collecte peuvent conduire à des résultats différents.

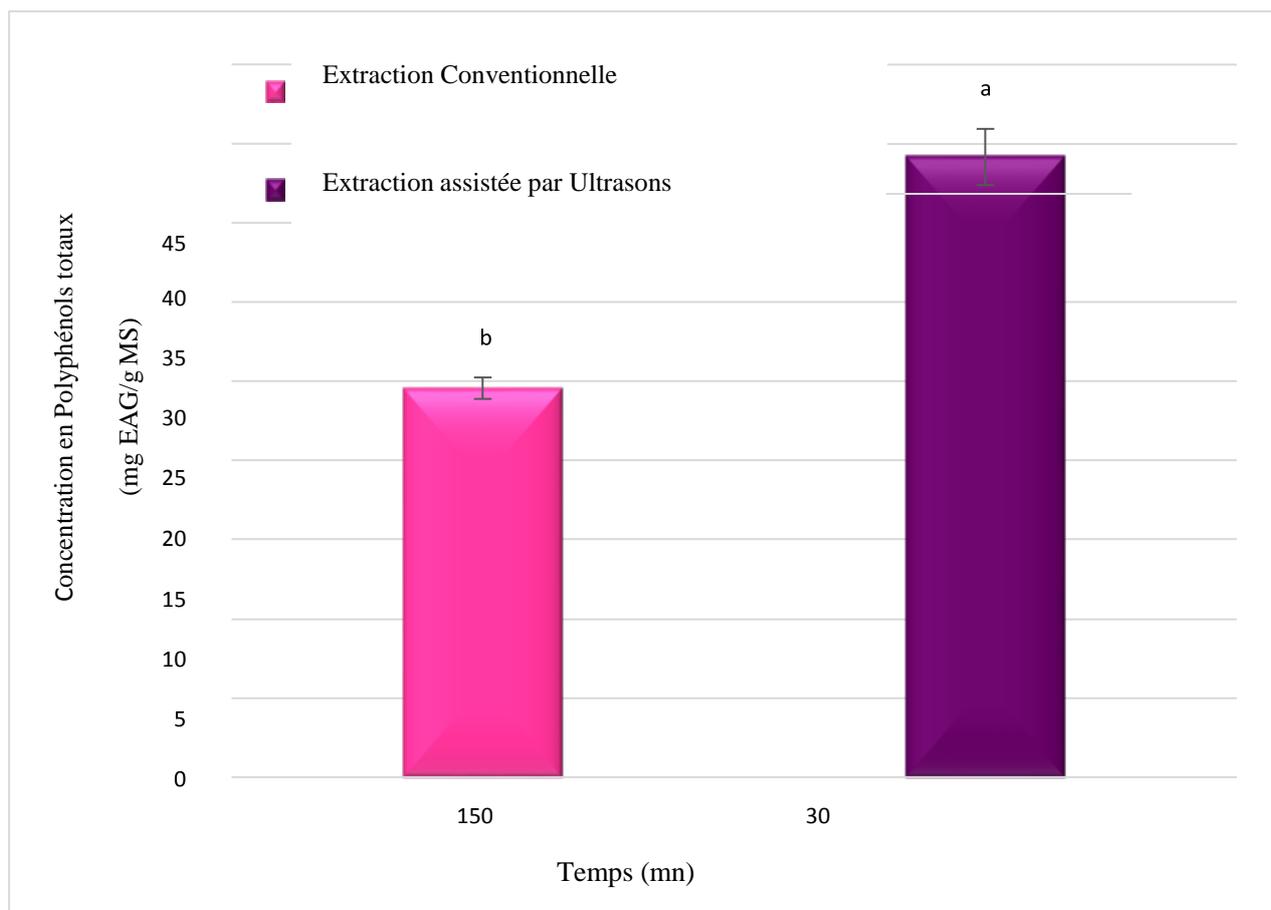
Dans cette étude, les CPT variaient selon les techniques d'extraction (EC et EAU). Pour les deux méthodes d'extraction, l'éthanol (50 %) a été utilisé comme solvant d'extraction. La méthode d'extraction a influencé de manière significative le rendement en contenus phénoliques. Les extractions ont donné $24,88 \pm 2,74$ et $39,15 \pm 1,78$ mg EAG/poids sec pour la EC et EAU, respectivement. L'optimisation des conditions d'extraction ont amélioré le rendement de la teneur en phénols de 57% par rapport à CE. Des résultats similaires ont également été rapportés par d'autres auteurs (Rodriguez-Pérez et al. 2015). De plus, l'EAU a réduit le temps d'extraction par rapport au temps requis pour l'EC. L'EAU a l'avantage de réduire considérablement les temps d'extraction tout en augmentant les niveaux de composés phénoliques extraits (Bourgou et al. 2016). L'EAU a réduit le temps d'extraction des composés phénoliques là où cela nécessitait un dixième de temps par rapport à la macération (Carrera et al. 2012). Cette amélioration était probablement due à la capacité des ondes ultrasonores à rompre les parois cellulaires, ce qui augmente par la suite la pénétration du solvant et accélère la diffusion moléculaire (Torres et al. 2017).

III. Comparaison entre les deux méthodes d'extraction

Dans ce travail, nous avons utilisé deux méthodes d'extraction : Extraction conventionnelle solide-liquide et l'EAU. La différence entre ces deux méthodes, quant aux teneurs en polyphénols totaux obtenues, est illustrée dans la figure 22 ci-après. Les deux méthodes d'extraction utilisant l'éthanol (50%) comme solvant d'extraction du même extrait d'OFI Bir-Essalam ont permis d'obtenir respectivement des taux d'extraction de 24.54 ± 0.68 et 39.14 ± 1.77 mg EAG/g PS après optimisation (concentration du solvant, temps et température).

La Figure 22 montre que la méthode d'extraction influence significativement le rendement en composés phénoliques et que l'EAU améliore le rendement d'extraction en composés phénoliques

de 14.6 % comparée à l'Extraction conventionnelle, comme signalé par Rodriguez et al, (2015).



.Figure 22: Effet des techniques d'extraction sur le temps d'extraction et sur la teneur des composés phénoliques des extraits de cladode d'OFI Bir-Essalam

IV. Détermination des flavonoïdes totaux

Les flavonoïdes constituent un groupe majeur de composés phénoliques (Djeridane et *al.* 2006). Le dosage des flavonoïdes a été réalisé sur des extraits traités aux US pendant 30 min à différentes températures. La température de 60 °C a été considérée comme la meilleure température pour l'extraction des CPT. Cependant, la teneur totale en flavonoïdes (TF) pourrait changer en fonction des changements de température.

L'effet de la température sur la teneur en flavonoïdes est illustré dans la figure 23.

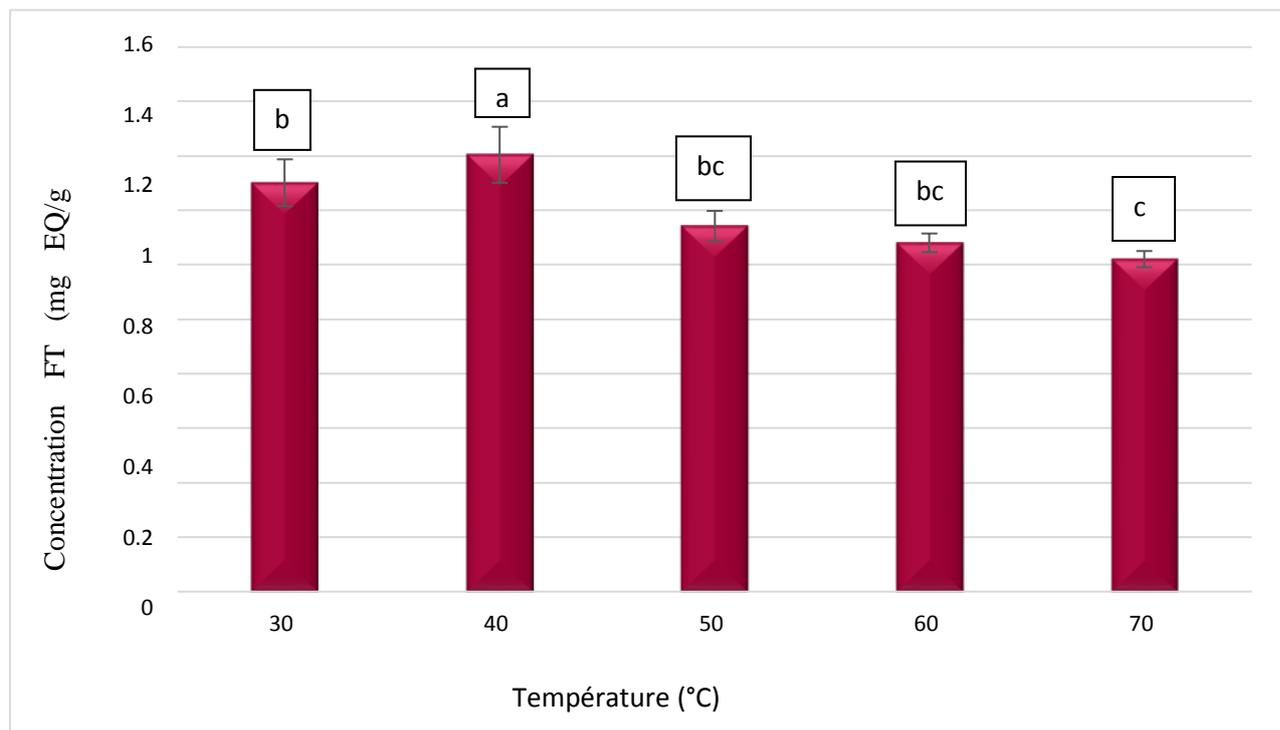


Figure 23: Effet de la température sur la concentration des flavonoïdes totaux des extraits de la cladode d’OFI Bir-Essalam.

Les résultats ont indiqué que la concentration optimale de flavonoïdes ($1,40 \pm 0,08$ mg EQ/g poids sec) a été obtenue à 40 °C. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Tiho et al. (2017), où le rendement d'extraction maximal a été atteint à des températures significativement différentes pour chaque composé (polyphénols et flavonoïdes). De plus, les flavonoïdes étant dénaturés par la chaleur, les valeurs les mieux élevées ont été obtenues avec la température de séchage la plus basse (40 °C) du produit extrait par macération (0,5083 g EQ/l ; 101,66 mg EQ/g), alors que les températures atteignant 80 °C ont été utilisées pour l'extraction du contenu phénolique total (Tiho et al. 2017). Le cladode de l’OFI est très riche en divers polyphénols (Angulo-Bejarano et al. 2014 ; Astello-García et al. 2015), ce qui pourrait expliquer la faible teneur en flavonoïdes obtenue à 40°C, indiquant que les extraits éthanoliques contiennent d'autres composés phénoliques tels que les tanins et les acides phénoliques, qui ont d'autres structures chimiques que celles des flavonoïdes.

Dans un autre rapport, la teneur en flavonoïdes des cladodes O.F.I s'est avérée égale à 5,4 mg de flavonoïdes/g d'échantillon sec d'extrait éthanolique (Allai et al. 2017). Cependant, Medina-Torres et al. (2011) ont obtenu une teneur en flavonoïdes de $23,40 \pm 1,83$ mg/g de cladode. Selon Allai et al. (2017), la teneur en flavonoïdes de l'extrait éthanolique lyophilisé du cladode d'*O. ficus-indica* était

d'environ $27,0 \pm 4,0$ mg d'équivalent rutine/g, alors que dans 1 mg d'extrait acétonique lyophilisé, la teneur était de $22 \pm 2,0$ g d'équivalent rutine. Dans une étude comparative, les cladodes O.F.I et O.M ont montré une faible teneur en flavonoïdes (Astello-García et al, 2015), avec la détermination quantitative des flavonoïdes de $19,4 \mu\text{mol}$ et $16,8 \mu\text{mol EQ/g}$ d'échantillon dans les cladodes OFI et O.M, respectivement. Le site de collecte, les solvants d'extraction et les méthodes réduisent la fiabilité des comparaisons entre les études.

De plus, les conditions dans lesquelles l'extraction est réalisée peuvent affecter la teneur totale en phénols et flavonoïdes, et par conséquent les activités biologiques modifiées par ces métabolites (Lee et al. 2003). Nos résultats étaient cohérents avec ceux de Ma et al. (2008), qui ont observé une diminution des rendements en polyphénols des EAU à des températures plus chaudes pendant une période prolongée. Ceci est probablement dû aux réactions thermiques d'altération ou de polymérisation des phénols eux-mêmes. Ainsi, une augmentation de la température diminue l'efficacité de l'extraction assistée par ultrasons. En présence de ces effets antagonistes, un optimum de la température est respecté. De plus, la stabilité et la synthèse des flavonoïdes et des composés phénoliques dans les plantes pourraient être affectées par plusieurs facteurs environnementaux tels que l'intensité lumineuse, le pH, la température, la nature du solvant, les enzymes, les oxydants, les ions métalliques favorisant la dégradation des flavonoïdes, la concentration en CO_2 , la maturité des feuilles et l'âge de la plante (Hemm et al. 2004).

V. Évaluation de l'activité antioxydante (test ABTS)

L'efficacité réductrice d'une molécule peut être un prédicteur de son activité antioxydante potentielle. Cette activité a été évaluée par le test ABTS dans les différents extraits obtenus à des températures d'extraction différentes (30 à 70 °C). Les résultats sont résumés dans le tableau 20. Selon les résultats, les taux d'inhibition de l'ABTS étaient cohérents, sans différence significative ($p < 0,05$) dans les niveaux d'inhibition et les TEAC.

L'extrait O.F.I de Bir-Essalam a induit pas moins de 77% d'inhibition des radicaux ABTS⁺ dans la plage de température appliquée (30-70 °C). Malgré l'augmentation des températures, l'activité antioxydante est restée stable. L'activité antioxydante était probablement le résultat d'un effet synergique de divers antioxydants comprenant des composés phénoliques.

Dans une étude sur les composés phénoliques du cladode de figuier de Barbarie, l'activité antioxydante était liée à la concentration des caroténoïdes (Jaramillo-flores et al. 2003). Les CPT et les flavonoïdes présents peuvent avoir contribué aux taux d'inhibition obtenus dans la plage de température étudiée. De plus, à 40 °C, l'extrait a présenté le taux d'inhibition le plus élevé ($80,44 \pm$

1,02 %) correspondant à la phase la plus riche en flavonoïdes. Les propriétés antioxydantes d'un produit végétal sont fortement liées à sa teneur en polyphénols (Li et al. 2007).

Tableau 21 : Capacité antioxydante de l'extrait de cladode *Opuntia ficus indica* de Bir-Essalam en tant que taux d'inhibition ABTS (acide 2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)) et équivalent Trolox (TEAC) à diverses plages de températures.

| Température | Taux d'inhibition de l'ABTS* | Capacité antioxydante* |
|-------------|------------------------------|------------------------|
| (°C) | (%) | (mg TEAC/g PS) |
| 30 | 79,26 ± 0,53 | 2,45 ± 0,04 |
| 40 | 80,44 ± 1,02 | 2,45 ± 0,22 |
| 50 | 80,14 ± 1,08 | 2,52 ± 0,08 |
| 60 | 77,30 ± 2,30 | 2,31 ± 0,17 |
| 70 | 79,49 ± 1,79 | 2,47 ± 0,13 |

*Signifie ± écart-type de trois mesures.

Les polyphénols possèdent un grand potentiel antioxydant et agissent comme donneurs d'hydrogène ou d'électrons. Cai et al. (2004) ont rapporté une forte corrélation entre la teneur totale en phénols, estimée par la méthode de Folin-Ciocalteu, et l'activité antioxydante estimée par le test ABTS. Cependant, dans notre cas, les résultats suggèrent une participation d'autres composés tels que les polysaccharides car à 70 °C le taux d'inhibition reste élevé, tandis que les niveaux de CPT et de flavonoïdes sont relativement faibles. Selon Jaramillo-flores et al. (2003), l'extractibilité des caroténoïdes est limitée par le mucilage présent dans les cladodes du figuier de Barbarie. Cela nous a conduits à réaliser des analyses infrarouges des extraits. Une observation intéressante était le degré de corrélation entre la teneur en phénols et l'activité antioxydante, mais ces composés pourraient diffuser différemment dans l'analyse, et la fraction phénolique n'inclue pas nécessairement tous les antioxydants qui pourraient être présents dans l'extrait (Athamena et al. 2010).

