



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biotechnologie

Réf :.....

Mémoire

Présenté par

BENMAHDI Fatima Zohra & ACHOURI Fatima Zohra

Pour l'obtention du diplôme de

Master Professionnel

Filière : Biotechnologie

Spécialité : Biotechnologie et Santé

Thème

**Effet du mucilage de la raquette du figuier de
Barbarie sur l'élimination de matières en
suspension en eau trouble**

Soutenu le : **01 Juillet 2024**

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme. KESSAD-ZIDANE Nadjet	MAA, Université de Béjaia	Président
Mme. ADJEROUD-ABDELLATIF Nawel	MCA, Université de Béjaia	Encadrant
Mme. MESKI-BOUCHACHI Samira	MCA, Université de Béjaia	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Je dédie ce modeste travail :

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur, A mes chers parents **Saaida** et **Djamel**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

À mes sœurs : Salsabil; Yousra et Rukaya et mon frère: Salah addine. Merci d'être à mes côtés, par votre présence, votre amour, pour toute la complicité et l'entente qui nous unit, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral. Ce travail est un témoignage de mon attachement et mon amour.

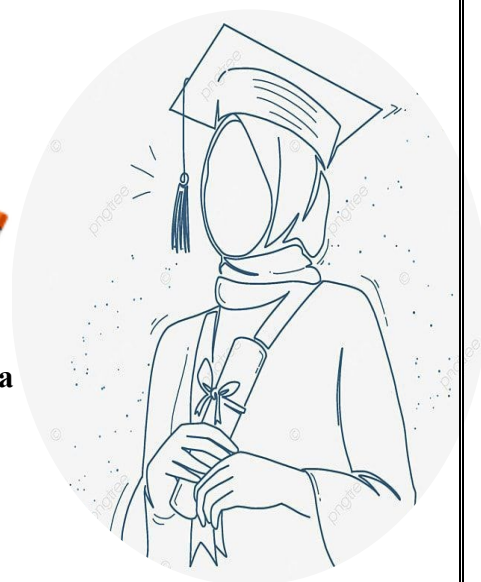
À mes amis(es) : Wafa ; Ghozlane ; Fatima ; Wissam ; Saaida ; Amel ; Hanane ; Djohra ; Sara ; Houda ; Sabrina ; Lydia ; Dida ; Yasmine ; lilia en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À mon ami Djalil qui m'a tendu sa main aux moments les plus difficiles et m'a aidé à affronter toutes sorte d'obstacles dans la vie.

À toutes les personnes que j'ai omis de citer qui ont participé à l'élaboration de ce travail. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible



Fatima zouhra



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour votre amour infini, votre soutien indéfectible et vos sacrifices sans fin ; Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À mon meilleur ami Hakou, Tu es ma source constante de soutien, à travers chaque défi et chaque succès, tu as été là, m'encourageant.

À mes frères : Moncef, Oussama, Amine, Youcef.

À mes sœurs : Lamia, Mouna, Amani, Tahani.

À ma tante qui ne m'a jamais laissée seule.

*À tous mes amis et mes proches sans exceptions qu'ils soient
Proches ou loin.*

À tous mes enseignants du primaire jusqu'au supérieur.

Fatima

Remerciements

En premier lieu, nous remercions le bon Dieu pour sa bienveillance et de nous avoir accordé le courage, la force et la patience pour arriver à ce stade de notre cursus universitaire et de réaliser ce modeste travail.

*En deuxième lieu, nous exprimons nos profondes reconnaissances à notre aimable enseignante et encadrante, Dr. **Nawel Adjeroūd-Abdellatif**, pour l'honneur qu'elle nous a accordé en nous encadrant, pour ses précieux conseils, orientations, encouragements et tous les efforts qu'elle a fournis.*

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail. Nous tenons aussi à remercier notre famille et nos amis(es), pour leurs prières et leurs encouragements, et tous ceux qui nous ont aidé et collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous aimerions remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de ces années d'étude.

N°	Titre	Page
	Dédicace	
	Remerciements	
	Table des matières	
	Liste des Tableaux	
	Liste des Figures	
	Liste des Abréviations	
	Introduction générale	1
	Synthèse bibliographique	
	Chapitre 01 : Origine et distribution géographique de l'<i>Opuntia ficus-indica</i> (OFI)	
I	Origine et distribution géographique de l' <i>Opuntia ficus-indica</i> (OFI)	06
1	Classification taxonomique	07
2	Description de l'OFI	08
3	Utilisation et intérêt de la plante	08
4	Usage médical	09
5	Usage alimentaire	10
6	Usage cosmétique	10
7	Usage environnementale	10
8	Usage biotechnologie	11
	Chapitre 02 : <i>Opuntia ficus-indica</i> (cladode et mucilage)	
II	Cladodes	13
1	Morphologie des cladodes (raquette)	13
2	Composition chimique des cladodes	14
3	Intérêt de cladode	18
4	Mucilage	19
	Chapitre 03 : Electrocoagulation-Electroflottation (EC-EF)	
III	Généralités sur l'Electrocoagulation-Electroflottation	23
1	Principe du procédé d'EC-EF	23
2	Avantages du procédé d'EC-EF	25
3	Inconvénients du processus d'EC-EF	27
4	Facteurs influençant le procédé d'EC-EF	27

Partie Expérimentale

Chapitre I : Matériels et méthodes

1	Collecte d'échantillon	33
2	Préparation de l'échantillon	33
3	Test d'humidité	34
4	Mesure des paramètres physicochimiques : pH , conductivité , viscosité	35
5	Extraction de mucilage	35
6	Dosage des sucres totaux	38
II	Traitement de l'eau	38
1	L'unité expérimentale d'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF)	38
2	Traitement d'une solution trouble de gel de silice	39
3	Optimisation de procédé EC-EF	40
4	Mesure de la turbidité	40
5	Traitement d'une solution trouble de levure de boulangerie	41
6	Optimisation de procédé EC-EF	41
7	Comptage cellulaire	41
8	Mesure de la turbidité	42
III	Analyse statistique	42

Chapitre II : Résultats et discussion

I	Matière végétale	44
I.1	Test d'humidité	44
I.2	Viscosité , pH ,Conductivité	44
I.3	Rendement d'extraction	45
I.4	Dosage des sucres	45
II	Traitement de l'eau avec EC-EF	46
II.1	Traitement d'une solution soluble avec gel de silice	46
II.1.1	L'effet de mucilage sur le procédé EC-EF	47
II.1.2	Effet de pH sur EC-EF	49
II.1.3	Effet de la conductivité sur EC-EF	51
II.2	Traitement d'une solution trouble de levure de boulangerie (<i>Sacharomyces cerevisiae</i>)	52

Table des matières

II.2.1	Effet de mucilage	53
II.2.2	Effet de pH	55
II.2.3	Effet de la conductivité	56
II.3	Comptage cellulaire	58
II.4	Mécanisme d'action de mucilage	63
	Conclusion	65
	Références bibliographiques	68
	Annexes	82
	Résumé	84

N°	Titre	Page
I	Composition minérale des cladodes du cactus (<i>Opuntia ficus- indica</i>). La teneur en minéraux est exprimée en mg/100g	15
II	Composition des cladodes en acides organiques à deux différents temps de récolte	15
III	Principaux composants des cladodes d'OFI	16
IV	Composition en polyphénols des cladodes de l' <i>Opuntia ficus-indica</i>	16
V	Composition en vitamines dans les cladodes du figuier de Barbarie	17
VI	Les monosaccharides des cladodes de l' <i>Opuntia ficus-indica</i>	17
VII	Composition en sucre de la gomme à mucilage (<i>Opuntia ficus-indica</i>)	20
VIII	Produits potentiels et sous-produits du Fiquier de Barbarie	21
IX	Taux d'élimination de la turbidité (TR%) de solution de gel de silice sans et avec mucilage 10 mg dans la procédure EC-EF.	48
X	Taux de l'élimination de la turbidité de solution de levure de boulangerie sans et avec mucilage 10 mg (TR%) dans la procédure EC-EF (avant optimisation).	54
XI	Taux d'élimination de la turbidité de solution de levure de boulangerie sans et avec mucilage 10 mg dans le procédure EC-EF (après l'optimisation).	55

N°	Titre	Page
1	Distribution de <i>l'opuntia ficus-indica</i>	06
2	Défèrent parties de la plant d' <i>Opuntia ficus-indica</i>	08
3	Organisation structurelle hiérarchique du nopal	13
4	Structure chimique du mucilage d' <i>Opuntia ficus-indica</i>	19
5	Unité d'électrocoagulation- électroflotation pour le traitement des eaux usée	24
6	Préparation des cladodes de l'OFI	34
7	Extraction conventionnelle du mucilage avec agitation.	36
8	Dispositif schématisé de l'extraction assistée par micro-onde(a), broyat de cladode et d'eau distillé (1:1) à l'intérieur du microondes (b), filtration par tamisage après extraction (c), précipitation à l'éthanol (96°C) (d), mucilage récupéré (e), poudre de mucilage(f).	37
9	Unité expérimentale de l'EC-EF	39
10	Eau trouble synthétique préparée par gel de silice	40
11	Traitement d'une solution de gel de silice à différentes turbidités par EC-EF (pH 7, Conductivité 1 ms/cm, voltage 20 V).	46
12	Effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF (Gel de silice à 250 ppm, pH 7, Conductivité 1000 ms/cm, voltage 20V).	47
13	Effet du pH sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Gel de silice à 250 ppm, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$, voltage 20 V). Le test à blanc (sans ajout du mucilage, pH 7) est représenté en pointillés	50
14	Effet de la conductivité sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Gel de silice à 250 ppm, pH 7, voltage 20 V) Le test blanc (sans ajout du mucilage, pH 7) est représenté en pointillés	51
15	Effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, pH 7, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20 V).	53
16	Effet du pH sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, pH 7)	56

17	Effet de la conductivité sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (Sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S/cm}$)	56
18	Nombre de cellules comptées pendant le procédé EC-EF sans mucilage (conductivité 1000 $\mu\text{S/cm}$) et avec 10 mg de mucilage (conductivité 1500 $\mu\text{S/cm}$) (Turbidité des solutions 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S/cm}$) est représenté en pointillé.	59
19	Nombre de cellules par mL pendant le procédé EC-EF sans mucilage (Conductivité 1000 $\mu\text{S/cm}$) et avec 10 mg de mucilage (conductivité 1500 $\mu\text{S/cm}$) (Turbidité des solutions 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S/cm}$) est représenté en pointillé.	59
20	Piégeage des particules dans les floes lors de la décantation	60
21	Adsorption et pontage au moyen de polymères: Électrocoagulation – Electroflottation	63
22	Adsorption et formation de ponts au moyen de polymères	63

Listes des abréviations

Al : Aluminium.

CaOx : Oxalate de Calcium.

CH : Chlorenchyme.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

DO : Densité Optique.

EAM : Extraction Assistée par Microonde.

EC : Extraction Conventionnelle.

E-coli : *Escherichia coli*.

Fe : Fer.

MES : Matières En Suspension.

MS : Matière Séche.

NaOH : Hydroxyde de Sodium.

OFI : *Opuntia ficus indica*.

OH : Ion Hydroxyde.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction :

L'eau est un essentiel élémentaire et économique, constituant la base de la vie et équilibres de l'environnement sans négliger son intérêt biologique (FAO, 2023 ; Festy *et al.*, 2003). Selon Mollah *et al.*, (2001) et Vepsäläinen, (2012), les pays en développement, notamment les États-Unis, sont confrontés par la pollution de leur eau, il est donc devenu nécessaire de mettre en œuvre des méthodes innovantes et efficaces de traitement des eaux usées, cela conduit au développement et à l'application de technologies électrochimiques avancées dans le traitement des eaux usées. L'une de ces technologies est l'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF), un système d'activation par coagulation et a été développé à l'optimisation des processus de traitement. Cette approche fournit les techniques d'activation par coagulation nécessaires pour les contaminants organiques et inorganiques (Chaturvedi, 2013 ; Mao *et al.*, 2023 ; Poinpally *et al.*, 2020).

L'électrocoagulation a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales par rapport à la floculation-coagulation traditionnelle. Ces particules chargées ont une plus grande probabilité d'être coagulées et déstabilisées en raison du champ électrique qui les met en mouvement (Naje et Abbas, 2013). C'est aussi un procédé efficace qui est simple à mettre en œuvre et à entretenir ce qui le rend non coûteux (Ebba *et al.*, 2022).

Beaucoup d'études ont reporté l'efficacité de ce procédé pour traiter différents types d'effluents industriels (Pichler *et al.*, 2012; Attour *et al.*, 2014; Omwene and Kobya , 2018), notamment des effluents de tanneries (El abbas *et al.*, 2020), des effluents d'industries agroalimentaires (Arbabi *et al.*, 2023 ; Kobya et Delipinar, 2008), d'après Kobya *et al.*, (2008), la technique a été mise en œuvre avec succès pour traiter les eaux usées issues de différentes industries alimentaires, comme la distillerie, la fermentation, la fabrication de chips de pommes de terre ,mais aussi des effluents d'hôpitaux comme cité dans Ebba *et al.*, (2022). Le type, la taille, la forme et la distance entre les électrodes, la densité de courant, la conductivité et la résistance, le pH et le temps de réaction sont des paramètres qui influencent l'efficacité de l'EC-EF ou le type et la quantité de coagulant-floculant (Alinsafi., *et al.*, 2005 ; Merzouk *et al.*, 2009 ; Djerroud *et al.*, 2023 ; Attour *et al.*, 2014 ; Mao *et al.*, 2023 ; Boinpally *et al.*, 2023). Ainsi que les coagulants/floculants inorganiques les plus couramment utilisés dans la technologie EC-EF sont l'aluminium et le fer (Chen 2004). Selon Chen (2004), il a été admis que le mucilage d'*Opuntia ficus- indica* peut être utilisé en substitution du fer ou de l'aluminium lors du processus conventionnel de coagulation-floculation pour le traitement de l'eau.

Leurs utilisations s'accompagnent d'une consommation importante de produits chimiques dont l'ajout d'adjuvants chimiques conduisant à la production de volumes importants de boues toxiques (**Adjeroud *et al.*, 2020**). De nos jours, il existe un intérêt croissant pour l'utilisation de biomatériaux respectueux de l'environnement et à faible coût pour éliminer les polluants synthétiques (**Barka *et al.*, 2013a ; Barka *et al.*, 2013b**), et aussi représentent les options les plus prometteuses en raison de leur biodégradabilité et de leur non-toxicité (**Baraka *et al.*, 2013**). **Shadow, (2010)** a indiqué de nombreuses plantes ont des propriétés de coagulation grâce à diverses substances naturelles, telles que les polysaccharides (**Miller *et al.*, 2008**). Selon **Chen, (2004)**, il a été convenu que la gomme d'OFI pouvait être utilisée comme substitut du fer ou de l'aluminium dans les processus conventionnels de coagulation et de floculation pour le traitement de l'eau.

Le figuier de Barbarie, plante de la famille des cactus, originaire du Mexique et aujourd'hui cultivée dans différents pays du monde (**Chougui *et al.*, 2015**), est connue pour sa capacité à produire du mucilage (matière végétale gélatineuse composée de sucres) qui apparaît immédiatement comme un liquide visqueux lui permettant de précipiter les ions et les particules des solutions aqueuses grâce à ses propriétés tensioactives (**Sáenz *et al.*, 2004**).

Opuntia ficus-indica (OFI) est le nom scientifique du figuier de Barbarie. La culture de cette plante nécessite peu d'investissement et peu d'eau. Diverses études ont été menées sur l'effet de l'OFI sur le traitement de l'eau, par exemple une amélioration de 15% du coefficient d'hydroxylation après optimisation par la méthodologie de la surface de réponse en utilisant le jus d'OFI, ou l'élimination complète du cuivre grâce au mucilage. (**Adjeroud *et al.*, 2015 ; Adjeroud *et al.*, 2018, Adjeroud *et al.*, 2020 ; Djerroud *et al.*, 2018 ; Djerroud *et al.*, 2023 ; Betatache *et al.*, 2018**).

Dans cette étude, nous avons valorisé la tige du figuier de Barbarie, à savoir le cladode, qui être considéré comme un sous-produit d'industries agroalimentaire (**Boutakiout, 2015**). L'objectif étant de déterminer l'efficacité de la technique d'EC-EF en association avec le mucilage de l'OFI pour le traitement d'une eau trouble synthétique à base de gel de silice d'une part, et d'autre part pour l'élimination de cellules vivantes de la levure de boulangerie (*Saccharomyces cerevisiae*).

