

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère De L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

جامعة أحمد بوقرة - بومرداس-

Université M'Hamed Bougara Boumerdès



Faculté des Sciences

Département de biologie

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention de diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de Vie

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialité : Nutrition et Sciences des Aliments

Thème :

**Caractérisation physicochimique et valorisation agro-alimentaire
des cladodes fermentés de figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*)**

Présenté par :

M^{lle} KEBABI Imane

M^{lle} SALHI Sabah

Soutenu le 20 juillet 2023 devant le jury :

M ^{me} AIT KAKI S.	Présidente	PROFESSEUR	UMBB
M ^{me} HAMZA N.	Examinatrice	MCB	UMBB
M ^{me} BOUDIEB K.	Promotrice	MCB	UMBB

Année Universitaire : 2022-2023

Remerciement

*Avant tout nous remercions **Allah** tout puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la confiance en moi mêmes pour pouvoir continuer mes études et arriver à ce niveau, et un sacré, remerciement à **mes chers parents** de m'avoir soutenu le long de ces années et de leur prière que sans laquelle je ne serai peut-être pas là.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à la directrice de mémoire, Madame **Kaissa Boudieb**. Nous les remercions de nous avoir encadrées, orientées, aidées et conseillées.*

*Nos sincères remerciements s'adressent aux **membres de jury** : la présidente **M^{me} AIT KAKI** et l'examinatrice **M^{me} HAMZA** qui ont accepté de lire et de juger ce travail.*

*Nous remercions en particulier **Monsieur Mahedi Badjou**, pour nous avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser nos travaux de terrain, et **Mesdames Boubekri Rachida et Serbah Souad**.*

Nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail. Merci à tous nos camarades pour tous les bons moments passés, et les échanges scientifiques qu'on a partagés, leurs Disponibilités et leurs compétences, merci du fond du cœur.

Dédicace :

Tout d'abord je remercie le Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la patience, et la persévérance pour atteindre mes objectifs.

*A cette occasion, je dédie ce travail A ma mère : la meilleure de toutes les mamans, "**Djebrouni Karima**" qui est pour moi un exemple remarquable de sacrifices et de courage.*

*A mon père "**Kebabi Mohamed**" : qui a donné son cœur, et tout ce qu'il avait pour que ses enfants réussissent dans leurs vies.*

*A ma grand-mère « **Yamina** » qui m'a soutenu moralement par ses prières.*

*A mes frères : **Yacine, Rafik & Bilal.***

*A mes sœurs : **Sonia, Fatima, Hanane & Sabah.***

*A ma très chère amie et sœur : **Sabah***

*A mes professeurs de l'université : **UMBB***

*Ce travail est aussi dédié à mes collègues et a toutes mes amies : **Sabah, Massinissa, Lyes, imade, ghalia, Hanane, Dihia, Sarah.***

IMANE

Dédicace :

Tout d'abord je remercie le Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la patience, et la persévérance pour atteindre mes objectifs.

*A cette occasion, je dédie ce travail A ma mère : la meilleure de toutes les mamans, " **Fatiha Mefedel** " qui est pour moi un exemple remarquable de sacrifices et de courage **et** mon père "**Salhi Slimane**".*

*Un grand remerciement pour mon meilleur frère
« **Riadh & Issam** »*

*A ma très chère amie et sœur : **Imane***

Ce travail est aussi dédié à mes collègues et a toutes mes amies : Imane, Raouf, Fayrouz, ma tante Hayat, grand-mère de mon binôme Yamina, belkasmii imane.

Sabah

Table des métiers

Liste des abréviations

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

1. Présentation du figuier de barbarie.....	4
1.1. Etude botanique	4
1.1.1. Taxonomie	4
1.1.2. Etymologie	5
1.1.3. Description morphologique.....	6
1.2. Origine et distribution.....	7
1.3. Physiologie	8
1.4. Composition chimique du figuier de barbarie.....	9
1.5. Utilisations du figuier de barbarie.....	16
1.5.1. Utilisations des fruits	16
1.5.2. Utilisations des raquettes	19
1.5.3. Usage des fleurs	20
1.5.4. Usage médicinal.....	21
1.5.5. Effets pharmacologiques.....	21
1.5.6. Usage cosmétique	22
1.5.7. Autres utilisations.....	23
2. Les fruits et légumes marinés fermentés	24
2.1. Définition	24
2.2. Processus de fermentation.....	24
2.3. Les principaux Légumes et fruits fermentés	24
2.4. Les principales étapes de préparation des fruits et légumes marinés fermentés	25
2.5. Les ingrédients de base et facultatifs pour préparer des fruits et légumes marinés fermentés.....	26
2.5.1. Ingrédients de base	26
2.5.2. Ingrédients facultatifs.....	26
2.5.3. Les additifs alimentaires	27
2.6. Les conditionnements de préparation.....	27
2.7. Intérêt des fruits et légumes marinés et fermentés	28

Chapitre 02 : matériel et méthodes

1.	Présentation du lieu de stage	29
2.	Matériel	29
2.1	Matériel biologique	29
2.1.1	Présentation de la zone d'échantillonnage	29
2.1.2	L'échantillonnage	30
2.1.3	Conservation	31
2.2	Matériel non biologique	31
3.	Méthodes	32
3.1.	Préparation des échantillons	32
3.2.	Analyses morphologiques et physico-chimiques.....	34
3.2.1.	Caractérisation morphologique	35
3.2.2	Analyses physico-chimiques de base.....	37
3.2.3.	Evaluation sensorielle	44
3.2.4.	Analyse des données	44

Chapitre 03 : résultats et discussions

1.	Résultats et discussion.....	45
1.1.	Caractérisation morphologique	45
1.2.	Analyses physico-chimiques de base.....	46
1.2.1.	Teneur en eau (taux d'humidité).....	47
1.2.2.	Teneur en matière sèche	48
1.2.3	Taux de Cendres	49
1.2.4	Détermination du pH	50
1.2.5	Acidité titrable	52
1.3	Analyse biochimique	53
1.3.1.	Détermination de la composition minérale.....	53
1.3.2	Rendement des polyphénols totaux (Rdt).....	56
1.3.3	Spectroscopie infrarouge a transformée de Fourier (FTIR)	57
1.4	Analyse sensorielle.....	61
1.4.1	L'aspect	61
1.4.2	La couleur	62
1.4.3	Le goût.....	63
1.4.4	Arôme	64

1.4.5	Texture	65
1.4.6	Appréciation globale	66
	Conclusion générale	69
	Reference bibliographique	71
	Annexes	

Liste des abréviations

CAM : Crassulacean acid metabolism

CNRTL : Centre national de ressources textuelles et lexicales

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

IRTF : Spectroscopie Infra-rouge à Transformée de Fourier

Kbr : Potassium bromide (bromure de potassium)

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

Rpm : rotation par minute

Liste des figures

Figure 1 : les jeunes cladodes.....	6
Figure 2 : les raquettes de Figuier de barbarie (Photo originale, 2023)	6
Figure 3 : fleures de figuier de barbarie(Photos originales, 2023)	7
Figure 4 : fruit de figuier de barbarie (Photos originales, 2023)	7
Figure 5 : distribution géographique de figuier de barbarie (Neffar, 2012)	8
Figure 6 : cycle photosynthétique des plantes de type CAM.	9
Figure 7 : position géographique de la zone d'échantillonnage « Aït Yahia Moussa »	30
Figure 8 : photo originale de la zone d'échantillonnage (Photo originale, 2023)	30
Figure 9 : dimensionnement des cladodes (photo originale, 2023)	31
Figure 10 : photos des étapes de nettoyage des échantillons (A : nettoyage /B : lavage /C :séchage / D :conservation)	32
Figure 11 : photos des étapes de préparation les échantillons fermentés	33
Figure 12 : photo des échantillons trompés dans la solution de vinaigre	34
Figure 13 : photos des étapes de préparation de la pate	34
Figure 14 : les déférentes interfaces de vue des coupes longitudinales des cladodes de Figuier de barbarie (A, B, C)	35
Figure 15 : étude morphologique par MEB des coupes de cladodes (photos originales, 2023).....	37
Figure 16 : photo de l'appareil ICP-OES avio-200 (photo originale, 2023)	40
Figure 17 : les étapes de l'extraction des polyphénols totaux.	42
Figure 18 : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (photo originale (A) appareil spectromètre ; (B) presse.....	43
Figure 19 : microscopie électronique à balayage (MEB) des cladodes frais d'Opuntia ficus-indica séchés à différents démontions.	46
Figure 20 : histogramme des taux d'humidité des cladodes du figuier de barbarie (frais,3jrs ,7jrs,15jrs)	48
Figure 21 : Teneurs en matières sèche des cladodes du figuier de barbarie (CFr, CF3,CF7 et CF15).....	49
Figure 22 : Histogramme de taux de cendre des cladodes du figuier de barbarie (frais,3jrs ,7jrs,15jrs)	50
Figure 23 : courbe graphique de la variation des pH des cladodes de figuier de barbarie frais et fermenté (3jrs/7jrs/15jrs).....	51
Figure 24 : courbe graphique de la variation de l'acidité titrable des cladodes de figuier de barbarie frais et fermenté (3jrs/7jrs/15jrs)	53
Figure 25 : Spectre d'analyse par IR des poudres de cladode (opuntia ficus indica)(1) : spectre d'analyse par IR de poudre d'échantillons frais (2) : spectre d'analyse par IR de poudre d'échantillons de 3 jours.....	58
Figure 26 : Spectre d'analyse par IR de la poudre de cladode (opuntia ficus indica) d'échantillons fermenté 7 jours.....	59
Figure 27 : Spectre d'analyse par IR de la poudre de cladode (opuntia ficus indica) d'échantillons fermenté 15jours.....	60
Figure 28 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (l'aspect)	62
Figure 29 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (couleur).....	63
Figure 30 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (goût)	64

Figure 31: répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (Arôme).....	65
Figure 32: répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (texture).....	66
Figure 33: répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cornichons (Appréciation globale).....	67

Liste des tableaux

Tableau 1: composition chimique des cladodes et de pulpe de fruit d'opuntia.....	9
Tableau 2: teneur en acide aminé dans la graine, la raquette du figuier OFI	11
Tableau 3: teneur en vitamines des différentes parties de la plante d'Opuntia ficus indica(La teneur en vitamines est exprimée en mg/100 g de tissu)	12
Tableau 4: Teneur en éléments minéraux dans les différentes parties de la plante d'Opuntia ficus indica (Les composés minéraux sont exprimés en mg/100g)	13
Tableau 5: teneur en phytostérols des différentes parties du fruit de l'espèce Opuntia ficus indica (pulpe, graines et peau) (Les teneurs en stérol sont exprimées en g/kg)	14
Tableau 6: la distribution et la quantité des phénols et des flavonoïdes présente dans les différentes parties d'Opuntia ficus indica.....	15
Tableau 7: la moyenne des mesures et les dimensions des raquettes des cladodes de figuier de barbarie.....	45
Tableau 8: les teneurs moyennes en eau, en matière sèche, en cendre, le pH et l'acidité titrable des échantillons de cladodes préparés	47
Tableau 9: les concentrations des macro-minéraux des cladodes de figuier de barbarie	53
Tableau 10: les concentrations des micro- éléments des cladodes de figuier de barbarie.....	55
Tableau 11: les résultats obtenus de rendement des polyphénols totaux	56

Introduction Générale

INTRODUCTION :

Parmi les nombreux végétaux qui composent la flore Algérienne (environ 14 000), il en est un qui se remarque tout d'abord par la singularité toute caractéristique de sa forme et par son abondance dans les terrains les plus arides : c'est le cactus raquette que l'on désigne par le nom scientifique *Opuntia ficus indica*. Considérée comme plante exotique du sol Algérien, elle s'est complètement acclimatée depuis sa venue avec les espagnols de l'Amérique central (**Khodir, 2022**).

En Algérie, le figuier de Barbarie suscite un vif intérêt. Des recherches approfondies ont été menées pour explorer divers aspects de cette plante, notamment : Étude de l'extraction et la caractérisation du mucilage de la raquette de l'*Opuntia ficus indica* (**Adjeroud et al., 2015 ; Felkai-Haddache et al., 2015a, Felkai- Haddache et al., 2015b ; Lefsih et al., 2016 ; Lefsih et al., 2018 ; Adjeroud et al., 2018**), l'extraction de l'huile des graines, ou bien la fabrication de jus à partir du figuier de Barbarie (**Terki et al, 2018**).

Concernant l'industrie alimentaire, les jeunes raquettes (Nopals ou Nopalitos) sont consommées comme légumes et ingrédients dans la confection des autres préparations alimentaires (**Saenz et al. 2004**). Le mucilage possède des propriétés visqueuses et est utilisé en industrie alimentaire (**Saenz et al. 2007**). Beaucoup de ces polysaccharides ont été utilisées pour ajuster et améliorer les propriétés rhéologiques pour leurs effets épaisseurs et/ou leurs propriétés gélifiantes, mais aussi comme agents de capture qui retiennent l'humidité et empêchent son évaporation à partir de denrées alimentaires, comme mousses et émulsions stabilisantes, agents d'enrobage dans la confiserie et aliments frits, adhésifs dans les glaçages de boulangerie, agents de clarification dans le bière et le vin, agents opacifiants dans les jus, agents floculats dans le vin, agents d'encapsulation en poudre d'arômes fixes ou certains huiles, ainsi que comme substituts de graisse dans la viande et les produits laitiers (**Felkai-Haddache et al., 2015a**).

Ces dernières années, les consommateurs ont tendance à préférer les aliments et les boissons frais, hautement nutritifs, bons pour la santé et prêts à manger ou à boire (**Endrizzi, et al., 2009**). En effet, les fruits et légumes fermentés jouent un rôle important dans l'alimentation de la population mondiale sur tous les continents (**Battcock et al., 2005**). Notamment, dans la conservation, la production d'aliments sains et nutritifs avec une grande variété de saveurs, d'arômes et de textures qui enrichissent le régime alimentaire humain et

éliminent les facteurs antinutritionnels pour rendre les aliments propres à la consommation (Demir *et al.*, 2006). La fermentation présente de nombreux avantages, notamment la sécurité alimentaire, l'amélioration de la nutrition et du bien-être social des personnes vivant dans des sociétés marginalisées et vulnérables (Montet *et al.*, 2006). La fermentation des fruits et légumes peut se produire "spontanément" grâce à la microflore lactique naturelle de surface, telle que *Lactobacillus spp.*, *Leuconostoc spp.* Et *Pediococcus spp.*

La consommation de fruits et légumes fermentés contribue à améliorer la nutrition humaine de plusieurs manières, notamment en assurant une alimentation équilibrée, en fournissant des vitamines, des minéraux et des hydrates de carbone, et en prévenant plusieurs maladies telles que la diarrhée et la cirrhose du foie grâce à leurs propriétés probiotiques (Yamano, *et al.*, 2006). Certains fruits et légumes fermentés contiennent des pigments colorés tels que des flavonoïdes, du lycopène, de l'anthocyanine, de l' β -carotène et des glucosinolates, agissent comme antioxydants dans l'organisme en piégeant les radicaux libres nocifs impliqués dans les maladies dégénératives telles que le cancer, l'arthrite et le vieillissement (Kaur *et al.*, 2001).

Néanmoins, La fermentation lactique des légumes n'a d'importance industrielle que pour certains fruits et légumes mondialement connus tels que, la choucroute, les olives, les concombres et le kimchi (Fessard, 2017).

Dans ce contexte, nous nous sommes orientés vers la valorisation des jeunes cladodes de figuier de barbarie en industrie-alimentaire, qui sont encore mal connues par le grand public Algériens, mais largement consommées au Mexique comme légume. Les études réalisées sur les cladodes sont nombreuses, par contre aucune étude n'est disponible concernant la fermentation des cladodes.

De ce fait, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet de fermentation (trompé dans une solution de vinaigre) sur différents paramètres physicochimiques des cladodes. Par ailleurs, l'analyse sensorielle, l'évolution du pH, l'acidité titrable, les cendres, le rendement en polyphénols et la teneur en micro et macro-minéraux pendant 15 jours de fermentation ont été évalués.

Pour atteindre cet objectif, le manuscrit est organisé en trois chapitres.

- Le premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique, qui aborde des généralités sur le figuier de barbarie et les fruits marinés fermentés.

- Le deuxième chapitre, regroupe le matériel et méthodes utilisés pour réaliser toutes les expériences en objet.
- Ce travail s'achève par une conclusion générale et des perspectives éventuelles.



Chapitre 01

1. Présentation du figuier de barbarie

1.1. Etude botanique

Le figuier de Barbarie, une plante native du Mexique, prospère dans les régions arides et semi-arides (**Reynolds et al., 2003**). En raison de sa capacité à s'adapter à des conditions environnementales difficiles, il occupe une place importante dans l'alimentation humaine et est également utilisé comme fourrage pour le bétail. Sa résistance aux conditions climatiques extrêmes en fait une plante d'un grand intérêt (**Hernández-Urbiola et al., 2011**).

1.1.1. Taxonomie

La taxonomie des opuntias ficus indica (OFI) est très difficile pour différentes raisons :

- ✓ Leurs phénotypes varient largement selon les conditions écologiques.
- ✓ La polyploïdie existe chez de nombreuses populations qui se produisent végétativement et sexuellement.
- ✓ L'existence de nombreux hybrides.

Il a été constaté que dans les populations sauvages des genres opuntias, les plants localisés au milieu de la population présentent une faible variabilité phénotypique alors que les plants situés aux périphéries présentent une variabilité très élevée, ce phénomène est lié probablement à la possibilité d'inter change génétique. Les cactacées présentent une taxonomie très variée. On compte environ 2260 taxa acceptés qui sont répartis comme suit :

- 1306 espèces
- 301 sous espèces hétéro typiques acceptées
- 582 espèces et hybrides
- 71 sous espèces hétéro typiques acceptées provisoirement

Le figuier de barbarie, scientifiquement connu sous le nom d'*Opuntia ficus-indica*, est une plante succulente appartenant à la famille des cactacées. Il appartient au règne des plantes (Plantae), à l'ordre des Caryophyllales, à la famille des Cactaceae, à la sous-famille des Opuntiaceae, au genre *Opuntia* et à l'espèce *Opuntia ficus-indica* (**De Felice, 2004**).

De nombreux auteurs ont élaboré des classifications du Genre *Opuntia*. La classification considérée comme la plus valable à ce jour est sans doute celle établie par Britton et Rose en 1963 (**Mulas et Mulas, 2004**).

D'après **Linné (L, 1768)**, la classification taxonomique du figuier de barbarie (*Opuntia ficus-indica*) (**Kiesling, 1999**), est la suivante :

Règne	Plantae
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophyllales
Famille	Cactaceae
Sous-famille	Opuntioideae
Genre	<i>Opuntia</i>
Sous-genre	Platyopuntia
Espèce	<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill., 1768

1.1.2. Etymologie

Étant donné l'importance d'*Opuntia ficus-indica* (OFI) et ses nombreux avantages, différents noms lui ont été attribués dans son habitat d'origine ainsi que dans les régions où il a été introduit. Ces noms reflètent souvent l'origine de son introduction et de sa distribution. Par exemple, au Mexique, il est couramment appelé Tenochtli. Le premier nom en espagnol utilisé était "higo de las Indias", faisant référence à ses origines dans les Nouvelles Indes, ce qui a donné lieu à son premier nom scientifique : *Cactus ficus-indica* Linné. Un autre nom bien connu est "tuna de Castilla" (ou "nopal de Castilla"), d'origine caribéenne, qui a été utilisé par les premiers Espagnols arrivant en Amérique, en référence à l'ancien royaume espagnol de Castille. Aujourd'hui, le nom commun le plus couramment utilisé est "cactus", dérivé du mot grec "kaktos" signifiant "plante épineuse". Il est important de noter que la plante peut avoir différents noms selon la langue et l'idiome local.

- ❖ En Mexique : Nopal.
- ❖ En arabe : El-tin-el-Choki, El-tin-el-Hindi, Karmouss n'ssara.
- ❖ En Espagne : outre Nopal, Tuna, Ensada, Higos de Pala, Higos de Mauro.
- ❖ En Brésil : palma de gado.

- ❖ En Portugais : palma forrageira, figo da India, figo de pitoira, figueira da India.
- ❖ En France : chardon d'Inde, figue de Barbarie, figuier à raquettes, figuier d'Inde, Opunce, raquette.
- ❖ En Italie : Fichi d'India.
- ❖ En Allemand : frucht des feigenkactus.

1.1.3. Description morphologique

Le figuier de barbarie est un arbuste pouvant atteindre 2 à 6 mètres de hauteur, caractérisé par un tronc épais et ligneux, des raquettes aplaties appelées cladodes, des épines, des fleurs et des fruits (Schweizer, 1997).

↳ **Les raquettes** : ou cladodes sont également appelés : coussinets de cactus, tiges, légume de cactus, phyloclades, Nopals ou Pencas (Stintzing *et al.*, 2005) et feuille du cactus (Nharingo *et al.*, 2016). Les jeunes cladodes appelés Nopalitos au Mexique (Fig. 3) (Stintzing and Carle, 2005). Ils ont une forme ovoïdale, sont de couleur verte, mesurent entre 30 et 50 cm de longueur et ont une épaisseur de 1,5 à 3 cm. Les raquettes sont dotées de petites aréoles qui sont couvertes d'épines et de glochides blancs (Fig. 4). Les cladodes jouent un rôle dans la photosynthèse en raison de leur fonction chlorophyllienne (Feugang, 2006). En raison de leur production élevée de mucilage dans les cladodes et les fruits, les cactacées sont capables de stocker l'eau, même dans des conditions climatiques défavorables (Sáenz, 2004).



Figure 1 : les jeunes cladodes

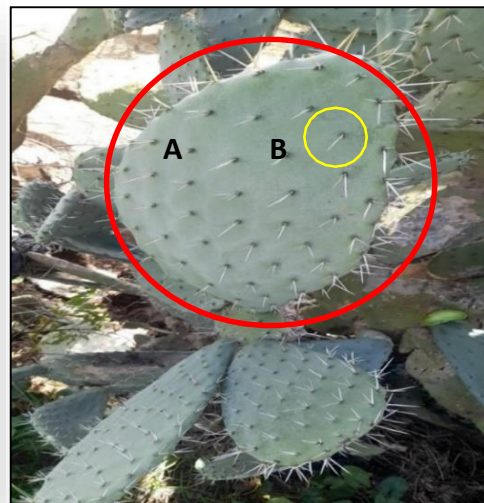


Figure 2 : les raquettes de Figuier de barbarie (Photo originale, 2023)

(A) : Branches (appelées cladodes ou raquettes), (B) : épines de figuier de barbarie

- ↪ **Les fleurs** : le figuier de barbarie produit des fleurs jaunes ou oranges à l'extrémité des raquettes (**Fig. 3**), mesurant entre 4 et 10 cm de largeur. Le fruit qui se développe à partir de ces fleurs est connu sous le nom de figue de Barbarie (**Fig. 4**). Il a une forme ovoïde et charnue, et est souvent décoré de petites épines (**Piga, 2004**).
- ↪ **Le fruit** : est généralement de couleur verdâtre, mais il peut prendre une teinte allant du jaune clair au rouge violacé à maturité. La plante fleurit généralement en Avril et Mai, et les fruits sont récoltés de fin Juillet à Septembre.



Figure 3 : fleurs de figuier de barbarie



Figure 4 : fruit de figuier de barbarie

(Photos originales, 2023)

1.2. Origine et distribution

Le figuier de Barbarie est une plante indigène des zones tropicales du continent Nord-Américain, en particulier du Mexique (représenté en vert dans la figure 5) (**Araba et al., 2000**). Au 16^{ème} siècle, il a été introduit en Afrique du Nord, notamment en Algérie, en Tunisie, la Libye et au Maroc. Depuis lors, sa culture s'est rapidement répandue dans le bassin méditerranéen, mais aussi dans de nouvelles zones de distribution telles que le Brésil, le Chili, les États-Unis, l'Inde, l'Italie, l'Espagne, l'Érythrée, le Portugal, l'Afrique du Sud, l'Éthiopie, le Soudan, la Tanzanie, le Kenya et l'Ouganda (représenté en noir dans la figure 5) (**Bouayad, 2012**). On peut également le trouver au Canada, en Argentine et au Pérou (**Rapport du Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, 2010**).

En Algérie, la répartition géographique de l'*Opuntia* n'est pas clairement définie, car on le trouve à l'état sauvage ou cultivé dans tout le pays, des régions côtières aux zones arides

et semi-arides (**Bouayad, 2012**). Les meilleures cueillettes de figues de Barbarie se réalisent généralement en altitude, en particulier dans les environnements rocheux, à l'exception des régions montagneuses et des zones sahariennes (**Benattia, 2017**).

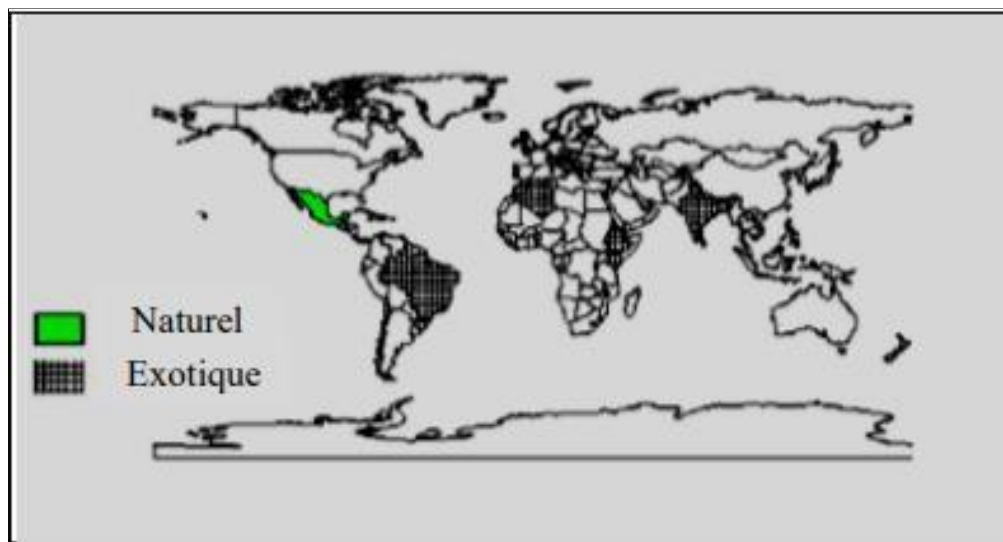


Figure 5 : distribution géographique de figuier de barbarie (Neffar, 2012)

1.3. Physiologie

L'adaptation du figuier de barbarie à la sécheresse est due à une photosynthèse de type CAM (Crassulacean Acid Metabolism) (**Fig. 6**). Pendant la nuit, le figuier de barbarie présente la particularité de fixer le CO_2 et de libérer l' O_2 , tout en fermant ses stomates pendant la journée. Cette adaptation lui permet de réduire la perte d'eau par évapotranspiration pendant les périodes les plus chaudes. Pendant la nuit le CO_2 est fixé dans les tissus de chloroplaste par réaction avec le phosphoénolpyruvate, résultant du métabolisme des sucres via la glycolyse pour donner l'oxaloacétate. Cet élément est à son tour transformé en malate pour être stocké dans la vacuole, d'où le nom de plante à métabolisme acide. Pendant le jour, le malate se décompose en pyruvate et libère le CO_2 et l' H_2O directement au niveau des tissus chlorophylliens qui s'en servent pour la suite de photosynthèse (**Black et Osmond, 2003 ; Arba 2009**).