La relation entre les antioxydants et l'activité antioxydante d'une plante est difficile à expliquer sur la base d'une seule analyse quantitative, en raison non seulement du niveau d'antioxydants, mais aussi de l'interaction entre eux et avec d'autres constituants (Yoo et al. 2008). Ainsi, la composition

chimique et les structures des composés actifs de l'extrait peuvent moduler l'efficacité de l'activité antioxydante.

VI. Teneur totale en polyphénols des espèces d'*Opuntia spp.* entre les deux régions

Les conditions optimales d'extraction obtenues aux EAU (50% d'éthanol, 30 min de sonication, à 60 °C) pour l'O.F.I de Bir-Essalam ont été appliquées au cladode des espèces étudiées collectées sur les autres sites. Les résultats du dosage des polyphénols totaux sont présentés dans le Tableau 21. Le rendement en CPT le plus élevé a été enregistré pour l'espèce O.F.I de Bir-Essalam, suivie des espèces O.M et O.A. Le rendement en CPT de l'espèce O.F.I de Bir-Essalam était significativement plus élevé que celui de l'espèce O.F.I de Taourirt et Souk-Ahras (Tableau 4). De plus, le rendement en CPT de O.M de Oued-Ghir était significativement plus élevé que celui de la O.M de Souk-Ahras. Aucune différence significative n'a été observée entre les rendements produits par la variété O. MG d'Oued-Ghir et la O.M de Taourirt et Souk-Ahras.

Les niveaux de CPT de l'O.A d'Amizour et de Souk-Ahras n'étaient pas significativement différents. Les valeurs CPT de l'OFI de Bir-Essalam de Bejaia et de l'OM d'Oued-ghir étaient significativement plus élevées que celles des espèces équivalentes de Souk-Ahras. La même espèce provenant de différents sites d'une même région peut avoir une composition phytochimique différente dans le cas de l'O.F.I de Bir-Essalam et de l'O.F.I de Taourirt, tous deux originaires de la région de Bejaia. Par conséquent, pour une espèce d'O.F.I, le site de culture pourrait influencer la teneur en composés phénoliques au sein d'une même région. De plus, le taux en CPT des O.F.I de Bir-Essalam est plus élevé que celui des espèces O.M et O.A, quelle que soit la région de collecte (Tableau 21).

La différence des niveaux de CPT entre les espèces pourrait être attribuée à l'influence de plusieurs facteurs. Des études récentes ont montré que le contenu phénolique est fortement influencé par des facteurs extrinsèques, à savoir la géographie et le climat, les caractéristiques génétiques, le stade de maturation et la période de stockage (Cheurfa et Allem, 2016). L'analyse de la diversité phénotypique d'*Opuntia ficus-indica* en Algérie a montré qu'il existe des variations entre les espèces au niveau des épines et des aréoles qui semblent être une réponse aux variations climatiques (Adli et al, 2017). Cependant, la présence et l'absence d'épines chez différentes espèces affectent le taux de CPT quelle que soit l'origine géographique. Astello-Garcia et al, (2015) ont montré que l'O.F.I contenait plus de composés phénoliques que l'espèce O.M, ce qui est cohérent avec nos résultats, bien que, dans la même étude, l'O.M avait un niveau de polysaccharides plus élevé que l'O.F.I.

Tableau 22 : Teneurs en polyphénols totaux et en flavonoïdes des cladodes de la poudre du cactus, traités par extraction assistée par ultrasons (UAE) à 60 et 40°C, concentration de solvant de 50% et temps d'extraction de 30 min, selon l'espèce et le site de collecte.

| Espèces d' <i>Opuntia</i> Sites | Polyphenols | | Flavonoïdes Totaux* | |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Totaux*(mg GAE/g P.S) | (mg QE/g P.S) | | |
| Température d'extraction (°C) | | | | |
| | | 60 | 60 | 40 |
| <i>O. ficus indica</i> | Bir-Essalam | 39.15 ± 1.78 ^a | 1.25 ± 0.05 ^c | 1.40 ± 0.15 ^f |
| | Taurirt | 30.25 ± 1.52 ^b | 2.34 ± 0.08 ^b | 2.49 ± 0.13 ^b |
| | Souk-Ahras | 30.17 ± 1.26 ^b | 2.88 ± 0.04 ^a | 2.73 ± 0.09 ^a |
| <i>O. megacantha</i> | Oued-ghir | 31.79 ± 2.25 ^b | 2.08 ± 0.12 ^c | 2.28 ± 0.07 ^c |
| | Souk-Ahras | 25.62 ± 3.30 ^c | 1.69 ± 0.03 ^d | 1.64 ± 0.18 ^e |
| <i>O. amycea</i> | Amizour | 18.15 ± 1.35 ^d | 2.31 ± 0.02 ^b | 2.05 ± 0.06 ^d |
| | Souk-Ahras | 19.74 ± 1.59 ^d | 1.68 ± 0.07 ^d | 1.34 ± 0.01 ^f |

VII. Comparaison des teneurs en Flavonoïdes totaux entre les espèces du genre *Opuntia* et entre région de collecte

Le dosage des flavonoïdes a été effectué sur les mêmes extraits obtenus après EAU avec les mêmes conditions citées pour le dosage de CPT optimisées (50% d'éthanol, 30 min de sonication). Le rendement en FT a été contrôlé à deux températures (40 et 60 °C). Les résultats ont montré que l'OFI de Souk-Ahras présentait la teneur en FT la plus élevée parmi les espèces et les sites étudiés. Aucune différence significative n'a été observée entre l'O.M et l'O.A de Souk-Ahras. La plus faible teneur en TF a été notée pour l'OFI de Bir- Essalam. L'analyse de la teneur en FT, réalisée à 40°C a montré que l'O.F.I de Souk-Ahras contenait la teneur significativement la plus élevée en flavonoïdes, suivie par l'O.F.I de Taourirt, l'O.M de Oued- Ghir et l'O.A d'Amizour.

Astello-Garcia et al. (2015) ont signalé que l'O.F.I dépassait légèrement l'O.M en termes de teneur en flavonoïdes. La réduction de la température d'extraction a légèrement affecté les rendements en FT des OFI de Souk-Ahras. Cet effet était plus prononcé pour l'OA des deux régions étudiées. Cependant, la température d'extraction plus basse a affecté positivement les valeurs de FT de l'espèce Bejaia. La teneur en FT était plus élevée dans l'O.F.I de Bir-Essalam et de Taourirt et dans l'O.M d'Oued-Ghir. Cela pourrait signifier que les espèces de Souk- Ahras semblaient présenter une

meilleure adaptation à la chaleur, survenant dans un environnement semi-aride. Par conséquent, il est important de contrôler le paramètre de la température pour assurer un processus d'extraction efficace. En effet, les composés phénoliques sont généralement classés comme des composants fonctionnels typiques de la paroi cellulaire des cellules végétales, et ils jouent un rôle clé dans les mécanismes de défense contre la plupart des stress abiotiques, y compris l'irradiation UV, le stress hydrique, et les températures plus élevées (Chinnici et al. 2004 ; Cheynier et al. 2013).

Al-Huqail et al. (2020) ont observé une augmentation des concentrations totales de composés phénoliques et de flavonoïdes en réponse au stress lié au déficit hydrique dans les feuilles de basilic ; les flavonoïdes ont également augmenté dans des conditions de température climatique élevée. Pinheiro et al. (2021) ont signalé une augmentation de la teneur en flavonoïdes dans les génotypes de sorgho soumis à un stress hydrique. De plus, Mayer et al. (2021) ont étudié le profil métabolique des tissus épidermiques et mésophylliens d'*Opuntia ficus indica*. Ils ont rapporté que les flavonoïdes : kaempferol, naringenin, et quercetin-3-O-glucoside étaient plus élevés dans les plantes stressées par le manque d'eau. Le manque d'eau induit la génération d'espèces réactives à l'oxygène, qui causent des dommages oxydatifs à la plante. Les plantes ont plusieurs méthodes d'adaptations pour minimiser ces dommages, comme un ensemble d'antioxydants qui limitent la propagation de la chaîne des processus oxydatifs (Sánchez-Rodríguez et al, 2011). Ainsi, les composés phénoliques constituent l'un des principaux groupes d'antioxydants capables de détoxifier les radicaux libres (Ksouri et al. 2007). De plus, les plantes exposées à des conditions extrêmes de choc thermique, pourraient activer certains mécanismes adaptatifs et protecteurs (Ghorbanli et al. 2013). Les mécanismes d'acclimatation de *Phillyrea latifolia* à un rayonnement solaire élevé ont été étudiés et la sécrétion de flavonoïdes par les trichomes glandulaires s'est avérée être un élément central du mécanisme d'acclimatation à l'excès de la lumière (Tattini et al.2000).

VIII. Activités antioxydantes parmi les espèces d'*Opuntia* des deux régions

Le test ABTS a été réalisé sur des échantillons d'O.F.I extraits avec la méthode EAU dans des conditions optimisées de concentration d'éthanol de 50%, de température et de temps de sonication de 60 °C et de 30 min, respectivement. Selon le (tableau 22), l'espèce O.M de Oued-Ghir a montré l'activité antioxydante significativement la plus élevée, suivie par l'OFI de Taourirt et la O.M de Souk-Ahras, l'OFI de Souk-Ahras et de Bir-Essalam. L'O.A de Souk-Ahras et d'Amizour ont exprimés des valeurs d'inhibition ABTS les plus faibles. Ainsi, l'O.M et l'O.F.I ont montré les valeurs les plus élevées contrairement aux espèces O.A que ce soit dans la région de Bejaia ou de Souk-Ahras.

Tableau 23 : Capacités antioxydantes des extraits de cladodes de cactus en tant que taux d'inhibition ABTS (acide 2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) et équivalent Trolox (TEAC).

| <i>Opuntia spp.</i> | Sites | Taux d'Inhibition ABTS*(%) | Capacité antioxydante* (mg TEAC/g DW) |
|------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|
| <i>O. ficus indica</i> | Bir-Essalam | 77.30 ± 2.30^b | 2.31 ± 0.17^c |
| | Taourirt | 80.85 ± 3.37^{a,b} | 2.57 ± 0.15^{a,b} |
| | Souk-Ahras | 79.67 ± 0.54^b | 2.51 ± 0.04^{b,c} |
| <i>O. megacantha</i> | Oued-ghir | 83.51 ± 0.94^a | 2.76 ± 0.07^a |
| | Souk-Ahras | 80.32 ± 0.35^{a,b} | 2.53 ± 0.03^b |
| <i>O. amyclae</i> | Amizour | 54.71 ± 2.78^d | 0.67 ± 0.11^e |
| | Souk-Ahras | 73.13 ± 1.90^c | 2.01 ± 0.14^d |

* Moyennes ± E.T. de trois mesures

Dans une étude comparative de cinq espèces d'*Opuntia*, entre autre l'O.F.I et l'O.M ont montré des capacités antioxydantes similaires (Astello-García et al. 2015). La même tendance pour les activités antioxydantes des espèces O.F.I et O.M de la région de Souk-Ahras a pu être observée. Cette tendance a été observée dans une moindre mesure pour les écotypes de la région de Bejaia (tableau 22). Pour les espèces O.A, le taux d'inhibition était plus élevé pour les écotypes de Souk-Ahras, que pour celles d'Amizour, ce qui est cohérent avec le résultat du CPT des espèces OA (Tableau 22). De faibles niveaux de CPT pourraient mieux refléter les taux d'inhibition et la présence d'autres antioxydants, qui pourraient interférer avec l'activité antioxydante. Les valeurs de CPT plus élevées des espèces O.F.I et O.M pourraient expliquer des taux d'inhibition plus élevés que ceux de l'espèce O.A. Les valeurs TEAC des extraits étaient cohérentes avec les taux d'inhibition.

IX. Analyse infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Les spectres FTIR générés sont illustrés à la figure 25. Les données des spectres FTIR varient entre 500 et 4000 cm⁻¹ des poudres de cladodes analysées. Les espèces *Opuntia* de Bejaia et Souk-Ahras ont été utilisées pour mieux comprendre la nature de leurs groupes fonctionnels. Les spectres montrent des bandes larges et fortes de l'ordre de 3647-3000/cm, ce qui est dû à la présence de groupes OH, caractéristiques des polyphénols et des glucides. Les bandes larges et convergentes autour de 3600-3200 /cm ont souligné le chevauchement des vibrations d'étirement des hydroxyles et des amines (Barka et al. 2013a). Les bandes d'absorption à 2921 et 2843 / cm étaient dues respectivement

à la vibration d'étirement asymétrique du CH₂ et à la vibration d'étirement symétrique du CH₃ des acides aliphatiques (Farinella et al. 2007).

La bande d'absorption autour de 1606 cm⁻¹ peut être due à la vibration d'allongement de la liaison C=C des acides aromatiques. La bande d'absorption à 1614 cm⁻¹ pourrait être due à la vibration d'allongement de la liaison C=O des cétones. Les pics d'environ 1630 cm⁻¹ se rapportent à l'étirement C=C référé aux liaisons aromatiques C=C et aux étirements asymétriques COO⁻ (Farinella et al. 2007). Le pic à 1432 cm⁻¹ est celui du tronçon phénolique -OH (Barka et al. 2013b).

Les pics observés à 1370 cm⁻¹ reflètent les vibrations d'étirement des groupes carboxyliques ioniques symétriques ou asymétriques (-COOH) des pectines (Farinella et al. 2007).

Les pics observés à 1379 et à 1313 cm⁻¹ (figure 24) prouvent la réapparition des groupements OH des phénols et/ou la présence des groupements OH de l'alcool tertiaire. Le pic à 1382 cm⁻¹ pourrait être dû à la présence du groupe CH₃ des alcanes (déformation dans le plan de symétrie). Les pics à 1309 cm⁻¹ pourraient être dus à la présence de composés azotés de la classe des composés nitro-aromatiques.

L'espèce Bir-Essalam O.F.I avait des bandes d'absorption intenses et plus larges, notamment dans l'intervalle de 1000 à 1500 cm⁻¹ correspondant éventuellement aux polyphénols ; suivi de Taourirt OFI. Cependant, tous les spectres ont clairement montré la nature phénolique de toutes les poudres analysées. Ces résultats suggèrent qu'il existe une large gamme de groupes fonctionnels (aldéhydes, carboxyle, hydroxyle, cétones, phosphate, sulfate, etc.) constituant les éléments clés des propriétés chimiques de diverses biomolécules dérivées des cladodes.

Cela pourrait peut-être être à l'origine de certaines incohérences dans le contenu en CPT d'*Opuntia spp* et leurs activités antioxydantes pertinentes.