Dans ce contexte, l'objectif de notre étude est d'évaluer l'efficacité du mucilage provenant des cladodes comme coagulant naturel dans le processus d'électrocoagulation-électroflottation pour traiter l'eau polluée avec du gel de silice, dans le but d'examiner sa capacité à améliorer le rendement du procédé et découvrir si le mucilage a effet antimicrobien notamment par des

essais sur la levure de boulangerie ; Optimisation des paramètres d'extraction du mucilage de cladode d'OFI en utilisant la méthode d'extraction conventionnelle et l'extraction assistée par microonde pour comparer les résultats obtenus. À notre connaissance, les études sur le traitement des eaux usées de levure par EC-EF sont peu nombreuses, aussi c'est le premier travail selon la bibliographie qui relie le procédé d'EC-EF au mucilage comme coagulant naturel pour l'élimination de levure de Boulangerie, cela dit **Ricordel *et al.*, (2013)** ont analysé la capacité ce procédé à éliminer une bactérie (*E. coli*) mais sans l'ajout de coagulants naturels.

Pour cela, notre mémoire a été structuré en trois volets. Le premier est une analyse bibliographique qui présente les généralités sur l'*Opuntia ficus-indica*, ainsi que sur les cladodes et le mucilage, et une présentation de l'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF). Le deuxième volet est l'étude expérimentale présentant les modes opératoires et la méthodologie suivis pour les traitements effectués. Le dernier volet concerne la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations. Nous finirons par une conclusion et des perspectives offrant une vision plus élargie sur le développement de ce travail.

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 01
ORIGINE ET DISTRIBUTION GÉOGRAPHIQUE DE
***L'OPUNTIA FICUS-INDICA* (OFI)**

I. Origine et distribution géographique de l'*Opuntia ficus-indica* (OFI) :

L'appellation scientifique du figuier de barbarie *Opuntia ficus-indica* (OFI) vient du latin *Opuntius* d'Oponte : nome d'une ville grecque (Schweizer, 1997). Le genre OFI est originaire des régions arides et semi-arides du Mexique (Nobel, 2002 ; Nharingo and Moyo., 2016 ; Hassan *et al.*, 2011). Il a été introduit d'abord en Espagne et plus tard, au 16ème siècle au Nord et au sud de l'Afrique. Il s'est diffusé rapidement dans le bassin méditerranéen. Il est développé sur la partie ouest de la Méditerranée : Sud de l'Espagne, le Portugal et l'Afrique du Nord (la Tunisie, l'Algérie Maroc) (Habibi *et al.*, 2004). Sa distribution géographique est localisée principalement dans : le Mexique, la Sicile, le Chili, le Brésil, la Turquie, la Corée, l'Australie, l'Argentine et l'Afrique du Nord (Bendhifi *et al.*, 2013).

Le processus de domestication de l'*Opuntia* a été orienté vers la production de plantes à clades: Groupement de plusieurs embranchements de plantes ou d'animaux ayant une organisation et une origine communes. Le clade contient un ancêtre et tous ses descendants vers la production de plantes aux cladodes dépourvus d'épines et aux gros fruits sucrés ; un processus qui a été développé en Amérique du Sud et qui a été développé pour au sud des hautes terres méridionales du Mexique (Yin *et al.*, 2010).



Figure 01 : Distribution de l'*Opuntia ficus-indica* (Mariod *et al.*, 2020)

En Algérie, les zones dédiées à la culture du figuier de Barbarie s'étendent sur plus de 30 000 ha (60 % dans la municipalité de Sidi-Fredj, wilaya de Souk-Ahras). A l'origine, la zone a été étendue par le Haut-commissariat pour le développement de la Steppe, la direction des services agricoles et la conservation des forêts pour contrôler la progression du désert (Anonyme 1).

1- Classification taxonomique :

L'*Opuntia ficus-indica* est fréquemment appelé figue de Barbarie il fait partie de la famille des Cactacées. La famille des Cactacées compte environ 1 500 espèces (Wallace, 1997). L'espèce de cactus *Opuntia ficus-indica* (OFI) est la plus importante sur le plan agronomique, tant pour son fruit que pour sa raquette.

De nombreux auteurs ont classé le genre *Opuntia*, toutefois, la catégorisation considérée comme la plus fiable est sans aucun doute celle de Britton Rose en 1963 :

- Règne : *Plantae*.
- Sous règne : *Tracheobionta*.
- Embranchement : *Phanérogames*.
- Sous Embranchement : *Magnoliophyta*.
- Classe : *Magnoliopsida*.
- Sous classe : *Caryophyllidae*.
- Ordre : *Opuntiales*.
- Famille : *Cactaceae*.
- Sous-famille : *Opuntioideae*.
- Tribu : *Opuntieae*.
- Genre : *Opuntia*.
- Sous-genre : *Platyopuntia*.
- Espèce : *Opuntia ficus indica* (L.)

Le genre spécifique *Platyopuntia* possède une variété de 150 à 300 espèces décrites comme telles, incluant notamment l'espèce *Opuntia ficus-indica* OFI (Mullas *et al.*, 2004).

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

La forme inerme d'*Opuntia ficus-indica*, commune aujourd'hui en agriculture, est le résultat d'un long processus de sélection en culture et est absente des populations sauvages (Inglese *et al.*, 2018). D'autres critères comme la taille du cladode, la longueur de l'aréole, la longueur des fruits et des graines, ainsi que la longueur et le poids de pulpe du fruit, permettent l'identification de l'OFI par rapport à d'autres espèces comme par exemple *Opuntia amyclae* qui est une forme épineuse et présente des cladodes de plus petites tailles (Reyes-Aguero, 2005).

2- Description de l'OFI :

Le figuier de Barbarie est une plante arborescente qui peut atteindre 3 à 5 mètres de haut. Son tissu ramifié, également connu sous le nom de raquette, est unique, avec des branches de tiges en forme de plaques mesurant 30-40 cm de long, 15-25 cm de large et 1,5-3 cm d'épaisseur. Après la quatrième année de croissance, la lignification forme le véritable tronc. Ces cladodes assurent la fonction chlorophyllienne et sont protégés par une cuticule céroïde (cutine). Les feuilles coniques sont temporaires et se manifestent sur les jeunes cladodes. Les Aréoles, environ 150 par cladode, sont des axillaires modifiés, caractéristiques des Cactacées, à la base des feuilles. Leur méristème génère des épines et des glochides, ou bien émet des racines adventives, de nouveaux cladodes ou des fleurs. L'ovaire et le fruit sont recouverts d'aréoles, qui peuvent donner naissance à de nouvelles fleurs ou racines. Les glucides sont de petites gles brunes, faciles à détacher, munies de petites écailles en forme d'hameçons. L'appareil racinaire est situé en surface, mais très étendu. Le fruit, appelé aussi figue de Barbarie, est une charnue brune, uniloculaire, polysperme, d'un poids compris entre 150 et 400 grammes (Schweizer,1997).

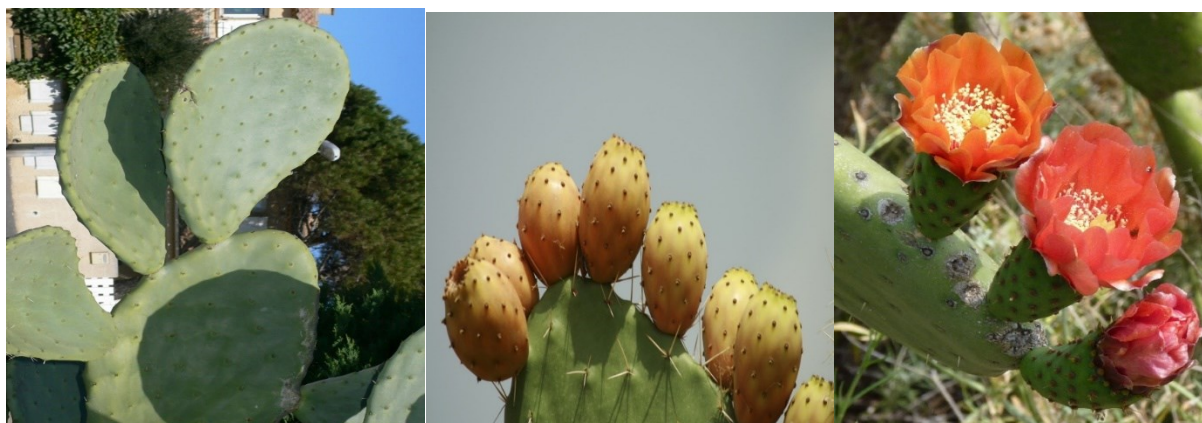


Figure 02 : Différentes parties de la plant d'*Opuntia ficus-indica* ([Lien 1](#))

3- Utilisation et intérêt de la plante :

Comme le cas de plusieurs plantes, ses métabolites secondaires (acide ascorbique, vitamines, caroténoïdes, fibres, acides aminés, composés antioxydants (flavonoïdes, bêta xanthine, bêtacyanine et alcaloïdes) sont utilisés pour la valorisation de la plante : cladodes, fruits, peau et fleurs du cactus (Aragona *et al.*, 2017).

De la même manière, sa viscosité et sa capacité à se gélifier ont ouvert la voie à son utilisation dans des secteurs tels que l'alimentation ou la pharmacie (Salehi *et al.*, 2019).

4- Usage médical :

Les raquettes de cette espèce sont caractérisées par la présence de mucilage pouvant représenter jusqu'à 35 % de la matière sèche. Il s'agit d'un polyside dont les structures sont très variables et auxquels on attribue différentes propriétés. Ainsi, ils possèderaient des effets hypoglycémians et favoriseraient l'élimination du cholestérol et des triglycérides du sang. (Ibanes *et al.*, 2004), plus de ses propriétés anti-inflammatoires et analgésiques, ainsi que les avantages du figuier de Barbarie sur les fonctions gastro-intestinales (Lee *et al.*, 2002). Les fleurs d'*Opuntia ficus-indica* sont également employées dans le traitement des problèmes rénaux. De plus, les nouveaux outils biotechnologiques qui sont actuellement appliqués au nopal pourraient contribuer à la prévention du diabète de type 2 et au contrôle du poids. à sa disponibilité (techniques de in vitro) et à la compréhension des voies métaboliques, de la métaboliques, la régulation et la surexpression des produits génétiques nutraceutiques (transformation génétique des plantes) (Béjarano *et al.*, 2014). Plusieurs recherches laissent entendre que les pigments alimentaires du figuier de Barbarie peuvent avoir un impact direct sur les processus inflammatoires de l'intestin (Trésorière *et al.*, 2014). La stéatose hépatique non alcoolique, les rhumatismes, l'ischémie cérébrale, les cancers, ainsi que les infections bactériennes et virales peuvent également être traitées par le cactus. Au Maroc, l'*Opuntia ficus-indica* est réputée pour sa capacité à soulager les coliques et les diarrhées, mais elle peut également causer une constipation massive chez les individus qui en consomment une grande quantité (Sijelmassi, 1996 ; Maataoui *et al.*, 2018). Des effets anticancéreux ont été identifiés récemment, de la bétacyanine isolée de l'OFI sur la lignée de cellules K562 de la leucémie myéloïde chronique et sur des mélanomes (cancer de la peau) chez la souris (Sreekanth *et al.*, 2007).

5- Usage alimentaire :

La poire de cactus est un fruit qui met l'accent sur ses éléments fonctionnels. En plus de leur valeur nutritionnelle, leur rôle en physiologie végétale est également expliqué par *Opuntia*. Présente des teneurs élevées en acides aminés, notamment en proline et en taurine. L'acide aminé conditionnel a récemment été réévalué par la science nutritionnelle et était jusqu'alors pratiquement inconnu dans les tissus végétaux. L'osmorégulation est également influencée par les composés aminés libres qui jouent un rôle essentiel dans la biosynthèse de la bête xanthine. Les poires de Cactus, à la différence des betteraves rouges, sont très colorées et peuvent donc être utilisées comme colorant alimentaire sans être certifiées.

Les mucilages contenus dans les tissus de l'*Opuntia* sont responsables de la rétention d'eau et peuvent être utilisés comme fibres alimentaires ou agents épaississants. Pauvre en acides, le fruit peut être utilisé dans les produits laitiers. Avec ses sucres facilement absorbables, sa teneur élevée en vitamine C et en minéraux, ses polyphénols, ses acides aminés et sa saveur agréable, la poire de Cactus est taillée sur mesure pour les préparations alimentaires fonctionnelles (Stintzing *et al.*, 2001).

Les cladodes d'*Opuntia ficus-indica* constituent la tige verte de la plante (Marine-Bustamante *et al.*, 2018). Ces derniers sont utilisés pour de nombreux produits alimentaires et boissons alcoolisées et non alcoolisées. Des farines et des fibres de cladodes sont parmi les compléments alimentaires. Pour améliorer la bioactivité et la qualité nutritionnelle des aliments, la farine des cladodes est une source prometteuse de fibres alimentaires, de minéraux et de composés bioactifs (composés phénoliques et caroténoïdes) (Nabil *et al.*, 2020). De plus, il a été possible d'obtenir des pâtes qui ont des caractéristiques organoleptiques et sensorielles satisfaisantes, notamment en ce qui concerne la consistance à la cuisson et la saveur, en ajoutant 3% d'extrait d'OFI à une farine de blé dur local (Giglio *et al.*, 2020).

6- Usage cosmétique :

Les gels à base de cladodes ont un effet rafraîchissant, comme préparations à base d'*AloeVera*, soulageant la peau et contribuant à la cicatrisation des plaies (Stintzing *et al.*, 2005).

L'huile de graine peuvent être utilisés dans les shampooings, les après-shampooings, les crèmes, les lotions, les savons, les masques de beauté et les écrans solaires (Sáenz *et al.*, 2013).

Le fruit, ainsi que les cladodes sont utilisés pour préparer des produits à valeur ajoutée, tels que les lotions pour le corps, shampooing et crèmes, etc. (Kaur *et al.*, 2012).

7- Usage environnementale :

Les Cactacées possèdent un ensemble de stratégies adaptatives, évolutives et écologiques qui leur confèrent une grande capacité de développement dans divers milieux. OFI résiste aux conditions météorologiques extrêmes et se développe rapidement dans des sols pauvres avec peu de besoin en eau. Ainsi, cette espèce est la plus cultivée à l'échelle mondiale et la plus importante sur le plan économique dans le groupe *Opuntia*, étant une alternative viable dans les régions tropicales et subtropicales où d'autres plantes ne peuvent pas survivre, principalement dans les zones aride (pluviométrie annuelle inférieure à 250 mm) et semi-aride (pluviométrie annuelle de 250 à 450 mm). (Mariana Martins *et al.*, 2023).

Grâce à son adaptation aux conditions désertiques et semi-désertiques, le figuier de Barbarie constitue une culture qui présente des intérêts écologiques et socio-économiques indéniables. Il joue en effet un rôle protecteur contre la désertification et l'érosion des sols. On le cultive aussi pour régénérer les terres. Il ne nécessite ni des techniques de culture spécialisées ni des fertilisants.

Cependant, malgré ses qualités naturelles, cette espèce a été peu étudiée jusqu'aux années 70, lorsque les marchés des fruits exotiques se sont développés dans plusieurs pays. Depuis lors, de nombreux efforts ont été déployés pour en faire une culture industrielle, que ce soit en tant que culture fourragère ou maraîchère.

Cependant, la production de fruits pour l'alimentation humaine et son utilisation comme fourrage pour l'alimentation animale demeurent (Neffar , 2012).

8- Usage biotechnologie :

Les nouveaux outils biotechnologiques qui sont actuellement appliqués au nopal pourraient contribuer à la prévention du diabète de type 2 et au contrôle du poids. à sa disponibilité (techniques de in vitro) et à la compréhension des voies métaboliques, de la métaboliques, la régulation et la surexpression des produits génétiques nutraceutiques (transformation génétique des plantes) . De plus, d'autres études sont réalisées sur la micro propagation et d'autres méthodes de culture de tissus in vitro, à différentes fins, comme la production massive de cultivars ornementaux de nopal et d'autres cultivars. Le nopal a récemment apporté une contribution à la biotechnologie en isolant des enzymes à valeur commerciale comme les cellulases, les xyloses et les cyclodextrines glycosyltransférases (F) (Béjarano *et al.*, 2014).

CHAPITRE 02
OPUNTIA FICUS-INDICA
(CLADODE ET MUCILAGE)

II. Cladodes :

1- Morphologie des cladodes (raquette) :

Le figuier de Barbarie est une plante dont la tige est recouverte d'une paroi externe remplie d'une cutine grasse enduite de cire qui agit comme une chlorophylle, limite la transpiration et protège contre les prédateurs. La tige et les rameaux sont coupés en longueur pour former des raquettes cylindriques ou aplatis de 30 à 50 cm de long et de 15 à 30 cm de large, de couleur verte (El Kharrassi *et al.*, 2015). Les Feuilles coniques, de quelques millimètres de long, petites sur la branche. Les aréoles sont des bourgeons accessoires caractéristiques des cactus. Quand il n'y a pas d'épines parfois et il s'agit de raquettes inermes, donc on connaît deux variétés inerme et épineuse (Angulo-Bejarano *et al.*, 2014).