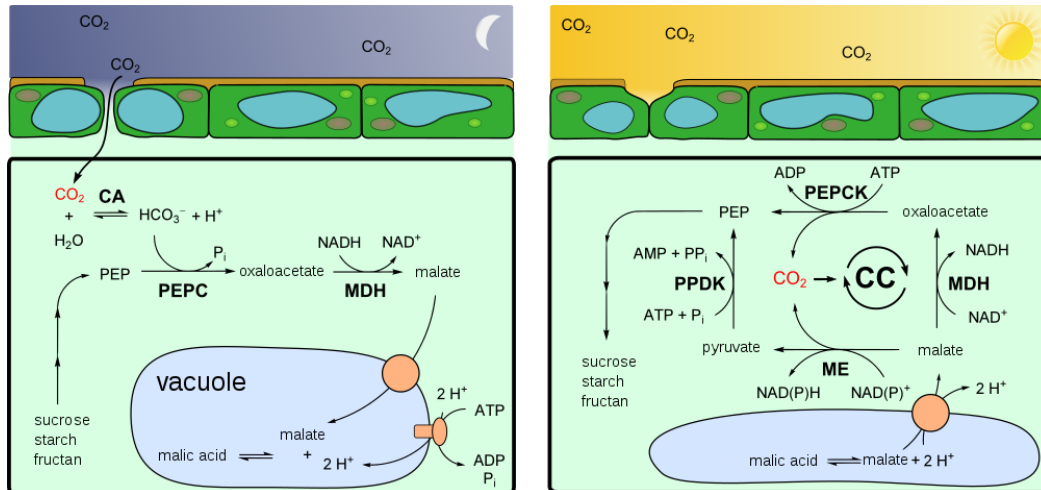


Figure 6 : cycle photosynthétique des plantes de type CAM

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/CAM_cycle)

1.4. Composition chimique du figuier de barbarie

Les cladodes et les fruits de *Opuntia ficus-indica* sont connus pour leur importance en tant que source de divers composés alimentaires (**Tableau 1**). La composition chimique des cladodes peut varier en fonction de l'emplacement de la culture, de la saison, de l'âge de la plante et de la variété (**Sáenz, 1995 ; Felker et al., 2005**). Les cladodes sont riches en pectine, en mucilage et en éléments minéraux. D'autre part, les fruits sont une source importante de vitamines, d'acides aminés et de bétalaïnes (**Feugang et al., 2006**).

Tableau 1 : composition chimique des cladodes et de pulpe de fruit *d'Opuntia ficus indica* (**Feugang et al., 2006**)

Constituants	Poids sec des cladodes	Poids frais	
		Cladodes (g/100g)	Pulpe de fruit (%)
Eau	-	88-95	84-90
Glucide	64-71	3-7	12-17
Cendres	19-23	1-2	0.3-1
Fibres	18	1-2	0.02-3.15
Protéines	4-10	0.5-1	0.21-1.6
Lipides	1-4	0.2	0.09-0.7

♣ Les acides aminés, et les vitamines

Les études ont montré que le fruit d'*Opuntia ficus-indica* présente des teneurs élevées en acides aminés, en particulier la proline, la taurine et la sérine (**Stintzing et al., 2001 ; Stintzing et al., 2005**) (**Tableau 2**). Concernant les cladodes, la glutamine est l'acide aminé prédominant, suivi de la leucine, de la lysine, de la valine, de l'arginine, de la phénylalanine et de l'isoleucine (**Tableau 2**). Quant aux graines, l'acide glutamique est l'acide aminé prédominant, suivi de la leucine, de la sérine et de la lysine (**Lee et al., 2005**).

En ce qui concerne la composition en vitamines, la peau du fruit est riche en vitamine E, notamment en α -tocophérol, avec des quantités pouvant atteindre 17,6 g/kg (**Tableau 3**) (**El-Mostafa et al., 2014**). Cependant, l'huile extraite des graines du fruit présente une faible teneur en vitamine E (0,403 g/kg), principalement sous forme de γ -tocophérol (0,330 g/kg) (**Tableau 3**) (**Ramadan et al., 2003 ; El-Mostafa et al., 2014**). Le fruit d'*Opuntia ficus indica* contient également une quantité significative de vitamine C, variant de 180 à 300 mg/kg (**Mobhammer et al., 2006**). Cette quantité est supérieure à celle présente dans d'autres fruits tels que la pomme, la poire, le raisin et la banane. La vitamine C se retrouve dans toutes les parties du fruit, avec une concentration de 0,5 à 1 g/kg (**Piga, 2004**). D'autres vitamines telles que les caroténoïdes, la thiamine, la riboflavine et la niacine sont principalement présentes en traces dans les cladodes (**Sepúlveda et Sáenz, 1990**).

Tableau 2: teneur en acide aminé dans la graine, la raquette du figuier de barbarie OFI (El-Mostafa *et al.*, 2014)

Acides aminés (g/100 g de matière sèche)	Raquette	Fruit	Graine
Alanine	1,25	3,17	4,75
Arginine	5,01	1,11	6,63
Asparagine	3,13	1,51	Trace
Acide aspartique	4,38	Trace	10,42
Acide glutamique	5,43	2,40	21,68
Glutamine	36,12	12,59	Trace
Cystine	1,04	0,41	0,37
Histidine	4,18	1,64	3,11
Isoleucine	3,97	1,13	6,20
Leucine	2,71	0,75	9,94
Lysine	5,22	0,63	6,79
Méthionine	2,92	2,01	0,70
Phénylalanine	3,55	0,85	5,25
Sérine	6,68	6,34	8,46
Thréonine	4,18	0,48	1,53
Tyrosine	1,46	0,45	3,09
Tryptophane	1,04	0,46	Trace
Valine	7,72	1,43	6,02
Acide α- aminobutyrique	Trace	0,04	Trace
Carnosine	Trace	0,21	Trace
Citrulline	Trace	0,59	Trace
Ornithine	Trace	Trace	Trace
Proline	Trace	46	Trace
Taurine	Trace	15,79	Trace
Glycine	Trace	Trace	5,06

Tableau 3: teneur en vitamines des différentes parties de la plante d'*Opuntia ficus indica* (La teneur en vitamines est exprimée en mg/100 g de tissu) (El-Mostafa *et al.*, 2014)

Vitamines	Pulpe	Graine	Peau	Raquette
Vitamine K1	53,2	52,5	109	.....
Vitamine C	34-40	.....	.....	7-22
Vitamine B1	.....	.....	.....	0,14
Vitamine B2	.....	.....	.....	0,6
Vitamine B3	.....	.....	.....	0,46
α-Tocophérol	84,9	56	1760	.....
β-Tocophérol	12,6	12	222	.....
γ-Tocophérol	7,9	33	174	.....
σ-Tocophérol	422	5	26	.....
Vitamine E totale	527,4	106	2182	.....

♣ Les sels minéraux

La composition minérale de la pulpe de fruit du figuier de Barbarie a été étudiée et a révélé des quantités relativement importantes d'éléments minéraux tels que le magnésium, le calcium et le potassium (Stintzing *et al.*, 2001). Les graines du fruit, quant à elles, sont riches en minéraux, avec une prédominance de potassium et de phosphore, suivis du magnésium, du sodium et du calcium. Les cladodes, quant à elles, présentent principalement du calcium et du potassium (Tableau 4).

Tableau 4 : Teneur en éléments minéraux dans les différentes parties de la plante d'*Opuntia ficus indica* (Les composés minéraux sont exprimés en mg/100g) (El-Mostafa *et al.*, 2014).

Principaux éléments identifiés	Pulpe	Graine	Cladodes
Calcium	27,6	16,2	5,64- 17,95
Oxalate de calcium	.....	.....	11,5- 4,3
Magnésium	27,7	74,8	8,80
Sodium	0,8	67,6	0,3- 0,4
Potassium	161	163	2,35- 55,20
Fer	1,5	9,45	0,09
Phosphate	.....	152	0,15- 2,59
Zinc	.....	1,45	0,08
Cuivre	.....	0,32	.....
Manganèse	.....	Trace	0,19- 0,29

♣ Les lipides et les composés phénoliques

La composition lipidique de la pulpe de fruit du figuier de Barbarie a été étudiée et a révélé une faible teneur en huile (0,1-1,0%) correspondant à 8,70 g de lipides totaux/kg de poids sec de pulpe, comparé à 98,8 g de lipides totaux/kg dans les graines (Ramadan et Mörsel, 2003). Les huiles de pulpe de fruit sont dominées par l'acide linoléique, suivi par l'acide palmitique et l'acide oléique. De plus, les acides gras polyinsaturés, tels que l'acide γ -linoléique et l'acide α -inolénique, sont présents en quantités plus élevées (Mobhammer *et al.*, 2006). Les principaux stérols présents dans les huiles de pulpe sont le β -sitostérol, suivi par le campésterol, représentant environ 90% des stérols totaux de la pulpe (Tableau 5).

Les analyses chromatographiques des lipides totaux extraits des raquettes de cactus révèlent que les acides palmitique (C16 :0), oléique (C18 :1), linoléique (C18 :2) et linolénique (C18 :3) représentent les principaux acides gras identifiés (Abidi *et al.*, 2009).

Il a été démontré par plusieurs auteurs que la teneur en matière grasse dans la pulpe du fruit de figue de Barbarie est de 0,5%. Elle constitue une excellente source d'acides gras tels que l'acide linoléique et l'acide oléique, qui sont les principaux acides présents, suivis par l'acide palmitique.

Les parties de la plante de cactus sont riches en composés phénoliques tels que les flavonoïdes et les acides phénoliques (Tableau 8) (El-Mostafa *et al.*, 2014). Dans la pulpe de fruit, la teneur en phénols totaux est de 218,8 mg/100 g, avec une concentration élevée en glycosides d'isorhamnétine (50,6 mg/100 g). Les raquettes sont riches en nocotiflorine (Tableau 6).

Tableau 5 : teneur en phytostérols des différentes parties du fruit de l'espèce *Opuntia ficus indica* (pulpe, graines et peau) (Les teneurs en stérol sont exprimées en g/kg)

(El-Mostafa *et al.*, 2014).

Principaux composés identifiés	Pulpe	Graine	Peau
Campesterol	8,74	1,66	8,76
Stigmasterol	0,73	0,30	2,12
Lanosterol	0,76	0,28	1,66
β-Sitosterol	11,2	6,75	21,1
Δ5-Avenasterol, Δ7-	1,43	0,29	2,71
Avenasterol	.....	0,05	.....
Δ7-Avenasterol	.....	.....	0,68
Ergosterol			

Tableau 6: la distribution et la quantité des phénols et des flavonoïdes présente dans les différentes parties d'*Opuntia ficus indica* (El-Mostafa *et al.*, 2014)

Parties de la plante	Principaux composés identifiés	Quantité En mg/100g
La fleur	Acide gallique	1630- 4900
	Quercetine 3-O-Rutinoside	709
	4 Kaempferol 3- O- Rutinoside	400
	5 Quercetine 3- O- Glucoside	447
	6 Isorhamnetine 3-O- Robinobioside	4269
	7 Isorhamnetine 3-O- Galactoside	979
	8 Isorhamnetine 3- O- Glucoside	724
	9 Kaempferol 3- O-Arabinoside	324
	La graine	Les acides phénoliques totaux	48-89
Feruloyl- sucrose isomer 1		7,36-17,62
Feruloyl- sucrose isomer 2		2,9-17,1
Sinapoyl-diglucoside		12,6-23,4
Les flavonoïdes totaux		1,5-2,6
Les tannins totaux		4,1-6,6
La peau de fruit	Les acides phénoliques totaux	45,7.103
	Les flavonoïdes totaux	6,95
	Kaempférol	0,22
	Quercétine	4,32
	Isorhamnétine	2,41-91
Les raquettes	Acide gallique	0,64-2,37
	Acide coumarique	14,08-16,18
	Acide 3,4-dihydroxybenzoïque	0,06-5,02
	Acide 4-hydroxybenzoïque	0,5-4,72
	Acide férulique	0.56-34,77
	Isoquercétine	2,29-39,67
	Isorhamnetine 3-O-glucoside	4,59-32,21
	Nicotiflorine	2,89-146,5
	Rutine	2,36-26,17
	Narcissine	14,69-137,1

♣ Les composés volatiles

Les composants volatils présents dans les fruits de la figue de Barbarie sont présents en quantités mineures mais jouent un rôle essentiel dans la saveur. L'éthanol est le composant prédominant, représentant 76,33% de la composition (Saenz, 2000 ; Piga, 2004).

1.5. Utilisations du figuier de barbarie

La figue de barbarie est couramment appelée le "fruit du diable" dans certains pays, tandis que d'autres la désignent comme le "fruit du paradis" en raison de ses multiples bienfaits pour la santé humaine, animale et l'environnement (Agroligne, 2016).

1.5.1. Utilisations des fruits

Il existe près de 200 espèces d'Opuntia, mais seuls les fruits d'une vingtaine d'entre elles sont utilisés. Ces fruits sont réputés pour leur teneur élevée en sucre, en minéraux et en vitamine C, offrant une valeur nutritionnelle similaire à celle d'autres fruits tels que les oranges, les pommes, les poires, les abricots, les cerises, etc (Arba, 2009). Ils sont récoltés et commercialisés durant l'été et l'automne, en fonction de la précocité de la variété. Les fruits sont consommés frais, séchés, congelés, confits ou transformés en jus concentré, en boisson alcoolisée, en confiture ou en huile alimentaire extraite des graines (Jana, 2012).

❖ Jus

Selon la norme générale Codex pour les jus et les nectars de fruits (CODEX STAN 247-2005), le jus de fruits est défini comme un liquide non fermenté mais fermentescible, extrait de parties comestibles de fruits sains, à maturité appropriée, frais ou conservés dans des conditions saines par des moyens adaptés et/ou des traitements de surface post-récolte conformes aux dispositions pertinentes de la Commission du Codex Alimentarius (Boutakiout, 2017). Des études ont été menées sur le jus de figue de Barbarie, mettant en évidence son goût et son parfum agréables. Une autre possibilité est la production de jus concentrés qui présentent une bonne stabilité microbiologique (Bhira, 2012). Selon la FAO, plusieurs essais ont été réalisés pour produire un jus de haute qualité et stable. Un exemple de produit commercial réussi est une boisson à base de concentré de figues de Barbarie colorées, d'eau et d'arômes naturels. Ce produit est disponible sur le marché américain, conditionné dans des emballages Tetra Pak d'un litre et vendu à environ 6 \$ US par litre (FAO, 2018).

❖ Confiture

Selon le Centre national de ressources textuelles et lexicales (CNRTL, 2012), la confiture est une préparation réalisée à partir de fruits entiers ou traités, cuits avec du sucre pour assurer leur conservation. La fabrication de confitures implique un traitement

thermique et une réduction de l'activité de l'eau (et parfois aussi du pH pour permettre un traitement thermique moins sévère) (FAO, 2018).

Un exemple de confiture commercialisée est la marque Scyavuru, qui rencontre un grand succès en Italie. Selon le site officiel de la marque Scyavuru, la composition de leur confiture est la suivante : figes de Barbarie (65 g pour 100 g), sucre (45 g pour 100 g), gélifiant (pectine) et jus de citron ([Confiture Extra de Figes de Barbarie 250 gr scyavuru sicile \(olico.it\)](http://Confiture Extra de Figes de Barbarie 250 gr scyavuru sicile (olico.it)))

❖ Vin

Selon la définition du Larousse (Larousse, 2004), le vin est un terme qui englobe tous les jus dont une partie ou la totalité du sucre est transformée en alcool par fermentation. Historiquement, le jus de la tuna, obtenu après cuisson du fruit sans ajout d'eau ni de sucre, donne une délicieuse boisson qui doit être consommée fraîche, idéalement immédiatement après sa production. En effet, après quelques heures, ce jus fermente naturellement pour devenir le Colonche (Nochoctli), célèbre vin de cactus des Aztèques, une boisson légèrement alcoolisée très appréciée par les Indiens, qui la fabriquent quotidiennement pendant la période de fructification. Selon une ancienne tradition, le Colonche est considéré comme une boisson magique, capable de lier éternellement les amants qui la consomment ensemble (Schweizer, 1997).

❖ Vinaigre

Un autre produit qui présente un potentiel intéressant est le vinaigre, et certaines expériences de fabrication méritent d'être soulignées (FAO, 2018). Ce vinaigre gastronomique possède un arôme riche, savoureux et fruité, une légère acidité et un goût très raffiné. Il offre de nombreuses vertus nutritives et cosmétiques. En effet, il stimule la flore intestinale, améliore la digestion et renforce les défenses naturelles. Ce vinaigre est extrait de la pulpe de figue (Agroligne, 2016). En Algérie, l'usine de transformation de la figue de barbarie, NOPALTEC, située dans la commune de Sidi Fredj, dans la wilaya de Souk Ahras, produit maintenant du vinaigre d'orange à partir des figes de barbarie.

❖ Colorants alimentaires

Les colorants naturels, en particulier les nuances de rouge et de violet, sont très appréciés par les consommateurs, car les colorants synthétiques rouges utilisés comme additifs alimentaires ont été restreints par des réglementations officielles dans l'Union

européenne et aux États-Unis en raison de leurs possibles effets indésirables sur la santé humaine (FAO, 2018).

➤ **Les bétalaines** : Dans l'industrie agroalimentaire, L'utilisation du figuier de Barbarie comme source de bétalaines est particulièrement intéressante, car ces fruits sont fortement parfumés et présentent des propriétés nutritionnelles supérieures à celles des racines de betterave rouge (Bhira, 2012). Les fruits de cactus de couleur rouge ou pourpre contiennent des bétalaines, qui peuvent être utilisées principalement comme colorants alimentaires pour des produits ne nécessitant pas de traitement thermique, tels que les glaces, les yaourts, les friandises, les desserts, les sirops et les sauces. Ces colorants naturels ne sont pas associés à un numéro E, ce qui permet aux produits alimentaires colorés par ces substances naturelles de conserver leur label biologique. Les colorants extraits de légumes et de fruits fournissent également des composés supplémentaires bénéfiques pour la valeur nutritionnelle du produit concerné. Ce qui distingue particulièrement les bétalaines du jus de fruit de cactus, c'est leur capacité à maintenir leur couleur dans une plage de pH située entre 3 et 7, contrairement à la plupart des anthocyanes couramment utilisées qui perdent en performance et se dégradent dans cette plage de pH (Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2010).

❖ L'huile des pépins

L'huile de pépins de figue de Barbarie est un produit très réputé sur le marché international, et son extraction à partir des graines du fruit du figuier de Barbarie la classe parmi les huiles polyinsaturées, à l'instar de la plupart des huiles végétales. Sa valeur commerciale est remarquable en raison de ses propriétés cosmétiques recherchées. Elle est abondante en acides gras insaturés tels que l'acide linoléique (64,43%) et l'acide oléique (18,46%). Parmi les acides gras saturés, l'acide palmitique (12,60%) et l'acide stéarique (2,82%) sont les plus prédominants. Cependant, sa véritable particularité réside dans sa teneur élevée en substances insaponifiables, telles que les stérols et les tocophérols. Cette caractéristique en fait un atout précieux dans le domaine de la cosmétologie, car ces

composés sont connus pour leurs effets bénéfiques sur l'élasticité de la peau, le métabolisme cellulaire et la restauration de la structure cutanée. L'huile de pépins de figue de Barbarie présente des propriétés cosmétiques remarquables, prévenant le vieillissement cutané et les rides. Les graines sont également utilisées dans la préparation de crèmes dermatologiques (**Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, 2010**). Cette huile appartient à la même catégorie que les huiles de graines de soja, de maïs et de tournesol (**Mulas, 2004**).

❖ Poudre de pépins

Les graines ou pépins de la figue de Barbarie constituent en réalité la partie utilisée pour extraire l'huile, tandis que le résidu restant est broyé et séché pour obtenir une fine farine. Cette poudre blanchâtre, qui présente une haute teneur en protéines, peut être employée dans divers domaines tels que la pâtisserie, où elle peut enrichir les recettes, ainsi que dans la préparation de soupes. De plus, cette farine de figue de Barbarie trouve également des applications dans l'industrie cosmétique (**Agroligne, 2016**).

1.5.2. Utilisations des raquettes

❖ La coccidoculture

Une méthode d'intensification de l'élevage des cochenilles sur les raquettes d'*Opuntia* permet la production d'un colorant rouge appelé Carmin.

➤ **Le Carmin** : est un colorant naturel de couleur rouge carmin (acide carminique) recherché par les industries alimentaires et cosmétiques pour ses caractéristiques biochimiques. Il est obtenu en élevant les cochenilles *Dactylopius coccus* et *Dactylopius opuntiae*, des insectes qui se nourrissent du cactus. Les cochenilles sont récoltées sur le cactus et séchées à l'air libre pour obtenir un produit brut appelé Grana, à partir duquel on peut extraire de 10 à 26% de carmin. Au début du 19^{ème} siècle, l'élevage de la cochenille à carmin était pratiqué au Sud du Maroc par la colonisation espagnole et le carmin était très demandé sur le marché international. Cependant, il a disparu par la suite en raison de l'avènement des colorants synthétiques. Actuellement, le carmin est de nouveau recherché sur le marché international en raison de ses qualités naturelles et biochimiques (**Arba, 2009**). En Algérie, le colorant Carmin ou E120 est utilisé comme additif dans plusieurs produits alimentaires suite à l'interdiction des colorants synthétiques toxiques pour la santé (**Couvez et al., 2010**).

❖ Jus et boissons

Le jus des feuilles de poire de cactus est obtenu en extrayant le jus par broyage et pressage. Le processus implique le broyage des cladodes après avoir enlevé les épines, ainsi que le hachage des feuilles à l'aide d'un mélangeur industriel ou domestique. De l'eau est ajoutée pour faciliter le processus, et le liquide obtenu est filtré afin de séparer les solides en suspension (Saenz *et al.*, 2013).

❖ Fourrage

Le cactus a longtemps été utilisé comme alimentation pour le bétail dans les régions arides, et sa production dans ces zones s'avère plus rentable que celle d'autres espèces fourragères telles que le maïs et le sorgho. Il joue un rôle essentiel en tant que réserve alimentaire pour le bétail lors de situations de sécheresse critique (Pimienta Barrios *et al.*, 1993). De nombreux pays tels que le Mexique, les États-Unis, le Brésil, le Pérou, le Chili, produisent des quantités significatives de raquettes comme alimentation pour le bétail (Nobel *et al.*, 1987).

❖ Autres Produits

La confiture de nopalitos est préparée en cuisant et en mélangeant des jeunes cladodes avec différentes quantités de sucre, de pectine et de conservateurs. Par ailleurs, la farine de cladodes est obtenue en déshydratant et en broyant des cladodes de différents âges. Les caractéristiques de la farine varient en fonction de l'âge des cladodes utilisées. Ces produits ont récemment trouvé des applications dans l'industrie de la boulangerie, notamment dans la fabrication de biscuits, de pâtisseries, de soupes et de desserts (Nobel, 2002).


Les jeunes cladodes appelés Nopalitos au (Mexique) sont consommées par les populations en tant que légumes en raison de leur texture tendre et leur richesse en fibres (Stintzing and Carle, 2005). En outre leur valeur nutritive est similaire à celle d'un grand nombre de légumes et fruits (Arba, 2009).

1.5.3. Usage des fleurs

La fleur de figue de barbarie est naturellement riche en vitamine C, calcium, fer, magnésium et zinc. Une fois séchées, elles peuvent être utilisées pour préparer une tisane bénéficiant de leurs propriétés diurétiques, vermifuges et astringentes. De plus, ces fleurs sont reconnues pour leur utilisation dans le traitement naturel de l'hypertrophie bénigne de la prostate, ainsi que pour leurs effets anti-inflammatoires et anti-hémorroïdaires (Agroligne, 2016). Le cactus présente une floraison abondante qui peut s'étendre sur une

période de 3 à 6 mois, en fonction de la région et de la variété.

1.5.4. Usage médicinal

 **Utilisations traditionnelles** : *Opuntia ficus indica* est largement utilisée dans la médecine populaire au Mexique pour traiter divers problèmes tels que les brûlures, les blessures, l'œdème et les problèmes d'indigestion. Des études ont rapporté que les extraits alcooliques de cette plante présentent des activités anti-inflammatoires, hypoglycémiantes et antivirales. Au Mexique, les raquettes de cactus sont également utilisées traditionnellement dans le traitement du diabète, de l'hyperlipidémie et de l'obésité (Saenz, 2000). En Sicile, le thé à base de fleurs d'*Opuntia* est utilisé comme remède contre les affections rénales (Meyer et McLaughlin, 1981). Des capsules fabriquées à partir de fleurs séchées sont utilisées comme régulateurs diurétiques et pour traiter les problèmes de prostate (Pimienta barrios *et al.*, 1993). Au Maroc, une décoction de fleurs séchées de cette plante est utilisée dans la pharmacopée traditionnelle pour soulager les douleurs gastro-intestinales, les brûlures et les coups de soleil (Ennouri *et al.*, 2005). Par ailleurs, l'huile essentielle extraite des graines des fruits du cactus est riche en acides gras polyinsaturés, en stérols et en vitamines. Elle est utilisée comme un ingrédient naturel anti-rides et pour la fabrication de crèmes dermatologiques anti-rides (Ennouri *et al.*, 2005).