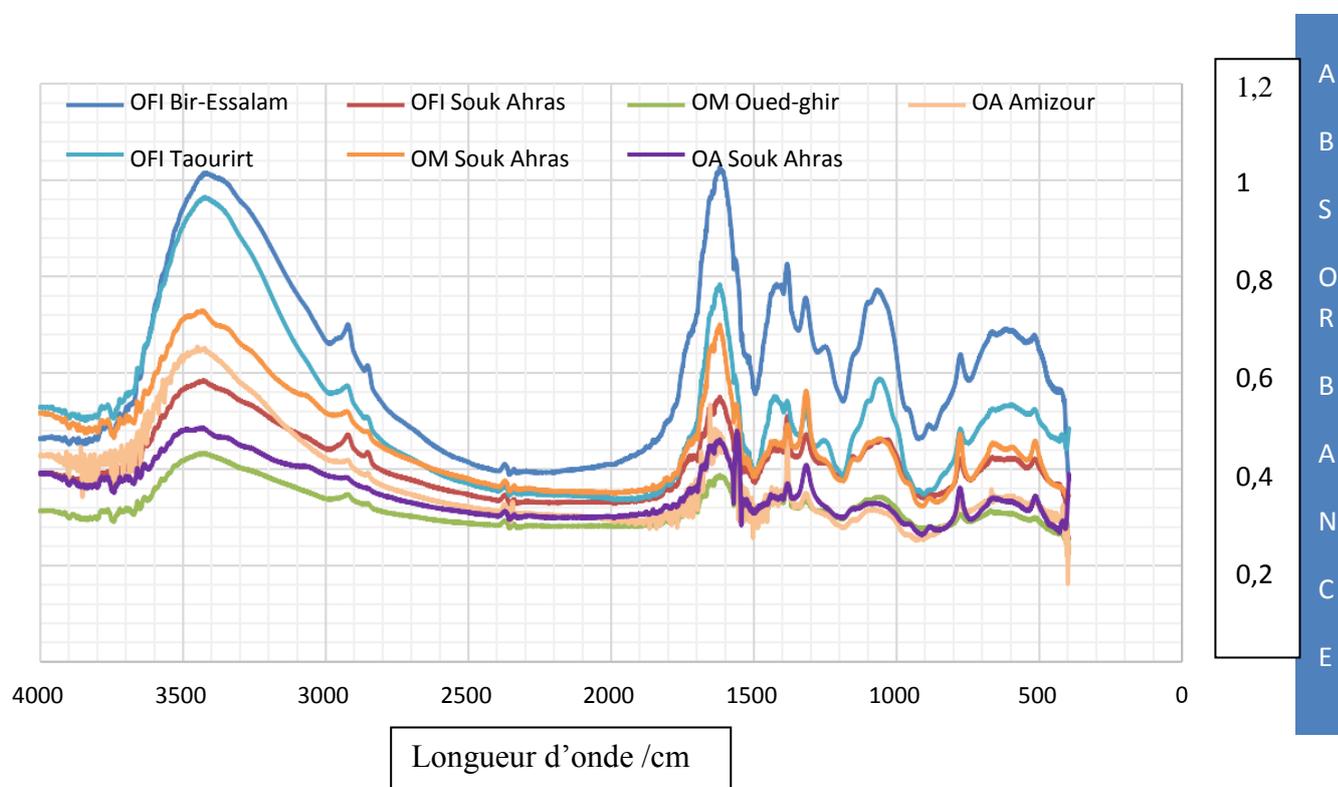


Figure 24: Analyse des spectres infrarouges de la poudre de cladodes des espèces de figuier de Barbarie étudiées (de Béjaïa : *Opuntia ficus indica* de Bir-Essalam (OFI), OFI de Taourirt, *Opuntia amyclae* (OA) d'Amizour, et *Opuntia megacantha* d'Oued-ghir (OM), de Souk-Ahras : OFI (Sidi-Fredj), OA (Merhana 1) et OM (Merhana 2).

Conclusion Générale
Et perspectives

Conclusion Générale

Dans le cadre de la valorisation du figuier de Barbarie d'Algérie et de ses produits et sous-produits des espèces du genre *Opuntia spp* de deux régions ont été identifiées, reste aussi à confirmer l'identification par des analyses du polymorphisme de l'ADN des espèces étudiées en utilisant des marqueurs biomoléculaires spécifiques au genre *Opuntia*.

L'étude morphologique et phénotypique a révélé l'existence de trois espèces : *Opuntia ficus-indica* (O.F.I), *Opuntia megacantha* (O.M) et *Opuntia amyclaea* (O.A). Ensuite, nous avons étudié les conditions optimales pour le meilleur rendement en composés phénoliques totaux (CPT). L'utilisation de solvant mixte (50 % eau/éthanol, v/v) a amélioré le rendement d'extraction des CPT.

Afin d'augmenter le rendement d'extraction, un procédé d'extraction innovant et respectueux de l'environnement a été utilisé. L'extraction assistée par ultrasons (EAU) était meilleure que l'extraction conventionnelle (CE) pour la récupération du CPT, dans laquelle le meilleur rendement extrait ($39,15 \pm 1,78$ mg GAE/g MS) a été obtenu avec les conditions optimales en 30 min. En revanche, l'EC n'a donné que $24,88 \pm 2,74$ mg de GAE/g P.S après 2 h 50 min d'extraction. Le processus était plus rapide et a entraîné une amélioration de 57,3 % du CPT extrait. La variation de la température d'extraction a révélé qu'à 60°C le rendement en CPT était égal à la valeur optimale pour le rendement en CPT le plus élevé. La récupération de la teneur en FT a montré que la température plus basse (40 °C) a donné lieu au rendement le plus élevé en FT pour les espèces de Bejaia, tandis que les rendements les plus élevés en FT ont été récupérés à 60 °C pour les espèces de Souk-Ahras.

En comparant les activités CPT, FT et activités antioxydantes des espèces de figuier de Barbarie étudiées dans les mêmes conditions optimales, nous avons conclu que l'O.F.I de Bir-Essalam présentait le rendement en CPT le plus élevé, suivi par l'O.F.I de Taourirt et Souk-Ahras, puis l'O.M, et enfin O.A. Globalement, nous avons observé un ordre décroissant de rendement en CPT (O.F.I, O.M, O.A) quelle que soit la région ou le site.

Cependant, au sein de la même région de Bejaia et pour la même espèce (O.F.I), Bir-Essalam et Taourirt ont montré des rendements en CPT assez conséquents. Ainsi, le site pourrait influencer la composition des cladodes de figuier de Barbarie pour une seule espèce même si Béjaïa est une région humide, tout en notant que la région de Taourirt est plus chaude que celle de Bir-Essalam.

Conclusion Générale

Pour l'activité antioxydante, qui a été réalisée grâce au test ABTS, que ce soit à Bejaia ou à Souk-Ahras, les espèces O.M et O.F.I présentaient les activités les plus élevées, ce qui était l'inverse de l'O.A qui avait l'activité antioxydante la plus faible. Ceci est presque cohérent avec leurs valeurs respectives de CPT.

Les niveaux élevés de composés bioactifs observés dans les poudres par analyse spectrale infrarouge étaient certainement le résultat de l'incohérence entre les teneurs en CPT récupérées et les activités antioxydantes correspondantes. Les analyses de spectres infrarouges ont montré la composition variée des cladodes de figuier de Barbarie avec de multiples groupements fonctionnels, ce qui en fait une source attrayante de métabolites secondaires qui pourraient être utilisés comme additif potentiel dans les industries alimentaires et nutraceutiques.

Dans l'ensemble, ces résultats illustrent l'importance des EAU en tant qu'outil innovant pour l'extraction des composés phytochimiques du cladode de figuier de Barbarie. D'autres facteurs et conditions qui influencent l'optimisation de l'extraction CPT ont nécessité une étude plus approfondie en tenant compte d'autres facteurs tels que la méthodologie de la surface de réponse, le PH, la fréquence des ultrasons, ainsi que les facteurs écologiques susceptibles d'améliorer l'efficacité de l'extraction.

Les données révèlent des teneurs élevées en certains composés phytochimiques qui peuvent donner une valeur ajoutée aux fruits de cactus et cladodes c'est à dire les principales parties comestibles du figuier de barbarie. Il y a encore un manque d'informations sur la composition et les applications potentielles des fruits, de ses composants, et les sous-produits de la plupart des espèces de cactus, en particulier *O. xocnostle*. Afin d'encourager son exploitation à des fins alimentaires et santé. Les procédés utilisés pour l'exploitation des sous-produits de la figue de Barbarie pour l'obtention de mucilage, d'huile de graines et de fibres alimentaires doivent être améliorés pour fournir des produits compétitifs sur le marché. La stabilité des composés phytochimiques après transformation des aliments ou l'extraction doit être étudiée de près. De même pour effets bioactifs in vivo. Ce genre d'études, en particulier celles in vivo sur les humains, sont coûteux, longs et nécessitent beaucoup de bénévoles, mais sont essentiels pour confirmer l'activité réelle des composés. Un autre aspect à élucider, sont les effets physiologiques et phytochimiques extraits par des méthodes chimiques des fruits ou légumes.

Perspectives de recherche :

- Recherche de marqueurs biomoléculaires spécifiques au genre *Opuntia* pour affiner l'identification des espèces d'*Opuntia* surtout dans les analyses du polymorphisme de l'ADN.
- Création des variétés hybrides ou « Idéotypes » Résistants aux maladies (cochenille), Nouvelles variétés spéciales fruits (calibre, peu de grains, couleur, taux de Brix, caractères organoleptiques...etc), pour assurer la diversification économique des produits agricoles et éventuellement y est envisager exportation.
- Les analyses de spectres infrarouges ont montré la composition variée des Biomolécules actives des cladodes de figuier de Barbarie avec de multiples groupements fonctionnels, ce qui en fait une source attrayante de métabolites secondaires à utiliser comme suppléments à des produits agro-alimentaire, ce qui constituera certainement des aliments fonctionnels à haute valeur nutritive.
- Un autre aspect à élucider, sont les effets physiologiques et phytochimiques extraits par des méthodes chimiques des fruits ou légumes.
- Des recherches sont nécessaires pour augmenter les connaissances courantes sur le potentiel nutraceutique et fonctionnel de différents produits et sous-produits du figuier de barbarie dans l'Industrie Agro-alimentaire.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1 **Achat S. 2013**: Polyphénols de l'alimentation : Extraction, pouvoir antioxydant et interaction avec des ions métalliques. Thèse de Doctorat en chimie. Université de conse-pascalpaoli, 211p.
- 2 **Adjeroud, N., Dahmoune, F., Merzouk, B., Leclerc, J.-P., Madani, K., 2015**. Amélioration du traitement par électrocoagulation-électroflottation des effluents par ajout de jus d'*Opuntia ficus indica* comme tampon. Sep. Purif. Technol. 144, 168-176. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.02.018>
- 3 **Adjeroud, N., Elabbas, S., Merzouk, B., Hammoui, Y., Felkai-Haddache, L., Remini, H., Leclerc, J.-P., Madani, K., 2018**: Effet du mucilage d'*Opuntia de ficus indica* sur l'élimination du cuivre de l'eau par la technique d'électrocoagulation-électroflottation. J. Electroanal.Chem.811,26-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.12.081>
- 4 **Adjeroud-Abdellatif, N., Hammoui, Y., Boudria, A., Agab, S., Choulak, F., Leclerc, J.-P., Merzouk, B., Madani, K., 2020**: Effet d'un extrait coagulant naturel du cladode d'*Opuntia ficus-indica* sur le procédé de traitement d'eau par électrocoagulation-électroflottation. Int. J. Environ. Anal. Chem. 1–25. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1804889>
- 5 **Adli, B., Boutekrabb, A., Touati, M., Bakria, T., Touati, A., Bezini, E., 2017** : Diversité phénotypique d'*Opuntia ficus indica* (L.) MILL. dans la steppe algérienne. J. Bot sud-africain. 109, 66-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.12.024>
- 6 **Agüero, J., Aguirre, J., Hernández, H., 2005**. Notes systématiques et description détaillée d'*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactacées). Agrociencia 39, 395-408.
- 7 **Al-Huqail, A., El-Dakak, RM, Sanad, MN, Badr, RH, Ibrahim, MM, Soliman, D., Khan, F., 2020**: Effets de la température climatique et du stress hydrique sur la croissance des plantes et l'accumulation de composés d'antioxydants du basilic doux (*Ocimum basilicum* L.) légume à feuilles. Scientifica (Le Caire). 2020, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2020/3808909>
- 8 **Allai, L., Karym, EM, El Amiri, B., Nasser, B., Essamad, A., Terzioğlu, P., Ertas, A., Öztürk, M., 2017**. Évaluation de l'activité antioxydante et de la composition phénolique de Cladodes d'*Opuntia ficus-Indica* collectés dans la région marocaine de Settat. Eurasienne J. Anal. Chem. 12, 105–117. <https://doi.org/10.12973/ejac.2017.00148a>

Références Bibliographiques

- 9 **Anderson, 2001**: The cactus family. PortlandArba M (2006). ‘Dellahia’ a cactus pear cultivar from the Mediterranean Coast of Northern Morocco. In: Eds. C. Mondragon-Jacobo. Proc. Vth International Congress on Cactus pear and cochineal. **Acta Hort.** 728: 37-41.
- 10 **Andres A. and Donovanb S.M. Kuhlenschmidtc M.S. 2009**. Soy isoflavones and virus infections. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 20 :563-569.
- 11 **Angulo-Bejarano, PI, Martínez-Cruz, O., Paredes-Lopez, O., 2014**. Contenu phytochimique Potentiel nutraceutique et applications biotechnologiques d'une ancienne plante mexicaine : le nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Cour. Nutr. Science alimentaire*. 10, 196-217. <https://doi.org/10.2174/157340131003140828121015>
- 12 **Anthoni J, 2007** : Synthèse enzymatique, modélisation moléculaire et caractérisation d'oligomères de flavonoïdes. Thèse de Doctorat INPL - Institut National Polytechnique de Lorraine France.
- 13 **Arba M, 2009** : Le cactus *Opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. Symposium international agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED). Rabat, Maroc, 215- 223.
- 14 **Archibald, E.E.A. 1935**: The development of the ovule and seed of jointed cactus (*Opuntia aurantiaca* Lindley). *S. Afr. J. Sci.*, 36: 195–211.
- 15 **Arnhold, Campos, Landsmann, Zárate; 2002**: biotechnological studies on *opuntia ficus-indica* (l.) mill. *ISHS Acta Horticulturae* 581: IV International Congress on Cactus Pear and Cochineal. DOI: 10.17660/ActaHortic.2002.581.13
- 16 **Aron P.M. and Kenedy J. 2008**: "Flavan-3-ols: nature, occurrence and biological activity", *Mol. Nurtr Food Res*, Vol. 52 n°1. 79-104.
- 17 **Arreola Nava, H., Portillo Martinez, L., 1994**. Los nopales hospederos de la cochinilla fina o cultivada (*Dactylopius coccus* Costa). *Cactáceas y succulentas Mex.* 39, 90-95.
- 18 **Askar, A., et El-Samahy, S.K. 1981**: Chemical composition of prickly pear fruits. *Deutsche-Lebensmittel-Rundschau* (Germany, F.R.). (1981). v. 77(8) p. 279-281.
- 19 **Astello-García, MG, Ilse, C., Nair, V., del SocorroSantos-Díaz, M., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros- Zevallos, L., Barba de la Rosa, AP, 2015** : Composition chimique et profil des composés phénoliques des cladodes d'*Opuntia* spp. cultivars avec un gradient de domestication différent. *J. Aliments Compos. Anal.* 43, 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>