Selon Perucini *et al.*, (2021), l'analyse hiérarchique de l'organisation structurale évalue la structure qui fonctionne à diverses échelles dimensionnelles (macrostructure, microstructure et nanostructure). La Figure 03 montre un modèle de l'organisation structurale hiérarchique de raquette et sa description morphologique.

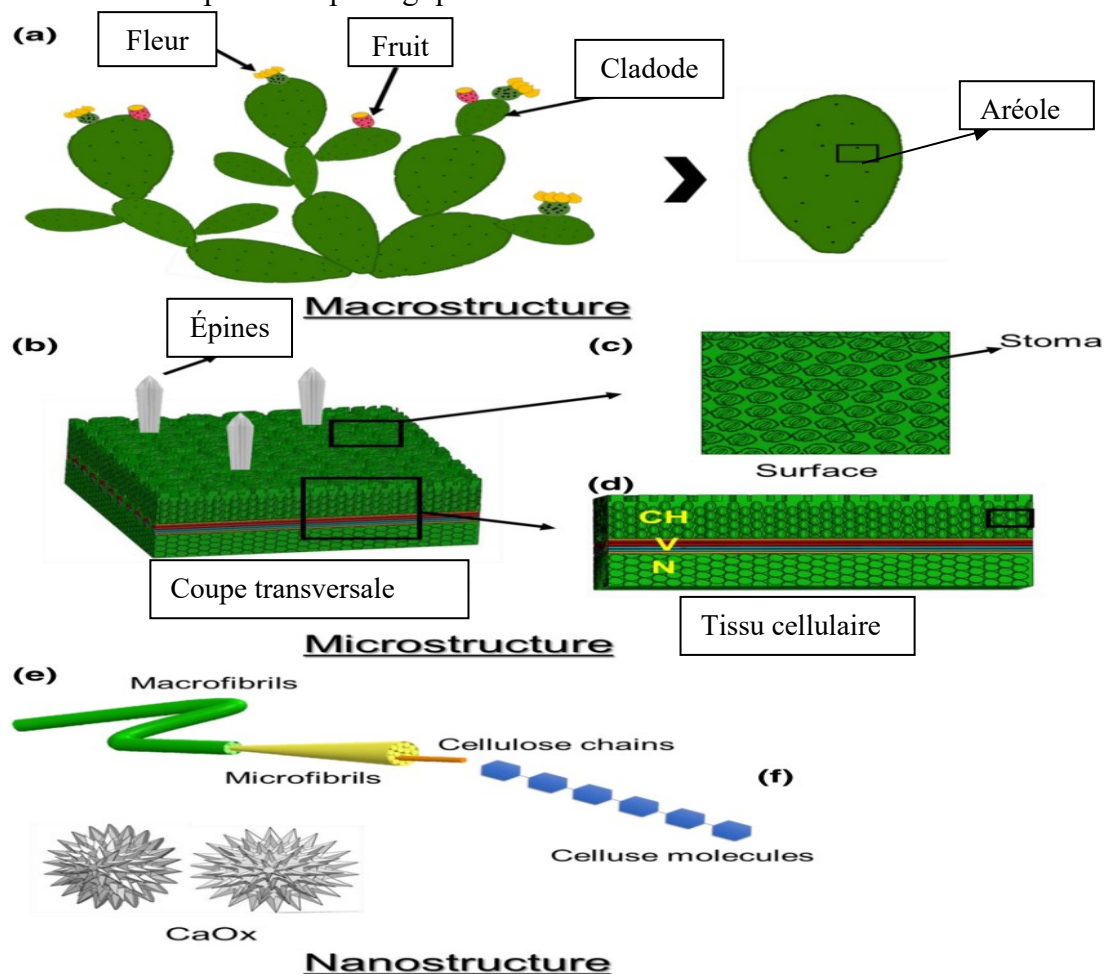


Figure 03 : Organisation structurale hiérarchique du nopal (Perucini *et al.*, 2021).

Les feuilles ou cladodes (**Figure 03 a**), ont une forme ovoïde ou allongée en forme de raquette, avec une longueur variant de 30 à 60 cm en fonction de la disponibilité d'eau et de nutriments (**Ciriminna et al., 2019**). Selon **Marin-Bustamante et al., (2018)**, les aréoles des cladodes favorisent la croissance des fleurs, des fruits et des épines. L'épiderme (**Figure 03 b**) est riche en stomates (**Figure 03 c**) qui sont responsables de la photosynthèse et de la respiration (**Salem-Fnayou et al., 2014**). Le tissu interne de l'épiderme est le chlorenchyme (CH). Le chlorenchyme, qui se situe au deuxième niveau hiérarchique, est un tissu interne constitué de plastides verts et d'un abondant amidon. Le tissu vasculaire transporte également de l'eau et des nutriments dans la plante (**Ginestra et al., 2009**). Le tissu central incolore (parenchyme) renferme les réserves de glucides (pectines et mucilage), de protéines et de polyphénols (**Feuganget al., 2006**). Au niveau de la nanostructure, les macrocellules jouent un rôle essentiel dans le métabolisme. La paroi cellulaire est composée de fibres perdues qui représentent les métabolismes des macro cellules (**Figure 03 e**), des cristaux d'oxalate de calcium (CaOx) sont à côté des tissus (dont la quantité diminue avec l'âge des cladodes) (**Contreras-Padilla et al., 2016**). Finalement, en ce qui concerne la structure cellulosique classique, on observe la présence de molécules cellulosiques (**Figure 03 f**) (**Ventura-Aguilar et al., 2017**).

2- Composition chimique des cladodes :

Les cladodes sont très riches en flavonoïdes et en autres polyphénols, en polysaccharides de haut poids moléculaires qui représentent plus de 50 % des molécules présentes dans les cladodes, dont les propriétés antidiabétiques seraient attribuées (**Keller et al., 2009**).

2-1- Les Composés minéraux :

Les cladodes sont riches en eau et en minéraux comme le phosphore, le magnésium, le potassium et le cuivre (**Tableau I**). C'est également une bonne source d'acides essentiels, dont la proline et la sérine (**Habibi, 2004**) Les principaux minéraux de la raquette sont le calcium et le potassium, avec des quantités allant de 235 à 5520 mg/100 g (**Feugang et al., 2006 ; Ayadi et al., 2009**). Selon **El Kharrassi et al., (2015)** la teneur en minéraux de l'espèce originale de Marrakech d'OFI était de 19,6 g/100 g.

Tableau I : Composition minérale des cladodes du cactus (*Opuntia ficus-indica*). La teneur en minéraux est exprimée en mg/100g (El-Mostafa et al., 2014).

Principaux composants identifiés	Cladode du cactus
Calcium	5,64-17,95
Oxalate de calcium	4,3-11,5
Magnésium	8,8
Sodium	0,3-0,4
Potasium	2,53-55,20
Fer	0,09
Phosphore	0,15-2,59
Zinc	0,08
Cuivre	/
Manganèse	0,19-0,29

2-2- Acides organiques :

L'acide malonique et l'acide citrique de 36 et 178 mg par 100g de poids frais (**Tableau II**); Les cladodes âgés ne contiennent pas d'acide malonique. L'acide piscidique augmente avec le temps, tandis que l'acide phorbique est de plus en plus important.

Tableau II: Composition des cladodes en acides organiques à deux différents temps de récolte (Stintzing and Carle, 2005)

Acides organiques	Poids frais (mg/100g)	Poids frais (mg/100g)
	06h00 (matin)	18h00 (après-midi)
Acide oxalique	35	35
Acide malique	985	95
Acide citrique	178	31
Acide malonique	36	Traces
Acide succinique	Traces	Traces
Acide tartrique	Traces	Traces

L'acide malique est de 95 à 985 mg/100 g de poids frais. Le principal acide est l'acide oxalique, qui fait environ 0,1 mg de poids sec. Il a un rôle important dans le calcium et le métabolisme des pectines (Stintzing and Carle, 2005).

2-3- Les protéines :

D'après **Moussaoui, (2020)**, les cladodes d'OFI sont composées principalement : d'eau, de glucides, de fibres, de protéines et de lipides (**Tableau III**). La richesse en protéines de 4-10% varie en fonction des facteurs édaphique, l'endroit de la culture, la saison et l'âge de la plante (**Stintzing and Carle, 2005**).

Tableau III : Principaux composants des cladodes d'OFI (Moussaoui, 2020).

Constituant	Matière fraîche (g/100g MS)	Matière sèche (g/100g PF)
Eau	—	88-95
glucides	64-71	3-7
Cendres	19-23	1-2
Fibres	18	1-2
protéines	4-10	0.5-1
lipides	1-4	0.2

2-4- Composés phénoliques :**Tableau IV: Composition en polyphénols des cladodes de *l'Opuntia ficus-indica* (El-Mostafa *et al.*, 2014).**

Polyphénols	Matière sèche (mg / 100 mg)
Acide gallique	0,64-2,37
Coumarique	14,08-16,18
3,4- dihydroxybenzoïque	0,06-5,02
4-hydroxybenzoïque	0,5-4,72
Acide ferulique	0.56-34,77
Isoquercetine	2,29-39,67
Isorhamnetin-3-O-glucoside	4,59-32,21
Nicotiflorine	2,89-146,5
Rutine	2,36-26,17
Narcissine	14,69-137,1

2-5- Acides gras :

L'acide palmitique (C16 : 0), l'acide oléique (C18 : 1) , l'acide linoléique (C18 : 2) , et l'acide linoléique (C18 : 3) sont inclus; la teneur totale en acides gras est de 34,87 et 32,83 résultent des analyses chromatographiques des lipides totaux extraits de raquette de cactus (**Abidi *et al.*, 2009**) .

2-6- Les vitamines :

Le **Tableau V** montre les diverses vitamines présentes dans les cladodes. Seule, la vitamine B est présente uniquement dans la raquette et en quantités infimes (**Feugang et al., 2006**).

Tableau V: Composition en vitamines dans les cladodes du figuier de Barbarie (Stintzing and Carle, 2005).

Vitamines	Pour 100 g de poids frais
Vitamine C	7-22 mg
Niacine	0,46 mg
Riboflavine	0,60 mg
Thiamine	0,14 mg
β -Carotène	11,3 – 53,5 μ g

2-7- Cellulose :

La cellulose dans les cladodes contient une moyenne de 11% Les cladodes ont une valeur moyenne de 85 à 171 mg/g en fonction des saisons et est environ 87 mg/g (**Retamal et al., 1987**).

2-8 Les glucides :

Les taux des glucides sont compris entre 36 et 37%. Le poids sec des glucides varie entre 64 et 71 g/100 g (**Ginestra et al., 2009**). Le **Tableau VI** représente les sucres simples non cellulosiques des cladodes de l'OFI.

Tableau VI : Les monosaccharides des cladodes de l'*Opuntia ficus-indica* (**Ginestra et al., 2009**).

Glucides	Matière sèche (μ g / mg)
Rhamnose	7,13 $\pm$ 1,28
Fructose	0,74 $\pm$ 0,11
Arabinose	39,64 $\pm$ 1,96
Xylose	18,64 $\pm$ 0,84
Mannose	13,64 $\pm$ 0,81
Galactose	33,69 $\pm$ 2,89
Glucose	153,15 $\pm$ 6,54

3- Intérêt de cladode :

3-1- Usage alimentaire :

Sont utilisées dans le sud de l'Algérie comme aliment pour les petits ruminants et les dromadaires. L'Algérie possède la première unité de fabrication de figues de Barbarie, située à Sidi Fredj, pour des usages pharmaceutiques, des jus, des confitures et des aliments pour le bétail (**Paolo Inglese et al., 2018**).

De plus, les jeunes cladodes sont consommés comme légumes en raison de leur texture tendre et fibreuse. Leur valeur nutritive est similaire à celle de nombreux autres légumes et feuilles (**Arba, 2009**), également considérées comme une nourriture traditionnelle en Amérique du Nord et en Amérique centrale, et comme un ingrédient essentiel (**Cruz-Rubio et al., 2021**). Elles sont également utilisées dans la préparation de pickles (cladodes conservés au vinaigre), de sauces et de confiseries variées (**Keller et al., 2019**).

3-2- Usage médical :

En cataplasme, les raquettes sont employées pour les contusions, les hématomes, l'arthrite et les rhumatismes, comme pansement pour les furoncles, les entorses et même les fractures osseuses. Les cladodes, chauffés avec du savon et du sel utilisées en Afrique du Sud pour les blessures et les infections de la peau. En outre, on peut les appliquer sur le front pour soulager les maux de tête, soulager les maux de gorge et traiter la fièvre typhoïde en les plaçant sur l'abdomen (**Keller et al., 2019**). Elles ont également des effets hypoglycémiant chez les rats diabétiques (**Cruz-Rubio et al., 2021 ; Stintzing et Carle, 2005**). Il existe également de plus en plus d'utilisations biotechnologiques du cladode, notamment dans la diffusion d'espèces menacées à des fins commerciales et ornementales (**Angulo-Bejarano et al., 2014**). De plus, **Malainine et al., 2001** assurent l'intégration des cladodes de l'OFI dans un régime alimentaire. Selon **Saih et al., (2018)**, les cladodes ont un effet sur le système nerveux en raison de la présence de nicotiflorine dans les plantes.

Chez les Aztèques, les cladodes étaient consommés sous toutes ses formes par les femmes enceintes, car ils étaient considérés comme les meilleurs fortifiants et d'excellents galactogènes (**Keller et al., 2019**).

Ils ont un effet anti-génotoxique, Protection des souris contre la génotoxicité causée par la zéaralénone (la zéaralénone est la principale mycotoxine produite par *Fusarium graminearum*) (**Zorguil et al., 2009**).

Les cladodes jouent un rôle dans le traitement de l'arthrose par les polysaccharides. Les glycoprotéines auraient probablement un effet protecteur contre les maladies chroniques (**Panico *et al.*, 2007**). L'extrait de cladodes d'OFI agit également comme protecteur du foie induit chez la souris par un insecticide organophosphoré, le chlorpyrifos (**Ncibi *et al.*, 2008**).

4- Mucilage

Le mucilage est une substance végétale gommeuse, souvent produite par certains tissus superficiels ou par certains canaux, composée de pectines (glucides de végétaux), est produit production est dans les cellules du chlorenchyme (partie externe de cladode) et du parenchyme (partie interne blanche de la cladode) et ayant la propriété de gonfler dans l'eau : en association avec le calcium, les molécules de pectine ont pour rôle de retenir l'eau, donnant un aspect de gel hydraté (**Sepulveda *et al.*, 2007** ; **Sáenz *et al.*, 2004**).

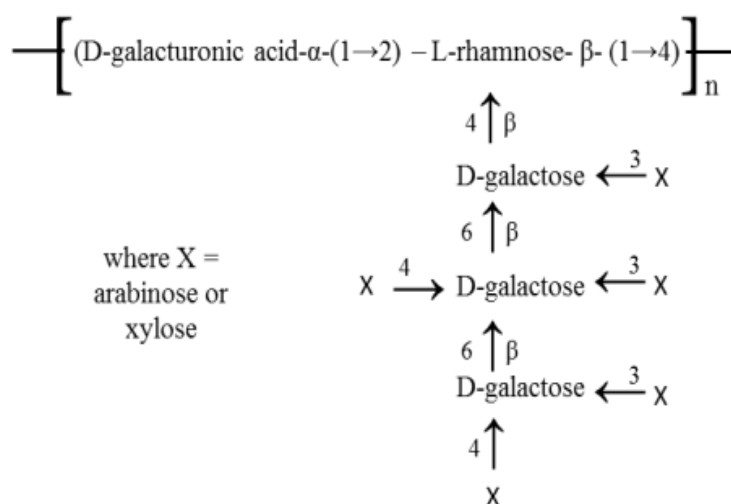


Figure 4 : Structure chimique du mucilage d'*Opuntia ficus-indica* (**Sáenz *et al.*, 2004**).

Selon **Medina-Torres *et al.*, (2000)** ; **Petera *et al.*, 2015**, le mucilage est un polysaccharide regroupe jusqu'à 30 000 sucres, il est principalement composé de (D-galactose, D-xylose, Larabinose, L-rhamnose et L-galacturonique) (**Tableau VII**) Cela dit, récemment, d'autres travaux ont cité le mucilage comme une substance complexe de nature glucidique, se produit dans les cellules du chlorenchyme (partie externe verte de la cladode) et du parenchyme (partie interne blanche de la cladode). Il possède des propriétés tensio-actives de l'eau.