1.5.5. Effets pharmacologiques

- **Effet Anti-ulcère**

Les cladodes d'*Opuntia ficus indica* sont reconnus pour leur utilisation dans le traitement des ulcères gastriques en Sicile (Kaur *et al.*, 2012). Des essais sur des rats ont démontré leur action protectrice contre les ulcères induits par l'éthanol (Kaur *et al.*, 2012).

- **Effet anti-inflammatoire et analgésique**

Des études ont démontré les propriétés bénéfiques des extraits de fruit et de raquette d'*Opuntia* sur la réduction des lésions gastriques chez le rat (Lee *et al.*, 2002). De plus, différentes recherches ont exploré l'action analgésique et anti-inflammatoire du genre *Opuntia* en utilisant des extraits de fruit, des cladodes lyophilisés et des phytostérols issus

du fruit et de l'extrait de raquette (**Kaur et al., 2012**). L'activité anti-inflammatoire principale de l'extrait de raquette a été attribuée au β -Sitostérol (**Park et al., 2001**).

- **Effet anti-cancéreux**

Des études ont rapporté que l'extrait du fruit du cactus présente des propriétés inhibitrices de la prolifération des cellules cancéreuses et de suppression de la croissance tumorale, notamment dans le cas du cancer de l'ovaire chez la souris (**Kaur et al., 2012**).

- **Effet anti-alcool**

La figue de barbarie est fréquemment utilisée pour atténuer les symptômes liés à la consommation excessive d'alcool, tels que la sécheresse buccale et les nausées. Le jus de figue de barbarie est également inclus dans plusieurs formules préventives contre la gueule de bois (**Wiese et al., 2004**).

- **Effet anti-diabétique**

Opuntia spp. A démontrer son efficacité dans la réduction de la glycémie (**Cicero et al., 2004**). Une étude menée sur des rats diabétiques évaluant l'activité hypoglycémiant d'un extrait purifié des cladodes a révélé que la glycémie et l'hémoglobine glycosylée ont été ramenées à des niveaux normaux grâce à un traitement combiné d'insuline et d'extrait de cladodes. Lorsque l'insuline a été retirée du traitement combiné, l'extrait de cladodes seul a maintenu la glycémie à un niveau constant chez les rats diabétiques (**Feugang et al., 2006**). Une autre étude a montré que la supplémentation du régime alimentaire des rats avec de l'huile de graines de cactus (25 mg/kg) a réduit la concentration de glucose dans le sang (**Ennouri et al., 2005**). Ces observations ont été attribuées à une induction potentielle de la sécrétion d'insuline, favorisant la conversion du glucose en glycogène (**Feugang et al., 2006**).

1.5.6. Usage cosmétique

Le secteur de la figue de barbarie est très demandeur de ce fruit exotique miraculeux en raison de la richesse en vitamines, notamment en vitamine E, et en oligo-éléments des raquettes, du fruit et des graines (**Agroligne, 2016**). Depuis des décennies, les femmes berbères et indiennes du continent américain utilisent le figuier de barbarie pour ses vertus cosmétiques. Les femmes berbères utilisent l'huile pour cicatriser et protéger leur peau des

conditions climatiques rigoureuses du désert (**Benattia, 2017**). Les Indiennes, quant à elles, préparent du savon et des onguents à base de mucilage de Nopal et de jus de tuna pour soigner leurs mains malmenées par le travail et protéger leur visage des effets néfastes du soleil (**Schweizer, 1997**). De nos jours, le mucilage des raquettes est utilisé dans la fabrication de shampoings, d'assouplissants capillaires, de crèmes dermiques et de laits hydratants (**Arba, 2009**). De plus, les extraits de la plante sont utilisés comme substitut avantageux de la graisse de baleine dans la préparation de crèmes et de pommades, en particulier pour leurs effets anti-rides (**Bhira, 2012**).

1.5.7. Autres utilisations

- ✓ **Engrais vert** : les résidus des raquettes ou des fruits et les autres parties de la plante constituent un excellent fertilisant (**Bouttakiout, 2017**)
- ✓ **Protection** : cette plante constitue des haies vives qui permettent la fixation des terrains ravinés par les pluies et stabilisent les terres sablonneuses, et sont infranchissables aux animaux sauvages (**Revue nature et santé, 2011**). Le cactus est utilisé comme obstacle contre les incendies car il résiste aux feux (**Chougui et al., 2013**).
- ✓ **Combustible** : le cactus fournit un excellent bois de chauffage et une flamme éclairante (**Revue nature et santé, 2011**).
- ✓ **Application en Biotechnologie** : Différentes applications biotechnologiques du genre *Opuntia* incluant les techniques d'isolement enzymatique, de transformation génétique et de culture in vitro de tissus ont été citées dans le travail d'**Angulo-Bejarano et al. (2014)**.

2. Les fruits et légumes marinés fermentés

2.1. Définition

Selon les Normes du *Codex Alimentarius*, les "fruits et légumes marinés fermentés" sont définis comme suit :

Les fruits et légumes marinés fermentés désignent les produits alimentaires préparés à partir de fruits et/ou de légumes sains, propres et comestibles, avec ou sans graines, épices, herbes aromatiques et/ou condiments. Ces produits sont soumis à un traitement ou à une transformation dans le but d'obtenir un produit acide ou acidifié conservé par une fermentation naturelle ou des acidifiants, avec l'ajout d'ingrédients appropriés pour assurer la conservation et la qualité du produit.

Ces produits sont traités d'une manière appropriée avant ou après leur conditionnement dans un récipient hermétiquement scellé, afin de garantir leur qualité et leur sécurité sanitaire, ainsi que pour prévenir leur détérioration. Ils peuvent être conditionnés avec ou sans liquide de couverture approprié, comme de l'huile, de la saumure ou un milieu acide tel que du vinaigre, dans le but de maintenir un pH équilibré inférieur à 4,6 (**Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014**).

2.2. Processus de fermentation

La fermentation des fruits et légumes peut se produire "spontanément" grâce à la microflore lactique naturelle de surface (**karovicovet et al.,1999**). Un grand nombre de bactéries lactiques potentielles ont été isolées dans divers aliments traditionnels naturellement fermentés (**Anandharaj et al.,1998**), telles que *Lactobacillus plantarum*, *L. pentosus*, *L. brevis*, *L. fermentum*, *L. casei*, *Leuconostoc mesenteroides*, *L. kimchi*, *L. fallax*, *Weissella confusa*, *W. koreenis*, *W. cibaria* et *Pediococcus pentosaceus*, qui sont considérés comme la source de probiotiques de la pratique alimentaire. La disponibilité de certains nutriments spécifiques tels que les vitamines, les minéraux et la nature acide des fruits et légumes fournit un milieu propice à la fermentation par les BL (**Guarner et al.,1998**)

2.3. Les principaux Légumes et fruits fermentés

La fermentation lactique des légumes n'a d'importance industrielle que pour les concombres, les choux et les olives (**Montent et al.,2006**). En Italie, la production industrielle de légumes fermentés se limite à la choucroute et aux olives de table (**Anandharaj et al.,2014**)

Le chou chinois, le chou, la tomate, la carotte et l'épinard ont une fermentabilité relativement plus élevée que les autres légumes (gombo et courges) car ils contiennent plus desaccharides fermentescibles (Kim *et al.*,20000). Les fruits et légumes fermentés les plus rapportés sont classés comme suit :

- **Légumes-racines** : carottes, navets, betteraves, radis, céleri-rave et patates douces
- **Légumes-fruits** : concombres, olives, tomates, poivrons, gombos et pois verts.
- **Jus de légumes** : carotte, navet, pulpe de tomate, oignon, patate douce, betterave et patate douce, oignon, patate douce, betterave et raifort.
- **Fruits** : pommes, poires, mangues immatures, palmiers immatures, citrons et fruits. Immatures, citrons et pulpes de fruits comme la banane (Swain *et al.*, 2014).

2.4. Les principales étapes de préparation des fruits et légumes marinés fermentés

Selon les Normes du *Codex Alimentarius*, voici les principales étapes de préparation des fruits et légumes marinés fermentés :

- ✚ **Sélection des fruits et légumes** : Utiliser des fruits et légumes sains, propres et comestibles. Les choisir selon leur qualité et leur maturité appropriée.
- ✚ **Préparation des fruits et légumes** : Laver soigneusement les fruits et légumes pour éliminer toute saleté ou impureté. Les préparer en enlevant les parties indésirables telles que les tiges, les pépins ou les parties abîmées.
- ✚ **Assaisonnement** : Ajouter des graines, des épices, des herbes aromatiques et/ou des condiments selon les recettes et les préférences. Ces ingrédients ajoutent de la saveur et de l'arôme aux fruits et légumes marinés fermentés.
- ✚ **Traitement acide ou acidification** : Le produit est traité pour obtenir un pH acide ou acidifié. Cela peut être réalisé par une fermentation naturelle, qui se produit par l'action de micro-organismes spécifiques, ou par l'ajout d'acidifiants tels que l'acide acétique ou le vinaigre. L'acidification permet de préserver le produit et d'inhiber la croissance des micro-organismes indésirables.
- ✚ **Conditionnement** : Les fruits et légumes marinés fermentés sont conditionnés dans des récipients hermétiquement scellés, tels que des bocaux ou des boîtes de conserve, pour assurer leur conservation et leur protection contre la contamination.

- ✚ **Liquide de couverture** : Certains produits peuvent être conditionnés avec un liquide de couverture approprié, comme de l'huile, de la saumure ou du vinaigre, pour maintenir un pH équilibré inférieur à 4,6 et assurer une bonne conservation du produit.
- ✚ **Traitement thermique (le cas échéant)** : Certains produits peuvent être soumis à un traitement thermique pour améliorer la stabilité et la sécurité sanitaire du produit. Cela peut inclure la pasteurisation ou la stérilisation des fruits et légumes marinés fermentés (**Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014**).

2.5. Les ingrédients de base et facultatifs pour préparer des fruits et légumes marinés fermentés

Selon les normes du *Codex Alimentarius*, voici les ingrédients de base et facultatifs généralement utilisés pour préparer les fruits et légumes marinés fermentés :

2.5.1. Ingrédients de base

- ✓ **Fruits et/ou légumes sains, propres et comestibles** : Les fruits et légumes sélectionnés doivent être frais, de bonne qualité et exempts de tout dommage ou altération.
- ✓ **Graines, épices, herbes aromatiques et/ou condiments** : Ces ingrédients sont souvent utilisés pour ajouter de la saveur, de l'arôme et de la texture aux fruits et légumes marinés fermentés. Ils peuvent inclure des graines de moutarde, des clous de girofle, du gingembre, de l'ail, des piments, des feuilles de laurier, etc.
- ✓ **Ingrédients acidifiants** : Pour assurer la fermentation et l'acidification des fruits et légumes, des ingrédients acidifiants tels que l'acide citrique, l'acide acétique (vinaigre), le jus de citron ou le jus de lime peuvent être ajoutés.

2.5.2. Ingrédients facultatifs

- ✓ **Sucre ou édulcorants** : Selon les préférences, du sucre ou des édulcorants peuvent être ajoutés pour équilibrer l'acidité et ajouter une légère note sucrée.
- ✓ **Huile** : Dans certains cas, de l'huile peut être ajoutée pour donner une texture plus onctueuse et apporter des saveurs supplémentaires.
- ✓ **Liquide de couverture** : Selon la méthode de conditionnement et les préférences régionales, un liquide de couverture peut être utilisé pour recouvrir les fruits et légumes

marinés fermentés. Cela peut inclure de l'huile, de la saumure ou du vinaigre (**Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014.**)

2.5.3. Les additifs alimentaires

Selon les normes du *Codex Alimentarius*, les additifs autorisés pour les fruits et légumes marinés sont utilisés de manière spécifique pour assurer la qualité et la sécurité du produit. Voici quelques exemples d'additifs couramment utilisés pour préparer les fruits et légumes marinés selon les normes du Codex :

- ✚ Acide citrique (E330) : Utilisé comme acidifiant pour ajuster l'acidité du produit.
- ✚ Sorbate de potassium (E202) : Un conservateur utilisé pour prévenir la croissance de micro-organismes indésirables.
- ✚ Benzoate de sodium (E211) : Un conservateur antimicrobien utilisé pour prévenir la croissance de bactéries, levures et moisissures.
- ✚ Sulfite de sodium (E221) : Un agent de conservation utilisé pour prévenir l'oxydation et le brunissement enzymatique.
- ✚ Saccharine (E954) : Un édulcorant sans calories utilisé pour ajouter de la douceur sans sucre.
- ✚ Ascorbate de sodium (E301) : Un antioxydant utilisé pour prévenir l'oxydation et le brunissement des fruits et légumes. (**Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014.**)

2.6. Les conditionnements de préparation

Selon le *Codex Alimentarius*, les fruits et légumes marinés fermentés peuvent être conditionnés de différentes manières. Voici quelques types de conditionnement couramment utilisés :

- **Récipients hermétiquement scellés** : Les fruits et légumes marinés fermentés peuvent être conditionnés dans des récipients tels que des bocaux en verre ou des boîtes de conserve qui sont scellés de manière hermétique. Cela permet de préserver la qualité du produit et de prévenir toute contamination (**Tamang et al., 2016**).
- **Pots en céramique ou en terre cuite** : Dans certaines traditions culinaires, les fruits et légumes marinés fermentés sont conditionnés dans des pots en céramique ou en terre

cuite. Ces matériaux permettent une bonne circulation de l'air et favorisent la fermentation des aliments (Marco *et al.*, 2021).

- **Sachets ou poches sous vide** : Certains fruits et légumes marinés fermentés peuvent être conditionnés dans des sachets ou des poches sous vide. Ce type de conditionnement permet de préserver la fraîcheur du produit et d'éliminer l'oxygène, ce qui favorise la conservation (Hutkins *et al.*, 2016).
- **Conteneurs en plastique ou en acier inoxydable** : Dans certaines industries alimentaires, les fruits et légumes marinés fermentés sont conditionnés dans des conteneurs en plastique ou en acier inoxydable. Ces matériaux sont durables, résistants et permettent de conserver les aliments de manière sécurisée (Song *et al.*, 2020).

2.7. Intérêt des fruits et légumes marinés et fermentés

Les fruits et légumes marinés et fermentés présentent plusieurs intérêts sur le plan nutritionnel et gustatif. Voici quelques avantages :

- **Conservation des nutriments** : La fermentation et la marinade peuvent aider à préserver les nutriments présents dans les fruits et légumes. Les processus de fermentation peuvent augmenter la biodisponibilité de certains nutriments et faciliter leur absorption par l'organisme.
- **Amélioration de la digestibilité** : La fermentation rend certains fruits et légumes plus digestes en dégradant les fibres et en augmentant la production d'enzymes digestives. Cela peut être particulièrement bénéfique pour les personnes ayant des sensibilités digestives.
- **Probiotiques naturels** : Les aliments fermentés contiennent souvent des bactéries bénéfiques pour la santé, connues sous le nom de probiotiques. Ces probiotiques peuvent favoriser une bonne santé digestive, renforcer le système immunitaire et contribuer à l'équilibre de la flore intestinale.
- **Saveur et texture améliorées** : Les fruits et légumes marinés et fermentés acquièrent souvent une saveur et une texture uniques et complexes. Les processus de marinade et de fermentation peuvent développer des arômes riches, acidulés et umami, ce qui peut ajouter de la variété et de l'intérêt aux plats (Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014).



Chapitre 02

Le travail expérimental de ce mémoire a été effectué au **CRD / SONATRACH - BOUMERDÈS CENTRE DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT** durant la période comprise entre avril et juillet de l'année 2023.

1. Présentation du lieu de stage

Le Centre de Recherche et de Développement (CRD) a été créé par le groupe SONATRACH en 1973 à Dar El Beida, puis déplacé à Boumerdes en 1975. Il joue un rôle clé dans les activités amont du groupe, en se concentrant sur la recherche, l'exploitation, le développement et la production des gisements d'hydrocarbures. Le CRD possède 40 laboratoires répartis entre Boumerdes et Hassi Messaoud, et dispose d'un personnel scientifique hautement qualifié et d'équipements de pointe. Les laboratoires sont organisés en trois directions techniques : Géologie, Gisements et Traitement des hydrocarbures. Le CRD fournit un soutien technique et scientifique à SONATRACH et à ses filiales dans le secteur des hydrocarbures.

2. Matériel

2.1. Matériel biologique

Le matériel végétal utilisé dans notre travail est composé de jeunes cladodes de figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*). L'espèce choisie est spontanée (non cultivée), n'a subi aucun traitement chimique et la pluie est la seule source d'eau pour son irrigation.

La récolte a été effectuée dans la région de « Ait Yahia Moussa ».

2.1.1 Présentation de la zone d'échantillonnage

L'échantillonnage des raquettes du figuier de barbarie a été effectué d'une manière aléatoire dans la région de « **Aït Yahia Moussa** » anciennement **Oued Ksari**, située dans le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou, de la partie Nord centre de l'Algérie. Elle est située à 20 km au Sud-Ouest de la ville de Tizi-Ouzou et à 115 km au Sud-Est d'Alger (latitude 36°38'28" Nord, longitude 3°53'18" Est, altitude 161m) (Dateandtime.info). Caractérisé par un climat méditerranéen avec été chaud (Classification de Köppen : Csa)

La carte géographique est donnée dans **la figure 7** Suivante :

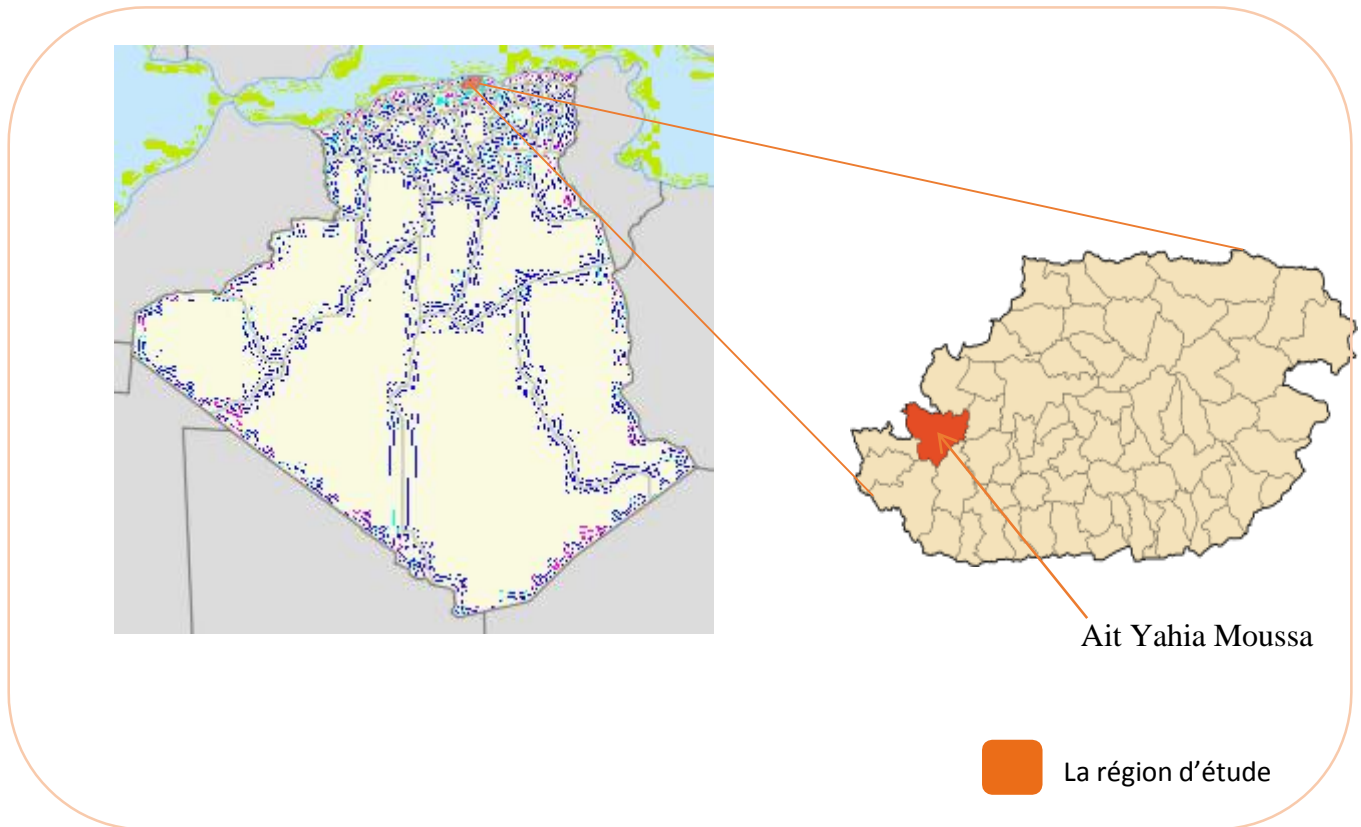


Figure 7 : position géographique de la zone d'échantillonnage « Aït Yahia Moussa »

2.1.2 L'échantillonnage

Les jeunes cladodes d'*Opuntia ficus indica* ont fait l'objet de cette étude.



Figure 8 : photo originale de la zone d'échantillonnage (Photo originale, 2023)

Les cladodes ont été récoltées d'une façon aléatoire durant le mois de Mai. Les dimensions des cladodes ont été choisies selon les mesures suivantes : la longueur entre 15 et 25 cm et la largeur entre 9 et 13 cm (**Fig. 9**). Elles correspondent aux dimensions de la référence « *napolitos* », c'est le nom donné à ce genre de cladodes au Mexique où elles sont largement consommées et commercialisées. Elles sont âgées selon ces dimensions de 3 à 8 mois (**Hadj Sadok et al., 2008**).

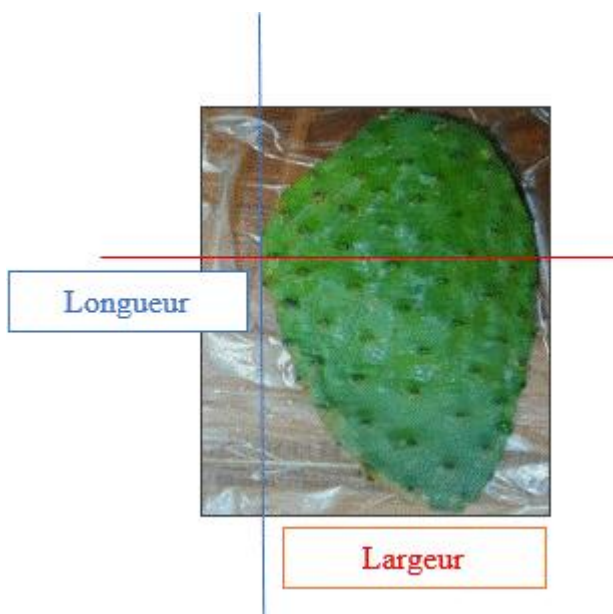


Figure 9 : dimensionnement des cladodes (photo originale, 2023)

2.1.3 Conservation

Les raquettes ont été conservées au froid à 4 °C pour les échantillons frais, durant une journée avant l'analyse. Quant aux autres échantillons destinés à la fermentation par le vinaigre, ils ont été préparés immédiatement après le nettoyage ; en enlevant les taches noires (auréole) et les glochides, puis en les rinçant avec eau du robinet suivie d'eau distillée.

2.2 Matériel non biologique

L'ensemble des appareils, solvants, réactifs chimiques utilisés pour réaliser ce travail est cité dans l'annexe n°01.

3. Méthodes

3.1. Préparation des échantillons

a) Les échantillons frais

Après avoir récolté les cladodes, et les laver avec de l'eau du robinet, nous commençons à les nettoyer en enlevant les épines avec des ciseaux, les points noirs (auréole) et les glochides, et en décollant la couche externe, puis en les rinçant à nouveau avec de l'eau du robinet puis l'eau distillée, comme le montre la **figure 10**, puis conservé à 4°C pendant une journée avant l'analyse.

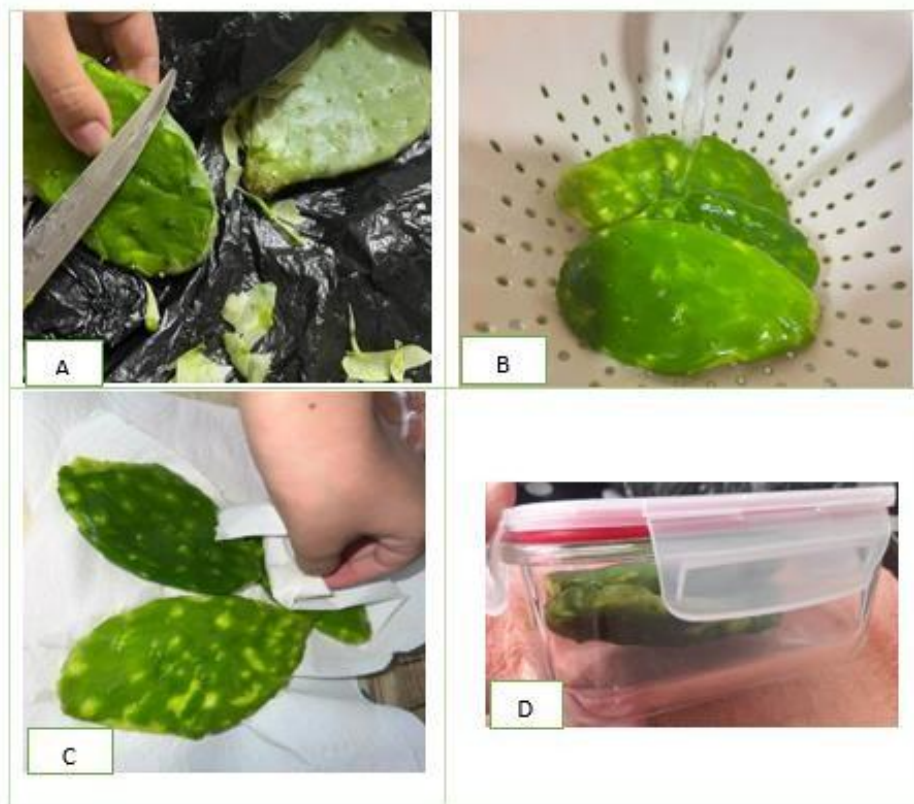


Figure 10 : photos des étapes de nettoyage des échantillons (A : nettoyage /B : lavage /C : séchage / D : conservation)

b) Préparation des échantillons trempés dans une solution du vinaigre

➤ Préparation de la solution acide

Dans un bol, mettre 1/2 litre d'eau (500ml) et (500 ml) de vinaigre blanc 5% acidité, puis bien mélanger (Recette traditionnelle héritée de nos ancêtres, nous l'utilisons pour faire les cornichons).