Références Bibliographiques

- 17 **Atalah E., PAK N., 1997** : Aumente el consumo de verduras, frutas y legumbres. In: Castillo, C., Uauy, R., Atalah, E. (ed.). Guías de alimentación para la población chilena, 79-89, Santiago, Chile.
- 18 **Athamena, S., Chalghem, I., Kassah-Laouar, A., Laroui, S., Khebri, S., 2010.** Activité anti-oxydante et antimicrobienne d'extraits de *Cuminum cyminum L.* Leban. Sci. J. 11, 69-81.
- 19 **Ayadi, Chérif, Guyot, Sotin, Yeddes; 2013** : Comparative Study of Antioxidant Power, Polyphenols, Flavonoids and Betacyanins of the Peel and Pulp of Three Tunisian *Opuntia* Forms, *Antioxidants* **2013**, **2(2)**, **37-51**;
<https://doi.org/10.3390/antiox2020037>
- 20 **Aybaster Ö., Isik E., Sahin, S., Demir C., 2013.** Optimization of ultrasonic-assisted extraction of antioxidant compounds from blackberry leaves using response surface methodology. *Ind. Crops Prod.* 44, 558–565.
- 21 **Azeredo, H.M.C. 2009**: Betalains: properties, sources, applications, and stability: a review, *International Journal of Food Science and Technology*, (12):2365–2376).
- 22 **Barbera G. Inglese, P. 1993.** La coltura del ficodindia. Bologna, Italy, Ed agricole
- 23 **Barbera G., Inglese P. et La Mantia, T. 1994**: Seed content and fruit characteristics in cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Miller). *Sci. Hortic.*, 58: 161–165.
- 24 **Barbera G., Inglese P, La Mantia; 2005**: Research strategies for the improvement of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit quality and production. *Journal of Arid Environment*, Volume 29, Issue 4, April 1995, Pages 455-468.
- 25 **Bárcenas RT, Yesson C and Hawkins JA, 2011.** Molecular systematics of the *Cactaceae*. *Cladistics*, 27 (5): 470–489, <http://doi.org/10.1111/j.1096-0031.2011.00350>
- 26 **Barka, N., Abdennouri, M., El Makhfouk, M., Qourzal, S., 2013a**: Caractéristiques de biosorption du cadmium et du plomb sur des cladodes de cactus séchés écologiques (*Opuntia ficus indica*). *J. Environ. Chem. Ing.* 1, 144-149.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.008>
- 27 **Barka, N., Ouzaouit, K., Abdennouri, M., El Makhfouk, M., 2013b**: Les cladodes de figues de Barbarie séchées (*Opuntia ficus indica*) en tant que biosorbant économique et respectueux de l'environnement pour l'élimination des colorants des solutions aqueuses. *J. Taiwan Inst. Chem. Ing.* 44, 52-60.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.09.007>

Références Bibliographiques

- 28 Barros, Buelga, Celestino, Ferreira, Morales, Moreno; 2014:** Exploring xoconostle by-products as sources of bioactive compounds. Food Research International Volume 65, Part C, November 2014, Pages 437-444.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.067>
- 29 Barthlott W, Hunt DR 1993:** Cactaceae. pp. 161–196 in The families and genera of vascular plants, eds. K. Kubitzki, J. G. Rohwer, and V. Bittrich. Berlin: Springer-Verlag.
- 30 Benbrouk C.M. (2005) :** Accroître la teneur en antioxydant des aliments grâce à l'agriculture et à la transformation alimentaire biologique. The Organic Center : 1-87.
- 31 Berger, Munoz, Sudzuki 1993 :** La culture du thon (figue de Barbarie). 1a. édition. Santiago, Chili : PRODAG.
- 32 Bouaouine O., Bourven1 I., Khalil F., Baudu M. 2018.** Identification of functional groups of *Opuntia ficus-indica* involved in coagulation process after its active part extraction. Environmental Science and Pollution Research, (25) 111-119.
- 33 Bourgou, S., Beji Serairi, R., Medini, F., Ksouri, R., 2016 :** Effet du solvant et de la méthode d'extraction sur la teneur en composés phénoliques et les potentialités antioxydantes d'*Euphorbia helioscopia*. J. nouveau Sci. Agric. Biotechnologie. 28, 1650-1655.
- 34 Bravo H. 1978. :** Las cactáceas de México. UNAM. Vol. 1. 643 p.
- 35 Bravo H, Merojada S. H., 1991.** Las Cactáceas de México, Première édition. éd. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexique.
- 36 Brinker, F., 2009:** Prickly Pear as Food and Medicine. J. Régime. Suppl. 6, 362-376.
- 37 Britton, N.L.,N. Rose; 1923:** The *Cactaceae*, Carnegie Institute, Washington, 191
- 38 Bruneton J. 1999.** Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales. 3ème édition, Tech & Doc, Lavoisier. pp. 1120.
- 39 Bruneton J. 2009 :** Pharmacognosie : phytochimie, plantes médicinales. 4ème édition, Tech et Doc, Paris. pp.262.
- 40 Bruneton J. 2015 :** Pharmacognosie : Phytochimie, Plantes médicinales. 2ème édition, Tech. et Doc, Lavoisier. Paris. pp. 288.
- 41 Brutsch, M.O & Zimmermann, H.G. 1993:** The prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, *Cactaceae*) in South Africa: Utilization of the naturalized weed, and of the cultivated plants. Econ. Bot., 47(2): 154–156.
- 42 Buxbaum, F. 1955.** The phylogenetic division of the subfamily *cereoideae*, *cactaceae*. Madrono, 14(6): 177–206.

Références Bibliographiques

- 43 Butera D., Tesoriere L., Di Gaudio F., Bongiorno A., Allegra M., Pintaudi A.M., KOHEN R., Livrea, M.A , 2002:** Antioxidant activities of Sicilian prickly pear (*Opuntia ficus indica*) fruit extracts and reducing properties of its betalains: Betanin and indicaxanthin. *J. Agric. and Food Chem.*, 50, 6895-6901.
- 44 Cai, Y., Luo, Q., Sun, M., Corke, H., 2004.** Activité antioxydante et composés phénoliques de 112 plantes médicinales traditionnelles chinoises associées à des anticancéreux. *Science de la vie.* 74, 2157-2184.
<https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.09.047>
- 45 Callen, EO, 1965.** Habitudes alimentaires de certains Indiens mexicains précolombiens. *Écon. Bot.* 19, 335-343.
- 46 Callen, EO, 1967 :** Analyse des coprolithes de Tihuan, dans *La Préhistoire du Tehuacan*
- 47 Carrera, C., Ruiz-Rodríguez, A., Palma, M., Barroso, CG, 2012.** Extraction assistée par ultrasons de composés phénoliques à partir de raisins. *Anal. Chim. Actes 732*, 100-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aca.2011.11.032>.
- 48 Caruso M., Currò S., Las Casas G., La Malfa S. et Gentile A., 2010 :** Microsatellite markers help to assess genetic diversity among *Opuntia ficus indica* cultivated genotypes and their relation with related species, *Springer: Plant Systematics and Evolution* volume 290, pages 85–97 (2010) , DOI: 10.1007/s00606-010-0351-9
- 49 Castellanos et Yahia 2008:** Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (14):5758–5764.
- 50 Casp, A. & Abril, J. 1999.** *Procesos de conservación d'alimentos.* Madrid, Mundi-Prensa.
- 51 Castaneda-ovando A. Pacheco-Hernandez M.L. Elena Paez- Hernandez M.E. Rodriguez Castellanos-Santiago, E., and Yahia, E.M. 2008:** Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (14):5758–5764.
- 52 Cejudo-Bastanté, M.J., Chaalal, M., Louaileche, H., Parrado, J., and Heredia, F.J. 2014:** Betalain profile, phenolic content, and color characterization of different parts and varieties of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, (33):8491–8499.

Références Bibliographiques

- 53 Chabrier J-Y. 2010 :** Plants Médicinales et formes d'utilisation en Phytothérapie. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy1. Faculté de pharmacie. 168p
- 54 Chemat F. 2011.** Eco-extraction du végétal procédés innovants et solvants alternatifs. Dunod, Paris.
- 55 Chemat F., Zill-e-Huma H., Khan MK. 2011:** Ultrasons, Sonochem. 18, 813-835
- 56 Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M., 2017 :** Extraction assistée par ultrasons d'aliments et de produits naturels. Mécanismes, techniques, combinaisons, protocoles et applications. Une critique. Ultrason. Sonochem. 34, 540-560.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- 57 Chemat, F., Vian, MA, Cravotto, G., 2012 :** Extraction verte de produits naturels : Concept et principes. Int. J. Mol. Sci. 13, 8615-8627.
<https://doi.org/10.3390/ijms13078615>.
- 58 Chemat S., Lagha A., Ait Amar H., Bartels PV., Chemat F. 2004.** Comparaison of conventional and ultrasound-assisted extraction of carvone and limonene from carway seed. Flavour and Fragrance journal. 19 : 188-195. <https://doi.org/10.1002/ffj.1339>.
- 59 Chessa I, Erre P, Barbato M, Ochoa J and Nieddu G 2013:** Polymorphic microsatellite DNA markers in *Opuntia* spp. collections. Acta Hort. num. 995: 35-42.
- 60 Cheurfa, M., Allem, R., 2016.** Évaluation de l'activité anti-oxydante de différents extraits des feuilles d'*Aloysia triphylla* (L'Hérit.) d'Algérie in vitro. Phytothérapie 14, 181-187. <https://doi.org/10.1007/s10298-015-0969-4>
- 61 Cheynier, V., Comte, G., Davies, KM, Lattanzio, V., Martens, S., 2013 :** substances Phénoliques végétales : avancées récentes sur leur biosynthèse, génétique et écophysiologie. Physiol végétal. Biochimie. 72, 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.009>
- 62 Chinnici, F., Bendini, A., Gaiani, A., Riponi, C., 2004 :** Radical scavenging activities of peels and pulps from cv. pommes dorées délicieuses en fonction de leur composition phénolique. J. Agric. Chimie alimentaire. 52, 4684-4689.
<https://doi.org/10.1021/jf049770a>
- 63 Chira K. Suh J.H. Saucier C., 2008.** "Les polyphénols du raisin". 6, France, 75-82.
- 64 Chougui, N., Tamendjari, A., Hamiidj, W. et al. 2013:** Oil composition and characteristics of phenolic compounds of *Opuntia ficus-indica* seeds. Food Chemistry, pp: 796–803.

Références Bibliographiques

- 65 Coria-Cayupán, Y.S., Ochoa, M.J., and Nazareno, M.A. 2011:** Health-promoting substances and antioxidant properties of *Opuntia sp.* fruits: changes in bioactive compound contents during ripening process. *Food Chemistry*, pages: 514–519.
- 66 Croteau R. Kutchan M.T. Lewis N.G. Buchanan B. Gruissem W. and Jones R. 2002:** Natural products (secondary metabolites) in *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Edition American society of plant physiologists. pp. 1250-1318.
- 67 Dahmoune, F., Boulekbache, L., Moussi, K., Aoun, O., Spigno, G., Madani, K., 2013 :** Valorisation des résidus de Citrus limon pour la récupération d'antioxydants : Evaluation et optimisation des micro-ondes et des ultrasons, Application à l'extraction par solvant. *Ind. Cultures Prod.* 50, 77-87.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.013>
- 68 De Leo, M., Bruzual De Abreu, M., Pawlowska, AM, Cioni, PL, Braca, A., 2010 :** Profilage du contenu chimique des fleurs d'*Opuntia ficus-indica* par HPLC-PDA-ESI-MS et GC/EIMS analyses. *Phytochimie. Lett.* 3, 48-52.
<https://doi.org/10.1016/j.phytol.2009.11.004>
- 69 DE Oviedo, 1536:** Sumario de la natural historia de las Indias, Tolède: 1526.Espagne
- 70 Del Socorro Santos Díaz, M., Barba de la Rosa, A.-P., Héliès-Toussaint, C., Guéraud, F., Nègre-Salvayre, A., 2017.** *Opuntia spp.* : Caractérisation et bénéfices dans les maladies chroniques. *Oxyde. Méd. Cellule. Longev.* 2017, 17.
<https://doi.org/10.1155/2017/8634249>
- 71 Dignet L, 1928 :** les cactacées utiles du Mexique. *Archives d'Histoire Naturelles*, Paris 1928
- 72 Djeridane, A., Yousfi, M., Nadjemi, B., Boutassouna, D., Stocker, P., Vidal, N., 2006.** Activité antioxydante de certains extraits de plantes médicinales algériennes contenant des composés phénoliques. *Nourriture Chem.* 97, 654-660.
- 73 Djerroud, N., Adjeroud, N., Felkai-Haddache, L., Hammoui, Y., Remini, H., Dahmoune, F., Merzouk, B., Madani, K., 2018.** Electrocoagulation-électroflottation renforcée pour la turbidité élimination par le mucilage de cladode d'*Opuntia ficus indica*. *Environ de l'eau. J.* 32, 321-332.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/wej.12328>
- 74 Dolatowski Z., J, Stadnik, J, Stasiak D; others. 2007.** Applications of ultrasound in food technology. *Acta Sci Pol, Technol. Aliment*, 6 (3), 89-99
- 75 Donkin RA, 1977.** Spanish red: An ethnographical study of cochineal and the *Opuntia* cactus. *Transactions of the American Philosophical Society.* 67:1–84.

Références Bibliographiques

- 76 Draye M., Estager J., Malacria M., Goddad JP., Ollivier C. 2009.** Sonochimie organique (K1250), Editions Techniques de l'ingénieur, France.
- 77 El-Hawary, SS, Sobeh, M., Badr, WK, Abdelfattah, MAO, Ali, ZY, El-Tantawy, ME, Rabeh, MA, Wink, M., 2020.** Profilage HPLC-PDA-MS/MS des métabolites secondaires du cladode d'*Opuntia ficus-indica*, extraits de zeste et de pulpe de fruit et leur effet antioxydant et neuroprotecteur chez le rat présentant une neurotoxicité induite par le chlorure d'aluminium. Saoudien J. Biol. Sci. 27, 2829-2838. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.07.003> Elsevier Science Publishers Ltd 1991
- 78 Ennouri, M., Evelyne, B., Laurence, M. & Hamadi, A. 2005.** Fatty acid composition and rheological behaviour of prickly pear seed oils. Food Chem., 93: 431–437.
- 79 Espinosa S., 2002 :** Estudio de algunas propieda des físicas de hidrocloides provenientes de la semilla de algarrobo (*Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz) y de cladodios de nopal (*Opuntia ficus indica* (L.) Mill.). Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- 80 Farag, MA, Maamoun, AA, Ehrlich, A., Fahmy, S., Wesjohann, LA, 2017:** Évaluation de la distribution des métabolites sensoriels dans 3 cultivars de fruits de cactus *Opuntia ficus-indica* à l'aide de techniques d'empreintes UV et de profilage GC/MS. LWT -Sciences de l'alimentation. Technol. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.014>
- 81 Farinella, N. V, Matos, GD, Arruda, MAZ, 2007.** La bagasse de raisin en tant que biosorbant potentiel de métaux dans les traitements des effluents. Bioresour. Technol. 98, 1940-1946. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.043>
- 82 Felkai-Haddache, L., Remini, H., Dulong, V., Mamou-Belhabib, K., Picton, L., Madani, K., Rihouey, C., 2016.** Extraction conventionnelle et assistée par micro-ondes de mucilage d'*Opuntia ficus-indica* Cladodes : Propriétés physico-chimiques et rhéologiques. Technologie des bioprocédés alimentaires. 9, 481-492. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1640-7>
- 83 Fernández-López, J.A., Almela, L., Obon, J.M., and Castellar, R. 2010:** Determination of antioxidant constituents in cactus pear fruits. Plant Foods for Human Nutrition, pages: 253-259.
- 84 Feugang JM., Konarski P., Zou D., Stintzing FC., Zou C. 2006:** Nutritional and medicinal use of cactus pear (*Opuntia spp.*) cladodes and fruits. Front Bio. sci.11: 2574-89.