Tableau VII : Composition en sucre de la gomme à mucilage (*Opuntia ficus-indica*) (Medina-Torres *et al.*, 2000).

Composition	Medina-Torres <i>et al.</i> , (2000) (%en moles)	Medina-Torres <i>et al.</i> , (2000) (%en moles)	McGarvie et Parolis (1981) (% en moles)
Arabinose	44.04	46,68	42,4
Galactose	20 .43	17.92	18.4
Xylose	22.13	23 .45	24,5
Rhamnose	7.02	6,76	6.4
Acide galacturonique	6.38	5.19	8.4

4-1 Intérêt industriel de mucilage :

Le mucilage peut être très rentable sur le plan économique grâce à son prix avantageux, de sa disponibilité et de son efficacité pour renforcer les propriétés mécaniques. À l'heure actuelle, il est crucial d'opter pour des matériaux biomatériaux écologiquement responsables, abordables et ayant mieux que des matériaux polluants artificiels. (Barka *et al.*, 2013). Dernièrement, il a été démontré que pour le traitement d'eaux usées, le jus d'OFI améliore la performance d'élimination de la turbidité par une technique de traitement de l'eau (l'électrocoagulation- électroflotation (EC-EF) avec 15% d'amélioration. Certaines recherches suggèrent qu'il peut être utilisé à la place d'adjuvants chimiques ou d'autres polymères synthétiques lors de la coagulation (Adjeroud *et al.*, 2015 ; Adjerroud *et al.*, 2018 ; Adjerroud *et al.*, 2020 ; Djerroud *et al.*, 2018 ; Djerroud *et al.*, 2023). Selon Adjerroud *et al.*, (2020), l'association du mucilage d'OFI avec l'EC-EF a entraîné une élimination de 100% du cuivre.

En addition, le mucilage est notamment exploité en cosmétique pour la création d'adoucisants, de shampooings, de laits hydratants et de crèmes pour le corps (Arpa, 2009). Selon Felkai-Haddache *et al.*, (2016) ; Sepulveda *et al.*, (2007) ; Ayat, (2020), est aussi joue un rôle majeur dans l'alimentation en tant qu'épaississant et émulsifiant sans négliger son activité industrielle du fait des propriétés cristallines, rhéologiques et physiologiques de pectine ; est employé aussi dans l'industrie agroalimentaire comme un enrobage comestible afin de prolonger la durée de conservation des aliments produits tel que les fraises (Del-Valle *et al.*, 2005). L'utilisation de la gomme a des effets protecteurs cellulaires pour prévenir les ulcères d'estomac (Galati *et al.*, 2002) ; le polysaccharide est également employé comme un moyen de médication (administration de médicaments) (Malviya *et al.*, 2011). Le Tableau VIII représente l'utilisation des cladodes comme sous-produits.

Tableau VIII : Produits potentiels et sous-produits du Figuier de Barbarie (**Moreno Alvarez et al., 2003**)

Produits	Sous-produits
Fruits	Jus en poudre
Jus, nectar	pulpe Pigments
Confiture, purée,	Gelée, fibres et mucilages
Sirop, édulcorant	
Bioéthanol, vin	—
Fruit conservé	—

CHAPITRE 03
ELECTROCOAGULATION- ELECTRO
FLOTATION (EC – EF)

III. Généralités sur l'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF) :

Depuis longtemps, Il été extrêmement difficile d'éliminer le flux naturel de polluants dans l'environnement. Pour gérer le cycle de l'eau, une solution globale doit être développée, ce qui peut être réalisé en augmentant la réutilisation et le recyclage de l'eau. Il est également difficile de purifier les eaux usées provenant des effluents industriels avant qu'elles ne soient rejetées. En fait, il est essentiel de trouver des méthodes innovantes, abordables et performantes (**El hafdi et al., 2019**).

De nouveaux procédés de traitement de l'eau moins chers et abordables sont nécessaires. Le procédé de coagulation/floculation, qui est un processus efficace dans le traitement d'eaux de surface et des eaux usées industrielles, il comprend l'élimination d'espèces organiques dissoutes et de la turbidité de l'eau, le plus souvent par l'ajout de coagulation chimique classique : aluminium, chlorure ferrique et polymères organiques synthétiques (**Djerroud et al., 2018**).

Différents traitements des eaux usées ont été effectués par la suite en utilisant le procédé d'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF). Cette technique permet de produire des agents coagulants *in situ* grâce à la génération d'un courant électrique qui va permettre l'oxydation d'une anode et la réduction d'une cathode métallique (**Djerroud et al., 2018**).

Certains travaux ont tenté d'améliorer l'efficacité du procédé d'EC-EF (**Essadki et al., 2008 ; Baran et al., 2018**). Mais d'autre part, l'utilisation de coagulants naturels pour le traitement des eaux usées est devenue une pratique de plus en plus recherchée, c'est une alternative qui offre un certain nombre d'avantages par rapport aux agents chimiques, notamment leur capacité à se dégrader, leur faible toxicité et leur faible production de boues résiduelles. Par exemple, dans le travail d'**El abbas et al., (2020)**, des coquilles d'œufs ont été utilisés pour améliorer l'efficacité du procédé de l'EC-EF. Concernant l'utilisation des végétaux, une des plantes les plus utilisées dans ce contexte après *Moringa oleifera*, est l'*opuntia ficus-indica*. Cette plante est régulièrement plantée, elle pousse facilement et nécessite très peu d'eau et peut être utilisée comme alternative naturelle (**Narasiah et al., 2002**).

1- Principe du procédé d'EC-EF :

Le processus de traitement d'électrocoagulation d'électroflottation implique l'utilisation d'un courant électrique afin de traiter les contaminants en formant des floccs. Lorsqu'un courant continu circule entre les électrodes, des bulles d'oxygène se forment à l'anode et des bulles d'hydrogène à la cathode (**Shammas et al., 2010**). Ces bulles remontent à la surface en transportant l'huile et les matières en suspensions (MES). Il a été constaté que pour une rétention

de 20 minutes, une différence de potentiel de 10 V à une densité de courant de 100 A/m² était généralement suffisante avec une concentration initiale de particules allant jusqu'à 10 000 mg/m². L'eau est pompée à travers une unité dans laquelle sont installées des électrodes en fer ou en aluminium. Un champ électrique à courant continu est appliqué aux électrodes pour induire les réactions électrochimiques nécessaires à la coagulation et à la flottation. L'eau traitée est évacuée du système pour être réutilisée ou éliminée. Les contaminants concentrés sous forme de bio solides sont collectés pour être éliminés ou valorisés (Shammas *et al.*, 2010).

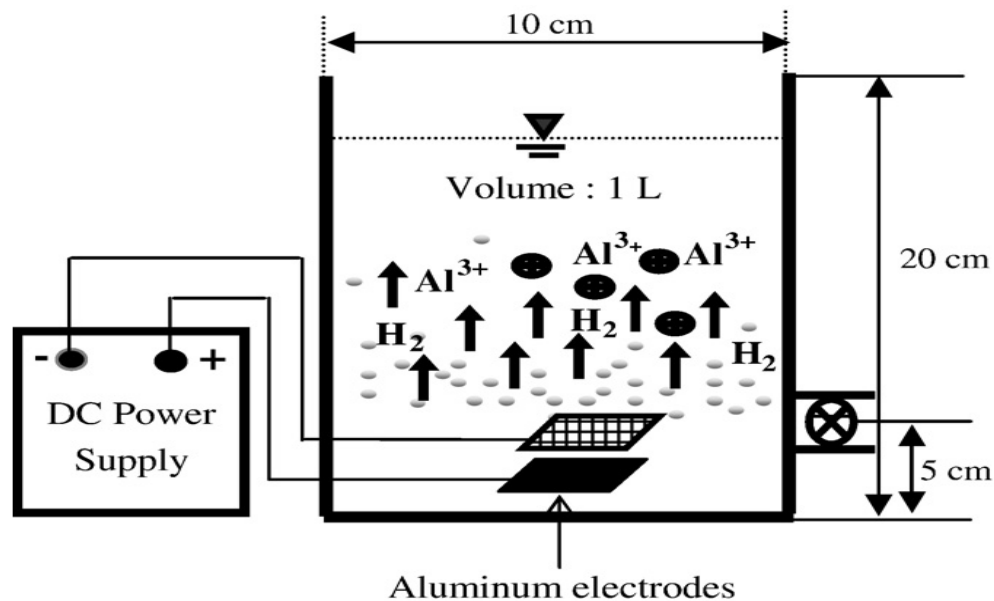


Figure 05 : Unité d'électrocoagulation- électroflottation pour le traitement des eaux usée (Merzouk *et al.*, 2010)

La cellule d'EC-EF la plus basique est constituée d'une anode et d'une cathode constituée de divers matériaux (comme le fer ou l'aluminium) immergés (partiellement ou totalement) dans l'eau ou les eaux usées à traiter (Sharma *et al.*, 2020 ; Yang, 2020). Une ou plusieurs paires anode-cathode peuvent être connectées en mode mono polaire ou bipolaire (Aljaberi *et al.*, 2018 ; AlJaberi *et al.*, 2020).

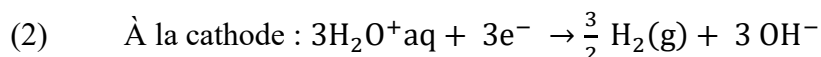
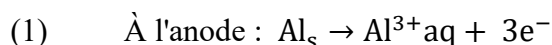
Il y a trois étapes successives qui sont impliquées dans le processus d'EC-EF :

- 1- L'oxydation électrolytique d'une anode métallique entraînant la formation de coagulants.
- 2- Perturbation des polluants, accumulation des particules et éclatement de l'émulsion.
- 3- Fusion de la phase perturbée afin de créer des floes.

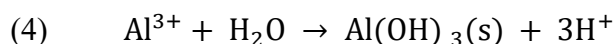
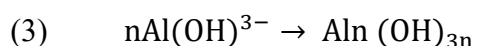
L'aluminium est un métal abordable et accessible qui peut être utilisé pour produire des ions polyvalents et différents produits d'hydrolyse. (Mechelhoff *et al.*, 2013). C'est la raison

pour laquelle l'aluminium est le matériau d'anode le plus répandu. Les réactions électrochimiques les plus importantes se produisant lors du processus d'EC-EF dans un réacteur équipé d'électrodes en aluminium se basent sur une anode qui est oxydée (elle perd des électrons), et une cathode qui est réduite (elle gagne des électrons), ce qui permet d'améliorer le traitement des eaux usées.

Ces réactions sont représentées dans les équations suivantes :



Les ions Al^{3+} produits par l'anode et les ions OH^- produits par la cathode forment différentes espèces monomériques et polymériques comme $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})^4+$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{9+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, and $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ qui se métamorphosent d'abord en $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ et se polymérisent ensuite en $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ selon les équations (3) et (4) en solution.:



La nature amphotère des floccs d' $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ présente généralement une plus grande surface qui facilite l'adsorption rapide des matières solubles et le piégeage des colloïdes.

Les microbulles de H_2 et d' O_2 libérées à la surface de l'électrode adhèrent aux agglomérats et les transportent à la surface de l'eau par électroflottation (**Aljaberi et al., 2018 ; Mollah et al., 2001 ; Mollah et al., 2004 ; Shivayogimath et al., 2017**).

2- Avantages du procédé d'EC- EF :

L'électrocoagulation –électroflottation a été utilisée avec succès pour traiter une variété d'eaux usées industrielles (**Mollah et al., 2001 ; Chen et al., 2000**), d'eaux potables (**A. Attour et al., 2013**) et d'eaux usées urbaines (**M. Pouet 1995**). L'EC-EF a le potentiel d'éliminer en grande partie les inconvénients des techniques de traitement classiques. Elle est plus efficace et plus compactes. Son équipement est simple et son fonctionnement est facile, elle élimine les petites particules colloïdales par rapport aux techniques traditionnelles de coagulation et de floculation (**Alinsafi et al., 2005**). Elle se caractérise par de faibles coûts d'investissement et de fonctionnement, un temps de réaction court et une faible production de boues. Un autre avantage important de l'EC-EF est la réduction des quantités excessive de coagulants chimiques (**Alinsafi et al., 2005**).

Le processus d'électrocoagulation présente les avantages suivants (**Robinson, 2009**) ; (**Beagles , 2009**) .

1. Aucun produit chimique n'est nécessaire (autre que le contrôle du pH) et aucune augmentation de la salinité.
2. Capacité à traiter une large gamme de polluants, c'est-à-dire qu'il peut traiter de multiples contaminants : solides en suspension et colloïdaux, métaux lourds et métaux lourds. et colloïdaux, métaux lourds, huiles libres et émulsionnées, bactéries et matières organiques.
3. Tolérer les fluctuations de la qualité de l'eau influente.
4. Les bulles de gaz produites pendant l'électrolyse peuvent faire flotter le polluant à la surface de la solution, où il peut être plus facilement concentré, collecté et éliminé.
5. Capacité à recycler l'eau pour la réutiliser.
6. Réduction des résidus : le système produit entre la moitié et le tiers des résidus de la coagulation chimique. La quantité de résidus séchés est de 0,20 à 0,37 kg/kg de DCO éliminée. Le résidu a tendance à être facilement décantable et facile à déshydrater, car il est composé principalement d'oxydes/hydroxydes métalliques.
7. Intègre les avantages de la précipitation chimique, de la flottation et de la décantation dans un encombrement beaucoup plus faible.
8. Entièrement automatisé, l'attention de l'opérateur est minimale.
9. Faible consommation d'énergie : La consommation d'énergie n'est que de 0,5 kWh/m³ dans un ensemble de conditions de fonctionnement typiques.
10. Faibles coûts d'exploitation : 15 g d'Al/m³ d'eau et 0,6 kWh d'électricité (50 % pour le pompage de l'eau) pour éliminer 1 kg de solides en suspension.
11. L'électrocoagulation est plus efficace que la coagulation chimique pour l'élimination de la turbidité.
12. La technique peut être utilisée de manière pratique dans les zones rurales où l'électricité n'est pas disponible, puisqu'un panneau solaire fixé à l'unité peut être utilisé pour réaliser le processus.

D'autres aspects sont notamment la diminution de la production de boues, la réduction de l'utilisation de produits chimiques et la diminution de l'encombrement en raison d'un temps de séjour plus court (**Mollah et al., 2001**).

Aussi, l'un des avantages du système EC-EF est qu'il n'y a pas de turbulences dues à de soudaines libérations de pression et donc pas de cisaillement de fragiles particules de matière. Par conséquent, aucun cisaillement des floes fragiles. Un autre avantage de ce procédé par rapport à d'autres est que l'efficacité de la génération de bulles est indépendante de la température de l'eau usée (**Bassala et al., 2017**).

3- Inconvénients du procédé d'EC-EF :

Les principaux inconvénients de l'EC-EF sont principalement liés à la faible conductivité de l'eau polluée, ce qui nécessite généralement l'ajout de chlorure de sodium. Lorsque des ions de calcium et du bicarbonate sont présents, cela entraîne la formation de dépôts de carbonate de calcium sur la cathode, ce qui accroît la résistance électrique de la cellule. Pendant les opérations, le nettoyage et le remplacement des électrodes peuvent entraîner une perte de temps en raison de l'arrêt du processus, car les électrodes sont dissoutes dans les eaux usées à la suite d'une oxydation (Mollah *et al.*, 2004).

Il convient de souligner que cette lacune réside dans l'absence de méthodes de conception et de modélisation prédominantes pour les réacteurs, ainsi que dans une consommation d'énergie considérable (Belkacem *et al.*, 2008).

Les désavantages économiques de l'EC-EF sont la dissociation des « électrodes sacrificielles » dans les courants d'eaux usées, qui doivent être remplacées régulièrement. En outre, le recours à l'électricité peut être onéreux dans de nombreux lieux. En plus, la formation d'un film d'oxyde imperméable sur la cathode peut entraîner une réduction de l'efficacité de l'unité d'EC-EF. Aussi, il est essentiel d'avoir une conductivité élevée de la suspension des eaux usées (Mollah *et al.*, 2001). Toutefois, il a été noté que l'ajout du mucilage du figuier de Barbarie réduit la consommation d'énergie spécifique à une densité de courant fixe tout en augmentant l'efficacité du procédé pour l'élimination du cuivre (Adjeroud *et al.*, 2018).