➤ Préparation des échantillons fermentés

Les échantillons de cladodes ont été préparés de la même manière que celle décrite précédemment, puis coupés en morceaux et divisé en trois groupes approximativement égaux (chaque boîte contient à peu près 117g). En les trompant par la suite dans la solution acide dans des bocaux préalablement stérilisés (**Fig.11**), ces derniers ont été fermés hermétiquement et conservés dans un endroit frais à l'abri de la lumière et du soleil.



Figure 11 : photos des étapes de préparation les échantillons fermentés

Les trois boîtes stériles qui contiennent les échantillons des cladodes ont été fermentées comme suit :

- Boîte 1 : 3 jours de fermentation.
- Boîte 2 : 7 jours de fermentation.
- Boîte 3 : 15 jours de fermentation

Les échantillons de chaque boîte ont subi une série d'analyses physicochimique après l'écoulement de la période de conservation indiquée ci-dessus (3^{ème} jour, 7^{ème} et 15^{ème} jour).



Figure 12 : photo des échantillons trempés dans la solution de vinaigre

c) Préparation de la pâte

Les échantillons des cladodes ont été coupés en petits cubes (2 cm), puis à l'aide d'un broyeur électrique (Philips), ils ont été broyés jusqu'à obtention d'une pâte homogène (**Fig.13**)



Figure 13 : photos des étapes de préparation de la pâte

3.2. Analyses morphologiques et physico-chimiques

Tous les échantillons ont passé les mêmes tests (échantillons frais/ les échantillons de vinaigre fermentées 3jours ,7jours,15jours)

3.2.1. Caractérisation morphologique

- **Observation par microscopie électronique à balayage (MEB)**

Des coupes longitudinales de différentes interfaces de vue ont été effectuées sur les échantillons des cladodes frais (**Fig.14**).

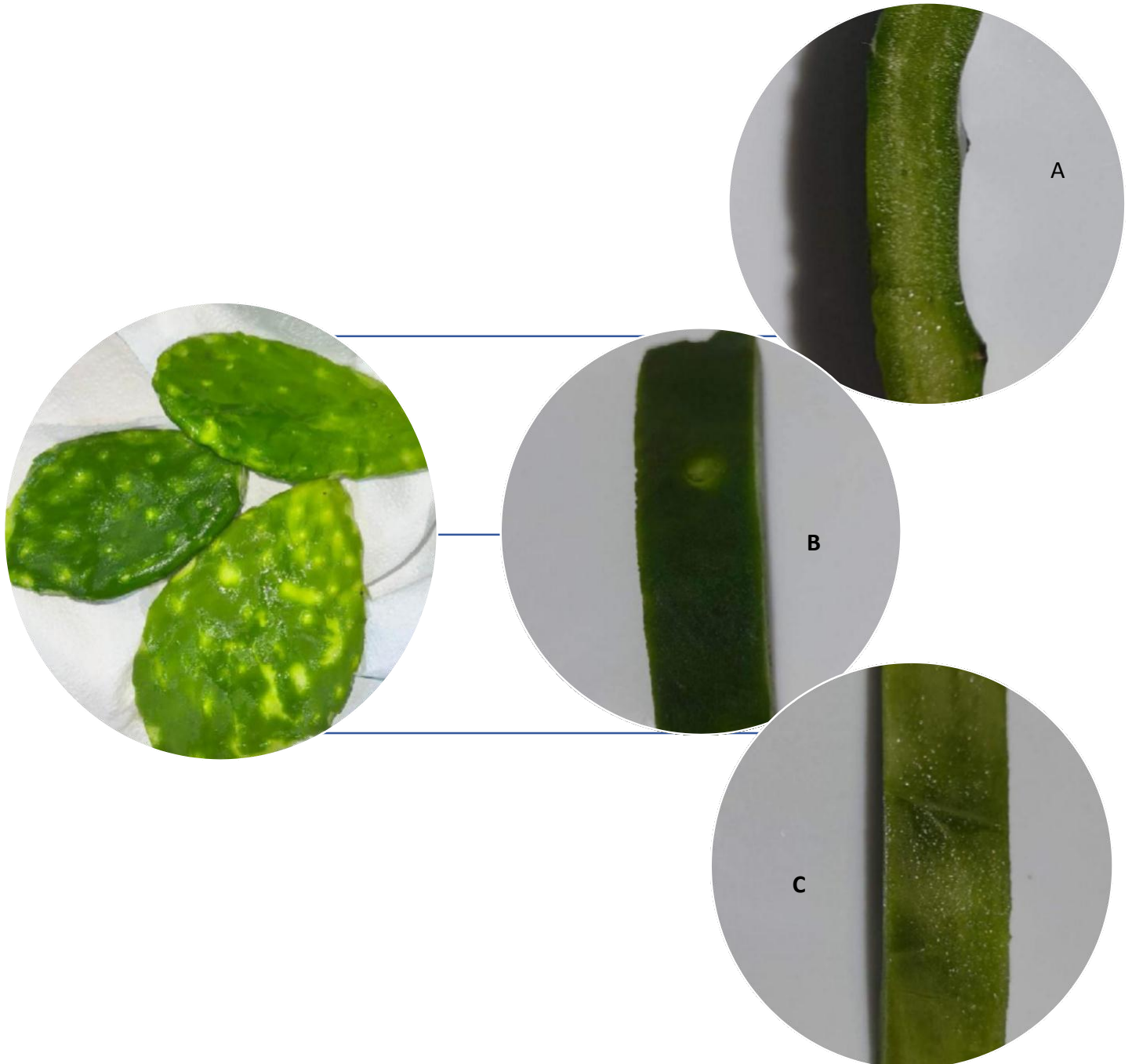


Figure 14 : les différentes interfaces de vue des coupes longitudinales des cladodes de Figurier de barbarie (A, B, C)

Le protocole suivi pour réaliser l'observation microscopique à balayage (**Fig.15**) des cladodes de figuier de barbarie est résumé comme suit :

a) Préparation des échantillons

- Effectuer des coupes
- Sécher les échantillons : étant les échantillons sont humides, il faut les laisser sécher à l'air ou utiliser une étuve à basse température pour éliminer l'excès d'humidité.

N.B : il ne faut pas surchauffer les échantillons, car cela pourrait altérer leur structure.

b) Fixation des échantillons

- Placez les sections de cladodes sur un support approprié, tel qu'un porte-échantillon conducteur.
- Fixez les échantillons sur le support à l'aide de pinces.
- Assurez-vous que les échantillons sont bien fixés et ne risquent pas de se détacher pendant l'observation.

c) Préparation du microscope électronique à balayage

- Mettez en marche le microscope électronique à balayage et assurez-vous qu'il est correctement connecté et en état de fonctionnement.
- Vérifiez les paramètres du microscope, tels que l'accélération du faisceau électronique, la tension d'accélération, la distance de travail, etc., en fonction des spécifications de l'appareil.

d) Montage des échantillons

- Placez le support contenant les échantillons dans la chambre du microscope électronique à balayage.
- Fermez soigneusement la chambre et assurez-vous qu'elle est correctement scellée.

e) Configuration du vide

- Utilisez le système de vide du microscope électronique à balayage pour évacuer l'air de la chambre et créer un vide suffisant.

f) Observation microscopique à balayage

- Configurez les paramètres d'acquisition de l'image, tels que l'accélération du faisceau, la résolution, le grossissement, etc., en fonction de vos besoins.
- Commencez l'observation à basse accélération du faisceau pour éviter tout endommagement des échantillons, puis augmentez progressivement si nécessaire.

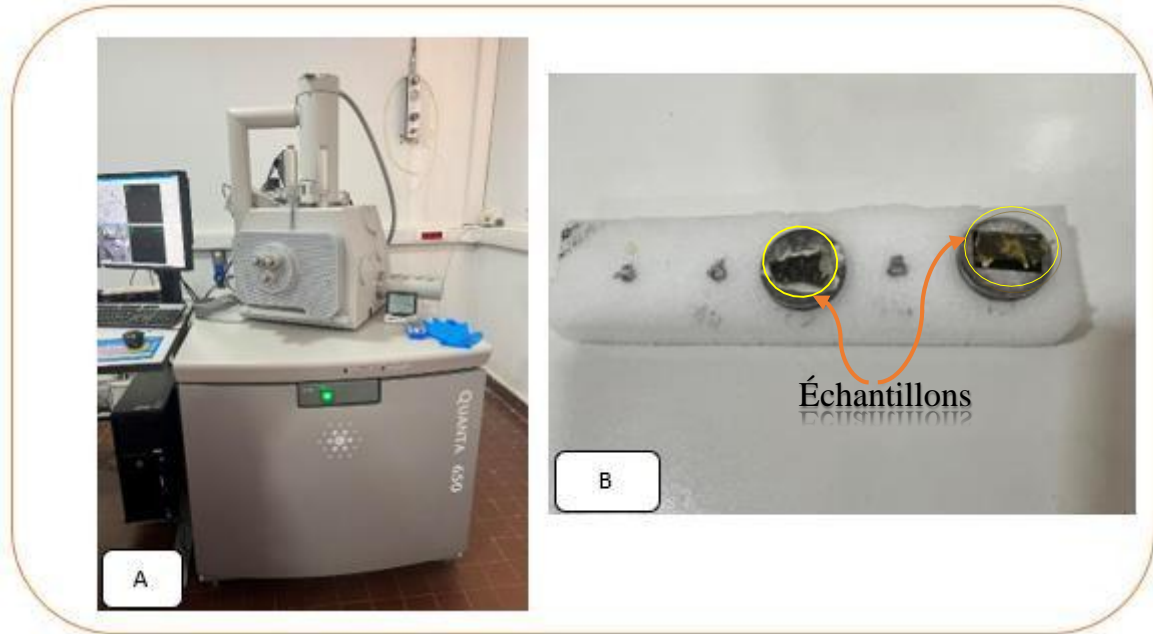


Figure 15 : étude morphologique par MEB des coupes de cladodes (**photos originales, 2023**)

A : microscope électronique à balayage (MEB), **B** : fixation des échantillons

3.2.2 Analyses physico-chimiques de base

3.2.2.1. Détermination de la teneur en eau et de la matière sèche

La teneur en eau (humidité) a été déterminée en effectuant une dessiccation des échantillons (5 g) dans une étuve ventilée à une température constante de 105 °C jusqu'à ce que le poids devienne constant. La teneur en eau est calculée comme la perte de poids subie pendant le processus de dessiccation (AFNOR NF V03-40).

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

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

Avec :

H : humidité (%)

M₀ : masse, en gramme de l'échantillon avant étuvage.

M₁ : masse, en gramme de l'échantillon après étuvage.

Le taux de la matière sèche (%MS) en pourcentage est calculé par la formule suivante :

$$MS (\%) = 100 - H (\%)$$

3.2.2.2. Détermination des cendres

A. Principe

Pour l'incinération, nous prenons le même échantillon que nous avons préalablement séché à l'étuve, que nous plaçons ensuite dans un creuset. Ce creuset est ensuite inséré dans un four à moufle chauffé à environ 550°C pendant 3 heures, jusqu'à ce que la couleur obtenue soit d'un gris clair ou blanchâtre. Le taux de cendres est exprimé en pourcentage par rapport à la matière sèche (AFNOR NF V03-40).

B. Mode opératoire

- Préparer le creuset préalablement séché dans l'étuve quelques minutes et peser et tarer à l'aide d'une balance analytiques.
- Ajouter à creuset, la quantité d'échantillon séché.
- Placer l'échantillon dans le four a moufle pendant une période de 3h à une température de 550°C.
- Retirer l'échantillon du four après calcination et laisser refroidir dans le dessiccateur.
- Peser la masse du creuset.

C. Expression des résultats

Le taux de cendres (Cd) est calculé par l'équation suivante :

$$Cd (\%) = 100 \times (M_2 - M_0) / p$$

Avec :

Cd (%) : le taux de cendre.

M₂ : masse de creuset + cendres (g).

M₀ : masse de creuset vide (g).

P : masse de la prise d'essai (g).

Le pourcentage de la matière organique est déterminé par l'équation suivante :

$$\text{MO}\% = 100 - \text{Cd}\%$$

Avec :

MO (%) : le pourcentage de la matière organique.

Cd (%) : le taux de cendre.

3.2.2.3. Détermination du pH

A. Principe

Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH mètre (HACH). Cette expérience est réalisée au minimum 03 fois pour bien préciser les résultats (**Hadjarab et Taleb, 2016**).

B. Mode opératoire

- Rincer bien l'électrode avec de l'eau distillée.
- Prendre environ 20g de l'échantillon (pate de cladodes OFI) pour l'analyse.
- Agiter avec une cuillère environ 03 min dans un bêcher
- Tremper l'électrode dans le bêcher.
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation puis noter le pH.

3.2.2.4. Détermination de l'acidité titrable

A. Principe

Le principe repose sur le titrage de l'acide lactique libéré, par une solution alcaline (NaOH dilué 1/9) en présence d'un indicateur de couleur (phénolphtaléine) (**NF V 05-101,1974**).

B. Mode opératoire

- Peser 1g de l'échantillon dans 10 ml d'eau distillé (dilutions).
- Ajouter deux ou trois gouttes de phénolphtaléine.
- Titrer avec de la soude (NaOH) à 0,1N jusqu'au virage de l'indicateur au rose.

C. Expression des résultats

Le résultat est lu directement sur PH mètre, il est exprimé en degré Dornic (°D). D'où 1 ml de NaOH correspond à 10°D, et 1°D correspond à 0,1g/l d'acide lactique, selon l'équation suivante :

$$A = V \times 10$$

Avec :

A : Acidité titrable en °D.

V : Volume de la solution sodique utilise pour le titrage en ml.

3.2.2.5. Détermination de la composition minérale

a. Principe

Les macro-minéraux tels que (Mg, Na, Ca, K) et les micro-minéraux tels que (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), ont été identifiés à l'aide d'un appareil ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy), un instrument utilisé en chimie analytique pour déterminer la concentration d'éléments dans un échantillon.

b. Mode opératoire

Les cendres préalablement obtenues sont dissoutes dans 200 ml d'eau distillée. Ensuite, à l'aide d'un agitateur, la solution est mélangée pendant 10min jusqu'à la dissolution complète des cendres. Le mélange obtenu est filtré à l'aide d'un papier filtre.

Le filtrat de différents échantillons est soumis à une analyse par (ICP-OES) (avio-200) (Fig 16).



Figure 16 : photo de l'appareil ICP-OES avio-200 (photo originale, 2023)

3.2.2.6. Extraction des polyphénols totaux

Les rendements en extraits secs ont été évalués durant la période de conservation (à l'état frais, 3^{ème}, 7^{ème} et 15^{ème} jour de fermentation, l'extraction est effectuée par macération de la pâte des échantillons de cladode dans un solvant hydroalcoolique.

a. Principe

La macération consiste à laisser la poudre du matériel végétal en contact prolongé avec un solvant pour en extraire les principes actifs. C'est une extraction qui se fait à température ambiante et qui a l'avantage de préserver les substances thermosensibles.

b. Mode opératoire

Une quantité de 5g de la poudre de la pâte des cladodes est macérée dans 450 ml de l'éthanol 80% pendant 72 heures. Le filtrat hydro éthanolique obtenu est filtré sur papier filtre. Ensuite, le filtrat est soumis à une centrifugation à une vitesse spécifique (4000 rpm) pendant quelques minutes (10 minutes) afin de séparer le surnageant, qui contient les polyphénols dissous, du précipité. Puis concentré sous vide à l'aide d'un rotavapeur à 45°C, pour obtenir un extrait sec brut chargé en substances extractibles (**Ramirez-Moreno *et al.*, 2013 ; Avila-Nava *et al.*, 2014**).

➤ Calcul du rendement (Rdt)

Le rendement en pourcentage (%), est défini comme étant le rapport entre la masse d'extrait brut et celle de la pâte des cladodes. Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{Rendement (\%)} = (\text{PB} / \text{PA}) * 100$$

Avec :

PB : poids d'extrait brut.

PA : poids de la plante sèche en poudre.

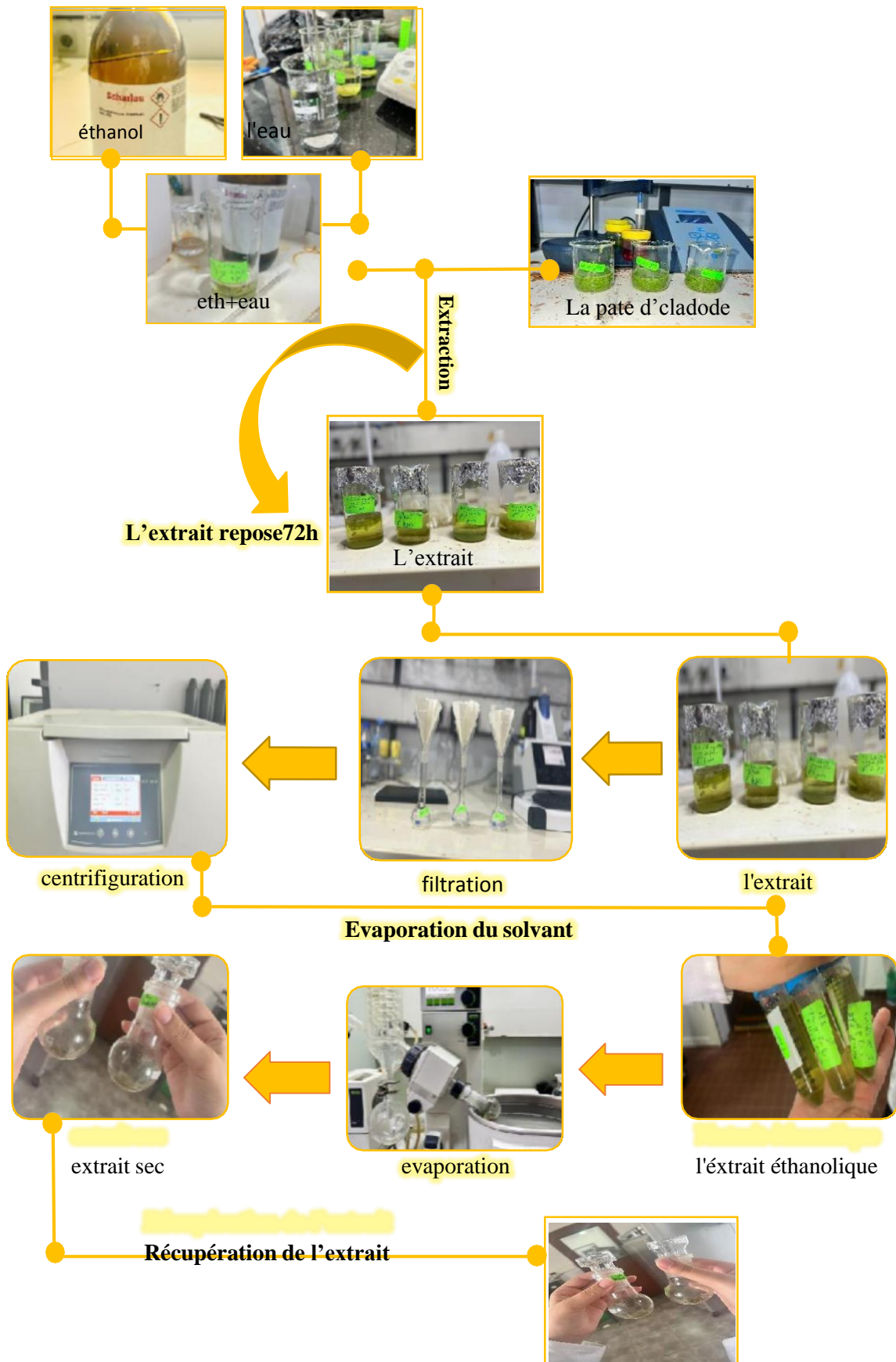


Figure 17 : les étapes de l'extraction des polyphénols totaux

3.2.2.7. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

➤ Préparation de la poudre

Une petite quantité de nos échantillons (frais, fermentés pendant 3, 7, 15 jours) sont séchés à l'air libre pendant 72 heures, puis broyés puis tamisés pour obtenir une poudre fine.

a. Principe

L'identification des groupements fonctionnels est rendue possible grâce à la spectroscopie infrarouge (IR), l'une des méthodes spectrales utilisées.

b. Mode opératoire

Les poudres de cladode ont été analysées à l'aide de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (Fig20). Chaque échantillon a été préparé sous forme de pastilles en mélangeant soigneusement 2 g de poudre de cladode avec 80 mg de bromure de potassium (KBr). Le mélange a ensuite été pressé à une pression de 60 bars pendant 1 minute à l'aide d'un granulateur. Les spectres ont été enregistrés en mode absorbance à température ambiante, dans la gamme infrarouge moyen de 400 à 4000 cm^{-1} , à l'aide d'un spectromètre Erkin Elmer couplé à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement IR (Bouzid *et al.*,2020).

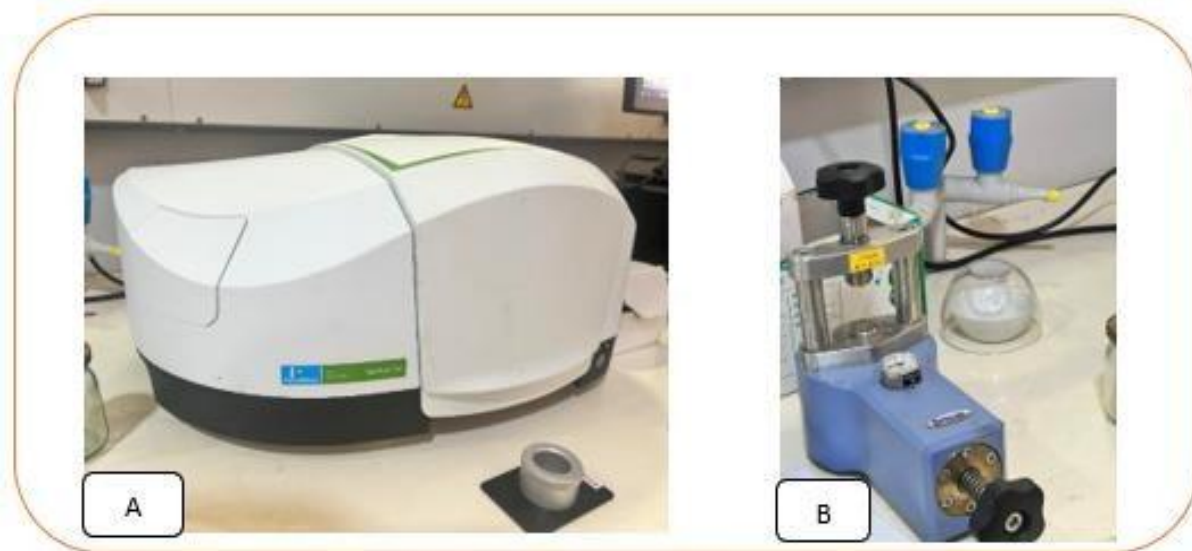


Figure 18 : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) (photo originale)

(A) appareil spectromètre ; (B) presse

3.2.3. Evaluation sensorielle

L'évaluation de la qualité sensorielle des échantillons des cornichons (F01, F02 et F03) a été effectuée au niveau de l'université m'Hamed BOUGARA de BOUMERDES par 25 sujets de différents âges et sexes, selon une échelle hédonique de neuf points allant de 1 à 9. (1 : Extrêmement désagréable, 2 : très désagréable, 3 : désagréables, 4 : assez désagréables, 5 : ni désagréables ni agréables, 6 : assez agréables, 7 : agréable, 8 : très agréables, 9 : extrêmement agréables), cette méthode est universelle et adoptée dans plusieurs travaux (Everitt, 2009 ; Lee *et al.*, 2005) (Annexe n°2).

Le test est basé sur l'évaluation de l'aspect, la couleur, le goût, l'arôme, la texture et une appréciation globale des échantillons des cornichons. L'analyse des résultats obtenus ont été traité par Excel.

3.2.4. Analyse des données

Les valeurs des paramètres physicochimiques tous les échantillons sont exprimés par des moyennes avec écart-types et l'étendue (minimum-maximum) pour la longueur, largeur, le pH, la teneur en cendre, l'acidité titrable.



Chapitre 03

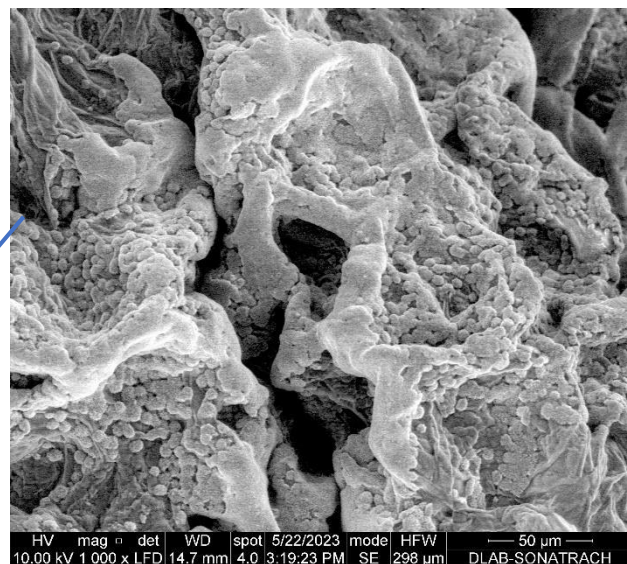
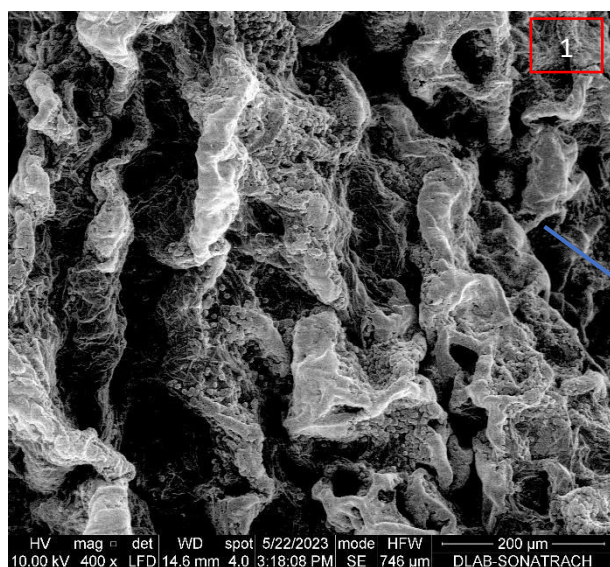
1. Résultats et discussion

1.1. Caractérisation morphologique

Les caractéristiques morphologiques des cladodes du figuier de barbarie utilisés dans cette étude sont données dans le tableau 7.