Références Bibliographiques

- 85 Figueroa-Cares, I., Martínez-Damián, M.T., Rodríguez- Perez, E. et al. 2010 :** Contenido de pigmentos, otros compuestos y capacidad antioxidante en 12 cultivares de tuna (*Opuntia* spp.) de México. *Agrociencia*, pages : 763–771.
- 86 Fliegman J. Furtwängler k. Malterer G. Cantarello C. Schuler G. Ebel J. and Mithofer 2010:** Flavone synthase II (CYP93B16) from soybean (*Glycine max* L). *Phytochemistry*, 71:508-514.
- 87 Furhman B. Lavy A. and Aviram M. 1995:** consumption of red wine with meals reduces the susceptibility of human plasma and low- density lipoprotein to lipid peroxidation. *Am.j. Clin. Nutr.*, 61:549-554.
- 88 Galati E.M., Mondello R., Giuffrida D., Dugo G., Miceli N., Pergolizzi S., Taviano M.F., 2003:** Chemical characterization and biological effects of Sicilian *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. Fruit juice: Antioxidant and Antiulcerogenic Activity. *J. Agric. and Food Chem.*, 51, 4903-4908.
- 89 Galati, E.M., Monforte, M.T., Tripodo, M.M., d'Aquino, A., et Mondello, M.R. 2001:** Antiulcer activity of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (*Cactaceae*): ultrastructural study. *Journal of Ethnopharmacology*
- 90 Galati, E.M., Pergolizzi, S., Miceli, N., Monforte, M.T., and Tripodo, M.M. 2001:** Study on the increment of production of gastric mucus in rats treated with *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. cladodes. *Journal of Ethnopharmacology*, pages: 229–233.
- 91 Galati, E.M., Tripodo, M.M., Trovato, A., Miceli, N., and Monforte, M.T. 2002:** Biological effect of *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. (*Cactaceae*) waste matter. Note I: diuretic activity. *Journal of Ethnopharmacology*, pages: 17–21.
- 92 Garcia-Castello, EM, Rodriguez-Lopez, AD, Mayor, L., Ballesteros, R., Conidi, C., Cassano, A., 2015.** Optimisation de l'extraction conventionnelle et assistée par ultrasons des flavonoïdes du pamplemousse (*Citrus paradisi* L.) les déchets solides. *LWT - Sciences de l'alimentation. Technol.* 64, 1114-1122.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.024>
- 93 Garon D., et Guéguen J.C. 2014.** Biodiversité et évolution du monde végétal. France : EDP Sciences. 289p.
- 94 George, S., Brat, P., Alter, P., Amiot, MJ, 2005.** Détermination rapide des polyphénols et de la vitamine C dans les produits d'origine végétale. *J. Agric. Chimie alimentaire.* 53, 1370-1373. <https://doi.org/10.1021/jf048396b>.
- 95 Gharby, S. Harhar, H., Charrouf, Z., Bouzobaa, Z., Boujghagh, M. & Zine, S. 2015:** Physicochemical composition and oxidative stability of *Opuntia ficus-indica*

Références Bibliographiques

- seed oil from Morocco. *Acta Hortic.* 1067: 83–88.
- 96 Ghorbanli, M., Gafarabad, M., Amirkian, T., Mamaghani, BA, 2013.** Étude des changements de la proline, des protéines totales, de la chlorophylle, de l'ascorbate et du déhydroascorbate sous le stress de la sécheresse chez les cultivars de tomates Akria et Mobil. *L'Iran. J. Physiol Végétal.* 3, 651-658.
<https://doi.org/10.22034/IJPP.2013.540675>
- 97 Gibson AC, Nobel PS 1986:** *The Cactus Primer.* Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- 98 Goldstein g., Andrade l., Nobel p. 1991:** Differences in water relations parameters from the chlorenchyma and the parenchyma of the *Opuntia ficus- indica* under wet versus dry conditions. *Aust. J. Plant. Physiol.*, 1991, 18(2), 95-107.
- 99 Griffith MP et Porter JM 2009.** Phylogeny of *Opuntioideae* (*Cactaceae*). *International Journal of Plant Science* 170 (1): 107-116. Doi: 10.1086/593048
- 100 Griffith MP, 2004.** Les origines d'une importante culture de cactus, *Opuntia ficus-indica* (*Cactaceae*) : Nouvelle preuve moléculaire. *Un m. J. Bot.* 91, 1915-1921.
- 101 Grijspaardt-Vink C., 1996:** Ingredients for healthy foods featured at European expo. *Food Tech.*, 2, 30.
- 102 Guevara-Figueroa, T., Jiménez-Islas, H., Reyes-Escogido, ML, Mortensen, AG, Laursen, BB, Lin, L.-W., De León-Rodríguez, A., Fomsgaard, IS, Barba de la Rosa, AP, 2010.** Composition immédiate, caractérisation des acides phénoliques et des flavonoïdes du nopal commercial et sauvage (*Opuntia spp.*) *J.Aliments Compos. Anal.* 23, 525- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.12.003>
- 103 Guinard J.L. 1979.** *Abrégé de biochimie végétale.* 2ème édition. Masson. pp. 173-231
- 104 Guzmán-Maldonado, S.H., Morales-Montelongo, A.L., Mondragón-Jacobo, C., Herrera Hernández, G., Guevara-Lara, F., and Reynoso-Camacho, R. 2010:** Physicochemical, nutritional, and functional characterization of fruits xoconostle (*Opuntia matudae*) pears from Central-Mexico region. *Journal of Food Science*, pages: 485–492.
- 105 Habibi Y., Heyraud A., Mahrouz M., Vignon MR., 2004:** Structural features of pectic polysaccharides from the skin of *Opuntia ficus indica* prickly pear fruits. *Carbohydr. Res.*, 339, 1119-1127.

Références Bibliographiques

- 106 Handa SS. 2008:** An Overview of extraction Techniques for Medicinal and Aromatic Plant. In: Handa SS., Khanuja S.P.S., Longo G., Rakesh D.D. (Eds) Extraction Technologies, for Medicinal and Aromatic Plants. International Centre for Science and High Technology, Trieste, Italy, pp. 21-54
- 107 Hanhineva K. Törrönen R. Bondia- Pons I. Pekkinen J. Kolehmainen M. Mykkänen H and Poutanen H. 2010:** Impact of Dietary Polyphenols on Carbohydrate Metabolism. *Int. J. Mol. Sci*, 11: 1365-1402.
- 108 Harbone J.B. 1980:** secondary plant products. Encyclopedia of plant physiology, Vol 8, Bell EA, Charlwood BV, Ed: Springer – Verlag, Berlin. IN. pp. 329-402.
- 109 He F., Pan Q.H., ying S., Chang-Qing D. 2008.** "Biosynthesis and Genetic Regulation of proanthocyanidins in plants. *Molécules*", 13: 2674-2703.
- 110 Hein K.E. Tagliaferro A.R. and Bobilya D.J. 2002:** Flavonoid antioxidants: chemistry, metabolism and structure- activity relationships. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 13:572- 584.
- 111 Helsen, P., Houtte V., Tye, K. Verdyck, Desender, N.S, V. Dongen; 2005:** Isolation and characterization of polymorphic microsatellite markers in Galapagos prickly pear (*Opuntia*) cactus species. *Molecular Ecology Notes: Volume7, Issue 3, May 2007, Pages 454-456.* <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2006.01615.x>.
- 112 Hemm, MR, Rider, SD, Ogas, J., Murry, DJ, Chapple, C., 2004.** La lumière induit le métabolisme des phénylpropanoïdes dans les racines d'*Arabidopsis*. *Plante J.* 38, 765-778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02089.x>
- 113 Hennebelle T. Sahpaz S. et Bailleul F. 2004.** Polyphénols végétaux, sources, utilisations et potentiel dans la lutte contre le stress oxydatif. *Phytothérapie*, 1: 3 – 6.
- 114 Herzi. (2013) :** Extraction et purification de substances naturelles : comparaison de l'extraction au CO₂-supercritique et des techniques conventionnelles. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). 148p
- 115 Hollingsworth P., 1996:** Food trends: diversity and choice dominate. *Food Tech.*, 5, 40.
- 116 Hoogendijk, M., and Williams, D.E. 2001.** Characterizing the genetic diversity of home garden crops: some examples from the Americas. *Proceedings of the Second International Home Gardens Workshop: Contribution of Home Gardens and In-situ Conservation of Plant Genetic Resources in Farming Systems* (Eds. Watson J.W. and Eyzaguirre P.B), IPGRI, Germany, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.033>

Références Bibliographiques

- 117 Hunt, D.R. Taylor, N.P. 1986.** The genera of the *Cactaceae*: towards a new consensus. *Bradleya*, 4: 65–78.
- 118 Hunt D.R, 2006:** The New Cactus Lexicon. Descriptions and Illustrations of the Cactus Family, compiled and edited by members of the International Cactaceae Systematics Group. Two Volumes, ISBN: 0953813460
- 119 Ignat I. Volf I. and Popa I.V. 2011.** A critical review of methods for characterization of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food chemistry*, 126: 1821-1835
- 120 Inglese, P., Chessa, I., La Mantia, T., Nieddu, G., 1998 :** Evolution des gibbérellines endogènes à différents stades de floraison en relation avec le retour de la floraison du figuier de Barbarie (*Opuntia ficus-ndica* L. Miller). *Sci. Hortique. (Amsterdam)*. 73, 45-51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(97\)00139-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-4238(97)00139-8)
- 121 Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Sáenz, C., 2018.** Ecologie, culture et utilisations du figuier de barbarie. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture et le Centre International pour la Recherche Agricole dans les Zones Arides. Rome. p. 208. www.fao.org/3/I7628FR/i7628fr.pdf
- 122 Izella S. 2009.** Cavitation par excitation bi fréquentielle : application à la thrombolyse ultrasonore. Thèse de doctorat. École doctorale mécanique, génie civil et acoustique, 102p
- 123 Jaramillo-Flores, ME, González-Cruz, M., Cornejo-Mazón, M., Dorantes-Álvarez, L., Gutiérrez-López, GF, Hernández-Sánchez, H., 2003:** Effet du traitement thermique sur l'activité antioxydante et la teneur en caroténoïdes et phénoliques. *Science alimentaire. Technol. Int.* 9, 271-278. <https://doi.org/10.1177/108201303036093>
- 124 Jiri S., Marketa, Olga K. Petr S., Vojtech J., Libuse T., Ladislav H., Miroslava B., Josef Z., Ivo P. et Rene K. 2010:** fully automated spectrophotometric protocols for determination of antioxidant activity: advantages and disadvantages. *Molecules*, 15: 8618- 8640. <https://doi.org/10.3390/molecules15128618>.
- 125 James and McCulloch, 1990:** Multivariate Analysis in Ecology and Systematics: Panacea or Pandora's Box? *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 21 (1990), pp. 129-166 (38 pages). <https://www.jstor.org/stable/2097021>.
- 126 Kadam S. u., Tiwari B.K., Alvarez, C., Donnell C.P.O. 2015:** Ultrasound application for the extraction, identification and delivery of food *Sci.Technol*, 46: 60-67.

Références Bibliographiques

- 127 Kamble, SM, Debaje, PP, Ranveer, RC, Sahoo, AK, 2017:** Importance nutritionnelle du cactus : un examen. *Tendances Biosci.* 10, 7668-7677.
- 128 Kaur, M., Kaur, A., and Sharma, R. 2012:** Pharmacological actions of *Opuntia ficus-indica*: a review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, **2**(7):15–18.
- 129 Khater F. (2011).** Identification et validation de nouveaux gènes potentiellement impliqués dans la bio synthèse des composés phénoliques. Thèse de doctorat en biologie, faculté SNV.203p.
- 130 Kiesling, R., 1998:** Origen, Domesticación y Distribución de *Opuntia ficus-indica*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.* 3, 50-59.
- 131 Knežević S.V. Blazekwic B. Stefan M.B. and Babac M. 2012:** Plant polyphenols as antioxidants influencing the human health. In “Phytochemicals as nutraceuticals-global approaches to their role in nutrition and health. Edition Venketeshwer Rao.pp.155-180.
- 132 Ksouri, R., Megdiche, W., Debez, A., Falleh, H., Grignon, C., Abdelly, C., 2007 :** Effets de la salinité sur la teneur en polyphénols et les activités antioxydantes dans les feuilles de l'halophyte *Cakile maritima*. *Physiol végétal. Biochimie.* 45, 244-249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.02.001>
- 133 Kuhnle G.G.C. 2018.** "Nutrition epidemiology of flavan-3-ols: The known unknowns", *Molecular Aspects of Medicine*, Vol 61: pp. 2-11.
- 134 Kuti O., 2004:** Antioxidant compounds from four *Opuntia* cactus pear fruit varieties. *Food Chem.*, 85 (4), 527-533.
- 135 Kuttruff H., 1991:** application of ultrasound in medical diagnostics *Ultrasonic*, Elsevier Science Publishers Ltd 1991.
- 136 Lambert C. (2011) :** Étude du rôle des stilbènes dans les défenses de la vigne contre les maladies du bois.Thèse de doctorat en biologie, faculté SNV, université bordeaux 2.202p
- 137 Laugier F. (2007) :** Les ultrasons en procédé polyphasiques : transfert gaz-liquide et réaction liquide-liquide. Thèse de génie des procédés et de l'environnement, l'Institut national polytechnique de Toulouse, 118p. *Lebensmittel-Rundschau*, **77**:279–281.
- 138 Lee, KW, Kim, YJ, Lee, HJ, Lee, CY, 2003:** Le cacao a plus de composés phytochimiques phénoliques et une capacité antioxydante plus élevée que les thés et le vin rouge. *J. Agric. Chimie alimentaire.* 51, 7292-7295. <https://doi.org/10.1021/jf0344385>.
- 139 Lefsih, K., Giacomazza, D., Passantino, R., Costa, MA, Bulone, D., Mangione, MR, Guarrasi, V., Mingoia, F., San Biagio, PL, Madani, K., 2018:** Caractérisation

Références Bibliographiques

- biochimique et biophysique de la pectine hydrosoluble d'*Opuntia ficus-indica* et de son potentiel actif cytotoxique. *Phytochimie* 154, 47-55.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.06.015>
- 140 Lehmann H. 2013 :** Le médicament à base de plante en Europe : Statut, enregistrement, contrôles : Université de Strasbourg .Faculté de pharmacie, 228p.
- 141 Le Houérou, 1965 :** Le role des *Opuntia* dans l'economie agricole Nord Africaine, Bull. Ecole Nat. Sup. d'Agric. Tunis.
- 142 Leighton T.G. 2007:** What is Ultrasound? *Prog. Biophys Mol Biol.* 93: 3-83.
- 143 Leighton I. N. E. S. and Urquiaga; 2000:** Plant Polyphenol Antioxidants and Oxidative Stress. *Biol. Res*, 33: 55-64.
- 144 Li H Prodesino L, Weiss J .2004:** High intensity ultrasound-assisted extraction of oil from soybeans. *Food Res Int* 37: 731-738.
- 145 Li, Y., Gong, M., Konishi, T., 2007:** Synergisme antioxydant entre les herbes constitutives de la formule de médecine traditionnelle chinoise, ShengMai San étudié in vitro et in vivo. *J. Guérir. Sci.* 53, 692-699. <https://doi.org/10.1248/jhs.53.692>
- 146 Liu, Zhang L. and Lu S. 2012:** Evaluation of antioxidant and immunity activities of quercetin in isoproterenol-treated rats. *Molecules*, 17: 4281- 4291, *Molecules* 2012, 17(4), 4281-4291; <https://doi.org/10.3390/molecules17044281>.
- 147 Luque-Garcia J., L.and M.D.Luque de Gastro. 2003:** Ultrasound: A powerful tool for leaching. *Trends in Analytical chemistry* 22: 41-47.
- 148 Luthria D-l. Biswar R. and Savithiry N. 2007:** Comparaison of extraction solvents and techniques used the assay of isoflavones from soybean. *Food chemistry*, 105:325-333.
- 149 Ma, Y.-Q., Ye, X.-Q., Fang, Z.-X., Chen, J.-C., Xu, G.-H., Liu, D.-H., 2008 :** Composés phénoliques et activité antioxydante des extraits du traitement par ultrasons des peelings de mandarine Satsuma (*Citrus unshiu Marc.*). *J. Agric. Chimie alimentaire.* 56, 5682-5690. <https://doi.org/10.1021/jf072474o>.
- 150 Macheix JJ. Fleuriet A., et Jay-Allemand C. 2005 :** Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne. p. 192.
- 151 Mahmoudi S. Khali M. and Mahmoudi N. 2013:** Etude de l'extraction des composés phénoliques de différentes parties de la fleur d'artichaut (*Cynara scolymus L.*). *Revue*