4- Facteurs influençant le procédé d'EC-EF :

La performance et la fiabilité de la technologie de traitement électrolytique sont influencées par le contrôle, le fonctionnement et les interactions chimiques du système électrolytique. La technologie de traitement électrolytique améliore ses performances et sa fiabilité.

Plusieurs paramètres influencent le mécanisme de l'EC-EF. Il est grandement influencé par la chimie de l'environnement aqueux, notamment par la conductivité. Cependant, d'autres facteurs comme le pH, la taille des particules et les concentrations des composants chimiques ont également une influence sur le processus d'EC-EF (Mollah *et al.*, 2001). Ces paramètres sont :

a. Le pH :

L'électrocoagulation est influencée par le pH des eaux usées, ce qui se traduit par l'efficacité du courant et la solubilité des hydroxydes métalliques. La performance du courant d'aluminium est généralement plus élevée dans des conditions acides ou alcalines qu'à la

neutralité. La performance du traitement est influencée par la nature des polluants, avec une élimination optimale des polluants observée à un pH proche de 7. Cependant, à pH neutre, la consommation d'énergie est plus élevée en raison de la variation de la conductivité. Avec une conductivité élevée, l'impact du pH n'est pas important (**Chen, 2004**). Le pH de l'effluent augmente lors du traitement par électrocoagulation pour les substances acides, tandis qu'il diminue pour les substances alcalines. C'est l'un des bénéfices de cette méthode. Dans des conditions acides, le pH augmente en raison de l'évolution de l'hydrogène aux cathodes, qui libère l' H^+ , ce qui entraîne une baisse du pH. De plus, une réaction d'extraction de l'oxygène se produit, ce qui entraîne une baisse du pH. La libération de CO_2 par barbotage d'hydrogène, la formation d'autres anions avec Al^{3+} et le déplacement de l'équilibre pour les réactions de libération de H^+ sont responsables de l'augmentation du pH dans les effluents acides. Dans des conditions alcalines, la baisse du pH peut être due à la formation de précipités d'hydroxyde avec d'autres cations.

b. La conductivité :

La conductivité joue un important rôle dans le traitement EC-EF, car elle influence la tension de la cellule et la consommation d'énergie électrique. L'utilisation d'électrolytes permet de diminuer la résistance chimique des eaux usées à traiter, ce qui entraîne une augmentation de la tension de la cellule à densité de courant conséquente. De plus, la consommation d'énergie sera réduite, car elle est influencée par la tension de la cellule et l'intensité du courant (**Djerroud et al., 2018**). Le NaCl est généralement utilisé pour améliorer la conductivité de l'eau et réduire les effets négatifs d'autres anions comme le HCO_3^- et le SO_4^{2-} . Les ions de chlore peuvent diminuer l'impact négatif d'autres anions, créant un isolant qui augmente le potentiel entre les électrodes et réduit l'efficacité du courant (**Chen, 2004**).

c. Densité de courant appliquée :

Selon (**Holt et al., 2002 ; Adhoum et al., 2004**), La densité de courant appliquée est cruciale pour le traitement électrolytique, où l'espace des électrodes est fixe et le courant est continu. Une agrégation efficace nécessite un courant de contact et une plus grande quantité de coagulant (Al). La densité de courant influence directement le dosage du coagulant, le taux de génération de bulles, le mélange de la solution et le transfert de masse au niveau des électrodes, affectant la génération de bulles, le mélange de la solution et le transfert de masse (**Holt et al., 2005**).

Koby et al., 2010, ont mené une étude sur l'élimination du phosphate et du zinc. Les conditions idéales pour l'élimination étaient une densité de courant de 60 %, un pH de 5 et une

durée d'opération de 10 minutes. Cette efficacité d'élimination était de 97 % pour les électrodes d'aluminium et de fer (Wang *et al.*, 2009).

La quantité d'ions Al^{3+} ou Fe^{2+} libérés par les électrodes correspondantes est déterminée par la densité de courant. Un courant élevé correspond à une électrocoagulation de petite taille. Toutefois, lorsque l'on utilise un courant trop élevé, il existe de grandes probabilités de gaspiller de l'énergie électrique en chauffant l'eau. De plus, une densité de courant excessive entraînerait une réduction considérable de l'efficacité du courant (rendement faradique). Ainsi, en ayant une densité de courant adéquate, le système peut fonctionner de manière durable. La densité de courant recommandée est de 20-25 A/m². Il est important de prendre en compte d'autres paramètres tels que le pH, la température et le débit pour garantir une efficacité de courant élevée (Chen, 2004).

d. Température :

Il n'y a pas eu beaucoup d'études sur l'impact de la température sur cette technologie, mais il a été prouvé que l'efficacité du courant au niveau d'électrodes en aluminium augmente d'abord avec la température, jusqu'à environ 60°C, où l'efficacité du courant atteint son maximum. Une hausse de la température supplémentaire entraîne une réduction du courant. De plus, une augmentation de la température entraîne une conductivité accrue, ce qui entraîne une diminution de la consommation d'énergie (Chen, 2004).

e. Durée du temps de fonctionnement :

Selon Zayas *et al.*, (2007), Le pH de 7,0 accélère la dégradation des matières organiques dans l'eau. En général beaucoup de travaux montrent qu'un temps de traitement court (moins d'une heure) est suffisant pour permettre une efficacité satisfaisante de l'EC-EF.

f. Type et disposition des électrodes :

Les électrodes du réacteur électrolytique doivent être au contact de l'eau usée à traiter. Elles sont dites mono ou bipolaires quand elles sont placées en une seule unité chacune (une électrode et une cathode) ou en double (deux anodes et deux cathodes), respectivement (Jiang *et al.*, 2002 ; Mollah *et al.*, 2004).

Koby *et al.*, 2003 ; Merzouk *et al.*, 2009 ont comparé l'efficacité des électrodes en fer et en aluminium pour éliminer le DCO de l'eau textile, concluant que les électrodes en aluminium sont plus efficaces dans les environnements acides et neutres. Les électrodes d'électrocoagulation sont généralement fabriquées en aluminium, en fer ou en alliage et assurent un traitement équilibré des fluides et des liquides, en favorisant la création de microbulles et un nettoyage régulier avec des solutions spécifiques.

g. Coût d'exploitation du traitement électrolytique

Le coût d'exploitation comprend les dépenses liées aux produits chimiques, à l'électronique, à la consommation d'énergie, à la maintenance, à la déshydratation et à l'élimination des déchets, ainsi que les coûts fixes (**Bayramoglu *et al.*, 2004 ; Kobya *et al.*, 2010**) ont rapporté que les dépenses liées à l'énergie et aux matériaux des électrodes sont les principales dépenses dans le calcul du coût d'exploitation.

h. Conception du réacteur :

Impliquant divers moteurs et composants structurels. Il doit comporter des éléments abordables, une tension cellulaire réduite, une faible pression, une installation simple, une maintenance et un système de surveillance (**Chopra *et al.*, 2011**).

**PARTIE
EXPÉRIMENTALE**

CHAPITRE I
MATÉRIELS ET MÉTHODES

I. Matériel végétal :

1- Collecte de l'échantillon :

La raquette ou cladode d'*Opuntia ficus-indica* sans épines (inermes) a été récoltée dans la wilaya de Bejaia, au lieu-dit Merdj-Ouamane (Sud-Est de Béjaia) pendant le mois de mars 2024.

2-Préparation de l'échantillon :

Les cladodes ont été rincés à l'eau de robinet puis à l'eau distillée. Un nettoyage se fait afin de retirer ses épines. Les dimensions du cladode ont été enregistrées : 45.5 ± 0.70 cm de longueur, $20,16 \pm 3,32$ cm de largeur, $2,06 \pm 0,20$ cm d'épaisseur, 180 aréoles et 2.306 kg de poids. Après la découpe de cladode, la cuticule externe est soigneusement enlevée à l'aide d'un couteau de cuisine (Miller *et al.*, 2008). Les cladodes sont caractérisés par un épais épiderme (chlorenchyme) : formé d'un revêtement transparent cireux qui est la cuticule et d'une peau dure qui couvre le noyau central (parenchyme) contenant le mucilage et riche en tissus aquifère permettant d'emmagasinier l'eau et de la préserver pendant les périodes de sécheresse et de chaleur. Cette cuticule cireuse pourrait agir comme une barrière à l'extraction de molécules bioactives.

Ensuite les cladodes ont été broyés et mélangés à de l'eau distillé avec un à un ratio de 1:1 (Adjeroudet *al.*, 2015 ; Cárdenas *et al.*, 1997; Fox *et al.*, 2012): 100 g de raquette est mélangé à 100 mL d'eau distillée, le tout est broyé à de courtes pulsions de 50 sec à 1 min dans un mixeur domestique (Philips, France). Ces préparations sont conservées dans des petites bouteilles au réfrigérateur à 4°C pour les extractions et la récupération du mucilage (Felkai-Haddacheet *al.*, 2016). La Figure suivante présente le protocole de préparation d'échantillon.

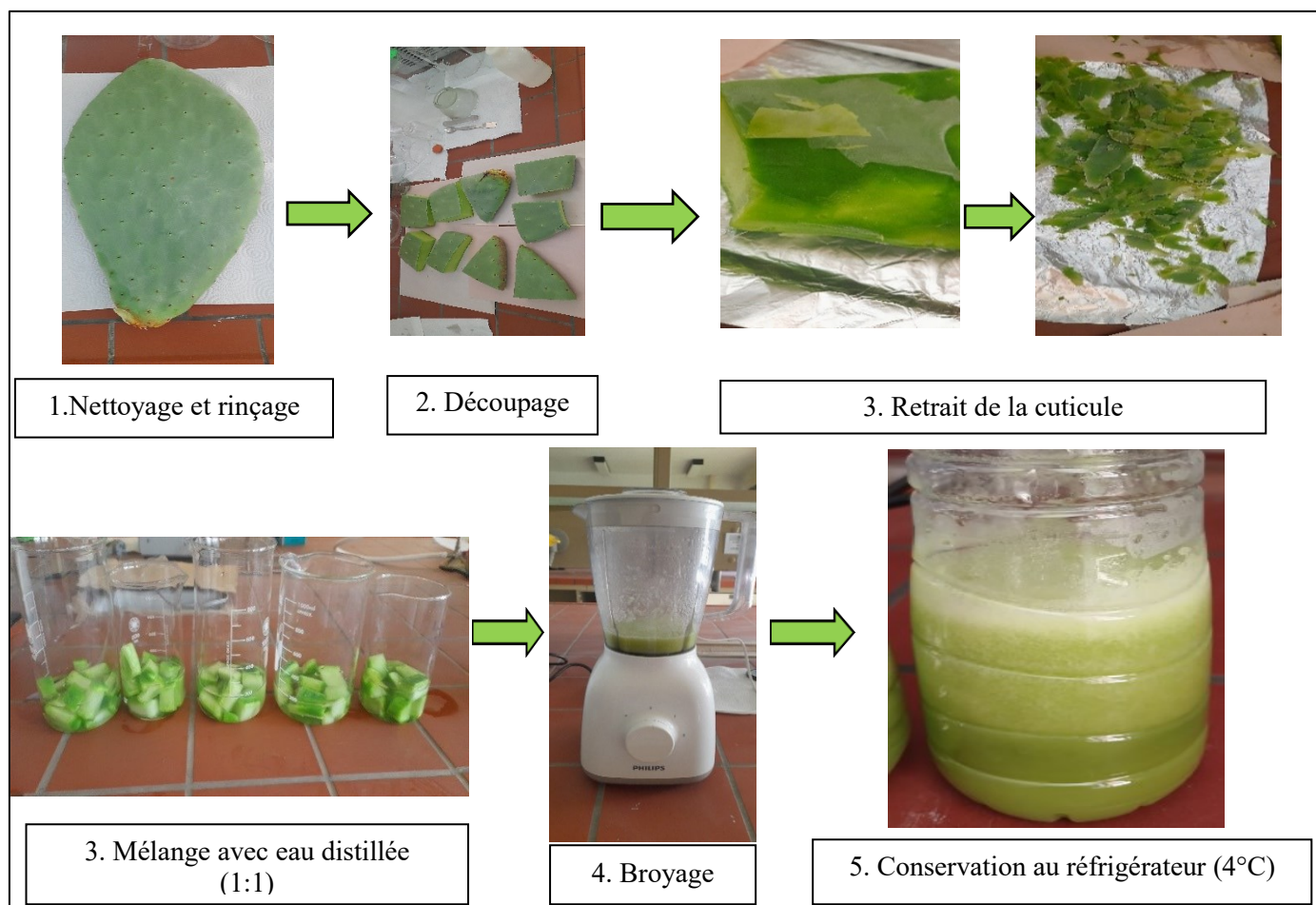


Figure 06 : Préparation des cladodes de l'OFI

(Photographies prises au laboratoire)

3- Test d'humidité :

Le séchage est la méthode utilisée pour déterminer le taux d'humidité. Un échantillon de 100 gde cladode, placé sur une coupelle, est mis dans une étuve à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'au séchage et la stabilité du poids (près de 3 h). Le taux d'humidité est défini comme étant la perte de poids qui résulte de la dessiccation, il est calculé par la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \cdot 100$$

H % : Humidité ou teneur en eau.

M₁: poids de la coupelle avec l'échantillon avant dessiccation.

M₂: poids de la coupelle avec l'échantillon après dessiccation.

La matière sèche (MS) est donc obtenue comme suit :

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

4- Mesure des paramètres physico-chimiques : viscosité, pH et conductivité

Le mesure de la viscosité des broyats de cladode d'OFI a été réalisée à l'aide d'un viscosimètre (PI-SNB1 digital viscosimètre, Chine) dont les paramètres sont Température de 21.6°C, le type de mobile (Spindel), choisi selon la consistance plus au moins visqueuse de l'échantillon, est le mobile N°2, et une vitesse de rotation de 60rpm.

Les mesures du pH et de la conductivité des broyats de cladodes ont été faites en utilisant un pH mètre (Hanna Instrument, Chine) et un conductimètre (Bante Instruments, Chine).

5- Extraction du mucilage :

5-1- Extraction conventionnelle (EC) :

Une extraction conventionnelle a été réalisée en plaçant les broyats des cladodes de l'OFI (ratio 1:1 solide liquide d'OFI et d'eau distillée) sur une plaque agitatrice (Velp's AM4 Scientifica, France) à 700 rpm pendant 3h et en maintenant la température du mélange à 80 ± 0.5 °C (Adjeroudet *al.*, 2018) (Figure 07). Cette extraction solide-liquide à l'eau aura lieu par pénétration du solvant aqueux dans les cellules (Royeret *al.*, 2010).

Après l'extraction, les mélanges sont filtrés à l'aide d'une passoire, et le mucilage est récupéré à la surface du filtrat (surnageant) après une nuit de réfrigération (4°C) par précipitation à l'éthanol réfrigéré à -96°C (V/V) (Matsushiroet *al.*, 2006).

– Le mucilage est placé dans une étuve ventilée à 40°C pendant une nuit pour permettre l'évaporation du solvant éthanolique.

Ensuite, le mucilage séché est récupéré sous forme de poudre et conservé à température ambiante jusqu'à utilisation. (Mis à part les étapes de l'extraction conventionnelle sur plaque agitatrice, la suite des étapes est représentée en Figure 03 (c-f), car ce sont les mêmes étapes suivies pour l'extraction aux microondes expliquée ci-dessous).



Figure 07 : Extraction conventionnelle du mucilage avec agitation.

5-2 Extraction assistée par microondes (EAM):

L'extraction assistée par microondes (EAM) consiste à utiliser l'énergie des microondes pour chauffer les solvants en contact avec un échantillon afin de répartir les analyses de la matrice de l'échantillon dans le solvant. La capacité de chauffer rapidement le mélange échantillon-solvant est inhérente à l'extraction assistée par microondes et constitue le principal avantage de cette technique (**Eskilsson , Björklund 2000**).

Cette méthode innovante est efficace par rapport aux méthodes conventionnelles pour extraire le mucilage des cladodes permettant une réduction de temps et une augmentation de qualité d'extraction. Ce procédé est une bonne alternative pour une extraction efficace (en qualité et quantité) des substances bioactives à partir de diverses sources végétales, car il permet d'économiser les quantités de solvant, de réduire le temps, et l'alimentation en énergie réduisant ainsi les coûts (**Adjeroudet al., 2018 ; Felkai-Haddacheet al., 2015 ; Dahmouneet al.,2015**).

- Comme en EC, le broyat de cladode (ratio 1:1 solide liquide d'OFI et d'eau distillée), préparé précédemment, est placé dans une fiole à l'intérieur du dispositif à extraction aux microondes : un microondes (Maxipower, Chine) attaché à un système de refroidissement (serpentin) qui permettra de maintenir une température stable tout au long de l'extraction. L'extraction est réalisée à une puissance de 700 Watt pendant 3.50 min (**FelkaiHaddacheet al., 2015 ; Adejroudet al., 2018 ; Cardenas et al., 1997**).