Tableau 7 : la moyenne des mesures et les dimensions des raquettes des cladodes de figuier de barbarie

Échantillons	Poids (g)	Largeur (cm)	Langueur (cm)	Forme
La Moyenne	108,4±12,09	9,2±0,57	19,42±2,58	Ovoïde



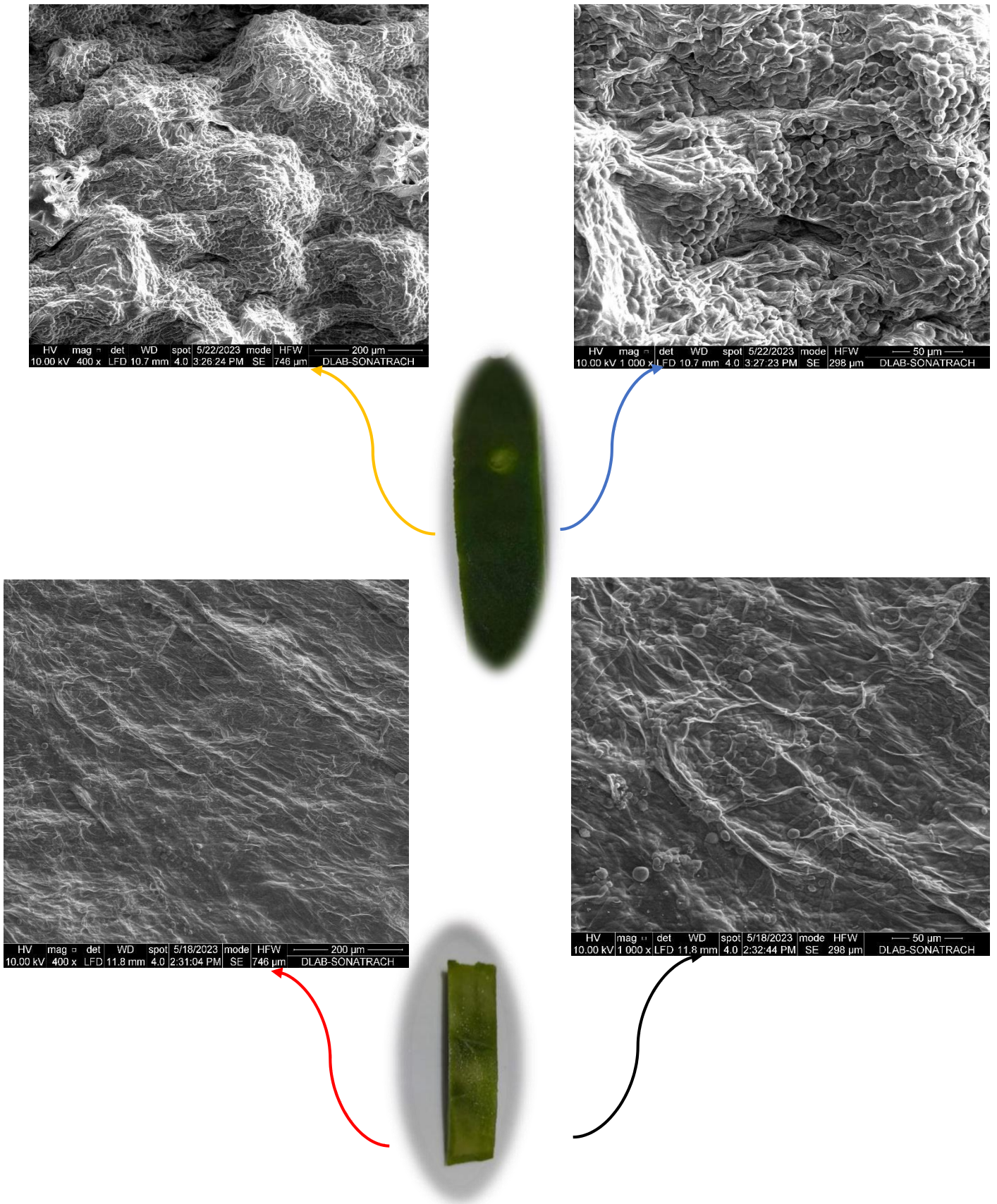


Figure 91 : images de microscopie électronique à balayage (MEB) des cladodes frais d'Opuntia ficus-indica séché à différents grossissements

1.2. Analyses physico-chimiques de base

Les valeurs moyennes des teneurs en eau, en matière sèche, en cendre, le Ph et l'acidité titrable des trois échantillons de cladodes préparés et l'échantillon à l'état frais sont données dans le **tableau 8**

Tableau 8 : les teneurs moyennes en eau, en matière sèche, en cendre, le pH et l'acidité titrable des échantillons de cladodes préparés

	CFr	CF3	CF7	CF15
(H)%	88,47±3,030	93,03±0,578	93,28±1,237	94,66±2,382
M. sèche (%)	11,48±4,327	6,96±0,578	6,72±1,237	5,34±2,382
Cendres %	12,08±0,003	11,80±0,003	11,61±0,001	11,39±0,002
PH	4,58±0,025	3,64±0,041	3,59±0,030	3,44±0,055
Acidité titrable (°D)	0,05±0,005	0,31±0,015	0,38±0,026	0,4±0,01

CFr : Cladodes frais, CF3 : cladodes fermenté 3 jours, CF7 : Cladodes fermentés 7 jours, CF15 : Cladodes fermentés 15 jours

1.2.1. Teneur en eau (taux d'humidité)

Les résultats de taux d'humidité (**Tableau 8 et Fig. 20**), montrent que la teneur en eau des échantillons de cladodes préparés varie entre 88,47 et 94,66%. La valeur la plus élevée est observée dans l'échantillon qui a subi une fermentation de 15 jours CF15 suivie de CF7 et CFr. Les cladodes de figuier de Barbarie frais contiennent une quantité relativement élevée d'eau. Cela est cohérent avec la nature juteuse des cladodes fraîches.

Néanmoins, ces résultats suggèrent que la fermentation des cladodes de figuier de Barbarie dans un mélange d'eau et de vinaigre peut avoir un léger impact sur le taux d'humidité, avec une tendance à une légère augmentation à mesure que la fermentation se

prolonge. Cela est attribué à la dégradation des composants cellulaires et à la libération d'eau pendant le processus de fermentation.

Ces résultats sont proches à celle obtenue par **Valente *et al.* (2010)** qui ont signalé un taux d'humidité des cladodes frais de 95 %. En générale, la teneur en eau des cladodes est comprise entre 80 et 95 % (**Murillo-Amador *et al.*, 2002**). D'après ces résultats, on constate que les raquettes sont riches en eau. C'est donc pour cela que cette plante est bien adaptée aux climats chaude et secs, voire même désertiques.

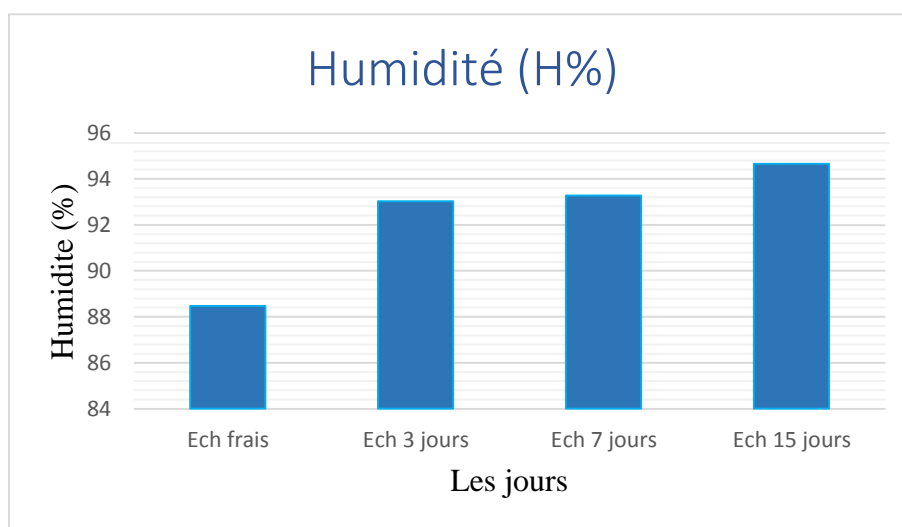


Figure 20 : histogramme des taux d'humidité des cladodes du figuier de barbarie (frais ,3jrs ,7jrs,15jrs)

1.2.2. Teneur en matière sèche

Les résultats de l'analyse de la teneur en matière sèche des échantillons de cladodes de figuier de Barbarie montrent une diminution progressive de la matière sèche à mesure que la durée de fermentation augmente. Les cladodes frais (CFr), qui n'ont pas été fermentés, ont la teneur en matière sèche la plus élevée de 11,48%. Les cladodes fermentés pendant 3 jours (CF3) présentent une teneur en matière sèche de 6,96%, tandis que celle des cladodes fermentés pendant 7 jours (CF7) est de 6,72%. Les cladodes fermentés pendant 15 jours (CF15) ont la teneur en matière sèche la plus basse, avec seulement 5,34%. En effet, la fermentation conduit à une perte progressive de la matière sèche des cladodes, en raison de la dégradation des composants pendant le processus.

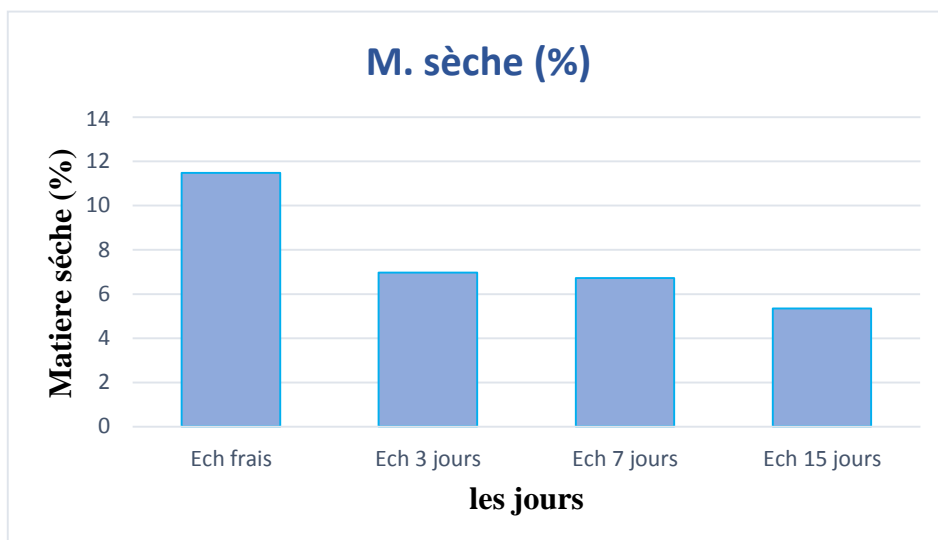


Figure 21 : Teneurs en matières sèche des cladodes du figuier de barbarie (CFr, CF3, CF7 et CF15)

1.2.3. Taux de Cendres

Les valeurs de la teneur en cendres des cladodes de figuier de Barbarie varient de 11,39 % à 12,08 %. Ces valeurs représentent la quantité de matière minérale inorganique restante après la combustion des cladodes. Les cendres sont principalement composées de minéraux tels que des sels de calcium, de potassium, de magnésium, de phosphore, ainsi que d'autres éléments présents dans la plante.

Les résultats obtenus indiquent que la fermentation des cladodes de figuier de Barbarie dans la solution acide pendant les différentes durées a entraîné une légère réduction du taux de cendres par rapport aux cladodes frais. Les valeurs du taux de cendres pour les cladodes fermentés varient entre 11,39 % et 11,80 % tandis que la teneur en cendres des cladodes frais est de 12,08%.

Ces résultats sont comparables à celles signalés par **Pereira *et al.* (2019)**, dans leur étude sur teneur en cendres des produits fermentés à base de céréales, tels que le pain au levain et les produits fermentés à base de riz, ont montré que la fermentation de ces aliments a entraîné une diminution de la teneur en cendres. Cela pourrait être dû à une libération de certains minéraux ou à des réactions chimiques qui se produisent pendant le processus de fermentation.

Cependant, selon les travaux de **Castro et al. (2014)**, sur les changements dans la teneur en cendres de différents produits fermentés ; la fermentation des légumes, tels que les cornichons et le chou a entraîné une légère augmentation de la teneur en cendres. Cela peut être dû à la concentration des minéraux provenant des légumes eux-mêmes, qui peuvent se concentrer davantage lors du processus de fermentation.

Ces études suggèrent que la fermentation peut influencer la teneur en cendres des aliments fermentés, mais les effets peuvent varier en fonction du type d'aliment et des conditions spécifiques de la fermentation **Gubta et al. (2018)**.

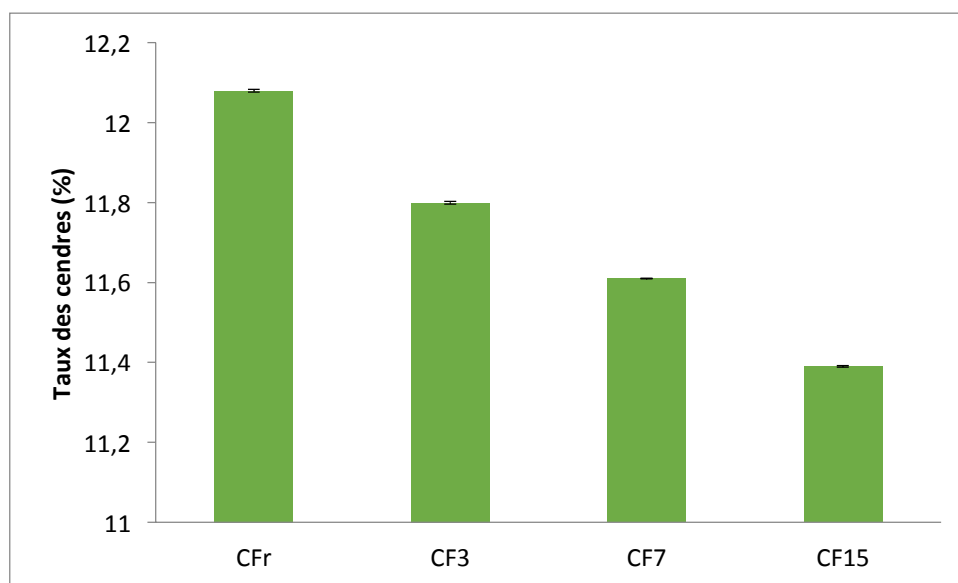


Figure 22 : Histogramme de taux de cendre des cladodes du figuier de barbarie (frais ,3jrs ,7jrs,15jrs)

1.2.4. Détermination du pH

Les valeurs moyennes du pH des cladodes frais et les cladodes fermentés (CF3, CF7 et CF15) illustrés sur le tableau 8 et la figure 23 démontrent que l'ensemble des échantillons présente un pH acide avec des valeurs variables.

Le pH le plus élevé est enregistré au de 3,44 (Ech 15jrs), tandis que le pH le plus bas est de 4,58 (Ech frais).

Acidité : Tous les pH mesurés sont inférieurs à 7, ce qui signifie que l'ensemble des échantillons est acide. « Un pH inférieur à 7 indique un milieu acide, tandis qu'un pH supérieur à 7 indiquerait un milieu basique ».

Différences de pH : Les écarts entre les valeurs de pH peuvent être attribués au temps de fermentation qui également joue un rôle dans les différences de pH observées.

L'acide acétique est un composé présent dans le vinaigre qui confère à ce dernier son goût acide caractéristique. Lorsque les cladodes de figuier du Barbarie sont immergés dans une solution acide de vinaigre et d'eau, l'acide acétique peut pénétrer dans les tissus des cladodes, entraînant ainsi une modification du pH.

L'acide acétique, en tant qu'acide faible, peut réagir avec les composants chimiques présents dans les cladodes de figuier du Barbarie, provoquant ainsi une augmentation de l'acidité dans les tissus. Cette augmentation de l'acidité se traduit par une diminution du pH des cladodes.

Mêmes constatations ont été révélés par **Becila et al. (2022)**, en suivant les variations du pH durant la fermentation du blé dur. En effet le pH passe de 6,48 à 5,50 après différents temps de fermentation. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus lors de la fermentation naturelle des olives algériennes, tels que rapportés par **Kacem et al. (2006)**, où le pH est passé de 4,53 à 4,40. Ces observations suggèrent que le processus de fermentation joue un rôle important dans la réduction du pH des aliments fermentés, ce qui peut avoir des implications sur leur profil sensoriel et leur conservation.

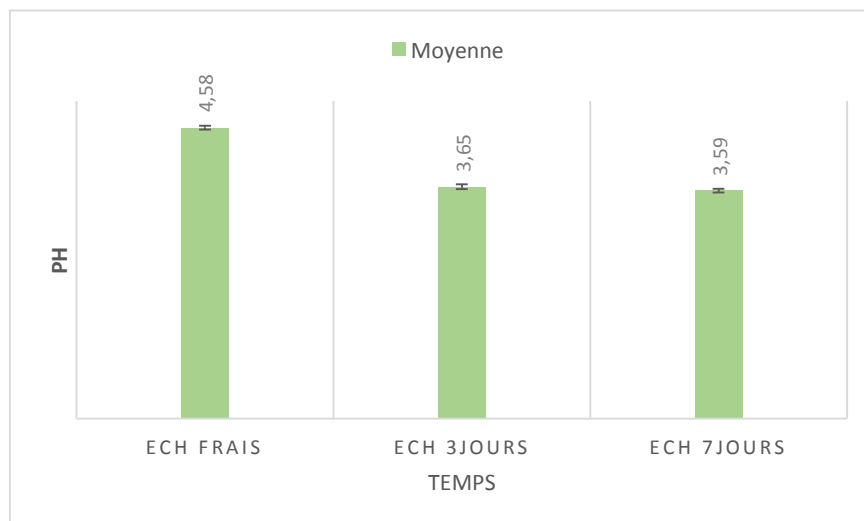


Figure 23 : courbe graphique de la variation des pH des cladodes de figuier de barbarie frais et fermenté (3jrs/7jrs/15jrs)

1.2.5. Acidité titrable

Les résultats montrent une augmentation progressive de l'acidité titrable au fur et à mesure que les cladodes fermentent. Les cladodes frais présentent la plus faible acidité titrable (0,05), tandis que les cladodes fermentés pendant 15 jours affichent la plus forte acidité titrable (0,4) parmi les échantillons étudiés.

L'acidité titrable est une mesure de la concentration d'acides présents dans un échantillon. Dans le cas des cladodes de figuier de Barbarie, l'acidité est généralement attribuée à la présence d'acide citrique.

L'augmentation de l'acidité titrable observée lors de la fermentation des cladodes peut être due à plusieurs facteurs. Pendant le processus de fermentation, des réactions chimiques se produisent, ce qui peut entraîner la production d'acides organiques supplémentaires, y compris l'acide citrique. De plus, la fermentation peut également provoquer la dégradation de certains composés, ce qui libère des acides présents à l'intérieur des cellules des cladodes (**Ayadi et al. 2019**).

La fermentation des légumes peut entraîner des changements dans le pH et l'acidité titrable. En général, la fermentation provoque une baisse du pH des légumes, les rendant plus acides. Cela est dû à l'activité des bactéries lactiques qui convertissent les sucres présents dans les légumes en acide lactique (**Chen et al**)

Même observations ont été révélées par **Chua et al. (2011)**, ont examiné les effets de la fermentation sur le pH et l'acidité titrable des légumes. Les résultats ont montré que la fermentation des légumes comme le chou, les cornichons et les carottes provoque une diminution significative du pH et une augmentation de l'acidité titrable. Une autre étude menée par **Marco et al. (2014)**, sur les effets de la fermentation sur le pH et l'acidité titrable des légumes ont constaté que la fermentation des légumes entraîne une acidification, ce qui a été attribué à la production d'acides organiques par les micro-organismes fermentaires.

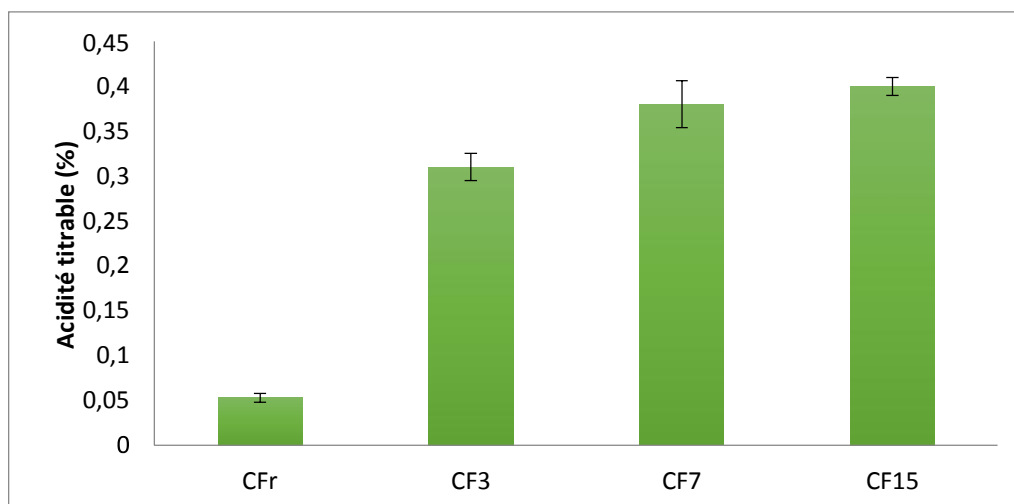


Figure 24 : courbe graphique de la variation de l'acidité titrable des cladodes de figuier de barbarie frais et fermenté (3jrs/7jrs/15jrs)

1.3. Analyse biochimique

1.3.1. Détermination de la composition minérale

La teneur en éléments minéraux (macro et micro-minéraux) des cladodes de figuier de barbarie est déterminée par la spectroscopie d'absorption atomique (ICP-OES)

La quantification des éléments minéraux est effectuée sur les cendres obtenues après incinération du matériel végétal.

➤ Teneur en macro-minéraux

Les concentrations des macro-minéraux de l'échantillon frais et les échantillons fermentés sont résumées dans le **tableau 9**.

Tableau 9 : les concentrations des macro-minéraux des cladodes de figuier de barbarie

Echantillons	Macro-minéraux (mg /kg)			
	Na	Mg	Ca	K
CFr	81,56	415,6	289,28	3011,96
CF3	88,16	68,12	220,44	940,56
CF7	91,68	164,32	181,32	654,88
CF15	122,84	200,04	149,96	859,92

CFr : Cladodes frais, CF3 : cladodes fermenté 3 jours, CF7 : Cladodes fermentés 7jours, CF15 : Cladodes fermentés 15 jours

Les résultats obtenus, révèlent une légère augmentation de la teneur en sodium pendant le 3^{ème} et 7^{ème} jour de fermentation, avec une valeur maximale 122,84mg /kg atteinte après 15 jours de fermentation, contre une diminution maximale dans la teneur en potassium enregistrée dans les trois premiers jours passant de 940,56mg/kg à 859,92 mg/kg au 15^{ème} jour.

Dans une cellule lors de la fermentation, la relation entre Na (sodium) et K (potassium) est essentielle pour maintenir l'équilibre électrolytique et assurer le bon fonctionnement des processus cellulaires (**Journal : Cellular and Molecular Biology Letters 2019**). Le potassium (K) est un cation intracellulaire essentiel qui joue un rôle crucial dans de nombreuses fonctions cellulaires. Il est généralement maintenu à une concentration plus élevée à l'intérieur de la cellule par rapport à l'extérieur. Le sodium (Na), quant à lui, est un cation extracellulaire et est également important pour la régulation du Potentiel de membrane. Il est généralement maintenu à une concentration plus élevée à l'extérieur de la cellule par rapport à l'intérieur (**Albert et al.2002**). Une diminution significative de la teneur en magnésium et de calcium pendant les premiers jours de fermentation, suivie d'une légère augmentation après 7 jours. En général, la fermentation des légumes peut améliorer la biodisponibilité des minéraux, y compris le magnésium.

Pendant le processus de fermentation, les bactéries bénéfiques transforment les glucides en acides organiques, ce qui peut aider à libérer les minéraux présents dans les légumes (**Tamang et al .2016**).

➤ Teneur en micro-minéraux

Les concentrations des macro-minéraux de l'échantillon frais et les échantillons fermentés sont résumées dans le **tableau 10**.

Tableau 10 : les concentrations des micro- éléments des cladodes de figuier de barbarie

Echantillons	Oligo- éléments (mg /kg)							
	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
CFr	0,142	0,272	< 1	< 1	< 1	< 1	0,207	0,592
CF3	0,140	< 1	< 1	4,104	0,776	0,190	1	1,708
CF7	< 1	0,110	2,073	3,168	0,641	0,169	0,012	1,354
CF15	< 1	0,096	0,927	3, 109	0,374	0,078	0,010	0,590

CFr : Cladodes frais, *CF3* : cladodes fermenté 3 jours, *CF7* : Cladodes fermentés 7jours, *CF15* : Cladodes fermentés 15 jours

La concentration de cadmium (Cd) reste basse, inférieure à 1, dans tous les échantillons, indiquant des niveaux limités de ce métal dans les légumes. Le chrome (Cr) est également présent à des concentrations généralement faibles, inférieures à 1, dans tous les échantillons, ce qui suggère une faible présence de chrome dans les légumes. Le cuivre (Cu) montre une augmentation progressive au cours de la fermentation, passant de moins de 1 dans les échantillons frais à 2,073 dans l'échantillon fermenté pendant 7 jours. Cela peut indiquer une augmentation de la teneur en cuivre résultant du processus de fermentation.

Le fer et le zinc (Zn) présentent des concentrations accrues après la fermentation. Le fer (Fe) passe de moins de 1 dans les échantillons frais à 3,168 dans l'échantillon fermenté pendant 7 jours, tandis que le zinc augmente de 0,592 à 1,354 dans la même période. Ainsi, la fermentation semble améliorer la disponibilité de ces deux éléments dans les légumes. D'autre part, le manganèse (Mn) montre une augmentation significative après la fermentation. Alors que la concentration initiale est inférieure à 1 dans les échantillons frais, elle atteint 0,374 dans l'échantillon fermenté pendant 15 jours. Cela suggère que la fermentation libère davantage de manganèse dans les légumes.