Références Bibliographiques

- « Nature et Technologie ». B- Sciences Agronomiques et Biologiques, 09: 35-40.
- 152 Maki Díaz, G., Peña Valdivia, C.B., García Nava, R., Arévalo Galarza, L., Calderón Zavala, G. & Anaya Rosales, S. 2015 :** Physical and chemical characteristics of cactus stems (*Opuntia ficus-indica*) for exportation and domestic markets. *Agrociencia*, 49: 31–51.
- 153 Malainine, M. E., Dufresne, A., Dupeyre, D., Mahrouz, M., Vuong, R., & Vignon, M. R. 2001 :** Structure et morphologie des raquettes et des epines du figuier de barbarie. *Phys. Chem. News*, 4, 126-13.
- 154 Marc F., Degléne-Benbrahim L., Ferrand C., Baccaunaud M. 2004.** Méthodes d'évaluation du potentiel antioxydant dans les aliments. *Medecine/ Science*, 20: 458-463. <https://id.erudit.org/iderudit/008122ar>.
- 155 Martin S. et Andrintsitohainia R. 2002 :** Mécanisme de la protection cardiaque et vasculaire des polyphénols au niveau de l'endothélium. *Journal : Annale de cardiologie*, 51: 304-315.
- 156 Mason T., et lorimer j. 1988:** Sonochemistry: Theory, application and uses of ultrasound in chemistry, Ellis Horwood limited, 32p.
- 157 Matsuhira B., Sáenz C., Urzúa C., Zarate O., Sepúlveda E., 2001:** Polisacáridos solubles de *Opuntia ficus indica*: caracterización estructural y propiedades fisico-químicas (abstr). In: XXIV Jornadas Chilenas de Química. Temuco, Chile, 28-30 noviembre 2001.
- 158 Mauseth, J.D. 2006.** Structure–function relationships in highly modified shoots of *Cactaceae*. *Ann. Bot.*, 98: 901–926.
- 159 Mawson R et Knoerzer K. 2007:** A brief history of the application, of ultrasonics in food processing.
- 160 Mayorga, M.C., Urbiola, M.C., Suárez, R. & Escamilla, S.H.M. 1990:** Estudio agronómico de xoconostle *Opuntia spp* en la zona semi árida del Estado de Querétaro. En Memoria 3ª Reunión Nacional 1er Reunión Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del nopal. Ed. Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, Saltillo, Coahuila, Mexico.
- 161 Mayer, JA, Wone, BWM, Alexander, DC, Guo, L., Ryals, JA, Cushman, JC, 2021 :** Le profilage métabolique des tissus épidermiques et mésophiles sous stress hydrique chez *Opuntia ficus-indica* révèle des réponses métaboliques adaptatives au stress. *Fonction. Biol végétale*. <https://doi.org/10.1071/FP20332>

Références Bibliographiques

- 162 Mazari, A., Yahiaoui, K., Fedjer, Z., Mahdeb, A., 2018:** Caractéristiques physiques, contenu phytochimique et activité antioxydante des figes de Barbarie poussant dans le Nord-Est algérien. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.* 20, 177-195.
- 163 Mcconn M., Nakata A., 2004:** Oxalate reduces calcium availability in the pads of prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *J. Agric. Food Chem.*, 52, 1371-1374.
- 164 Medina-Torres, L., Vernon-Carter, EJ, Gallegos-Infante, JA, Rocha-Guzman, NE, Herrera-Valencia, EE, Calderas, F., Jiménez-Alvarado, R., 2011:** Étude des propriétés antioxydantes d'extraits obtenus à partir de cladodes de cactus nopal (*Opuntia ficus-indica*) après séchage convectif. *J.Sci. Agroalimentaire.* 91, 1001–1005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.4271>
- 165 Merghem R. 2009 :** Eléments de biochimie végétale. Edition Bahaeddine. pp. 107-133.
- 166 Mohammedi, Z., Atik, F., 2011 :** Impact du type d'extraction par solvant sur la teneur en polyphénols totaux et l'activité biologique de *Tamarix aphylla* (L.). *Int. J. Pharma Bio Sci.* 2, 609-615.
- 167 Moheb A. Ibrahim R.K. Roy R. and Sarhan F. 2011:** Changes in wheat leaf phenolome in response to cold acclimation. *Phytochemistry*, 72: 2294- 2307.
- 168 Mondragon-Jacobo C, 2001:** Cactus pear breeding and domestication. *Plant Breed Rev.* 20: 135-166.
- 169 Mondragon, Chessa, 2013:** A global perspective on genetic resources of cactus pear; and asset for the future sustainability of semi-arid lands. *Acta Horticulturae* num. 995: 19-26.
- 170 Mondragón and Yahia; 2011:** Nutritional components and anti-oxidant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Food Research International*, pages: 2311–2318.
- 171 Morales, M., Sáenz, C. et Robert, P. 2009.** Bioactives compounds in toppings from colored cactus pear cultivated in Chile. *Acta Hort.* 811: 127–130.
- 172 Mulas M. Mulas G, 2004 :** Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification.
- 173 Mulas, M., D'Hallewin, G. 1997:** Fruit quality of four cactus pear (*Opuntia ficus-indica* Mill.) cultivars as influenced by irrigation. *Acta Hort.* 438: 115–122.
- 174 Muñoz de Chávez, M., Chávez, A., Valles, V., and Roldán, J.A. 1995:** The Nopal: a plant of manifold qualities. *World Review of Nutrition and Dietetics*, 77:109–134.
- 175 Nanacy T. et Agnés A. 2014 :** Colloque viticulture et stress hydrique : impact du stress hydrique sur la qualité de la vendange, exemple des flavonoïdes. INRA SPO. 20p.

Références Bibliographiques

- 176 Neffar S. 2012 :** Etude de l'effet de l'âge des plantations de figuier de barbarie (*Opuntia ficusindica* (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. Université de Badji Mokhtar .Anaba, 132p.
- 177 Nefzaoui A. 2009:** Cactus: A crop to meet the challenges of climate change in dry areas. *Annals of Arid Zones*, 48: 1-18.
- 178 Nenadis, Tsimidou, wang, Zhang; 2004:** Estimation of Scavenging Activity of Phenolic Compounds Using the ABTS•+ Assay, *J. Agric. Food Chem.* 2004, 52, 15, 4669–4674. <https://doi.org/10.1021/jf0400056>.
- 179 Nerd, A., Mizrahi, Y. 1993:** Modern cultivation of prickly pear in Israel. *Acta Hort.* 349: 235–237.
- 180 Nobel S.P, 1988:** *Environment Biology of agaves and cacti.* Cambridge University Press. New York, 270 pages.
- 181 North, G.B, Nobel, P.S. 1992:** Drought-induced changes in hydraulic conductivity and structure in roots of *Ferocactus acanthodes* and *Opuntia ficus-indica*. *New Phytol.* 120: 9-19.
- 182 Odabaş, H.İ., Koca, I., 2016.** Application de la méthodologie de surface de réponse pour optimiser la récupération des composés phénoliques de la peau de noisettes en utilisant différentes méthodes d'extraction. *Ind.CulturesProd.*91,114–124.
- 183 Odoux, E., and Domínguez-López, A. 1996 :** Le figuier de Barbarie : une source industrielle de bétalaines? *Fruits*, pages : 61–78.
- 184 Ouerghemmi, I. Bourgou, S., Mejri, H., Marzouk, B. & Saidini Tounsi, M. 2013.** Study of essential and fixative oil chemical composition extracted from *Opuntia ficus-indica* seeds grown in Tunisia and its antioxidant activity. *Riv. Ital. Sostanze Grasse*, 90: 21–30.
- 185 Özcan, M. Al Juhaimi, F. 2011.** Nutritive value and chemical composition of prickly pear seed (*Opuntia ficus-indica* L.) growing in Turkey. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 62(5): 533–536.
- 186 Parisi D.I., Puoci F., Restuccia D., Lemma F., Picci, N. 2014.** Polyphenols and Their Formulations: Different Strategies to Overcome the Drawbacks Associated with Their Poor Stability and Bioavailability. *Polyphelos Hum. Health Dis*, 4, 29-45.
- 187 Park, E.-H., Kahng, J.H., Lee, S.H., and Shin, K.H. 2001:** An anti-inflammatory principle from cactus. *Fitoterapia*, pages : 288–290.

Références Bibliographiques

- 188 Periago M.J., Ros G., López M., Martínez C., Rincón F., 1993.** The dietary fiber components and their physiological effects. *Revta. Española de Ciencia y Tecnol. Aliment.* 33 (3), 229-246.
- 189 Perry M. (2013).** .Herboristerie : Enquête sur les principales demandes a l'officine. Faculté de pharmacie, Université de LORRAINE, 134p.
- 190 Pico Y. 2013.** Ultrasound-Assisted extraction for food and environmental samples. *ACTreuds Anal.Chem*, 48: 84-99.
- 191 Piga, A. 2004:** Cactus pear: a fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, pages: 9–22.
- 192 Pimienta-Barrios, E. 1990:** El nopal tunero. Mexico, Universidad de Guadalajara. 246 pp.
- 193 Pimienta-Barrios, E. 1994:** Prickly pear (*Opuntia spp.*): a valuable fruit crop for the semiarid lands of Mexico. *J. Arid Environ.* 28: 1–11.
- 194 Pimienta - Barrios, E. Engleman, E.M. 1985 :** Desarrollo de la pulpa y proporción, en volumen de los componentes del lóculo maduro en tuna (*Opuntia ficus indica* (L) Miller). *Agrociencia*, 62: 51–56.
- 195 Pimienta-Barrios, E. 1993:** Vegetable cactus (*Opuntia*) In: Williams, J.T. Ed., *Pulses and Vegetables*, pp. 177–191. Chapman and Hall: London.
- 196 Pimienta-Barrios, Muñoz, 2001:** Domesticação das opuntias e variedades cultivadas. In: *Agroecologia: cultivo e usos de Palma forrageira*. SEBRAE/PB, 2001. p.58-63.
- 197 Pinheiro, SS, Cardoso, L. de M., Anunciaçao, PC, Bezerra de Menezes, C., Aparecida Vieira Queiroz, V., Stampini Duarte Martino, H., Mattos Della Lucia, C., Pinheiro Sant'Ana, HM , 2021:** Le stress hydrique a augmenté la teneur en flavonoïdes des grains de sorgho sans tanin. *J. Aliments Compos. Anal.* 100, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103892>
- 198 Portillo, L. y A. Arreola-Nava. 1994.** Los nopales hospederos de la cochinilla fina o cultivada (*Dactylopius coccus Costa*). *Cact. Y Suc. Mex.* 39: 90-95.
- 199 Potgieter, D'Aquino, Inglese, Mondragon ; 2017 :** Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear, Document FAO, Rome , 2017.
- 200 Pradal, D., Vauchel, P., Decossin, S., Dhulster, P., Dimitrov, K., 2018.** Procédé intégré d'extraction-adsorption pour la récupération sélective de composés phénoliques antioxydants issus de l'industrie alimentaire par produit. *Chem. Ing. Traiter. - Intensif de processus.* 127, 83-92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.016>

Références Bibliographiques

- 201 Prasad, KN, Yang, E., Yi, C., Zhao, M., Jiang, Y., 2009 :** Effets de l'extraction à haute pression sur le rendement d'extraction, la teneur totale en phénols et l'activité antioxydante du péricarpe du fruit longane. *Innov. Science alimentaire. Émerger. Technol.* 10, 155-159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.11.007>
- 202 Proestos C., Sereli D., Komaitis M. 2006:** Determination of phenolic compounds in aromatic plants by RP-HPLC and GC-MS. *Food Chem.* 95, 44-52.
- 203 Prouillac, C. 2006 :** Synthèse et évaluation de nouveaux composés organiques et phosphorés contre les effets des rayonnements ionisants. Etude de leur mécanisme d'action in vitro. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 254p.
- 204 Ramadan, M.F., and Mörsel, J.T. 2003:** Recovered lipids from prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) peel: a good source of polyunsaturated fatty acids, natural antioxidant vitamins and sterols. *Food Chemistry*, pages: 447-456.
- 205 Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C., 1999 :** Activité antioxydante en appliquant un test amélioré de décoloration des cations radicalaires ABTS. *Radic libre. Biol. Méd.* 26, 1231-1237. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- 206 Ribereau-Gayon P. 1968 :** Notion générale sur les composés phénoliques. IN : les composés phénoliques des végétaux. Edition Dunod, 1-40 p.
- 207 Richter G. 1993 :** Composés phénoliques. In « Métabolisme des végétaux : physiologie et Biochimie ». Edition Presses polytechnique et universitaires romandes. pp. 317-339.
- 208 Roberts, D. 1999:** Analyzing technical trade barriers in agricultural markets: challenges and priorities. *Agribusiness* 15: 335-354.
- 209 Rodríguez Felix, A. 2002:** Postharvest physiology and technology of cactus pear fruits and cactus leaves. *Acta Hort.* 581: 191-199.
- 210 Rodríguez-Felix, A., Cantwell, M. 1988:** Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (Nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition* pages: 83-93.
- 211 Romdhane M., Gourdon C. 2002:** Investigation in solid-liquid extraction: influence of ultrasound. *Chem Eng j* 87: 11-19.
- 212 Sáenz C., 2002:** Cactus pear fruits and cladodes: a source of functional components for foods. *Acta Hort.*, 581, 253-263.
- 213 Sáenz C., Estevez AM, Fontanot M., Pak N., 2002:** Oatmeal cookies enriched with cactus pear flour as dietary fiber source: Physical and chemical characteristics. *Acta*

Références Bibliographiques

- Hort., 581, 275- 278.
- 214 Sáenz C., Pak N., Sepúlveda E., Lecaros M., 1997 :** Caracterización de harina de cladodio de “nopal”. In: Vazques, R., Gallegos, C., Triviño, E., Díaz, Y. (ed.), VII Congreso nacional y V Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del nopal. Monterrey, México, 15-19 septiembre 1997, 302-303.
- 215 Sáenz C., Sepúlveda E., Pak N., Albornoz N., 1999 :** Vegetal soup with cactus cladodes (*Opuntia ficus indica*) dietary fiber addition (abstr.). In: 10th World Congress on Food Science and Technology. Sidney, Australia, 3-8 October 1999, 55, IUFOST.
- 216 Sáenz C., Sepúlveda E., Pak N., Vallejos X., 2002:** Uso de fibra dietética de “Nopal” en la formulación de un polvo para flan. Arch. Latinoam. Nutr., 52 (4), 387-392.
- 217 Sáenz C., Sepúlveda, Vallejos M.I., 2003:** Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de “nopal”. Efecto del tratamiento térmico. In: Esparza, G., Salas, M., Mena, J., Valdez, R. (ed.), IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del “nopal”. Zacatecas, México, 2- 6 septiembre 2003, 269-272, Universidad Autónoma de Chapingo.
- 218 Sáenz, C. 2000:** Processing technologies: an alternative for cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits and cladodes. Journal of Arid Environments. Pages: 209–225.
- 219 Sáenz, C., and Sepúlveda, E. 2001:** Cactus-pear juices. Journal of the Professional Association of Cactus Development, pages: 3–11.
- 220 Saézn, C., Berger, H., Corrales García, J., Galletti, L., Garcia del Cortazar, V., Higuera, I., Mondragón, C., Rodríguez Feliz, A., Sepulveda, E. & Varnero M.T., eds. 2006 :** Utilización agroindustrial del nopal. FAO Plant Production and Protection Paper No. 162. Rome, FAO. 165 pp.
- 221 Sáenz, C., Tapia, S., Chavez, J., and Robert, P. 2009:** Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*).
- 222 Scheinvar 1995:** Taxonomy of utilized *Opuntias*. In: Barbera G., Inglese P., Pimienta-Barrios E (eds) Agroecology, cultivation and uses of cactus pear. FAO Plant Production and Protection Paper 132, FAO Rome, pp 20-27.
- 223 Şahin, S., Şamlı, R., 2013.** Optimisation de l'extrait de feuille d'olivier obtenu par extraction assistée par ultrasons avec méthodologie de surface de réponse. Ultrason. Sonochem. 20, 595-602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.029>
- 224 Sánchez-Rodríguez, E., Moreno, DA, Ferreres, F., Rubio-Wilhelmi, M. del M., Ruiz, JM, 2011.** Réponses différentielles de cinq variétés de tomates cerises au stress