Après l'extraction, les mélanges sont filtrés à l'aide d'une passoire, le mucilage est récupéré à la surface du surnageant par précipitation à l'éthanol réfrigéré à 96°C (V/V) après une nuit de réfrigération (4°C). Enfin, le mucilage est récupéré sous forme de poudre après séchage à l'étuve ventilée (40°C, 24h) (**Figure 08 (a-f)**).

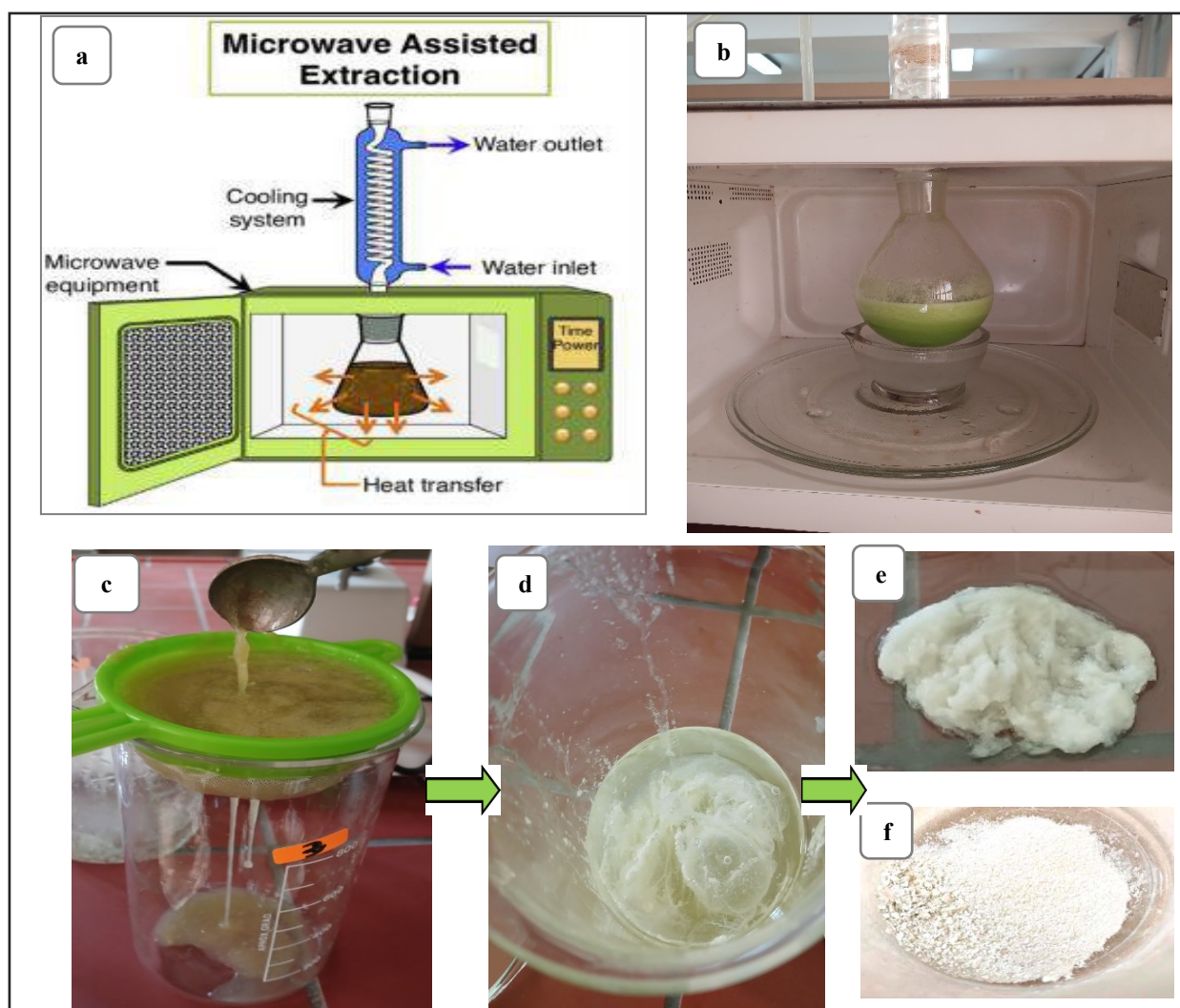


Figure 08 : Dispositif schématisé de l'extraction assistée par micro-onde(a), broyat de cladode et d'eau distillée (1:1) à l'intérieur du microondes (b), filtration par tamisage après extraction (c), précipitation à l'éthanol (96°C) (d), mucilage récupéré (e), poudre de mucilage (f).

5-3- Rendement des extractions :

Le rendement des extractions (% p/p) est calculé comme le pourcentage de poids (g) de l'extrait sec du mucilage obtenu après extraction et séchage à l'étuve (M) par rapport au poids de la matière sèche (g) du test d'humidité (M_0) (Zhang *et al.*, 2007), selon la formule suivante:

$$R(\%) = \frac{M}{M_0} \cdot 100$$

R : Rendement exprimé en %.

M : Masse en gramme de l'extrait sec du mucilage.

M_0 : Masse en gramme de l'échantillon initial séché à l'étuve (100g de cladode utilisé pour le test d'humidité et l'extraction).

6-Dosage des sucres totaux :

Ce dosage biochimique a été réalisé sur le mucilage extrait par microondes. Selon un protocole basique d'**Aschwell, (1957)**, en présence d'acide concentré, les hexoses se déshydratent en dérivés furfurals qui réagissent avec l'anthrone après chauffage pour donner un composé coloré bleu-vert qui absorbe à 627 nm. Les disaccharides dans ce milieu acide sont hydrolysés en hexoses.

La teneur en sucres totaux (sucres neutres) a été déterminée à l'aide de la méthode à l'anthrone. Le mucilage est d'abord dissous dans de l'eau distillée à une concentration de 1g/L pendant 24h sur plaque agitatrice.

Une quantité de 4mL d'une solution aqueuse d'anthrone (0,2 %, p/v dans de l'acide sulfurique pur) sont ajoutés à 1 mL de mucilage préparé la veille mais dilué préalablement à 1/10 dans de l'éthanol à 80 %. Les mélanges sont faits dans des tubes à essai en verre et placés dans de la glace. Ensuite, les tubes sont incubés à 90-95°C pendant 20 min. Une coloration bleu-vert apparaît. Après refroidissement, l'absorbance des densités optiques est réalisée à 620 nm (**Das et al., 2010**). Les dosages en sucre du mucilage ont été établis à l'aide d'une solution étalon de glucose (1 mg/mL) qui sera utilisée comme la courbe d'étalonnage (0,125 à 0,0156 mg/mL)(**Annexe N°01**). Le résultat sera exprimé en µg/mg (ou mg/g) en prenant en compte la concentration du mucilage dissous 24h avant.

II. Traitement de l'eau :

1.L'unité expérimentale de l'électrocoagulation-electroflottation (EC-EF):

Le réacteur électrochimique EC-EF utilisé pour cette étude est un réacteur d'un volume total de 4 L dans lequel deux électrodes en aluminium de forme rectangulaire (27 mm x 17 mm x 1 mm) d'une superficie de 4,59 cm², sont placées verticalement au centre du réacteur. Les électrodes sont reliées à une source de courant continu grâce à un générateur de courant (PHYWE, Allemagne) qui fournit une tension (voltage) de 0-25 V (0-10 A). Les électrodes sont séparées d'un centimètre (**Merzouket al., 2010**) (**Figure 09**).

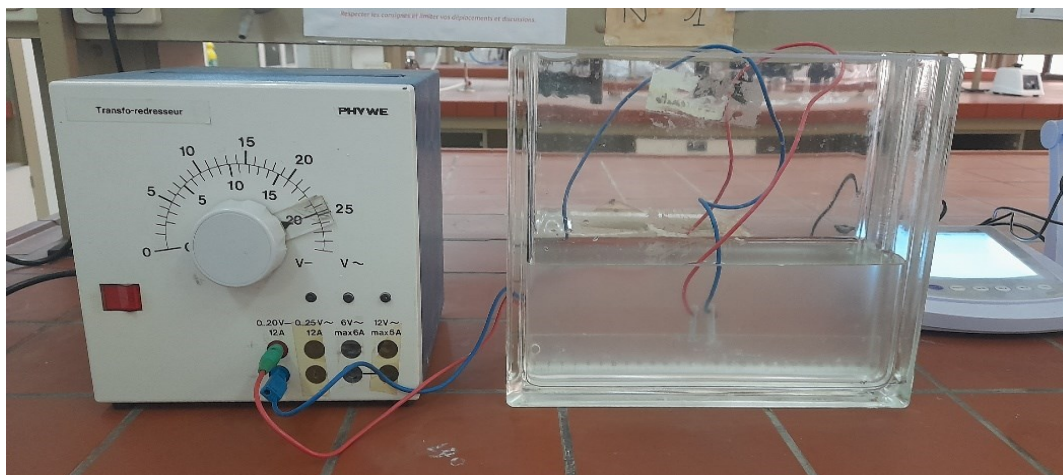


Figure 09 : Unité expérimentale de l'EC-EF

➤ **Mode opératoire :**

Une fois que l'unité d'EC-EF est préparée, on verse dans la cellule électrolytique un volume de 2 L d'eau usée synthétique à traiter (gel de silice ou solution de levure de boulangerie) puis on met en marche le générateur de courant. Tout au long des traitements (maximum 60 min) des prélèvements (5 mL) sont réalisés à une distance de 4,5 cm au-dessus du fond du réacteur. Cette opération est effectuée à des intervalles de temps réguliers de 5 min allant de 0 (temps zéro avant le démarrage du procédé) à 50-60 min. Les essais sont effectués dans des conditions initiales stables, à savoir un pH de la solution d'environ (7 ± 0.17), un voltage de 20 V et une conductivité (k) de 1 ± 0.02 mS/cm ($1000 \mu\text{S/cm}$) (Adjeroudet *al.*, 2015).

2.Traitement d'une solution trouble de gel de silice :

Afin de simuler des rejets industriels troubles une eau usée synthétique est préparée avec un volume total de 2 L d'eau de robinet (pour couvrir efficacement les électrodes dans l'unité EC-EF) à raison de différentes concentrations (p/v) de départ selon les traitements réalisés (250, 350, et 500ppm ou mg/L) de gel de silice (Woelm Pharma, Allemagne) (Merzouket *al.*, 2009) (Figure 10).

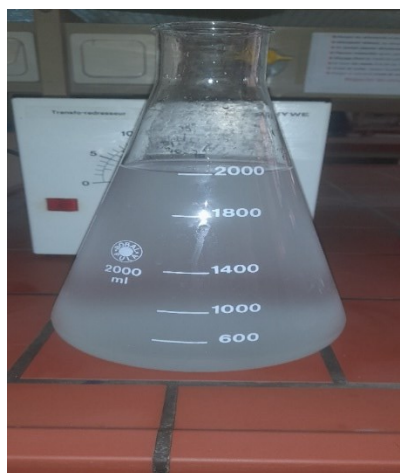


Figure 10 : Eau trouble synthétique préparée par gel de silice

Le pH et la conductivité des échantillons prélevés à différents intervalles de temps, sont mesurés en utilisant respectivement un pH-mètre EC 211 et un conductimètre EC 215 (instruments Hanna, Italie).

3. Optimisation du procédé d'EC-EF :

3.1. Effet du mucilage sur l'EC-EF :

Pour voir l'effet du mucilage extrait des cladodes d'OFI sur l'efficacité de traitement du gel de silice sur le procédé d'EC-EF, différentes quantités de mucilage (5, 10 et 15 mg) ont été préparées et la quantité désirée est ajoutée au début du procédé. La quantité désirée du mucilage est dissoute au préalable dans une solution de NaOH (1 M) afin de le solubiliser avant son ajout en solution.

3.2. Effet du pH et de la conductivité :

Après l'étude de l'effet du mucilage, deux paramètres ont été modifiés afin d'optimiser davantage le procédé d'EC-EF. Le pH et la conductivité de la solution de gel de silice sont variés à des valeurs de 5.5, 7 et 8.5 et de 1000, 1500 et 2000 mS/cm, respectivement, avant le lancement du traitement à l'EC-EF.

4. Mesure de la turbidité :

La turbidité des échantillons a été déterminée par spectrophotomètre UV-VIS (Spectro scan 50, japon). La concentration du gel de silice a été estimée à partir d'une longueur d'onde maximale (λ_{max}) de 740 nm et les résultats des essais sont exprimés en ppm (ou mg/L) à l'aide d'une courbe d'étalonnage du gel de silice (**Annexe 02**).

Le calcul de l'efficacité d'élimination de la turbidité (TR%) après traitement électrochimique sans et avec mucilage a été effectué en utilisant la formule suivante :

$$TR(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100$$

C_0 : Concentration du gel de silice en (mg/L) avant lancement du procédé EC-EF.

C : Concentrations du gel de silice en (mg/L) à différents temps du traitement (temps de Prélèvements).

5. Traitement d'une solution trouble de levure de Boulangerie :

Une solution de la levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae* à une concentration de 1500 NTU a été préparée dans un volume total de 2 L d'eau de robinet et traitée suivant le même protocole de base décrit en section 2.1 pour le gel de silice, excepté que les volumes prélevés à différents intervalles de temps sont de 10 mL. Cette partie microbiologique du travail a pour objectif d'analyser l'effet antimicrobien du mucilage de cladodes de l'OFI et de déterminer son effet sur l'efficacité du procédé d'EC-EF. La concentration initiale de 1500 NTU a été choisie pour se rapprocher au maximum de la turbidité de certains effluent industriels de fabrication de pain (Koby et Delipinar, 2008 ; Arbabi *et al.*, 2023). Cette concentration est l'équivalent de 500 ppm sachant qu'un 1 ppm = 3 NTU.

6. Optimisation du procédé d'EC-EF :

6.1. Effet du mucilage sur le procédé EC-EF :

Pour voir l'effet du mucilage extrait des cladodes d'OFI sur l'efficacité de traitement de la solution de levure de boulangerie sur le procédé d'EC-EF, différentes quantités de mucilage (2.5, 5, 10 et 15 mg) ont été préparées et la quantité désirée est ajoutée au début du procédé. Comme cité précédemment, la quantité désirée du mucilage est dissoute au préalable dans une solution de NaOH (1 M) afin de le solubiliser et de l'homogénéiser avant son ajout en solution.

6.2. Effet du pH et de la conductivité:

Après l'étude de l'effet du mucilage, deux paramètres ont été modifiés afin d'optimiser d'avantage le procédé d'EC-EF. Le pH et la conductivité de la solution de levure de boulangerie sont variés à des valeurs de 5.5, 7 et 8.5 et de 1000, 1500, 2000 et 3000 mS/cm, respectivement, avant le lancement du traitement à l'EC-EF.

7. Comptage cellulaire:

Un comptage cellulaire de la solution de levure de boulangerie traitée avec et sans mucilage a été effectué par cellule de Malassez (profondeur 0.20mm) (Marienfeld, Allemagne)

afin de voir l'effet du mucilage sur la réduction du nombre de cellule de levure en solution. Le traitement EC-EF de la levure sans mucilage (le test blanc) a été comparé au procédé avec 10 mg de mucilage, pH 7 et conductivité de 1500 mS/cm (procédé après optimisation).

Une goutte de solutions prélevés (10 mL), pendant différents intervalles de temps (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 min), est placée au niveau de la cellule de Malassez et recouverte d'une lamelle. Le comptage est ensuite effectué par observation au microscope optique (objectif 10 et 40). Des photographies des observations faites sont prises afin de comparer les deux traitements réalisés sans et avec mucilage.

Aussi, la densité ou concentration cellulaire des deux expériences comparées est calculée selon la formule suivante :

$$N = \frac{n}{v} \cdot Fd$$

N = Concentration cellulaire (nombre de cellules par unité de volume) (cellules/mL)

n = Nombre de cellules comptées

v = volume d'une unité de comptage, un rectangle ou unité de comptage contient 0,01 mm³ (0,01 µL) d'échantillon

Fd = facteur de dilution

8. Mesure de la turbidité :

Pour cette partie du travail, la turbidité des échantillons a été déterminée à l'aide d'un turbidimètre (HI88713-Hanna Instrument, USA). Les valeurs mesurées des échantillons de levure de boulangerie sont directement exprimées en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

Le calcul de l'efficacité d'élimination de la turbidité (TR%) après traitement électrochimique sans et avec mucilage a été effectué en utilisant la même formule précédemment citée pour les expériences sur gel de silice (TR%).