Les concentrations de nickel (Ni) restent globalement faibles, inférieures à 1, dans tous les échantillons. En ce qui concerne le plomb (Pb), les concentrations varient, mais restent

généralement faibles. L'échantillon fermenté pendant 3 jours présente une concentration de plomb de 1, qui diminue à 0,010 dans l'échantillon fermenté pendant 15 jours.

En résumé, les résultats indiquent que la fermentation a des effets variables sur les concentrations des éléments dans les légumes. Certains éléments, comme le fer, le manganèse et le zinc, montrent une augmentation, tandis que d'autres restent stables ou diminuent, tels que le cadmium et le plomb. Ainsi, selon (Kwon *et al.* 2012), la teneur en minéraux, notamment le fer et le calcium augmente durant la fermentation du kimchi, un plat traditionnel coréen à base de légumes fermentés. Dans le même sens, (Blandón *et al.* 2017) ont montré que la fermentation des légumes par des bactéries lactiques pouvait améliorer la biodisponibilité du fer et du zinc.

1.3.2. Rendement des polyphénols totaux (Rdt)

Les résultats du rendement en polyphénols totaux (extrait sec brut) obtenus après une extraction hydroalcoolique de l'échantillon frais et les échantillons fermentés sont donnés dans le **tableau 11**.

Tableau 11 : les résultats obtenus de rendement des polyphénols totaux

Echantillons	CFr	CF3	CF7J	CF15
Rdt (%)	5,8	4	3,4	2,8

CFr : Cladodes frais, *CF3* : cladodes fermenté 3 jours, *CF7* : Cladodes fermentés 7 jours, *CF15* : Cladodes fermentés 15 jours

La fermentation est un processus biochimique qui peut modifier la composition chimique des matériaux végétaux.

Les résultats obtenus (tableau 11), indiquent que le rendement en polyphénols extraits des cladodes de figuier de barbarie diminue progressivement durant la période de fermentation elle passe de 5,8% à l'état frais à 2,8% après 15 jours de fermentation. Cela suggère que la fermentation pendant une période plus longue peut réduire la quantité de polyphénols extraite.

Les effets de la fermentation sur le rendement en polyphénols des aliments peuvent varier en fonction des conditions spécifiques de la fermentation et du type d'aliment. Certaines fermentations peuvent entraîner une diminution des polyphénols, tandis que

d'autres peuvent favoriser la formation de nouveaux composés phénoliques (**Tamang et al. 2016**).

Ma et al. (2012) ont évalué l'impact de la fermentation sur les polyphénols présents dans le thé vert, suggèrent que la fermentation du thé vert pour produire du thé noir a entraîné une diminution du contenu en polyphénols. Cela peut être dû à des réactions enzymatiques et à des processus d'oxydation qui se produisent pendant la fermentation.

Cependant, il est également important de noter que la fermentation peut aussi conduire à la formation de nouveaux composés phénoliques. En effet, une étude menée par **Xie et al. (2016)** a montré que la fermentation du riz pour produire du vin de riz rouge a entraîné une augmentation des polyphénols totaux, y compris la formation de nouveaux composés phénoliques.

1.3.3. Spectroscopie infrarouge a transformée de Fourier (FTIR)

➤ **Caractérisation des poudres (frais, fermenté) par spectrométrie infrarouge**

C'est une technique d'analyse de l'absorption de la lumière infrarouge par les molécules. L'absorption est liée à la vibration des liaisons qui permet d'identifier la nature des liaisons est les groupes caractéristiques.

Il existe deux types de mode de vibration :

- Elongation : zone du spectre IR4000 –1000 cm⁻¹.
- Déformation : s'étend de 1300 à 400 cm⁻¹.

Les résultats de l'analyse qualitative de la poudre des cladodes frais, fermenté (CF3, CF7 et CF15) représentés par des spectres IR de la transmittance (T%) en fonction du nombre d'onde (cm⁻¹) sont représentés dans les **figures25, 26 et 27**.

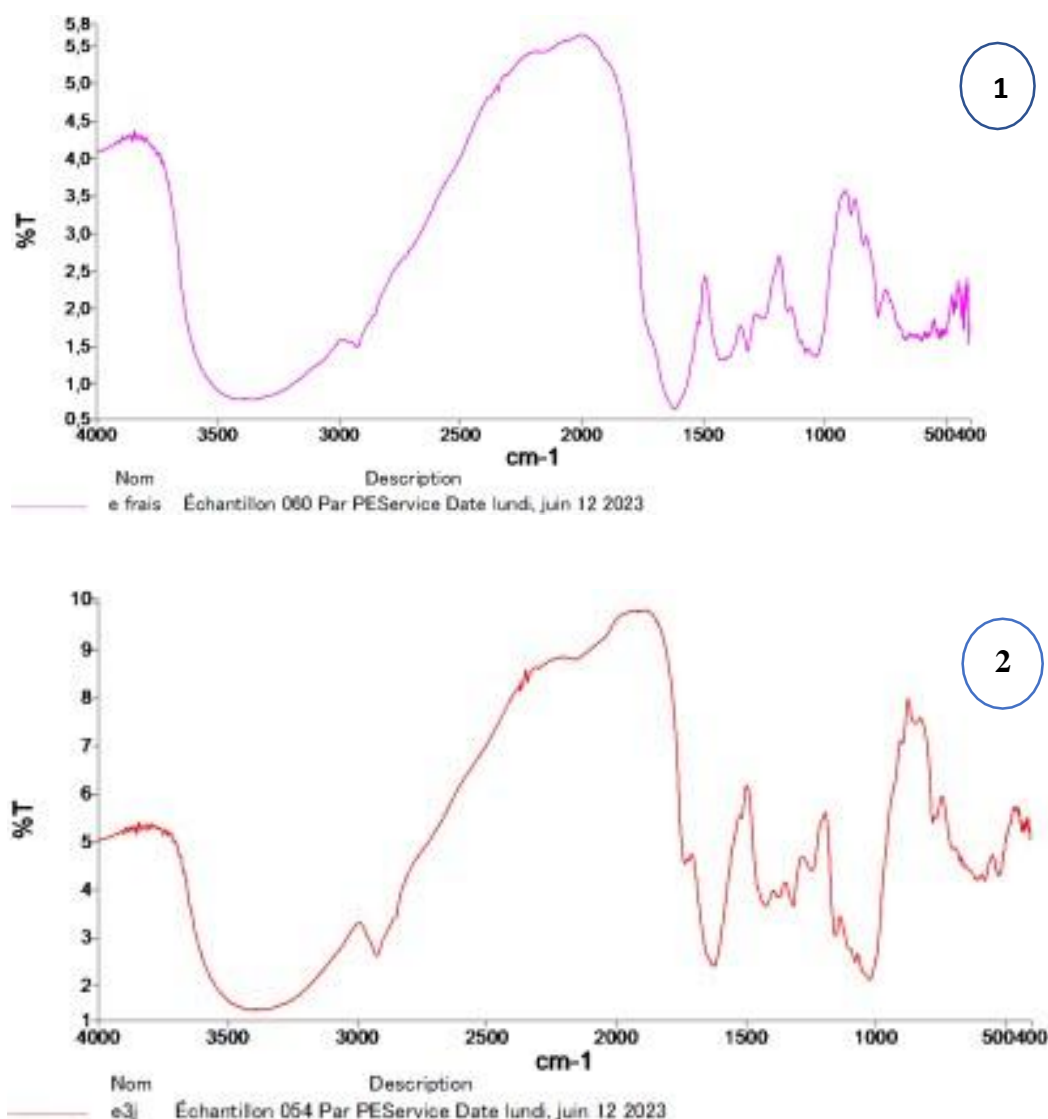


Figure 25 : Spectre d'analyse par IR des poudres de cladode (opunita ficus indica)

(1) : spectre d'analyse par IR de poudre d'échantillons frais (2) : spectre d'analyse par IR de poudre d'échantillons de 3 jours.

L'analyse par spectroscopie infrarouge des deux poudres (CFr et CF3) (**Fig. 25**) monte l'apparition de bandes d'absorbions caractéristiques des fonctions et groupements chimiques. Ainsi, on remarque que les deux poudres (CFr et CF3) représentent des intensités d'absorption quasiment identiques.

Une bande large de forte intensité entre 2500 et 3340 cm^{-1} correspondants à la vibration de l'élongation de la liaison O-H des alcools est observés. Cette bande est de forte transmittance dans la poudre des cladodes frais et fermenté de 3 jours. Par ailleurs, une bande apparaît dans la région 2700 et 2600 cm^{-1} liées aux vibrations d'élongation de la liaison C-

H de l'aldéhyde. Dans les deux poudres en remarque qu'il y'a une bande à forte intensité et fine dans la région 1580 et 1650cm^{-1} liées aux vibrations d'une liaison amide N-H, C=O cette région est caractéristique des groupe fonctionnels amides tels que les amides primaires, secondaires et tertiaires. En outre, la bande comprise entre 1800 cm^{-1} et 1000 cm^{-1} correspond à des vibrations d'élongation de différentes liaisons à savoir : C-O d'un acide carboxylique d'une moyenne intensité, liaison C=O d'esters et de certain alcools et phénols.

Enfin, le domaine d'absorption comprise $600\text{-}500\text{cm}^{-1}$ montre dans les deux spectres des bandes d'absorptions moyenne et fine d'une faible transmittance qui correspond à l'élongation des chlorures d'alkyles C-Cl.

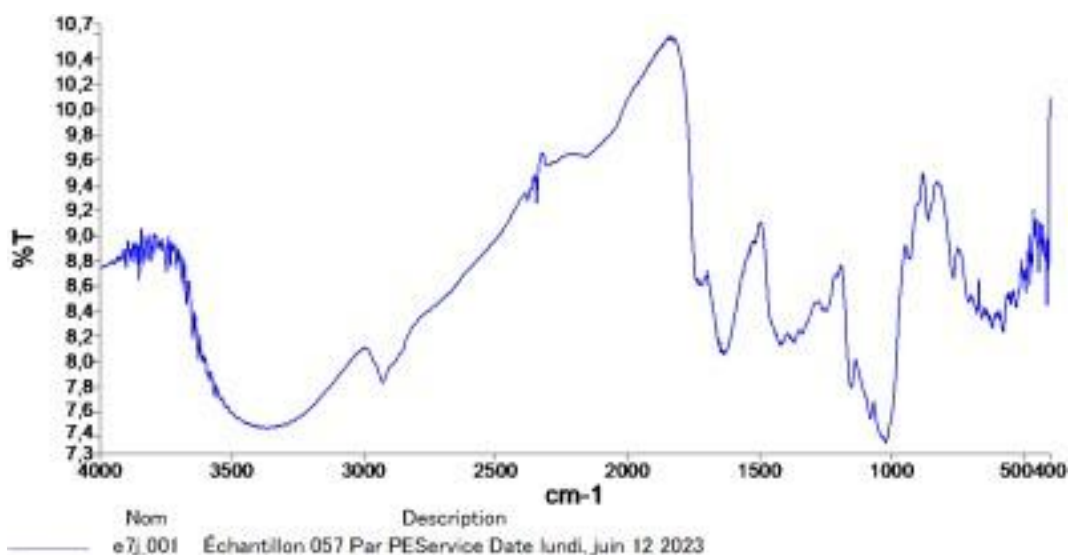


Figure 26 : Spectre d'analyse par IR de la poudre de cladode (*Opuntia ficus indica*) d'échantillons fermenté 7 jours.

On remarque que le profil infrarouge de la poudre des cladodes (CF7) montre l'apparition des plusieurs bandes forte intensité et fine par apport à la poudre des cladodes CFr et CF3 dans la région $4000\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ liée à la vibration de la liaison O-H alcools et N-H, deux bandes fines et de forte intensité apparaissent entre 3000 et 2300 cm^{-1} attribuées à la vibration d'élongation des liaisons O-H de l'aldéhyde. Ainsi une bande fine de moyenne ou forte intensité entre 1560 et 1640 cm^{-1} correspondants à la vibration des liaison N-H amine ou amide. En outre, la bande comprise entre 1800 cm^{-1} et 1200 cm^{-1} correspond à des

vibrations d'élongation de différentes liaisons à savoir :C-O d'un acide carboxylique d'une moyenne intensité, liaison C=O d'esters et de certain Alcools et phénols.

Le domaine d'absorption compris entre 1200 cm^{-1} et 900 cm^{-1} montre une bande d'absorption forte intensité et fine qui correspond à vibration caractéristique des liaisons C-H (carbone-hydrogène) et des liaisons C-C (carbone- carbone), liaison des C-O de certaines classes phénols.

Enfin, apparition des plusieurs bande d'absorption fine d'une faible transmittance par apporte les autre deux spectre IR (poudre d'échantillon CFr et CF3) dans la région 900 cm^{-1} et 450 cm^{-1} correspond à la vibration d'élongation de certains composés aromatiques, composés halogénés, certains groupes méthylènes et phosphorique.

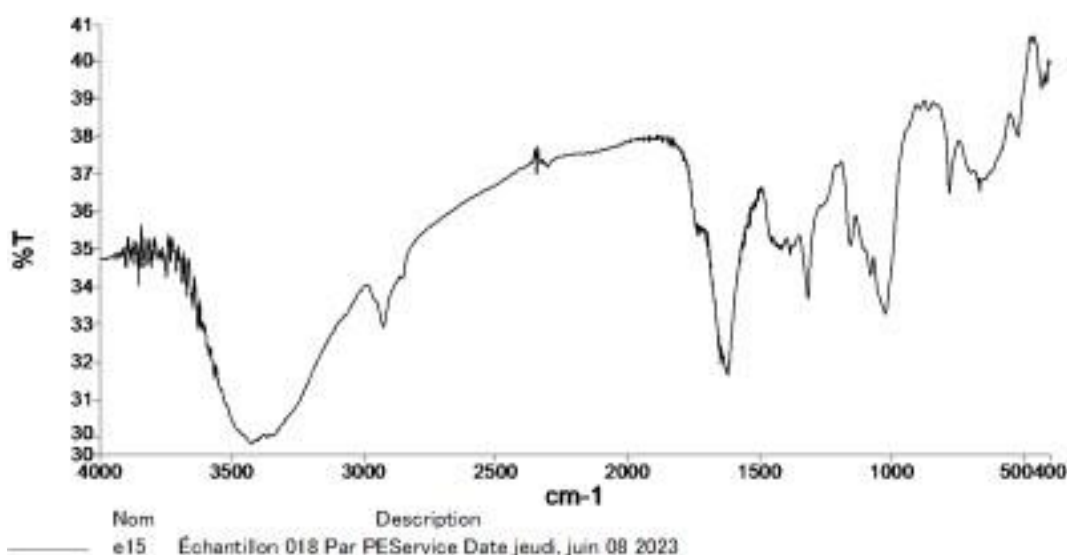


Figure 27 : Spectre d'analyse par IR de la poudre de cladode (*Opuntia ficus indica*) d'échantillons fermenté 15 jours

Plusieurs bandes d'absorption fine et d'une faible transmittance apparaissent dans la zone 3500 et 3700 cm^{-1} liée aux vibrations de liaison O-H alcools libre. Ainsi entre 3400 et 3200 cm^{-1} une bande de forte intensité est moins large par rapport aux autres spectres IR (CFr, CF3 et CF7) liée aux vibrations de la liaison O-H alcools liée. Par ailleurs, deux bandes apparaissent dans la région 3000 cm^{-1} à 2800 cm^{-1} liées aux vibrations de liaison C-H.

En outre, la bande comprise entre 1500 cm^{-1} et 1600 cm^{-1} attribuées à des vibrations de liaison double carbone C=C d'alcane ou composé aromatique, on remarque trois bandes d'absorption forte ou moyenne et fine entre 1000 et 1750 cm^{-1} liée aux vibrations des liaison C-C, C-O, C-N, C=O.

En fin, le domaine d'absorption comprise $600-750\text{ cm}^{-1}$ et $500-600\text{ cm}^{-1}$ correspond à vibration d'élongation de liaison C-I et C-Br.

Tous les spectres ont clairement montré la nature phénolique de toutes les poudres analysées (frais et fermenté 3, 7 et 15 jours). Ces résultats suggèrent qu'il existe une large gamme de groupements fonctionnels (aldéhydes, carboxyle, alcools, alcane, etc.) constituant les éléments clés des propriétés chimiques des différentes biomolécules dérivées des cladodes.

1.4. Analyse sensorielle

Les trois types d'échantillons (dont les codes ont été attribué comme suit : F01 : cladodes fermentés 3 jours, F02 : cladodes fermentés 7 jours, F03 : cladodes fermentés 15 jours) ont été présentés à un panel de 25 dégustateurs de différents sexes et âges. On a demandé aux dégustateurs de donner à chaque échantillon et à chaque critère (aspect, couleur, goût, arôme, texture, appréciation globale), une note de 1 à 9 (Extrêmement désagréable, Très désagréable, Désagréables, Assez désagréables, Ni désagréables ni agréables, Assez agréables, Agréable, Très agréables, Extrêmement agréables) (**Annexe 02 ,03 et 04**).

1.4.1. L'aspect

Les résultats de test de classement effectués sur l'aspect des cladodes fermentés préparés, illustrés par la **figure 28** montrent que l'aspect le plus apprécié est celui de l'échantillon F01.

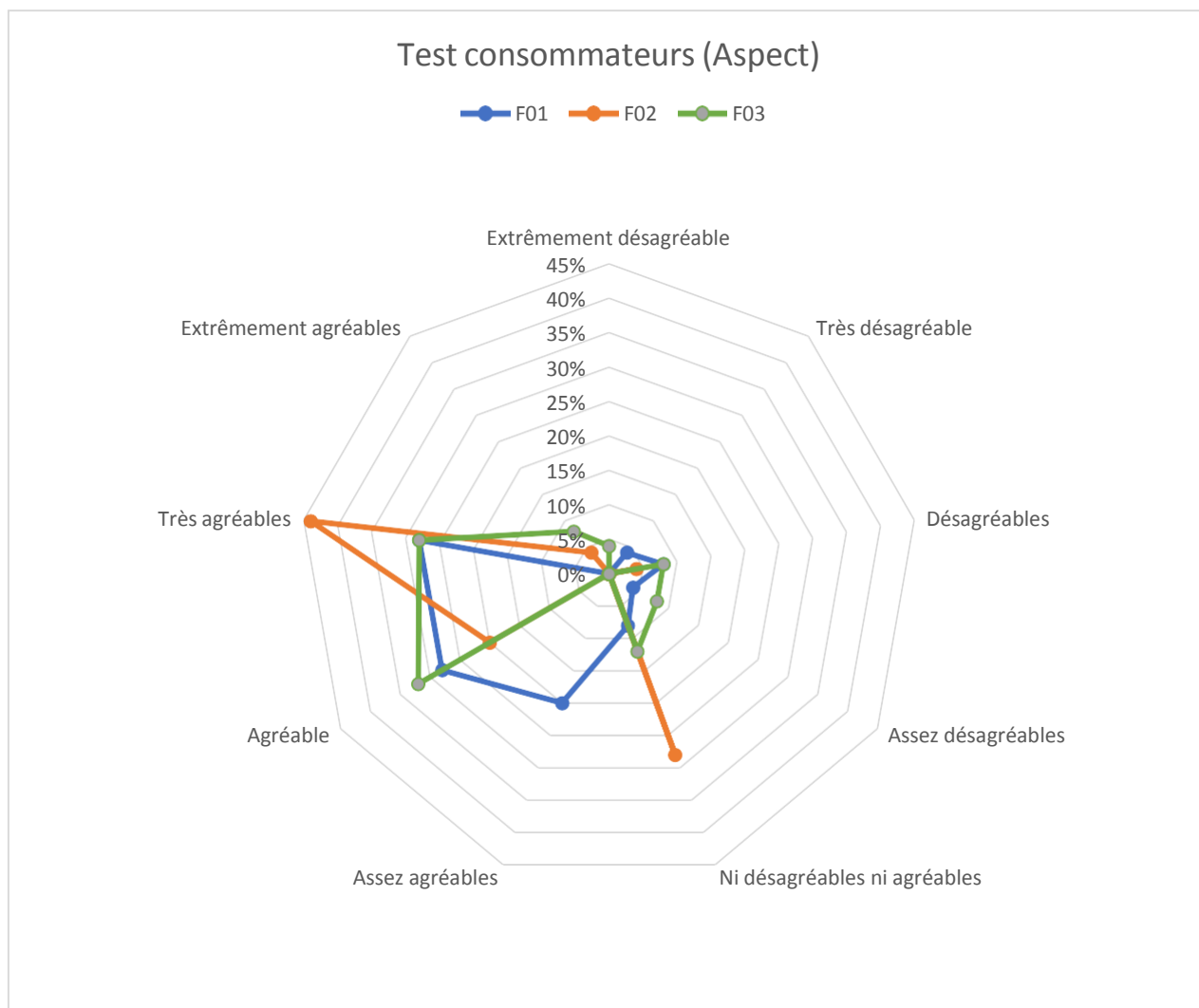


Figure 28 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (l'aspect).

1.4.2. La couleur

Les résultats de niveau d'acceptabilité de la couleur (**Figure 29**) révèlent que chacune des trois échantillons des cladodes fermentés F01, F03 avec 76% et F02 avec 88% des dégustateurs qui ont admiré sa couleur.

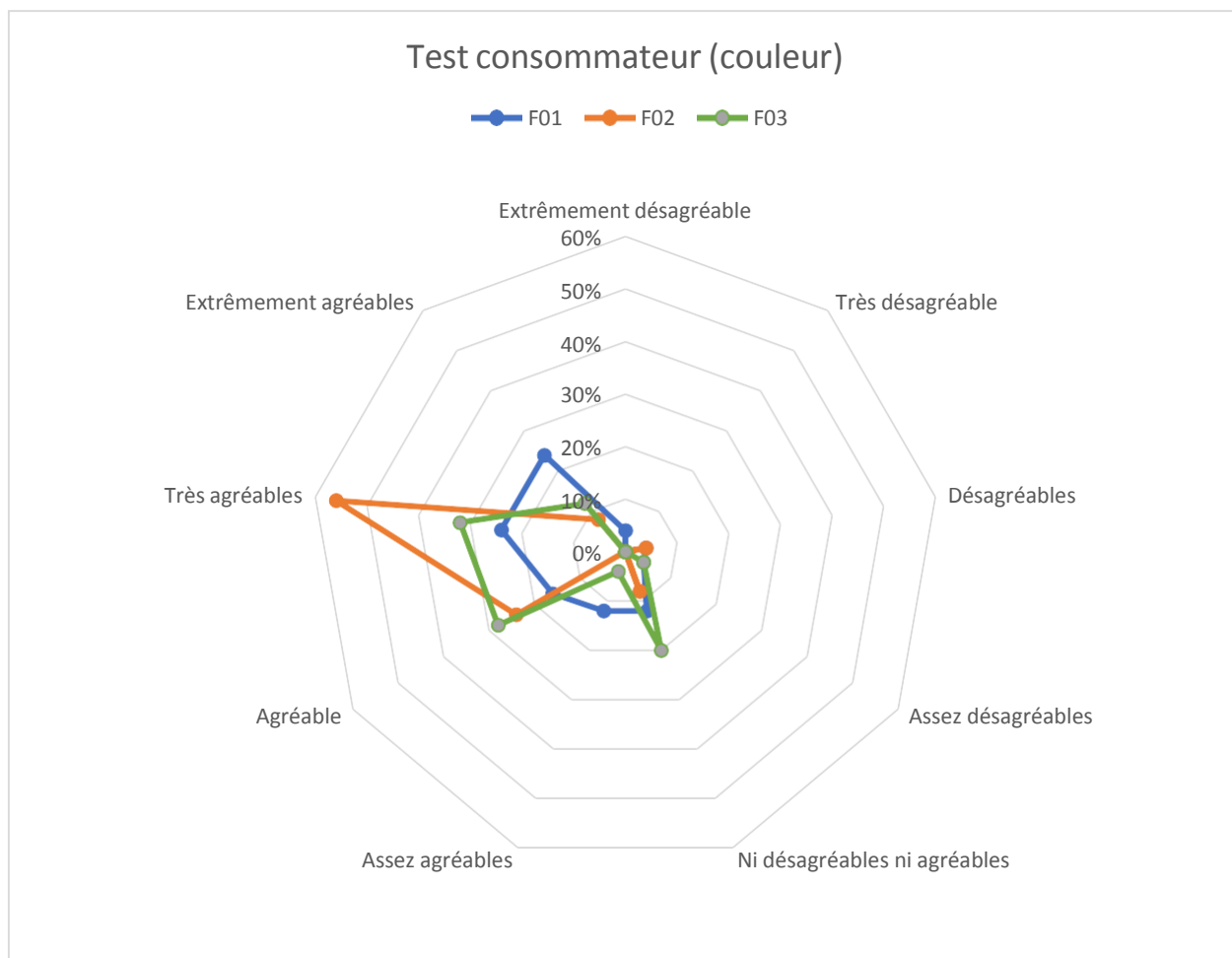


Figure 29 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (couleur).

1.4.3. Le goût

Selon les résultats mentionnés dans **la figure 30**, 92% des dégustateurs ont apprécié le goût des cladodes fermentés F 02 qui est un résultat majoritaire, contre 84% pour les cladodes fermentés 03 et 80% pour les cladodes fermentés 01.