Références Bibliographiques

- hydrique : changements sur les métabolites phénoliques et les enzymes associées. *Phytochimie* 72, 723-729. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.02.011>
- 225 Sawaya, W.N. & Khan, P. 1982.** Chemical characterization of prickly pear seed oil, *Opuntia ficus indica*. *J. Food Sci.*, 47: 2060–2061.
- 226 Sawaya, W.N., Khatchadourian, H.A., Safi, W.M. & Al Hammad, H.M. 1983:** Chemical characterization of prickly pear pulp, *Opuntia ficus-indica*, and the manufacturing of prickly pear jam. *J. Food Technol.*, 18: 183–193.
- 227 Sepúlveda and Sáenz; 1988:** Industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). I. Aceite de la semilla. *Alimentos*, 13: 35–38.
- 228 Sepúlveda, Sáenz, Vallejos ; 2003 :** Comportamiento reológico de néctar elaborado con hidrocoloide de “nopal”. Efecto del tratamiento térmico. In: Esparza, G., Salas, M., Mena, J., Valdez, R. (ed.), IX Congreso Nacional y VII Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del “nopal”. Zacatecas, México, 2- 6 septiembre 2003, 269-272, Universidad Autónoma de Chapingo.
- 229 Shahidi, F., Janitha, P., and Wanasundara, P. 1992:** Phenolic antioxidants: Critical Reviews in Food Science and Nutrition, (1):67–103.
- 230 Sloan E., 1994:** Top ten trends to watch and work on. *Food Tech.* 7: 89-100.
- 231 Sloan E., 2000:** the top ten functional food, *Food Tech.*, 54 (4), 33-62.
- 232 Snyman, H.A. 2005.** A case study on in situ rooting profiles and water-use efficiency of cactus pears, *Opuntia ficus-indica* and *O. robusta*. *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 7: 1-21.
- 233 Spigno, G., Tramelli, L., De Faveri, DM, 2007.** Effets du temps d'extraction, de la température et du solvant sur la concentration et l'activité antioxydante des phénols de marc de raisin. *J. Food Eng.* 81, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.021>
- 234 Spiller G., 1992:** Definition of dietary fiber. In: *Dietary Fiber in Human Nutrition*. Ed. by Gene A. Spiller. CRC Handbook. Second Ed. Boca Raton, Florida.
- 235 Stanley F. Wainapel MD. MPH. and Avital Fast MD. 2003.** Antioxidants and the Free Radical Theory of Degenerative Disease. In: *Alternative Medicine and Rehabilitation*, Demos Medical Publishing, New York.
- 236 Stintzing F.C., Carle R. 2005** Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Mol. Nutr. Food Res*, 2005, 49, 175-194.
- 237 Tao, Y., Sun, D.-W., 2015.** Amélioration des processus alimentaires par ultrasons : une revue. *Critique. Rév. Food Sci. Nutr.* 55, 570-594. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.667849>

Références Bibliographiques

- 238 Tattini, M., Gravano, E., Pinelli, P., Mulinacci, N., Romani, A., 2000.** Les flavonoïdes s'accumulent dans les feuilles et les trichomes glandulaires de *Phillyrea latifolia* exposés à un excès de rayonnement solaire. *Nouveau Phytol.* 148, 69-77. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00743.x>
- 239 Tchabo, W., Ma, Y., Engmann, FN, Zhang, H., 2015.** Extraction enzymatique assistée par ultrasons (UAEE) de composés phytochimiques à partir de moût de mûrier (*Morus nigra*) et étude d'optimisation utilisant la méthodologie de surface de réponse. *Ind.CulturesProd.*63, 214-225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.053>
- 240 Tesoriere, L., Allegra, M., Butera, D., Livrea, M.A. 2004:** Absorption, excretion, and distribution of dietary antioxidant betalains in LDLs: potential health effects of betalains in humans, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Volume 80, Issue 4, October 2004, Pages 941–945, <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.4.941>
- 241 Tesoriere L., Butera D, Pintaudi AM., Allegra M., Livrea MA. 2004:** Supplementation with cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit decreases oxidative stress in healthy humans: a comparative study with vitamin C. *The American Journal of Clinical Nutrition*, Volume 80, Issue 2, August 2004, Pages 391–395, <https://doi.org/10.1093/ajcn/80.2.391>.
- 242 Tiho, T., Yao, NJC, Brou, YC, Adima, AA, 2017.** Effet de la température de séchage sur la teneur totale en phénols et flavonoïdes et activité antioxydante de la pulpe des fruits mûrs de *Borassus aethiopicum* Mart. *J. Alimentation Res.* 6, 50-64. <https://doi.org/10.5539/jfr.v6n2p50>.
- 243 Tlili, N., Bargougui, A., Elfalleh, W., Triki, A. & Nasri, N. 2011.** Phenolic compounds, protein, lipid content and fatty acids compositions of cactus seeds. *J. Med. Plants Res.*, 5(18) : 4519–4524
- 242 Trabelsi, N., Megdiche, W., Ksouri, R., Falleh, H., Oueslati, S., Soumaya, B., Hajlaoui, H., Abdelly, C., 2010 :** Effets des solvants sur les contenus phénoliques et les activités biologiques des feuilles d'halophyte *Limoniastrum monopetalum*. *LWT – Sciences de l'alimentation.* Technol.43,632-639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.11.003>
- 245 Union internationale pour la protection des obtentions végétales (UPOV) 2006 :** Figuier de Barbarie et Xoonostles (*Opuntia*, Groupe 1 et 2), Principes directeurs pour la conduite de l'examen de la distinction, de l'homogénéité et de la stabilité, TG/217/1, Genève. www.upov.int/edocs/tgdocs/fr/tg217_01.pdf.

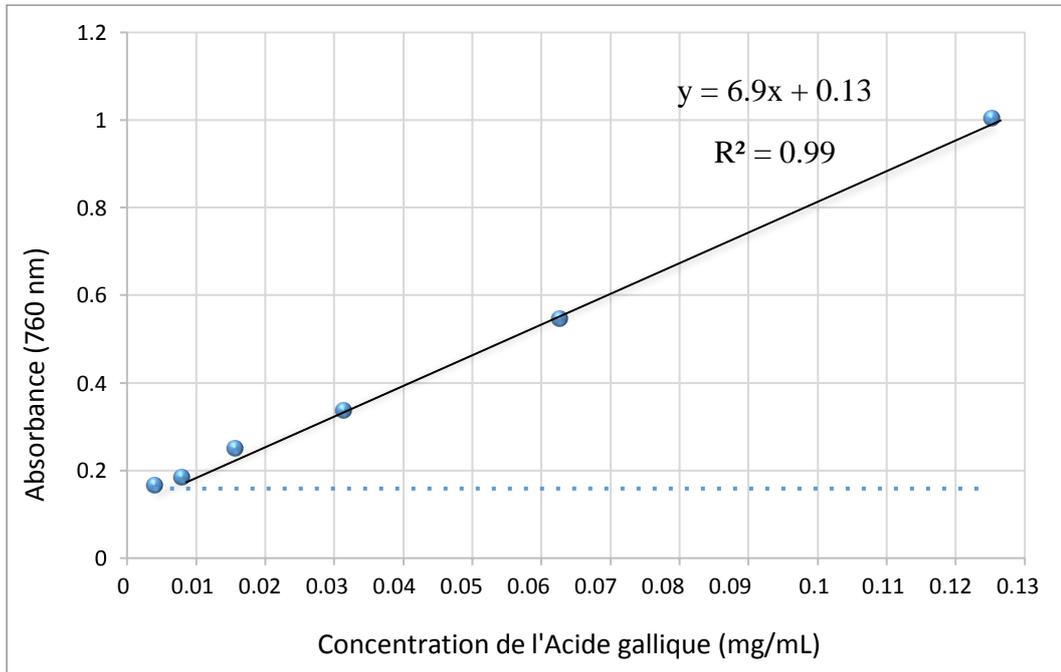
Références Bibliographiques

- 246 Valls J. Millán S. Martí M.P. Borràs E. and Arola L. 2009.** Advanced separation methods of food anthocyanins, isoflavones and flavanols. *Journal of Chromatography A*, 1216: 7143– 7172.
- 247 Vilku, K., Mawson, R., Simons, L., Bates, D., 2008.** Applications et opportunités pour l'extraction assistée par ultrasons dans l'industrie alimentaire - Une revue. *Innov. Sciencealimentaire.ÉmergerTechnol.*9,161-169.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.014>
- 248 Waksmundzka-Hajnos M., ET Sherma J. 2011.** High Performance Liquid Chromatography inPhytochemical Analysis. *Chromatographic Science Series*. pp. 477-478.
- 249 Wang L. and Weller, C.L. 2006.** Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science and Technology*, 17: 300-312
- 250 Wessels, A.B. 1988:** Snoei, vrugitdunning, vrugontwikkeling en vrugkwaliteit van doringlose turksvye. In *Proceedings of the First National Symposium on Fruit Production of Spineless Prickly Pears*, 2–4 February 1988, University of Pretoria, South Africa, pp. 12– 20.
- 251 Wu TY., GUO. The CY. Hay JXW. 2013.** Theory and Fundamentals of Ultrasound, *Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation: Springer*.p.5.
- 252 Xingnong, W., P. Felker and A. Paterson. 1997.** Environmental influences on cactus pear fruit yield, quality and cold hardiness and development of hybrids with improved cold hardiness. *JPACD* 48-59.
- 253 Yahia, E., and Mondragón-Jacobo, C. 2011:** Nutritional components and anti-oxydant capacity of ten cultivars and lines of cactus pear fruit (*Opuntia spp.*). *Food Research International*, pages: 2311–2318.
- 254 Yoo, KM, Lee, CH, Lee, H., Moon, B., Lee, CY, 2008:** Antioxydant relatif aux activités de fourmis et cytoprotectrices des herbes communes. *Chimie alimentaire*. 106, 929-936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.006>

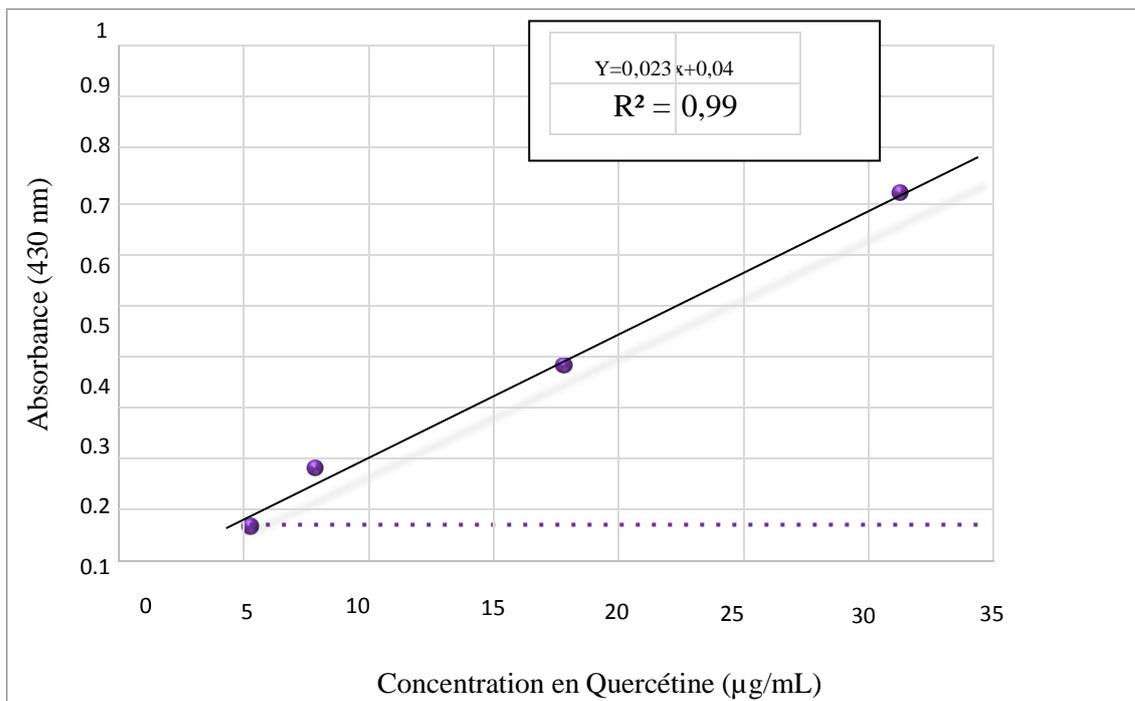
Annexes

Courbes d'étalonnage

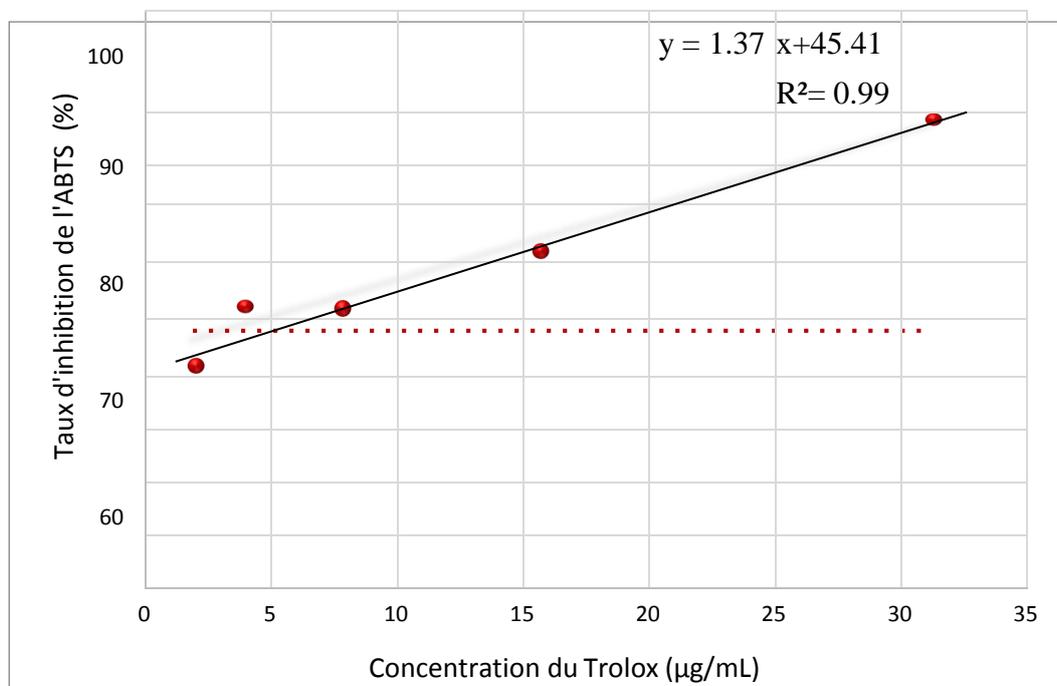
1-Courbe d'étalonnage pour le dosage des Polyphénols totaux : (Appendice : 1)



2-Courbe d'étalonnage pour le dosage des Flavonoïdes (Appendice : 2).



3-Courbe d'étalonnage pour l'évaluation de l'activité anti-oxydante par le test d'ABTS (Appendice : 3).