III. Analyse statistique :

Une analyse descriptive des résultats est réalisée à l'aide du logiciel Microsoft office Excel 2010, afin de déterminer les moyennes et les écarts types. Une analyse de la variance (ANOVA) est appliquée à l'aide du logiciel JMP (procès version 10, SAS, USA) afin de mettre en évidence les différences significatives de rendement d'extraction du mucilage. Le degré de signification des données est pris à la probabilité $p < 0,05$.

CHAPITRE II

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. Matière végétale :

I.1. Test d'humidité :

Les cladodes d'OFI de Merdj-Ouamane renferment un taux d'humidité de 94,05 %, à partir de cette valeur nous avons pu déduire le pourcentage de la matière sèche qui a été estimé à 5.95 %. La valeur obtenue est proche à celle trouvée par (Valente *et al.*, 2010) qui était de 95 %. En général, 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.

I.2. Viscosité, pH et conductivité :

Les valeurs des paramètres physico-chimiques mesurées concernant la viscosité, du pH, et de la conductivité correspondent à $0,087 \pm 0,01$ Pa.s (à 21.6°C), 4,82, et 3,58 mS/cm, respectivement.

La viscosité est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement. Plus la viscosité est élevée, plus le fluide s'écoule lentement et résiste à la déformation. Cette résistance est aussi mesurée par le paramètre de rhéologie qu'on pourrait faire en dehors de l'université pour compléter cette mesure. Felkai Haddache *et al.*, (2015) ont déterminé une rhéologie du mucilage avec les mêmes conditions d'extraction par microondes. Toutefois, en général, une viscosité de 0,087 Pa.s est plus élevée que celle de l'eau, mais beaucoup plus faible que celle d'une huile à moteur ou du miel. Par conséquent, on peut la considérer comme une viscosité relativement faible, bien qu'elle soit plus élevée que celle de fluides très peu visqueux comme l'eau (Viscosité de l'eau : environ (0,001 Pa.s à 20 °C, celle d'une huile moteur : entre 0,1 à 1 Pa.s à 20 °C selon la formulation, et celle du miel : environ 2 à 10 Pa.s à température ambiante) (Fox *et al.*, 2003).

La pectine est partiellement responsable de la viscosité de la pulpe de la figue de Barbarie (c'est un élément positif pour la production de jus, marmelades et confitures). Sa teneur dans la pulpe de la figue de barbarie est entre (0,17-0,21%) (Saenz., 2000). Sachant que les polysaccharides constituent environ 30 à 50 % de la composition de la raquette, la viscosité de la raquette est certainement liée à celle des sucres (mucilage) qui la compose. Il est à noter que la viscosité dépend de plusieurs paramètres comme l'ionisation des polysaccharides (poly-électrolytes) des cladodes d'OFI, du pH et de la température (Majdoub *et al.*, 2001).

Les valeurs du pH et de la conductivité peuvent être comparées à celles d'autres travaux dont les raquettes ont été collectées dans une région proche de Bjéaia (Ziama Mansouriah) ; à savoir 6.14 et 1.75 mS/cm, respectivement (Adjroud *et al.*, 2020 ; Adjroud, 2017). Cela dit,

si la valeur du pH se rapproche de celle que nous avons trouvé (4.82), celle de la conductivité est différente. Généralement ces changements sont dus aux différences de la nature du sol, de la localisation géographique et la composition exacte des plantes (**Rana et al., 2021**).

I.3. Rendement d'extraction:

L'extraction conventionnelle (EC) a montré un rendement de 45.21 ± 0.65 % ($t = 80 \pm 0.5$ C°, pendant 180 min). Par contre le rendement de l'extraction assistée aux microondes (EAM) était égale à $50,75 \pm 0.82$ % (la température des solutions après extraction était entre 80-90 C°). Il été observé que le mucilage extrait par EAM était plus facile à précipiter et à récupérer que celui de l'EC. Les méthodes d'extraction innovantes ont été mise en place afin d'améliorer les rendement des extraction de molécules bioactives des plantes par rapport aux rendements obtenus par les méthodes traditionnelles (**Chemat et al., 2017 ; Dahmoune et al., 2013**) Cela dit, nous remarquons selon nos les deux rendements des extraits de mucilage obtenus sont quasiment identiques mais ils ont été obtenus en des temps d'extractions significativement importants : près de 3 h en EC et 3 minutes 50 secondes par EAM). Le temps est très important pour des applications à grande échelle car cela permet un gain économique considérable (**Chemat et al., 2017**).

L'EAM permet de libérer plus de molécules d'intérêt comme les protéines et les hydrates de carbone que le EC. Dans le travail de **Felkai-Haddache et al., (2016)**, l'extraction assistée par microondes a été plus efficace que l'extraction conventionnelle du mucilage des cladodes d'OFI (avec un temps de 3 min au lieu de 3h). Dans ce travail, l'EAM qui est plus efficace que l'EC est privilégiée en raison de son temps d'extraction plus court, sa qualité d'extractibilité, et sa facilité de réalisation.

Ainsi, après cette comparaison des rendements d'extraction, nous avons opté pour l'extrait issu de l'extraction innovante (EAM) pour l'aspect pratique et la rapidité d'exécution, afin de réaliser la suite des expériences sur le traitement de l'eau.

I.4. Dosage des sucres :

La composition moyenne du sucre dans le mucilage du figuier de Barbarie est composée de 42% d'arabinose, 22% de xylose, 21% de galactose, 8% d'acide galacturonique et 7% de rhamnose. Selon **Saenz et al., (2004) et Cardenas et al., (2008)**, le mucilage est constitué majoritairement de 55 sucres neutres, principalement du L-arabinose, D-galactose, L-rhamnose et du D-xylose, ainsi que d'acides polygalacturoniques qui jouent un rôle dans le processus de coagulation, le reste des sucres est composé de sucres réducteurs. Il est donc important de doser ses sucres, en majorité neutres

Le dosage des sucres totaux (neutres) des cladodes d'OFI réalisé par la méthode à l'anthrone, a donné un résultat de $289,04 \pm 0,11 \mu\text{g}/\text{mg}$. Une valeur plus importante a été retrouvée dans le travail d'**Adjroud *et al.*, (2020)** équivalente à $544,71 \pm 4,00 \mu\text{g}/\text{mg}$. Toutefois, notre valeur est plus élevée que celle de **Felkai Haddache *et al.*, (2015)** qui était de $164,00 \pm 0,57 \mu\text{g}/\text{mg}$. Cela peut être expliqué par la diversité des cladodes étudiées, leur nature et leur origine, ainsi que leur lieu de récolte et les facteurs naturels qui pourraient les influencer, sans oublier la procédure d'extraction et l'impact de la concentration du solvant d'extraction.

II. Traitement de l'eau par EC-EF :

II.1. Traitement d'une solution soluble avec gel de silice :

Nous avons d'abord fait une comparaison de traitement par le procédé d'EC-EF d'eaux troubles de gel de silice à différentes concentrations (250, 350 et 500 ppm) afin de simuler des rejets industriels turbides. Selon la **Figure 11**, nous constatons une diminution plus au moins progressive de la turbidité en fonction du temps pour les trois essais.

Cela dit, nous avons choisi de travailler sur une eau de gel de silice de 250 ppm comme concentration de l'eau à traiter de départ car la diminution de la turbidité est la plus progressive en fonction du temps n'atteignant pas de faibles valeurs après 50 min de traitement ce qui permettra de voir l'effet du mucilage. D'un autre côté, cette valeur se rapproche de celle de plusieurs travaux (**Adjeroud, 2015 ; Adjroud *et al.*, 2018, Adjeorud *et al.*, 2020**), ce qui nous permettra de comparer.

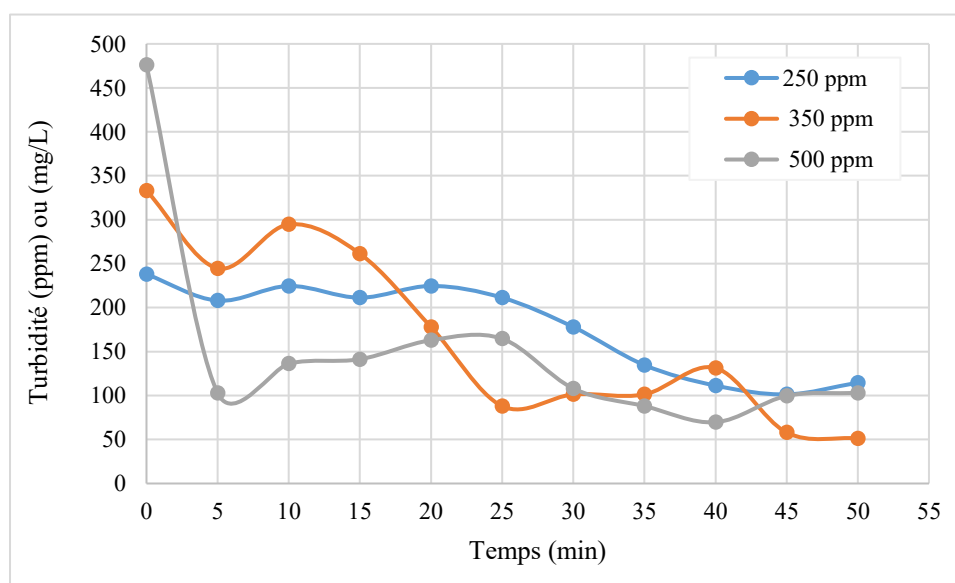


Figure 11 : Traitement d'une solution de gel de silice à différentes turbidités par EC-EF (pH 7, Conductivité 1 ms/cm, voltage 20 V).

II.1.1-L'effet de mucilage sur le procédé EC-EF :

Afin d'optimiser le procédé d'EC-EF, nous avons testé l'effet du mucilage de l'OFI sur l'amélioration de l'efficacité de traitement. La **Figure 11** présente l'effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF (Gel de silice à 250 ppm, pH 7, Conductivité 1 mS/cm, voltage 20 V).

Trois quantités de mucilage sont testées : 5, 10 et 15 mg, et ajoutées au début du procédé (temps zéro). Ces quantités correspondent aux concentrations de 2.5, 5 et 7.5 mg/mL, respectivement en considérant les 2 L d'eau traité.

Selon la **Figure 12**, nous remarquons que l'ajout de 15 mg de mucilage augmente encore plus la turbidité (de 0 à 20 min) par rapport à l'essai sans mucilage, toutefois les deux valeurs de 5 et de 10 mg de mucilage améliorent l'efficacité du traitement. On constate donc clairement que la quantité de 10 mg de mucilage permet la meilleure réduction de la turbidité par rapport aux autres quantités testées. L'efficacité d'élimination du trouble (TR%) est égale à 76.45 % (**Tableau IX**). Ce résultat correspondant au même résultat retrouvé par **Adjroud et al., (2020)** lors du traitement EC-EF du gel de silice par mucilage extrait par Ultrasons. Un volume de 0.3 mL de jus de raquette a été efficace pour le même traitement (**Adjeroud et al., 2015**). De la même façon, **Djerroud et al., (2018)** ont trouvé que l'efficacité maximale du procédé d'EC-EF a été observée avec 2.5 mg/L de mucilage avec une élimination de la turbidité de 85.5 %. Cependant, **Fedala et al., (2015)** ont trouvé que 0.2 mg/L permet l'abattement de la turbidité avec une efficacité de 89%. Ensuite, elle reste constante pour toutes les concentrations de mucilage testées à partir de 25 min. Par contre, 60 mg de mucilage ont été efficace pour l'élimination de 100 % de cuivre par EC-EF.

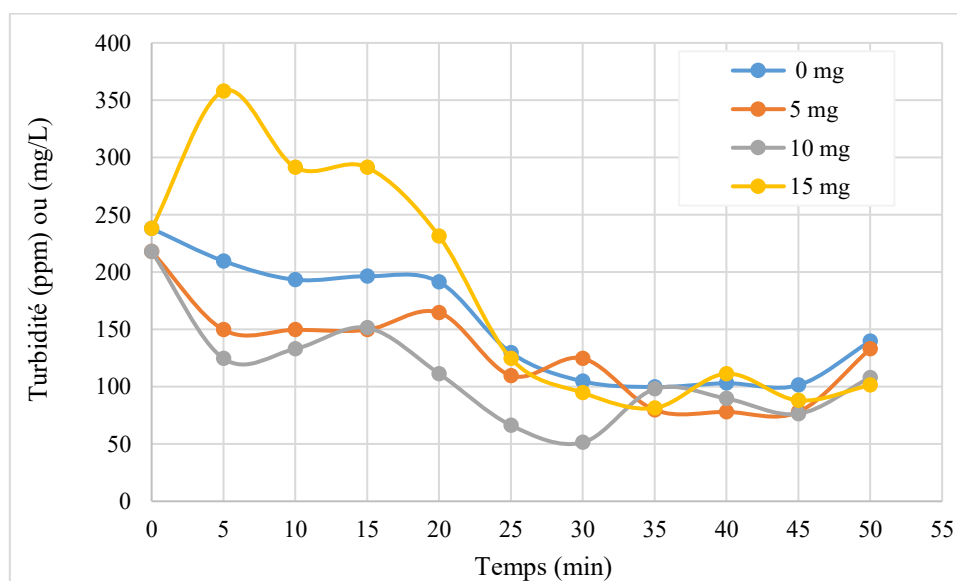


Figure 12 : Effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF
(Gel de silice à 250 ppm, pH 7, Conductivité 1000 ms/cm, voltage 20V).

Ainsi dans notre cas la concentration de 5 mg/L est considérée comme la concentration idéale pour améliorer l'efficacité de l'EC-EF. Cela représente un avantage car de petites quantités du bio-coagulant suffisent pour améliorer le rendement, en plus du fait que la plante est disponible et peut être facilement cultivée et pousse de manière sauvage sans exigences particulières de culture (Chougui *et al.*, 2015).

Tableaux IX : Taux d'élimination de la turbidité (TR%) de solution de gel de silice sans et avec mucilage 10 mg dans la procédure EC-EF.

Les valeurs avec les lettres différentes (a, b, c, d, e, f) sont significativement différentes (Tukey, $p < 0,05$) pour chaque type de traitement.

Temps de traitement (min)	TR% sans mucilage	TR % avec 10 mg d mucilage
0	$0 \pm 0,00^d$	$0 \pm 0,00^f$
5	$11,90 \pm 0,49^{dc}$	$42,81 \pm 6,48^{ed}$
10	$18,77 \pm 9,31^c$	$38,99 \pm 2,70^{ed}$
15	$17,51 \pm 4,4^{dc}$	$30,58 \pm 8,64^e$
20	$19,61 \pm 3,9^c$	$48,93 \pm 7,56^{dc}$
25	$45,78 \pm 1,30^{ab}$	$69,57 \pm 1,62^{ba}$
30	$56,02 \pm 1,98^{ab}$	$76,45 \pm 8,65^a$
35	$58,13 \pm 0,49^a$	$55,04 \pm 1,07^{dcb}$
40	$56,72 \pm 3,46^a$	$58,87 \pm 1,62^{dcba}$
45	$57,42 \pm 3,95^a$	$64,98 \pm 2,69^{cba}$
50	$41,32 \pm 2,46^b$	$50,45 \pm 6,48^{dcb}$

Si l'on compare le pourcentage de l'efficacité de l'élimination de la turbidité pour les des essais (Tableau IX), nous remarquons toutes les valeurs sont meilleures en présence du mucilage. L'efficacité d'élimination du trouble (TR%) est égale à la valeur maximale à 30 min de 76.45 % avec 10 mg mucilage par rapport à 56.02 % du test sans mucilage, ainsi le mucilage améliore le rendement de 20.43 %. Une amélioration de 15 % est constaté dans le travail d'Adjeroud *et al.*, (2015). L'analyse statistique permet de confirmer les différences significatives, les lettres indiquées sont différentes.

La diminution de la turbidité dans le procédé EC-EF sans ou avec mucilage est expliquée par la dissolution des électrodes en aluminium au passage du courant électrique (principe du procédé EC-EF expliqué en Bibliographie). Les espèces ioniques complexes (espèces coagulées

et hydroxydes métalliques) jouent le rôle de coagulants, qui s'adsorbent sur particules en suspension (gel de silice) et neutralisent ainsi les particules colloïdales ce qui conduit à la déstabilisation de l'émulsion et à la formation d'agrégats, puis les floccs deviennent facilement éliminables et flottent par interaction avec les bulles d'hydrogènes formées par la cathode (**Chen *et al.*, 2000 ; Kobyia *et al.*, 2006**).

Concernant l'action du mucilage, le mucilage des cladodes est connu pour réduire la turbidité et interagir avec les solides en suspension (**Adjeroud *et al.*, 2015**).