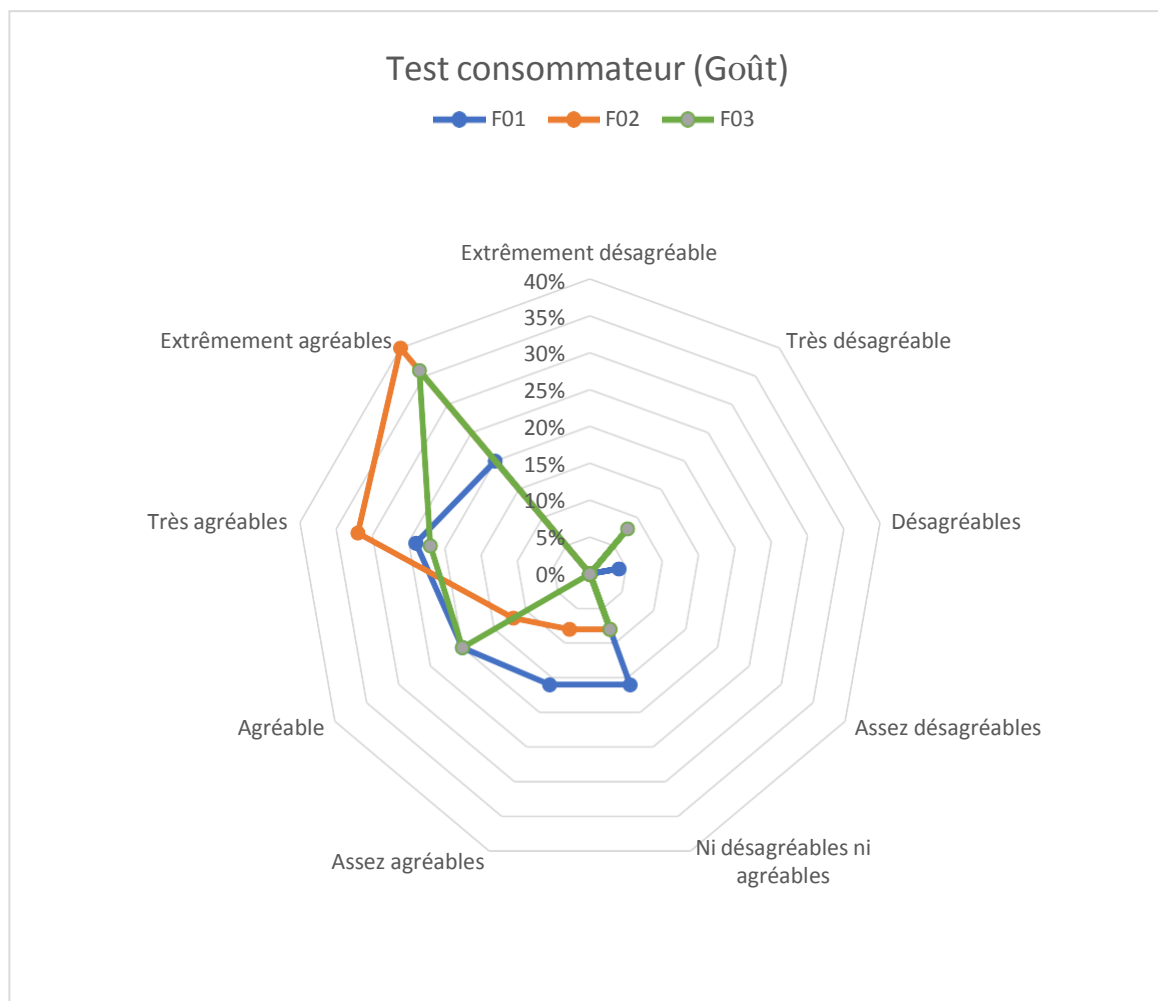


Figure 30 : Répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (goût).

1.4.4. Arôme

Selon les résultats de test de dégustation indiqués sur **la figure 31**, 80% des dégustateurs ont appréciés l'arôme des cladodes fermentés F03, et 68% des cladodes fermentés F02, alors que 64% ont préféré celui des cladodes fermentés F01.

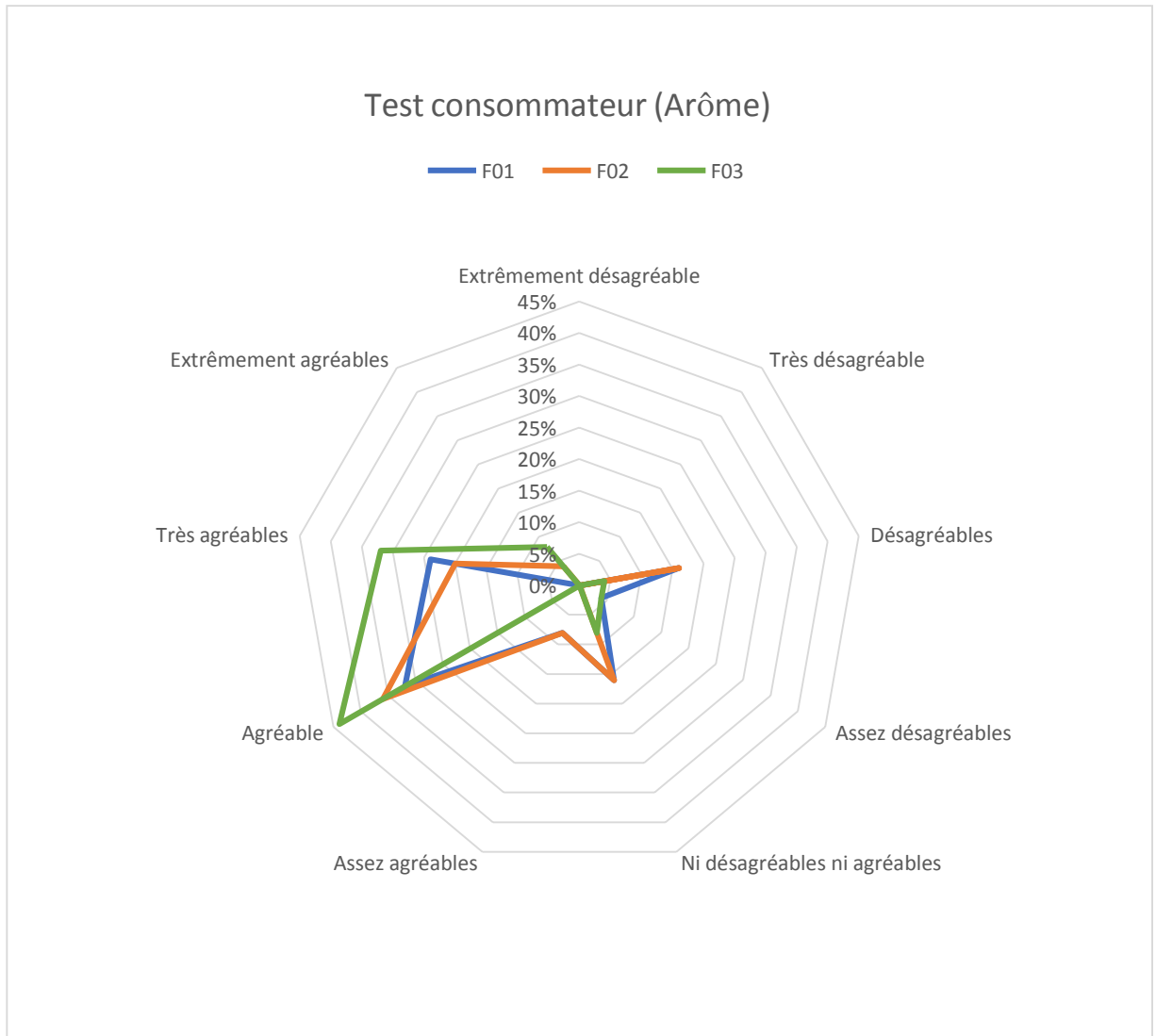


Figure 31 : répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (Arôme)

1.4.5. Texture

Les résultats de l'analyse de la texture donnés dans **la figure 32** montrent que 80% des dégustateurs ont été impressionnés par la texture des cladodes fermentés F03, 76% pour les échantillons F01, et 72% par celle de F02.

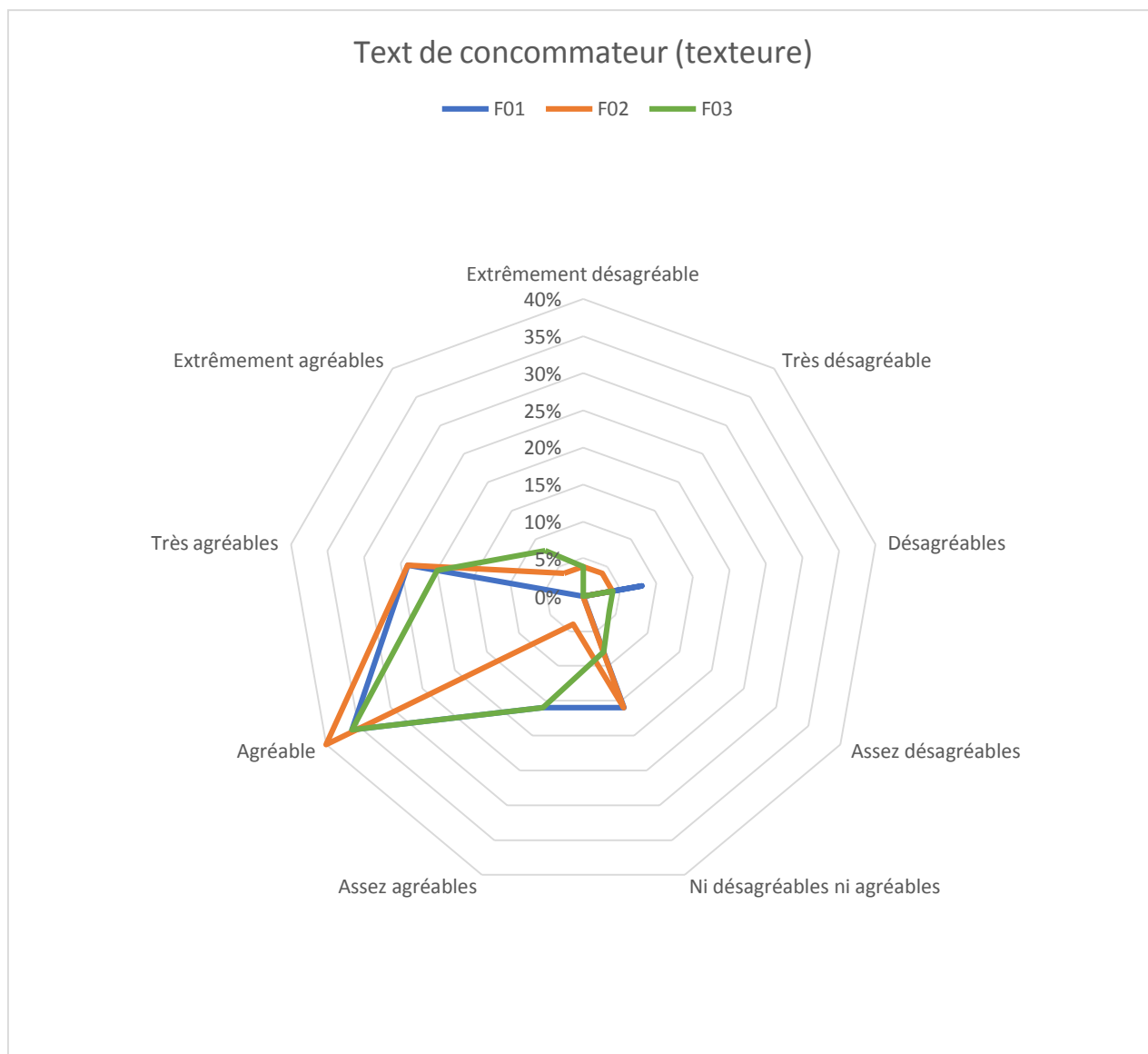


Figure 32 : répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (texture)

1.4.6. Appréciation globale

D'une façon plus générale, on a fait une appréciation globale des 3 cladodes fermentés préparées, et les résultats ont montré que 92% des dégustateurs ont apprécié les cladodes fermentés F03 et 84% pour le F01 et F02.

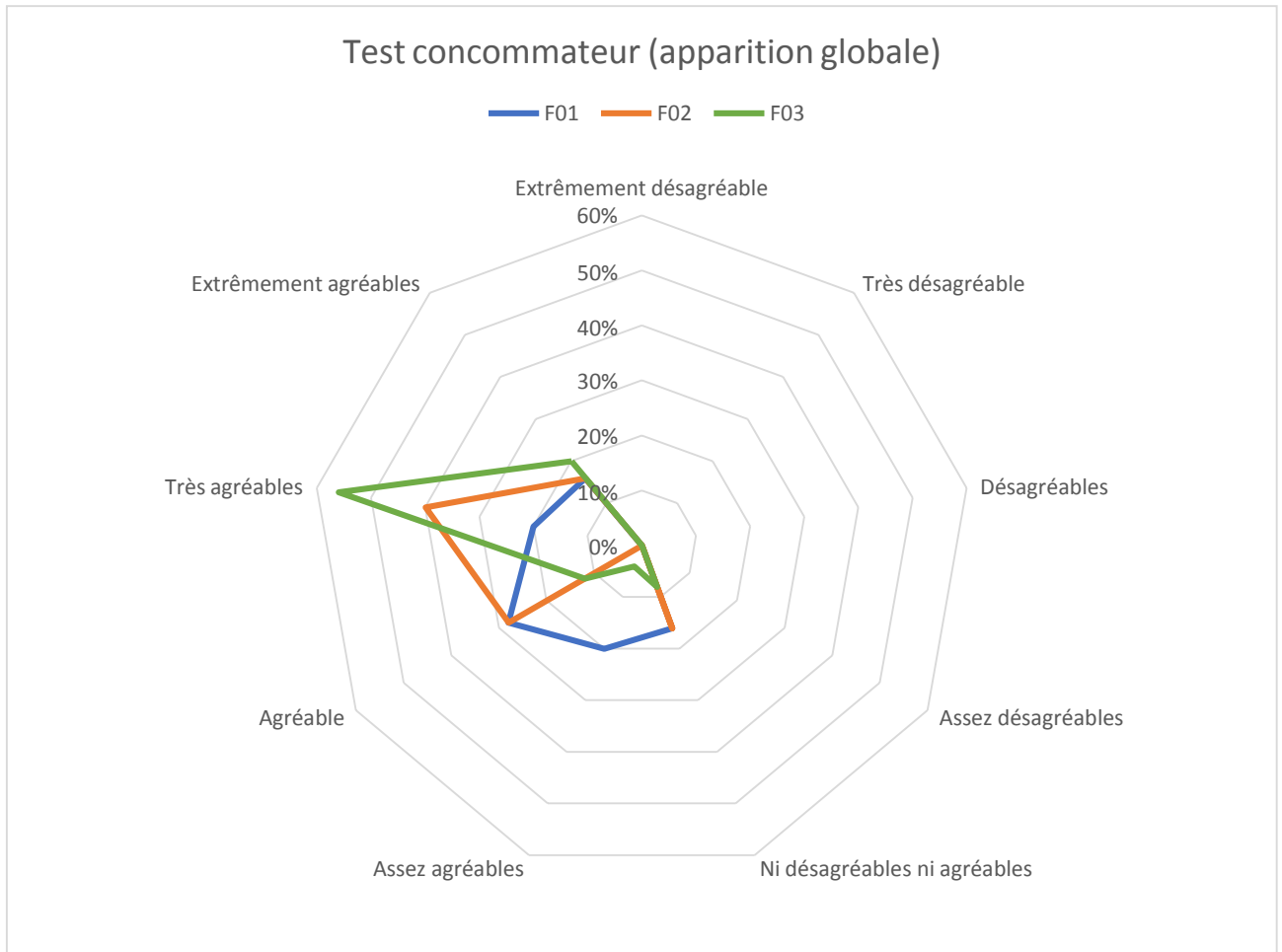


Figure 33 : répartition des réponses des dégustateurs sur l'échelle hédonique pour les trois cladodes fermentés (Appréciation globale)

Les résultats obtenus indiquent clairement que les cladodes fermentés pendant 15 jours (F03) ont été les mieux appréciés par les dégustateurs en termes de goût, de couleur, d'arôme et de texture. Cette observation suggère que la fermentation prolongée de 15 jours a contribué à développer des caractéristiques organoleptiques plus agréables et équilibrées dans les cladodes.

Du point de vue du goût, les cladodes fermentées pendant 15 jours ont probablement atteint un équilibre optimal entre l'acidité et d'autres saveurs, offrant ainsi une expérience gustative agréable. La couleur des cladodes fermentées pendant cette période a également été appréciée, ce qui peut être attribué à des changements de pigmentation pendant la fermentation. De plus, l'arôme des cladodes fermentées pendant 15 jours a probablement développé des notes subtiles et attrayantes résultant de la fermentation et de la libération de composés aromatiques.

Enfin, la texture des cladodes fermentés pendant cette durée a été considérée comme satisfaisante, peut-être en raison de la dégradation des fibres et d'une texture plus tendre.

Ces résultats suggèrent que la fermentation prolongée de 15 jours dans une solution de vinaigre a conduit à des cladodes fermentés qui sont non seulement bénéfiques sur le plan physicochimique, mais aussi agréable sur le plan sensoriel. Ces cladodes pourraient donc être considérées comme une option privilégiée pour une utilisation culinaire et alimentaire, compte tenu de leur appréciation positive en termes de goût, couleur, arôme et texture par les dégustateurs.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica*), est une plante qui présente un intérêt croissant en raison de ses propriétés nutritionnelles et de ses utilisations potentielles dans l'industrie alimentaire.

Cette étude vise à examiner les effets de la fermentation dans une solution de vinaigre sur divers paramètres physicochimiques et organoleptiques des cladodes d'*Opuntia ficus indica*.

Les résultats obtenus ont fourni des informations précieuses sur les changements observés. En effet, la fermentation a entraîné une baisse du pH (de 4,58 à 3,44) et une augmentation de l'acidité titrable (de 0,005 à 0,1), principalement due à l'accumulation d'acide lactique et d'autres acides organiques totaux.

De plus, Les cladodes fermentées ont montré une légère augmentation du taux d'humidité par rapport aux cladodes frais. Cela peut être dû à la production de composés hygroscopiques pendant la fermentation.

Les cladodes fermentés ont montré une diminution progressive de la teneur en matière sèche (passe de 11,48 à 5,34), ce qui peut être attribué à la dégradation des composants au cours de la fermentation. Les variations dans les valeurs du taux de cendres suggèrent que la fermentation peut modifier la composition minérale des cladodes.

En ce qui concerne les polyphénols, les cladodes de figuier de Barbarie frais ont montré un rendement plus élevé (5,8%) par rapport aux cladodes fermentés, indiquant une diminution du rendement en polyphénols (2,8%) avec une durée de fermentation plus longue.

L'analyse par spectrométrie infrarouge a confirmé la nature phénolique des différentes poudres de cladodes, soulignant la présence de divers groupements fonctionnels qui jouent un rôle clé dans les propriétés chimiques des biomolécules dérivées des cladodes.

L'évaluation sensorielle a montré que les cladodes fermentés pendant 15 jours (CF3) ont été les mieux appréciés en termes de goût, de couleur, d'arôme et de texture. Cette observation

suggère que la fermentation prolongée a contribué à développer des caractéristiques organoleptiques équilibrées et agréables dans les cladodes fermentés.

Ces résultats soulignent l'importance de la fermentation dans la modification des paramètres physicochimiques et sensoriels des cladodes de figuier de Barbarie. Ils fournissent des informations précieuses pour évaluer l'acceptabilité et l'utilisation potentielle des cladodes fermentés dans diverses applications alimentaires et culinaires. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir notre compréhension des mécanismes sous-jacents à ces changements et pour explorer davantage les effets de la fermentation sur la qualité et les propriétés fonctionnelles des cladodes fermentés. Sur la base des conclusions de cette étude, voici quelques perspectives de recherche possibles :

- Explorer les propriétés fonctionnelles, en étudiant l'effet de la fermentation sur les propriétés fonctionnelles des cladodes de figuier de Barbarie fermentés, telles que leur capacité antioxydante, leurs activités antimicrobiennes ou anti-inflammatoires.
- Le profil des composés bioactifs, des cladodes frais et fermentés, en utilisant des techniques analytiques avancées comme la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse.
- Explorer l'optimisation de la fermentation en examinant différentes conditions telles que la durée de fermentation, la concentration de vinaigre et la température.
- L'activité prébiotique, les applications industrielles et la durée de conservation des cladodes de figuier de Barbarie fermentés.

Références Bibliographiques

*L*es références bibliographiques

1. ([Confiture Extra de Figues de Barbarie 250 gr scyavuru sicile \(olico.it\)](#))
2. Abidi, S. L., Ahamad, S., & Khan, M. A. (2009). Chemical Composition and Profile Characterization of Seed Oil from Tunisian *Opuntia Ficus-Indica* Fruits. *Journal of Food Science*, 74(5), C380-C385.
3. Adjeroud, N., et al. (2015). Extraction and characterization of mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 122, 411-416.
4. Adjeroud, N., et al. (2018). Valorization of *Opuntia ficus-indica* mucilage through the extraction of pectin and development of a pectin-based edible film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1089-1097.
5. Adjeroud-Abdellatif, N. Hammoui, Y. Boudria, A. Agab, S. Choulak, F. Leclerc, J.P. Merzouk, B. Madani, K. 2020. Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus-indica* cladode on electrocoagulation electroflotation water treatment process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. doi.org/10.1080/03067319.2020.1804889.
6. AFNOR. (2003). NF V03-40 : Produits alimentaires - Dosage de l'humidité - Méthode par dessiccation en étuve ventilée. Association Française de Normalisation.
7. Agroligne. (2016). Les figues de Barbarie : fruit du paradis ou fruit du diable ? Agroligne..
8. Alberts B, Johnson A, Lewis J, Raff M, Roberts K, Walter P. *Molecular Biology of the Cell*. 4th edition. New York: Garland Science; 2002. Chapter 44, Electrical Excitability and Ion Channels.
9. Angulo-Bejarano P, González-Mendoza D, Ventura-Zapata E, (2014). Plant Tissue Culture of *Opuntia* spp.: A Biotechnological Tool for the Production of Value-Added Products. In R. Y. Torres-Sánchez et al. (Eds.), *Cactus* (pp. 307-330). Springer.
10. Araba, A. M., et al. (2000). Fruit characteristics of prickly pear cactus (*Opuntia* spp.) clones grown in arid lands. *Journal of Food Quality*, 23(5), 471-480.
11. Arba, M. (2009). *Opuntia Ficus Indica*: An Important Source of Minerals and Vitamins. *International Journal of Food Science, Nutrition and Dietetics*, 57(3), 181-185.
12. Arba, M. (2009). *Opuntia Ficus Indica*: An Important Source of Minerals and Vitamins. *International Journal of Food Science, Nutrition and Dietetics*, 57(3), 181-185.
13. Arba, M. (2009). *Physiological and Biochemical Adaptations of Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. to Water Stress. PhD Thesis,
14. Ayadi MA, Kechaou N, Attia H. Impact of fermentation on nutritional and physicochemical properties of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Sci Biotechnol*. 2019;
15. Battcock, M., & Azam-Ali, S. (2001). *Fermented Fruits and Vegetables: A Global Perspective* (Vol. 134). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
16. Benattia, K. (2017). Valorisation de la figue de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) dans le développement durable de l'oasis de Ouled Ziane (Sahara algérien).
17. Benattia, N. (2017). Huile de figue de Barbarie : comment bien la choisir ? Doctissimo.

18. Bhira, K. (2012). Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.): A Sustainable Crop for Arid and Semi-arid Regions. *Advances in Food Research*, 57-72.
19. bifidobacteria in natural media using vegetables, seaweeds, grains and potatoes,” *Food*
20. Black, C. C., et Osmond, C. B. (2003). Crassulacean Acid Metabolism Photosynthesis: 'Working the Night Shift'. *Photosynthesis Research*, 76(3), 329-341.
21. Blaustein MP. Sodium and Potassium Ions: Hypertension and Beyond. Hypertension. 2020
22. Bouayad, N. (2012). Figue de Barbarie : une alternative de développement des régions arides et semi-arides.
23. Boutakiout, M. (2017). Codex Alimentarius : Norme générale pour les jus et les nectars de fruits. Bureau de normalisation du Maroc.
24. Boutakiout, M. (2017). Codex Alimentarius : Norme générale pour les jus et les nectars de fruits. Bureau de normalisation du Maroc.
25. Bouzid, W., Belkhiri, F., & Hamza-Mekroud, K. (2020). Phenolic compounds and biological activities of cladodes from three *Opuntia* species grown in Algeria. *Journal of Applied Phycology*, 32(6), 3689-3700.
26. Chen L, Xu Y, Li W, et al. Microbial succession and metabolite changes during fermentation of Dongchimi, a traditional Korean fermented vegetable food. *J Microbiol Biotechnol*.
27. Chougui, Y., et al. (2013). Enquête sur l’exploitation des cactacées au niveau de la région d’Oued Souf. Laboratoire de Recherche Appliquée en Mécanique de l’Agriculture et du Génie Rural, Université Kasdi Merbah Ouargla.
28. CNRTL. (2012). Définition de "confiture". Centre national de ressources textuelles et lexicales.
29. Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Organisation mondiale de la santé (OMS).
30. Codex Alimentarius. Norme pour les légumes en conserve. Codex Stan 314-2014. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Organisation mondiale de la santé (OMS).
31. Couvez, M., et al. (2010). La filière figue de Barbarie dans la région de Souk-Ahras : état des lieux et perspectives de développement. Algérie.
32. Montet, G. Loiseau, and N. Zakhia-Rozis, “Microbial technology of fermented
33. De Felice, S. (2004). Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*): A Review. In: *Progress in New Crops*. ASHS Press, Alexandria, Virginia, USA.
34. Demir, N., Bahçeci, K. S., & Acar, J. (2006). The effects of different initial *Lactobacillus plantarum* concentrations on some properties of fermented carrot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 30(3), 352-363.
35. El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M. S., ... Nasser, B. (2014). Antioxidant Activity and Hepatoprotective Effects of Moroccan *Opuntia ficus-indica* Extract. *BioMed Research International*, 2014, 1-12.
36. El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., Vamecq, J., El Kebbaj, M. S., ... & Latruffe, N. (2014). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a source of bioactive compounds for nutrition, health and disease. *Molecules*, 19(9), 14879-14901.
37. El-Mostafa, K., et al. (2014). *Opuntia* spp.: Characterization and Benefits in Chronic Diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2014, Article ID 863424.