Annexes

4. Données Brutes (Appendice : 4)

| | HP | LP | LC | IC | CL/CI | EC | LE | LF | DF | PF |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| O,F,I_Be 1 | 200,41 | 123,75 | 36,42 | 19,67 | 1,87 | 0,67 | 0,00 | 8,53 | 5,20 | 83,33 |
| O,F,I_Be 1 | 192,91 | 126,17 | 36,83 | 18,92 | 1,94 | 0,68 | 0,00 | 8,54 | 5,13 | 76,33 |
| O,F,I_Be 1 | 199,25 | 126,17 | 35,67 | 20,33 | 1,77 | 0,64 | 0,00 | 8,13 | 5,11 | 82,08 |
| O,AM_Be | 196,58 | 106,58 | 39,83 | 22,08 | 1,82 | 0,65 | 2,88 | 8,48 | 5,03 | 91,00 |
| O,AM_Be | 194,83 | 109,50 | 40,83 | 22,58 | 1,82 | 0,66 | 2,93 | 8,36 | 4,91 | 85,00 |
| O,AM_Be | 197,08 | 112,25 | 40,33 | 21,83 | 1,90 | 0,66 | 2,80 | 8,43 | 4,85 | 83,75 |
| O,MG_Be | 214,33 | 142,58 | 40,00 | 19,58 | 2,06 | 0,68 | 2,85 | 8,27 | 4,93 | 82,17 |
| O,MG_Be | 191,84 | 134,67 | 39,08 | 19,42 | 2,03 | 0,67 | 2,87 | 8,27 | 4,83 | 90,17 |
| O,MG_Be | 209,44 | 139,67 | 40,22 | 18,78 | 2,16 | 0,66 | 2,92 | 7,90 | 4,73 | 82,33 |
| O,F,I_Be 2 | 207,17 | 154,50 | 38,25 | 20,17 | 1,91 | 0,68 | 0,00 | 8,03 | 5,54 | 79,33 |
| O,F,I_Be 2 | 205,08 | 156,42 | 35,00 | 19,08 | 1,89 | 0,68 | 0,00 | 8,13 | 5,58 | 77,42 |
| O,F,I_Be 2 | 207,64 | 155,91 | 36,36 | 18,82 | 1,95 | 0,65 | 0,00 | 8,11 | 5,59 | 83,64 |
| O,AM_Sa | 199,25 | 133,83 | 38,92 | 22,00 | 1,89 | 1,13 | 2,52 | 10,56 | 7,43 | 148,50 |
| O,AM_Sa | 201,83 | 131,58 | 36,50 | 20,92 | 1,83 | 1,04 | 2,71 | 10,70 | 7,44 | 142,92 |
| O,AM_Sa | 200,50 | 130,17 | 34,67 | 22,00 | 1,66 | 1,03 | 2,50 | 10,60 | 7,34 | 143,08 |
| O,MG_Sa | 194,00 | 127,17 | 36,50 | 19,92 | 1,86 | 1,17 | 2,75 | 10,57 | 7,40 | 146,83 |
| O,MG_Sa | 198,33 | 130,00 | 36,50 | 20,92 | 1,75 | 1,08 | 2,81 | 10,71 | 7,30 | 146,33 |
| O,MG_Sa | 193,92 | 114,67 | 35,92 | 19,83 | 1,79 | 1,08 | 2,71 | 10,38 | 7,05 | 143,00 |
| O,F,I_Sa | 202,92 | 155,00 | 38,67 | 20,17 | 1,96 | 1,03 | 0,00 | 10,73 | 6,88 | 151,00 |
| O,F,I_Sa | 200,00 | 158,58 | 35,75 | 19,08 | 1,88 | 1,01 | 0,00 | 10,66 | 7,18 | 145,33 |
| O,F,I_Sa | 204,17 | 149,42 | 35,42 | 21,42 | 1,67 | 1,00 | 0,00 | 10,44 | 6,88 | 141,00 |

Annexes

5.Contribution des variables :(Appendice :5)

| | Fact. 1 | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 | Fact. 6 | Fact. 7 | Fact. 8 | Fact. 9 | Fact.10 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| H P | 0,015849 | 0,168323 | 0,035046 | 0,216046 | 0,498098 | 0,065446 | 0,000049 | 0,000334 | 0,000260 | 0,000549 |
| L P | 0,000716 | 0,339447 | 0,003150 | 0,009798 | 0,022425 | 0,502069 | 0,053668 | 0,054038 | 0,013796 | 0,000895 |
| L C | 0,066765 | 0,050178 | 0,382076 | 0,094619 | 0,102009 | 0,027290 | 0,003394 | 0,135896 | 0,094400 | 0,043375 |
| l c | 0,023766 | 0,157395 | 0,000106 | 0,486344 | 0,005708 | 0,149270 | 0,013698 | 0,090821 | 0,042038 | 0,030854 |
| LC/lc | 0,097730 | 0,032805 | 0,338403 | 0,082059 | 0,010589 | 0,016788 | 0,048023 | 0,272788 | 0,071233 | 0,029582 |
| E C | 0,193574 | 0,000467 | 0,069242 | 0,009447 | 0,001799 | 0,000923 | 0,122038 | 0,232889 | 0,016525 | 0,353096 |
| L E | 0,004263 | 0,242288 | 0,044984 | 0,098865 | 0,352142 | 0,198588 | 0,027251 | 0,016641 | 0,007236 | 0,007743 |
| L F | 0,200514 | 0,000055 | 0,043427 | 0,001513 | 0,000234 | 0,017498 | 0,229973 | 0,166487 | 0,257913 | 0,082386 |
| D F | 0,201509 | 0,008590 | 0,014295 | 0,000981 | 0,005562 | 0,008271 | 0,347529 | 0,027393 | 0,093888 | 0,291982 |
| P F | 0,195315 | 0,000453 | 0,069272 | 0,000328 | 0,001434 | 0,013857 | 0,154377 | 0,002713 | 0,402711 | 0,159538 |

Annexes

6. Coordonnées des individus : (Appendice : 6)

| | Fact. | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 | Fact. 6 | Fact. 7 | Fact. 8 | Fact. 9 | Fact.10 |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| O,MG_Be | 1,84375 | 0,35793 | 4,00897 | 2,44083 | 4,03606 | 2,58076 | 1,11724 | 5,01656 | 0,32881 | 1,86138 |
| O,MG_Be | 2,67520 | 0,64985 | 2,49083 | 17,50680 | 1,59419 | 0,43275 | 0,04144 | 2,64471 | 23,88814 | 9,59045 |
| O,MG_Be | 1,32682 | 1,02316 | 15,04519 | 0,27938 | 4,33891 | 2,83943 | 2,98767 | 3,63261 | 5,83440 | 1,82641 |
| O,AM_Be | 1,81885 | 12,60999 | 0,34147 | 4,78003 | 1,07387 | 7,93837 | 0,08417 | 2,02137 | 1,25749 | 7,97871 |
| O,AM_Be | 2,37016 | 15,91826 | 0,02344 | 8,56230 | 5,67126 | 0,00545 | 0,05694 | 2,78793 | 3,20197 | 0,36696 |
| O,AM_Be | 3,38422 | 9,12637 | 0,22475 | 3,31298 | 2,50584 | 1,63817 | 0,20027 | 6,20585 | 0,02395 | 8,34816 |
| O,F,I_Be2 | 8,17178 | 1,95087 | 11,31651 | 1,89780 | 21,93709 | 0,14310 | 3,71990 | 3,72991 | 6,34468 | 2,49299 |
| O,F,I_Be2 | 4,58190 | 0,91855 | 0,88112 | 10,88851 | 12,05928 | 22,65053 | 7,72773 | 1,69417 | 6,44219 | 2,80992 |
| O,F,I_Be2 | 11,78731 | 1,56754 | 15,98132 | 1,21451 | 6,99260 | 0,36991 | 0,11002 | 0,04057 | 11,11363 | 0,00735 |
| O,F,I_Be1 | 2,84576 | 6,44479 | 0,62993 | 8,01709 | 2,30241 | 0,23992 | 13,56387 | 9,58478 | 6,83170 | 2,71092 |
| O,F,I_Be1 | 1,58060 | 11,35875 | 10,78911 | 0,00623 | 0,13315 | 1,37944 | 8,73692 | 1,39120 | 1,29025 | 8,28279 |
| O,F,I_Be1 | 2,80567 | 13,07189 | 2,39215 | 0,05209 | 0,04831 | 1,52915 | 4,91280 | 1,93395 | 1,27486 | 14,77547 |
| O,AM_Sa | 5,29772 | 1,15898 | 12,10630 | 2,28976 | 0,24319 | 13,66652 | 14,59592 | 0,63368 | 1,69634 | 1,19734 |
| O,AM_Sa | 5,55968 | 0,11373 | 1,39503 | 0,00282 | 6,52050 | 0,75945 | 0,59247 | 18,82823 | 4,94286 | 7,29498 |

Annexes

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| O,AM_Sa | 9,86765 | 0,94450 | 4,40899 | 2,42639 | 8,79430 | 8,54340 | 0,58237 | 5,64785 | 3,01614 | 0,03526 |
| O,MG_Sa | 6,69425 | 0,62475 | 1,76131 | 10,50237 | 0,03470 | 0,13716 | 11,18405 | 8,65546 | 0,56530 | 4,89727 |
| O,MG_Sa | 7,42510 | 0,92576 | 0,07578 | 0,14072 | 2,45824 | 0,76555 | 1,72475 | 10,62222 | 11,85366 | 5,68410 |
| O,MG_Sa | 5,51278 | 2,10555 | 0,13806 | 10,29702 | 0,26655 | 29,71705 | 2,60871 | 3,57305 | 4,27165 | 0,47219 |
| O,F,I_Sa | 2,69620 | 6,20528 | 10,82255 | 1,29957 | 11,92658 | 3,67536 | 7,72773 | 3,61374 | 0,74818 | 1,42108 |
| O,F,I_Sa | 4,64731 | 10,07976 | 0,05184 | 2,01815 | 6,87837 | 0,36110 | 6,85564 | 1,04676 | 3,32655 | 5,13827 |
| O,F,I_Sa | 7,10728 | 2,84372 | 5,11535 | 12,06463 | 0,18462 | 0,62740 | 10,86940 | 6,69541 | 1,74725 | 12,80800 |

Annexes

Coordonnées des variables (Appendice : 7)

| | Fact. 1 | Fact. 2 | Fact. 3 | Fact. 4 | Fact. 5 | Fact. 6 | Fact. 7 | Fact. 8 | Fact. 9 | Fact.10 |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| H P | 0,271833 | -0,681700 | -0,194667 | 0,441614 | 0,473331 | 0,066463 | 0,001395 | 0,002492 | 0,001606 | 0,002015 |
| L P | -0,057759 | -0,968072 | -0,058357 | 0,094046 | -0,100433 | -0,184086 | 0,046141 | -0,031679 | -0,011698 | -0,002571 |
| L C | 0,557922 | 0,372200 | -0,642758 | 0,292253 | -0,214203 | 0,042918 | 0,011603 | -0,050237 | -0,030600 | -0,017904 |
| l c | -0,332871 | 0,659200 | 0,010710 | 0,662585 | -0,050670 | -0,100375 | -0,023311 | 0,041069 | 0,020420 | 0,015100 |
| LC/lc | 0,675017 | -0,300950 | -0,604909 | -0,272166 | -0,069012 | -0,033662 | -0,043647 | 0,071176 | 0,026581 | 0,014786 |
| E C | -0,950001 | -0,035904 | -0,273625 | -0,092346 | 0,028449 | 0,007895 | -0,069579 | -0,065765 | 0,012803 | 0,051083 |
| L E | 0,140988 | 0,817876 | -0,220548 | -0,298738 | 0,397985 | -0,115775 | 0,032879 | -0,017580 | -0,008472 | -0,007564 |
| L F | -0,966880 | -0,012288 | -0,216697 | -0,036960 | -0,010257 | 0,034367 | 0,095514 | 0,055605 | -0,050578 | 0,024675 |
| D F | -0,969277 | -0,154002 | -0,124326 | -0,029755 | 0,050017 | -0,023628 | -0,117415 | 0,022555 | -0,030516 | -0,046452 |
| P F | -0,954265 | -0,035356 | -0,273686 | -0,017206 | -0,025400 | 0,030583 | 0,078257 | -0,007098 | 0,063201 | -0,034337 |

Résumés

Résumé

Abstract:

The species of the genus *Opuntia* in Algeria are not well known. Initially, the study is focused on the systematic identification of ecotypes and cultivars of two regions: Bejaia located in the bioclimatic sub-humid stage and Souk ahras with semi-arid climatic variant. Three most representative species (*Opuntia ficus indica*, *Opuntia megacantha*, *Opuntia amyacleae*) were identified. In a second step, we proceeded to the extraction of total polyphenols from cladodes to evaluate the antioxidant activity of the retained species. To optimize the extraction of total phenolic compounds, two methods were used (conventional and ultrasonic assisted extraction). The obtained results show the efficiency of using the method of ultrasound assisted extraction with an extraction yield improvement of 14.6% compared to the conventional method. The observed contents of polyphenols and flavonoids demonstrate the richness of *Opuntia ficus indica* from Bir-Essalam, Bejaia (35.83±3.12 mg GAE/g DW). The results of antioxidant activity indicate that species OFI and OM have the highest ABTS inhibition rates without significant difference between the collection regions. The FTIR (Infrared) analysis of the powders and liquid extracts showed the polyphenolic and polysaccharide nature of the samples, as well as the richness of the cladodes in various biomolecules.

Key words: *Opuntia*, Cladode, Conventional extraction, Ultrasound assisted extraction, Total polyphenols, Biomolecules.

المخلص:

أنواع جنس الصباريات *Opuntia* الموجودة في الجزائر غير معروفة كفاية. في البداية، تركزت الدراسة على تحديد الأصناف من منطقتين هما: "بجاية" الواقعة في الطابق المناخي شبه رطب، و"سوق أهراس" مع متغير مناخي شبه جاف. تم تحديد ثلاثة أنواع تمثيلية (*Opuntia amyacleae* و *Opuntia megacantha*, *Opuntia ficus indica*). تباعا، شرعنا في استخلاص البوليفينول الكلي من الأضلاف لتقييم نشاط مضادات الأكسدة للأنواع المختارة. لتحسين استخلاص المركبات الفينولية الكلية تم استخدام طريقتين (الطريقة التقليدية أو بمساعدة الموجات فوق الصوتية). النتائج المتحصل عليها أثبتت كفاءة استخدام طريقة الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية مع محصول استخلاص محسن بنسبة 14.6٪ مقارنة بالطريقة التقليدية. تظهر المستويات المرصودة من البوليفينول والفلافونيدات ثراء *Opuntia ficus indica* من بير السلام، بجاية (35.83 ± 3.12 مغ EAG / غ DW). تشير نتائج نشاط مضادات الأكسدة إلى أن الأنواع O.F.I و O.M تظهر أعلى مستويات تثبيط ABTS مع عدم وجود فرق كبير بين مناطق انتقاء الأنواع. تحليل IRTF (الأشعة تحت الحمراء) للمستخلصات السائلة أظهر الطبيعة البوليفينولية والمتعددة السكريد للعينات، فضلاً عن ثراء الأضلاف في الجزيئات الحيوية المختلفة.

الكلمات الأساسية: الصباريات، الأضلاف، الاستخلاص التقليدي، الاستخلاص بمساعدة الموجات فوق الصوتية، المركبات الفينولية الكلية، الجزيئات الحيوية.

Résumé

Résumé :

Les espèces du genre *Opuntia* en Algérie sont méconnues. Initialement, l'étude est axée sur l'identification systématique des écotypes et cultivars de deux régions à savoir : Bejaia située dans l'étage bioclimatique subhumide et Souk ahras à variante climatique semi-aride. Trois espèces les plus représentatives (*Opuntia ficus indica*, *Opuntia megacantha*, *Opuntia amyclaea*) ont été identifiées. Dans un second temps, nous avons procédé à l'extraction des polyphénols totaux des cladodes pour évaluer l'activité anti-oxydante des espèces retenues. Pour optimiser l'extraction des composés phénoliques totaux, deux méthodes ont été utilisées (conventionnelle et extraction assistée par ultra-sons). Les résultats obtenus témoignent de l'efficacité d'utilisation du mode d'extraction assistée par ultra-sons avec une amélioration du rendement d'extraction de 14,6 % par rapport à la méthode conventionnelle. Les teneurs observées en polyphénols et flavonoïdes démontrent la richesse de l'*Opuntia ficus indica* de Bir-Essalam, Bejaia ($35.83 \pm 3,12$ mg EAG/g P.S). Les résultats de l'activité anti-oxydante indiquent que les espèces OFI et OM présentent des taux d'inhibition d'ABTS les plus élevées sans différence significative entre les régions de collecte. L'analyse IRTF (Infra-rouge) des poudres et des extraits liquides montre la nature polyphénolique et polysaccharidique des échantillons, ainsi que la richesse des cladodes en divers biomolécules.

Mots clés : *Opuntia, Cladode, Extraction conventionnelle, Extraction assistée par ultra-sons, Polyphénols totaux, Biomolécules.*