38. Endrizzi, I., Pirretti, G., Calo, D. G., & Gasperi, F. (2009). A consumer study of fresh juices containing berry fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(7), 1227-1235.
39. Ennouri, M., Fetoui, H., Bourret, E., Zeghal, N., & Guermazi, F. (2005). Attenuation of experimental diabetes-induced inflammation and muscle injuries by Cactus fibers. *Experimental Biology and Medicine*, 230(7), 491-498.
40. Everitt, B. (2009). *An R and S-PLUS Companion to Multivariate Analysis*. Springer Science & Business Media. (Livre)
41. Guarner and G. J. Schaafsma, "Probiotics," *International Journal of Food*
42. FAO. (2018). Fiche technique sur la figue de Barbarie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
43. Felkai-Haddache, L., et al. (2015a). Characterization and rheological properties of *Opuntia ficus-indica* L. cladodes mucilage: Effect of extraction conditions. *Food Hydrocolloids*, 44, 333-341.
44. Felkai-Haddache, L., et al. (2015b). Extraction of mucilage from *Opuntia ficus-indica* cladodes: Optimization using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 70, 340-347.
45. Felker, P., et al. (2005). The Nutritional and Environmental Attributes of the Cactus *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Arid Environments*, 61(4), 569-589.
46. Fessard, A. (2017). Fermented vegetables: Industrial importance and microbiological process. *LWT-Food Science and Technology*, 77, 436-441.
47. Feugang, J. M., Konarski, P., Zou, D., Stintzing, F. C., & Zou, C. (2006). Nutritional and medicinal use of Cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes and fruits. *Frontiers in Bioscience*, 11(1), 2574-2589.
48. Gupta A, Mishra AK, Bansal M. Effect of Fermentation on Bioavailability of Minerals from Food. *Food Rev Int*. 2018
49. H. Y. Kim, J. H. Min, J. H. Lee, and G. E. Ji, "Growth of lactic acid bacteria and
50. Hadjarab, B., & Taleb, L. (2016). Extraction and characterization of essential oil from *Cymbopogon citratus*. *International Journal of Chemical Sciences*, 14(1), 251-258.
51. Hernández-Urbiola, M. I., Romo-Asunción, D., Rodríguez-García, M. E., & Rodríguez-Domínguez, J. M. (2011). Adaptation of *Opuntia* species to semiarid conditions: changes in growth, water relations, and photochemistry. *Journal of Arid Environments*, 75(3), 236-243.
52. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/250424>
53. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/CAM_cycle)
54. Hutkins, R. W., Krumbeck, J. A., Bindels, L. B., Cani, P. D., Fahey Jr, G., Goh, Y. J., ... & Martens, E. C. (2016). Prebiotics: why definitions matter. *Current Opinion in Biotechnology*, 37, 1-7. (Article de revue scientifique)
55. International Volume 2014, Article ID 250424, 19 pages
56. J. Karovicov ` a, M. Drd ` ak, G. Greif, and E. Hybenov ` a, "The ` choice of strains of
57. Jana, A. H. (2012). Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica* L.): An Overview. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 4(Suppl 4), 22-26.
58. *Journal of Food Microbiology*, vol. 127, no. 3, pp. 220–228, 2008.
59. Kaur, C., & Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables: The millennium's health. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(7), 703-725.
60. Kaur, G., Tirkey, N., Bharrhan, S., Chanana, V., Rishi, P., & Chopra, K. (2012). Inhibition of oxidative stress and cytokine activity by curcumin in amelioration of endotoxin-induced experimental hepatotoxicity in rodents. *Clinical and Experimental*

- Immunology, 166(1), 145-155.
61. Khodir, M. (2022). Flora of Algeria: Checklist, Ecology and Distribution. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 21(1), 1-23.
 62. Kiesling, R. (1999). Nomenclature of the Opuntioideae (Cactaceae). *Cactus and Succulent Journal*, 71(4), 189-197.
 63. Lactobacillus species for the lactic acid fermentation of vegetable juices,” *European Food*
 64. Larousse. (2004). Définition de "vin". Larousse.
 65. Lee, Y. S., Kim, Y. S., Lee, J. Y., Kim, H. C., Moon, S. H., & Song, S. Y. (2005). Amino acid and fatty acid composition of an edible cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Food Chemistry*, 91(4), 667-672.
 66. Lee, S. Y., Kim, Y. S., Cho, Y. S., & Kim, K. O. (2005). Sensory evaluation and instrumental analysis of soy milk products. *Food Science and Biotechnology*, 14(1), 30-36. (Article de revue scientifique)
 67. Lee, E. B., Shin, D. S., Kim, J. S., Kang, S. W., Oh, Y. J., Park, S. Y., ... & Kim, H. C. (2002). Antioxidative and antiulcer effects of scopoletin isolated from *Artemisia princeps* Pampanini cv. Sajabal. *Archives of Pharmacal Research*, 25(5), 709-712.
 68. Lefsih, K., et al. (2016). *Opuntia ficus-indica* cladodes as a source of dietary fiber: Chemical composition and fiber characterization. *Industrial Crops and Products*, 83, 679-686.
 69. Lefsih, K., et al. (2018). Extraction and characterization of pectin from *Opuntia ficus-indica* cladodes after mucilage removal. *Food Hydrocolloids*, 77, 136-144.
 70. Linné, C. (1768). *Systema Naturae per Regna Tria Naturae, Secundum Classes, Ordines, Genera, Species, Cum Characteribus, Differentiis, Synonymis, Locis. Tomus II. Editio decima, reformata. Laurentii Salvii, Stockholm, Sweden.*
 71. M. Anandharaj and B. Sivasankari, “Isolation of potential probiotic *Lactobacillus*
 72. Marco, M. L., Heeney, D., Binda, S., Cifelli, C. J., Cotter, P. D., Foligné, B., ... & Smid, E. J. (2021). Health benefits of fermented foods: microbiota and beyond. *Current Opinion in Biotechnology*, 70, 1-8. (Article de revue scientifique)
 73. Meyer, B. N., et McLaughlin, J. L. (1981). Activity of Cactaceae constituents against insect feeding and growth. *Insect Science and its Application*, 1(2), 141-145.
 74. *Microbiology*, vol. 39, no. 3, pp. 237–238, 1998..
 75. Mobhammer, C., et al. (2006). Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity of *Opuntia Ficus-Indica* Juice and By-Products. *Food Science and Technology International*, 12(3), 209-215.
 76. Mobhammer, F., et al. (2006). Nutritional Value of Prickly Pear (*Opuntia ficus-indica*) Fruit Juice. *Food Chemistry*, 96(3), 562-564.
 77. Montet, D., Loiseau, G., & Zakhia-Rozis, N. (2006). Microbial technology of fermented vegetables. In *Microbial Biotechnology in Horticulture* (Vol. 1, pp. 309-343). Science Publishers.
 78. Mulas, M. (2004). Chemical Composition and Oil Characteristics of Seeds of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia tomentosa* Fruits. *Journal of Food Science*, 69(1), C88-C92.
 79. Mulas, M., et Mulas, G. (2004). Cactus pear (*Opuntia* spp.) production in Italy: State of the art and research needs. *Acta Horticulturae*, 643, 247-252.
 80. Murillo-Amador, B., et al. (2002). Osmotic adjustment in *Stenocereus queretaroensis* and *Opuntia streptacantha* (Cactaceae) under drought conditions. *Journal of Arid Environments*, 50(2), 227-234.
 81. Nharingo, T., Moyo, M., & Dube, S. (2016). A review on utilization of *Opuntia*






- plants: a 21st century perspective. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 6(5), 420-426.
82. Nobel, P. S., Loza-Cornejo, S., & Valenzuela, G. (1987). Growth and CO₂ exchange responses to soil water content in the crassulacean acid metabolism plant *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology*, 84(2), 387-391.
83. Olico.it. (Consulté en 2023). Confiture Extra de Figues de Barbarie 250 gr scyavuru sicile. Olico.it.
84. Panda, S. H., Parmanik, M., Sharma, P., Panda, S., & Ray, R. C. (2005). Microorganisms in food biotechnology: Present and future scenario. In *Microbes in Our Lives* (pp. 47-54). Department of Botany and Microbiology, Utkal University, Bhubaneswar, Orissa.
85. Piga, A. (2004). Cactus Pear: A Fruit of Nutraceutical and Functional Importance. *Journal of Professional Association for Cactus Development*, 6, 9-22.
86. Piga, A. (2004). Figs (*Ficus carica* L.). In: Caballero, B., et al. (Eds.), *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (2nd ed.), Vol. 4, 2693-2699.
87. Piga, A. (2004). Flavor Compounds in Fig: Their Formation, Biosynthesis, and Accumulation. *ACS Symposium Series*, 874, 136-150.
88. Piga, A. (2004). Flavor Compounds in Fig: Their Formation, Biosynthesis, and Accumulation. *ACS Symposium Series*, 874, 136-150.
89. Piga, A. (2004). Flavor Compounds in Fig: Their Formation, Biosynthesis, and Accumulation. *ACS Symposium Series*, 874, 136-150.
90. Pimienta Barrios, E., Díaz Rivera, E., & Escalante Estrada, J. (1993). Clinical studies on the effect of the new phytotherapeutic drug Prosta-UR. *Revista Mexicana de Urología*, 53(4), 177-181.
91. [ps://fr.db-city.com/Algérie--Tizi-Ouzou--Draâ-El-Mizan--Aït-Yahia-Moussa?fbclid=IwAR1iyRxNWKxr6NmRGUxx_KhZTglzW7Pn6uVRK_ACJKrfP3USbQdkd1o6u5o](https://fr.db-city.com/Algérie--Tizi-Ouzou--Draâ-El-Mizan--Aït-Yahia-Moussa?fbclid=IwAR1iyRxNWKxr6NmRGUxx_KhZTglzW7Pn6uVRK_ACJKrfP3USbQdkd1o6u5o)
92. R. Di Cagno, R. F. Surico, S. Siragusa et al., "Selection and use of autochthonous mixed
93. Ramadan, M. F., & Mörsel, J.-T. (2003). Recovered Lipid from Prickly Pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] Peel: A Good Source of Polyunsaturated Fatty Acids, Natural Antioxidants, and Sterols. *Food Chemistry*, 83(3), 447-456.
94. Ramadan, M. F., & Mörsel, J. T. (2003). Analysis of glycolipids from black cumin (*Nigella sativa* L.), coriander (*Coriandrum sativum* L.) and niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) oilseeds. *Food Chemistry*, 80(2), 197-204.
95. Ramadan, M. F., et Mörsel, J. T. (2003). Oil Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica* L.) Seeds and Characteristics of the Seed Oil. *Food Chemistry*, 82(3), 339-345.
96. Ramírez-Moreno E, Córdoba-Díaz D, Sánchez-Mata M d C et al (2013) Effect of boiling on nutritional, antioxidant and physicochemical characteristics in cladodes (*Opuntia ficus indica*). *LWT Food Sci Technol* 51:296–302. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.10.005>
97. Rapport du Ministère de l'agriculture et de la pêche maritime (2010). La filière de la figue de Barbarie. Direction de la Statistique et de la Planification Agricole, Rabat, Maroc.
98. Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime. (2010). Valorisation de l'*Opuntia ficus-indica*. Royaume du Maroc, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, Département de l'Agriculture.
99. Rapport du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime. (2010). Valorisation de l'*Opuntia ficus-indica*. Royaume du Maroc, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche maritime, Département de l'Agriculture.
100. Research and Technology, vol. 210, no. 1, pp. 53–56, 1999.
101. Revue nature et santé. (2011). Figue de Barbarie. *Revue nature et santé*.






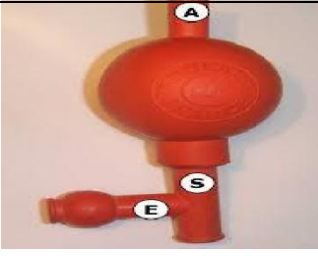
102. Reynolds, S., et al. (2003). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. In: Elevitch, C.R. (Ed.), *Traditional Trees of Pacific Islands: Their Culture, Environment, and Use*. Permanent Agriculture Resources, Holualoa, Hawaii, USA.
103. Sáenz, C. (1995). *Opuntia* spp.: A Unique Source of Food and Nutritional Components. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 1, 59-66.
104. Saenz, C. (2000). Volatile Components in Fruits of *Opuntia ficus-indica* from Spain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3800-3804.
105. Saenz, C. (2000). Volatile Components in Fruits of *Opuntia ficus-indica* from Spain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3800-3804.
106. Saenz, C. (2000). Volatile Components in Fruits of *Opuntia ficus-indica* from Spain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3800-3804.
107. Sáenz, C. (2004). The Prickly Pear Cactus (*Opuntia* spp.): A Review. *Journal of Professional Association for Cactus Development*, 6, 9-30.
108. Saenz, C., & Sepulveda, E. (2013). Prickly Pear Cactus (*Opuntia* spp.): A Review of Past and Future Prospects in the Development of Functional Food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(10), 2386-2394.
109. Sáenz, C., et al. (2004). Optimization of mucilage extraction from *Opuntia ficus-indica* cladodes. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 6, 21-29.
110. Saenz, C., & Sepulveda, E. (2007). Functional properties of selected cactus pads (*Opuntia* spp.). *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 81-94.
111. Schweizer, E. (1997). *Opuntia* as a Food Crop: Ecological, Physiological, and Agricultural Aspects. *HortScience*, 32(4), 616-620.
112. Schweizer, E. (1997). *Opuntia* as a Food Crop: Ecological, Physiological, and Agricultural Aspects. *HortScience*, 32(4), 616-620.
113. Schweizer, H. (1997). *Cactaceae*. In: Kubitzki, K. (Ed.), *The Families and Genera of Vascular Plants*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
114. Science and Biotechnology, vol. 9, pp. 322–324, 2000. 117. *Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 26–29, 2013.
118. Sepúlveda, E., et Sáenz, C. (1990). Composition Chimique de la Tige Comestible (Cladode) de Trois Espèces d'*Opuntia*. *Fruits*, 45(1), 13-20.
119. Song, Y., Lu, Z., Rao, S., Shen, L., & Zeng, Y. (2020). The formation, flavor, and health benefits of vegetable fermented products. *Food Science and Human Wellness*, 9(2), 98-109. (Article de revue scientifique)
120. starter for lactic acid fermentation of carrots, French beans or marrows,” *International*
121. Stintzing, F. C., & Carle, R. (2001). Cactus fruits: a review on their chemistry, biology, and nutritional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 45, 145-191.
122. Stintzing, F. C., & Carle, R. (2001). Cactus fruits: a review on their chemistry, biology, and nutritional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 45, 145-191.
123. Stintzing, F. C., et al. (2005). Color, Betalain Pattern, and Antioxidant Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442-451.
124. Stintzing, F. C., et Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition and Food Research*, 49(2), 175-194.








125. strains from human milk,” *International Journal of Research in Pharmacy and Life*
126. Swain M. R., Anandharaj M., Ray R.C., and Rani R. P. (2014). *Fermented Fruits and*
127. Tamang JP, Shin DH, Jung SJ, Chae SW. *Functional Properties of Microorganisms in Fermented Foods. Front Microbiol.* 2016
128. Tamang JP, Shin DH, Jung SJ, Chae SW. *Functional Properties of Microorganisms in Fermented Foods. Front Microbiol.* 2016
129. Tamang, J. P., Shin, D. H., Jung, S. J., & Chae, S. W. (2016). Functional properties of microorganisms in fermented foods. *Frontiers in Microbiology*, 7, 578. (Article de revue scientifique)
130. Terki, N., Boutekedjiret, C., Dahmoune, F., & Moussi, K. (2018). Optimization of the formulation of a clarified prickly pear juice using response surface methodology. *Food Chemistry*, 254, 270-276.
131. Valente, L. M., da Silva, J. B., Cereda, M. P., & Lourenço, S. (2010). Chemical composition and physicochemical properties of prickly pear juice (*Opuntia ficus indica* Mill) for the beverage industry. *Food Science and Technology*, 30(1), 76-80.
132. *Vegetables of Asia: A Potential Source of Probiotics. Biotechnology Research*
133. *vegetables,” in Microbial Biotechnology in Horticulture, R. C. Ray and O. P. Ward, Eds.,*
134. *vol. 1, pp. 309–343, Science Publishers, Enfield, NH, USA, 2006.*
135. Yamano, T., Iino, H., Takada, M., Blum, S., Rochat, F., & Fukushima, Y. (2006). Improvement of the human intestinal flora by ingestion of the probiotic strain *Lactobacillus johnsonii* La1. *British Journal of Nutrition*, 95(2), 303-312.





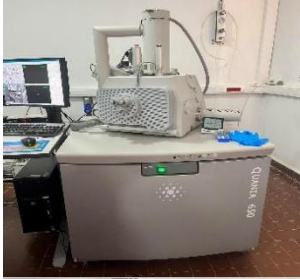


Annexes




Annexe 01

Matériel	Fabricant	Photo
Spatule	LabTech	
Plat d'évaporation	EvapMaster	
Verre de montre	EvapMaster	
Entonnoir Fiole	Laboratoires HUMEAU	
Dessiccateurs	DryTech	

<p>Becher</p>	<p>LabPro</p>	
<p>Pissette</p>	<p>LabJet</p>	
<p>Eprouvette graduée</p>	<p>LabJet</p>	
<p>Agitateur</p>	<p>RSlab</p>	
<p>Balance électrique</p>	<p>Sartorius</p>	
<p>Poire Propipette</p>	<p>LabMaterials</p>	

Papier filtre	LabMaterials	
Pipette graduée	LabMaterials	
Barrette et le support	LabMaterials	
Étuve	Memmert	
PH mètre	Hach	
Spectromètre infrarouge A transformée de Fourier Transportable FTIR	ErkinElmer	
Centrifugeuse	Normalab	

Four Amoufle	Nabertherm	
Rotavapor	Heidolph	
Broyeur	philips	
Réfrigérateur	LG	
Microscopie électronique à balayage (MEB)	Quanta 650	
ICP-OES	Avio- 200	
Methyl Orange PH Indicateur	Biochem Chemopharma	

Ethanol	Scharlau	
NAOH	QREC	
Bromure de potassium KBr	Merck	

A votre avis lequel de ces échantillons est le meilleur ?

Cornichon F 01

cornichon F 02

Cornichon F 03

Remarques :

Bonne dégustation

Annexe 03

Niveau d'acceptabilité des produits élaborés par le panel des dégustateurs

Selon :

- ↪ Échelle 1 à 4 : Extrêmement désagréable à assez désagréable.
- ↪ Échelle 5 : Ni agréable Ni désagréable.
- ↪ Échelle 6 à 9 : Assez agréable à extrêmement agréable

Produit dégustés	Critères d'appréciation	Échelle de 1 à 4	Échelle 5	Échelle de 6 à 9
F 01	Aspect	4 16%	2 8%	19 76%
	Couleur	3 12%	3 12%	19 76%
	Goût	1 4%	4 16%	20 80%
	Arôme	5 20%	4 16%	16 64%
	Texture	2 8%	4 16%	19 76%
	Appréciation globale	0 0%	4 16%	21 84%
F 02	Aspect	1 4%	7 28%	17 68%
	Couleur	1 4%	2 8%	22 88%
	Goût	0 0%	2 8%	23 92%
	Arome	4 16%	4 16%	17 68%
	Texture	3 12%	4 16%	18 72%
	Appréciation globale	0 0%	4 16%	21 84%

F 03	Aspect	5 20%	3 12%	17 68%
	Couleur	1 4%	5 20%	19 76%
	Goût	2 8%	2 8%	21 84%
	Arôme	3 12%	2 8%	20 80%
	Texture	3 12%	2 8%	20 80%
	Appréciation globale	0 0%	2 8%	23 92%

Annexe 04

Les notes de classement données à chaque échantillon par les 25 dégustateurs

Cornichons	Aspect	Couleur	Goût	Arôme	Texture	Appréciation globale
F 01	7	9	9	8	7	8
F 01	8	9	9	7	8	9
F 01	8	9	9	8	8	9
F 01	3	5	7	3	6	5
F 01	7	9	5	3	7	7
F 01	5	6	8	7	5	7
F 01	6	5	3	3	6	6
F 01	7	9	7	8	6	7
F 01	3	7	6	6	6	6
F 01	6	1	5	7	7	7
F 01	5	6	6	8	8	5
F 01	6	3	7	4	7	7
F 01	8	6	8	7	7	7
F 01	4	5	7	5	7	5
F 01	8	9	9	8	8	9
F 01	8	8	9	8	8	9
F 01	7	8	5	5	5	6
F 01	8	8	8	7	7	8
F 01	7	7	5	3	3	6
F 01	7	8	8	6	5	8
F 01	8	8	8	7	8	8
F 01	6	7	7	7	7	7
F 01	2	7	6	5	3	6
F 01	7	8	8	7	7	8
F 01	6	4	6	5	5	5
F 02	7	5	6	3	6	5
F 02	5	3	7	3	2	7
F 02	7	7	8	6	5	7
F 02	9	9	9	8	8	9
F 02	8	9	9	8	8	9
F 02	8	8	9	8	8	8
F 02	8	8	8	7	7	9
F 02	7	8	5	6	7	7
F 02	8	8	9	7	8	8
F 02	3	7	5	3	7	5
F 02	8	7	8	5	7	8

F 02	8	8	8	7	7	5
F 02	7	8	7	5	5	5
F 02	5	7	8	7	1	7
F 02	5	8	9	7	7	8
F 02	8	8	9	9	9	9
F 02	5	8	9	3	3	8
F 02	8	8	9	7	7	8
F 02	5	5	6	8	5	7
F 02	8	7	8	5	8	8
F 02	7	7	7	7	7	7
F 02	8	8	9	8	8	8
F 02	8	8	9	7	7	8
F 02	5	8	8	5	5	8
F 02	5	8	8	7	7	7
F 03	4	7	2	7	4	8
F 03	7	5	5	5	70	8
F 03	5	6	7	4	6	6
F 03	8	5	7	7	8	9
F 03	1	4	7	8	6	5
F 03	3	5	7	5	7	8
F 03	4	8	7	8	6	9
F 03	7	9	9	3	5	9
F 03	9	8	2	8	6	5
F 03	5	8	8	7	3	8
F 03	7	7	8	9	9	8
F 03	3	7	8	8	7	7
F 03	8	8	8	9	9	8
F 03	9	9	9	7	8	9
F 03	7	5	9	7	5	8
F 03	8	8	5	8	8	8
F 03	7	8	9	7	1	7
F 03	8	8	9	7	8	9
F 03	8	7	9	7	7	8
F 03	5	7	8	7	7	8
F 03	7	5	8	8	7	8
F 03	8	9	9	8	7	8
F 03	7	7	9	7	8	7
F 03	8	7	9	8	7	8
F 03	7	8	8	7	7	8

Résumé

Cette étude vise à évaluer les effets de la fermentation dans une solution de vinaigre sur différents paramètres physicochimiques des cladodes de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica*). Les paramètres étudiés comprennent le pH, l'acidité titrable, les macro et micro-minéraux, le taux d'humidité et le rendement en polyphénols totaux. Les résultats ont montré que la fermentation entraîne des modifications de ces paramètres. En effet, la fermentation conduit à une baisse du pH et une augmentation de l'acidité titrable des cladodes fermentés. De plus, une légère augmentation du taux d'humidité et une diminution progressive de la teneur en matière sèche ont été observées. Les valeurs du taux de cendres ont également montré des variations. En outre, l'évaluation sensorielle a révélé que les cladodes fermentés pendant 15 jours étaient les mieux appréciés en termes de goût, de couleur, d'arôme et de texture. Ces résultats soulignent l'importance de la fermentation dans la modification des caractéristiques physicochimiques et sensorielles des cladodes de figuier de Barbarie. Les perspectives de recherche futures incluent l'exploration des propriétés fonctionnelles, l'analyse détaillée des composés bioactifs, l'optimisation du processus de fermentation, l'évaluation de l'activité prébiotique et l'exploration des applications industrielles des cladodes fermentés. Ces avancées contribueront à une meilleure compréhension des cladodes de figuier de Barbarie fermentés et à leur utilisation potentielle dans divers domaines, tels que l'alimentation, la santé et l'industrie alimentaire.

Mots clés : fermentation, cladodes, *Opuntia ficus indica*, figuier de Barbarie, paramètres physicochimiques

Summary

This study aims to evaluate the effects of fermentation in a vinegar solution on various physicochemical parameters of *Opuntia ficus indica*, commonly known as the prickly pear cactus, cladodes. The studied parameters include pH, titratable acidity, macro and micro-minerals, moisture content, and total polyphenol yield. The results demonstrated changes in these parameters due to fermentation. Specifically, fermentation led to a decrease in pH and an increase in titratable acidity of the fermented cladodes. Additionally, a slight increase in moisture content and a gradual decrease in dry matter content were observed. The ash content values also showed variations. Moreover, sensory evaluation revealed that cladodes fermented for 15 days were preferred in terms of taste, color, aroma, and texture. These findings highlight the importance of fermentation in altering the physicochemical and sensory characteristics of prickly pear cactus cladodes. Future research perspectives include investigating the functional properties, detailed analysis of bioactive compounds, optimizing the fermentation process, assessing prebiotic activity, and exploring industrial applications of fermented cladodes. These advancements will contribute to a better understanding of fermented prickly pear cactus cladodes and their potential utilization in various fields, such as food, health, and the food industry.

Keywords: fermentation, cladodes, *Opuntia ficus indica*, prickly pear cactus, physicochemical parameters.

المخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير التخمير في محلول الخل على معايير فيزيائية كيميائية مختلفة لجلود التين الشوكي (*Opuntia ficus indica*) تتضمن المعلومات المدروسة الأس الهيدروجيني، الحموضة القابلة للمعايرة، المعادن الكلية والصغرى، محتوى الرطوبة وحاصل البوليفينول الكلي. أظهرت النتائج أن التخمير يؤدي إلى تغييرات معنوية في هذه المعايير. في الواقع، يؤدي التخمير إلى انخفاض في الرقم الهيدروجيني وزيادة في حموضة المعايرة للكتل المخمرة. بالإضافة إلى ذلك، لوحظ زيادة طفيفة في محتوى الرطوبة وانخفاض تدريجي في محتوى المادة الجافة. كما أظهرت قيم محتوى الرماد اختلافات. علاوة على ذلك، أظهر التقييم الحسي أن الكلاودات المخمرة لمدة 15 يوماً كانت الأفضل من حيث المذاق واللون والرائحة واللمس. تسلط هذه النتائج الضوء على أهمية التخمير في تعديل الخصائص الفيزيائية والكيميائية والحسية لعناقيد التين الشوكي. تشمل وجهات النظر البحثية المستقبلية استكشاف الخصائص الوظيفية، والتحليل التفصيلي للمركبات النشطة بيولوجياً، وتحسين عملية التخمير، وتقييم نشاط البريبايوتيك، واستكشاف التطبيقات الصناعية للكتل المخمرة. ستساهم هذه التطورات في فهم أفضل لفصائل التين الشوكي المخمرة واستخدامها المحتمل في مختلف المجالات، مثل الغذاء والصحة وصناعة الأغذية.

الكلمات الأساسية: التخمير، cladodes، *Opuntia ficus indica*، الكمثرى الشائك، البارامترات الفيزيائية والكيميائية