Miller *et al.*, (2008) suggère que l'acide galacturonique, un des composants du mucilage de l'OFI pourrait être le composant actif qui fournit une activité de coagulation par un mécanisme qui fonctionne principalement par adsorption, d'autres sucres (galactose et rhamnose) testés séparément n'ont pas montré d'activité de coagulation. L'amélioration du taux d'abattement par le mucilage est peut-être liée à une augmentation des sites de liaison à la surface du bio-coagulant avec le gel de silice ce qui favorisent la formation des floccs (**Barka *et al.*, 2011**).

Une étude portée sur le mucilage de l'Okra (*Abelmoschus esculentus*), prouve que la présence de groupes hydroxyle (-OH) sert de site actif pour adsorption des particules colloïdales au mucilage (**Freitas *et al.*, 2015**).

Une autre étude plus récente rapportée par (**Adjeroud *et al.*, 2018**) que les particules de mucilage pourraient interagir directement avec les polluants (cuivre) en solution, grâce notamment à la structure poreuse du mucilage, avant leur adsorption sur les hydroxydes d'aluminium. D'un autre côté, l'adsorption des molécules en suspension (gel de silice) sur la surface de l'espèce d'aluminium pourrait faciliter leur attachement au mucilage d'OFI par conséquent ceci augmenterait l'efficacité de la coagulation ainsi que l'élimination de la turbidité. Dans les deux cas, de petits floccs se forment et flottent à la surface.

On remarque aussi que l'augmentation supplémentaire des concentrations de mucilage au-delà de 10 mg n'améliore pas davantage le taux d'abattement (**Figure 12**) avec une stabilité relative jusqu'à la fin du traitement. Ceci est probablement due à l'accumulation des polymères de mucilage empêchant l'interaction avec le gel de silice et à la saturation des sites d'interaction (**Adjeroud *et al.*, 2015**).

II.1.2- Effet de pH sur EC-EF :

Pour l'optimisation du pH, nous avons comparé l'EC-EF réalisée précédemment à pH 7 avec des essais à pH 5.5 et 8.5 en présence de 10 mg de mucilage, vu que c'était le premier paramètre optimisé et la meilleure quantité de mucilage ayant un effet positif sur le procédé. La

modification du pH initial est réalisée soit par l'addition de l'acide chlorhydrique (HCL) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH).

Le type, la taille, la forme et la distance entre les électrodes, la densité de courant, la conductivité et la résistance, le pH et le temps de réaction sont des paramètres qui influencent l'efficacité de l'EC-EF ou le type et la quantité de coagulant-floculant (**Alinsafi et al., 2005 ; Merzouk et al., 2009 ; Djerroud et al., 2023 ; Attour et al., 2014 ; Mao et al., 2023 ; Boinpally et al., 2023**). Le pH est connu comme l'un des principaux facteurs qui contrôle la performance de l'électrocoagulation–électroflottation (**Parsa et al., 2011 ; Secula et al., 2012**). À partir de la **Figure 13** qui représente l'effet du pH sur le procédé d'EC-EF assisté par 10 mg de mucilage à 250 ppm de gel de silice, nous remarquons que la variation du pH (de 5.5 et 8.5) n'a aucun effet sur l'amélioration des rendements du procédé EC-EF en présence de 10 mg de mucilage.

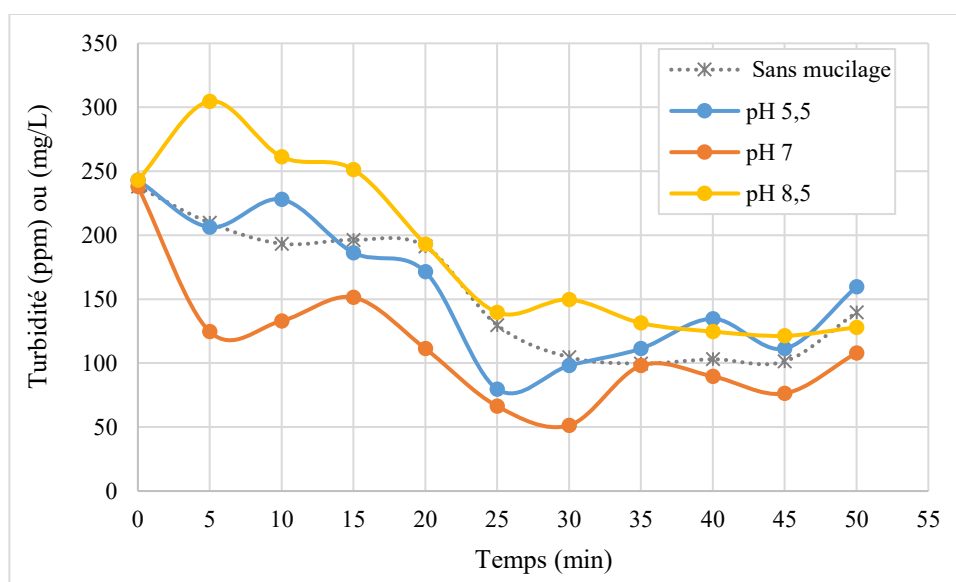


Figure 13 : Effet du pH sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Gel de silice à 250 ppm, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$, voltage 20 V).
Le test à blanc (sans ajout du mucilage, pH 7)

Ce résultat est différent d'autres résultats retrouvés en littérature. **Djerroud et al., (2018)** ont obtenu une élimination maximale de la turbidité avec 88.39% à pH 9. Dans un traitement EC-EF sans l'ajout de mucilage, l'élimination maximale de la turbidité a été observée à pH 8 (**Merzouk et al., 2009**), tandis que celui assisté par le jus de cladode d'OFI, l'efficacité maximale d'élimination de la turbidité du gel de silice est atteinte à pH 8.7 (**Adjerroud et al., 2015**). Cela pourrait être dus à des erreurs de manipulations ou à des différences techniques rencontrées lors de la réalisation des expériences.

Par ailleurs, tout au long des essais réalisés, nous avons observé que les valeurs du pH tendent vers la neutralité quel que soit le pH initial de la solution (Annexe 03) cela a été

retrouvés aussi dans plusieurs études de l'EC-EF et s'explique par un équilibre entre la production et la consommation d' $\text{OH}^\cdot$, évitant de fortes variations de pH (Chen, 2004).

II.1.3- Effet de la conductivité sur EC-EF :

La conductivité d'une solution est une mesure de sa capacité à conduire le courant électrique en raison de la présence d'ions dissous dans la solution.

Nous avons varié la conductivité en travaillant sur deux valeurs supplémentaires (1500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) différentes de celle testée en premier de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les expériences sont réalisées à pH 7 et en présence de 10 mg de mucilage. La conductivité du modèle d'eau usée a été ajustée en ajoutant des volumes appropriés de solution de NaCl (1 M).

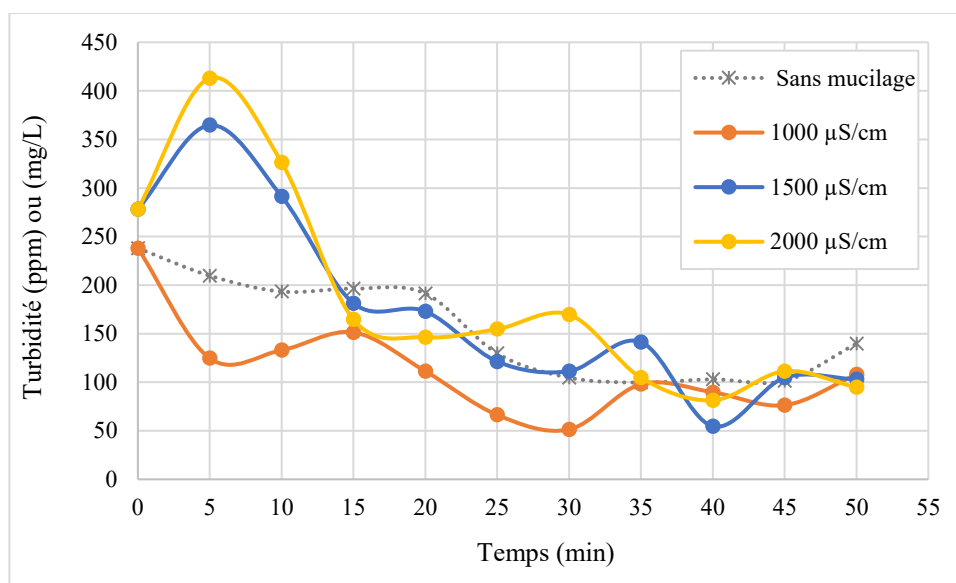


Figure 14 : Effet de la conductivité sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Gel de silice à 250 ppm, pH 7, voltage 20 V)
Le test blanc (sans ajout du mucilage, pH 7) est représenté en pointillés

La **Figure 14** représente l'effet de conductivité sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Gel de silice à 250 ppm, pH 7, voltage 20 V). La diminution maximale de la turbidité est obtenue avec la conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ comme mentionné auparavant (**Figure 13**: effet du mucilage), et aucun effet positif n'est observé sur l'EC-EF avec les valeurs de 1500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est contraire aux travaux d'Adjero *et al.*, (2015) et de Djerrou *et al.*, (2018) qui trouvent des valeurs de 2.7 et 2.5 mS/cm, respectivement comme valeurs de conductivité idéales ayant amélioré les rendements des procédés d'EC-EF. Cette différence peut être attribuée à la nature chimique de mucilage qui peut modifier la composition ionique de l'eau en éliminant certains ions où on a ajouté d'autres, à son interaction avec les contaminants, aux effets de la purification, ainsi qu'aux conditions environnementales sous lesquelles le traitement est effectué.

L'augmentation de la turbidité notée pour les essais de 1500 et 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en début de traitement (du temps 0 à 15 min), s'explique par l'ajout important du sel de NaCl.

Les effets exacts du pH et de la conductivité sur le procédé d'EC-EF sont discutés ci-dessous dans la deuxième partie expérimentale concernant la levure de boulangerie.

II.2. Traitement d'une solution trouble de levure de Boulangerie (*Saccharomyces cerevisiae*) :

Dans ce volet, nous nous sommes intéressés à traiter une eau trouble simulée composée de levure de boulangerie *Saccharomyces cerevisiae*, afin de tester l'efficacité du procédé d'EC-EF sans et avec ajout du mucilage. Il est à rappeler que le procédé d'électrocoagulation sans ajout de coagulant naturel a été appliqué pour le traitement de diverses eaux notamment celles de procédés alimentaires tels que les eaux usées de distillerie et de fermentation (Yavuz, 2006 ; Kannan *et al.*, 2006), les eaux usées des laiteries (Sengil *et al.*, 2006), les eaux usées de la fabrication de chips de pommes de terre (Koby *et al.*, 2006), les eaux usées de traitement des pâtes et des biscuits (Barrear-diaz, 2006), l'élimination des composés organiques non biodégradables dans les procédés alimentaires (Barrear-diaz *et al.*, 2006), les eaux usées de l'industrie de la levure, et les eaux usées des abattoirs de volailles (Khristoskova, 1984 ; Bayramoglu *et al.*, 2006).

Récemment une étude d'Arbabi *et al.*, (2022) a été menée pour déterminer l'efficacité de l'électrocoagulation (EC-EF) à l'aide d'électrodes en aluminium pour l'élimination de la couleur, de la turbidité d'eaux usées de l'industrie de la levure de boulangerie. Cette eau se caractérise par une forte contamination par des composés organiques, une forte couleur et une turbidité de 3200 NTU composée de cellules de levures ou autres résidus de rejet. Les résultats ont montré que le procédé EC utilisant une électrode en aluminium est une méthode appropriée et efficace pour éliminer la couleur, la turbidité des eaux usées de l'industrie de la boulangerie. Un autre travail de Koby *et al.*, (2008) a visé l'élimination de trouble d'une eau polluée de l'industrie de pain à une turbidité de 2100 NTU.

Par conséquent, nous avons créé une turbidité égale à 15000 NTU par la suspension de cellules de levure de boulangerie achetée en commerce dans 2 L d'eau de robinet. Des essais sur des valeurs de turbidité plus importantes n'ont pas abouti à des résultats probants, en raison de la faible dimension des électrodes en aluminium utilisés ainsi que le volume d'eau à traiter dans notre dispositif d'EC-EF qui est un système de laboratoire non adapté à traiter des eaux usées de forte turbidité, contrairement à des systèmes pilote ou semi pilote industriels.

II.2.1-Effet de mucilage :

Pour voir l'effet du mucilage des cladodes de l'OFI sur l'EC-EF, nous avons ajouté différentes quantités de mucilage (2.5, 5, 10 et 15 mg) qui correspondent aux concentrations de 1.25, 2.5, 5 et 7.5 mg/mL. par rapport à 2 L de solution traitée.

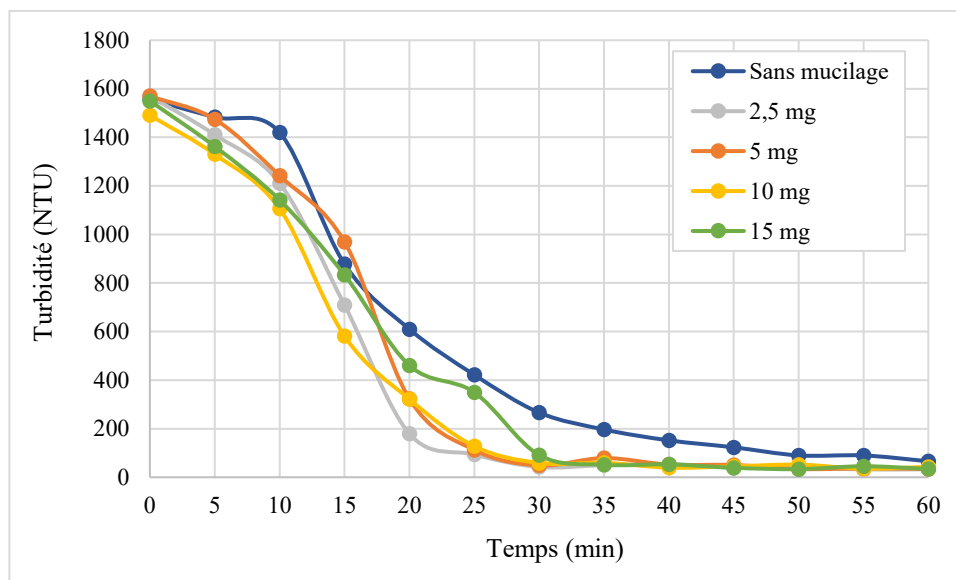


Figure 15 : Effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF
(Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, pH 7, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20 V).

La **Figure 15** ci dissous représente l'effet du mucilage sur le procédé d'EC-EF (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, pH 7, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20 V). D'après les graphes, on observe une diminution de la turbidité en fonction du temps des tous les essais réalisés. Cela dit, l'ajout des différentes concentrations de mucilage montre une meilleure diminution de la turbidité par rapport au test sans mucilage, la quantité de 10 mg qui montre la meilleure diminution de turbidité depuis le début du procédé (temps 0 min) au temps de 30 min par rapport au procédé sans mucilage.

Le mécanisme de fonctionnement du procédé d'EC-EF sur l'abattement de la turbidité en général, ainsi que l'effet du mucilage sont les mêmes qui sont expliqués plus haut pour le gel de silice (partie effet du mucilage sur le gel de silice). Toutefois, peu de travaux existent sur l'élimination de microorganismes (seules en solution) par EC-EF, et aucun n'a été retrouvé sur l'ajout de coagulant naturel pour ce type d'essais.

Nos résultats sont très proches de ceux de **Boudjema, (2014)** qui montrent que le procédé d'électrocoagulation a permis une importante réduction de 99 % de levures et de moisissures (champignons en général sans préciser les espèces) au bout de 30 min de traitement. La mort des cellules de levure a été expliquée par un effet dynamique qui est due au transfert d'énergie d'électrodes vers la membrane cytoplasmique (**Schrive *et al.*, 2006**).

Toepfl *et al.*, (2004), a associé l'effet du champ électrique à la température pour la mort de cellules vivantes par le phénomène d'interphase électrode-liquide.

Plus tard une nouvelle hypothèse plus intéressante est considérée, la mort de la cellule est associée au transfert de masse intracellulaire par la formation des pores transmembranaires par conséquent une perméabilité incontrôlable. Les levures sont des unicellulaires très fragiles au stress de milieu extérieur tel que leur exposition au champ électrique par rapport aux moisissures qui peuvent souvent former des pores de conservation à paroi épaisse (Boudjema, 2014). Dans un autre travail, la bactérie *Escherichia coli* en eau modèle d'eau de robinet a été éliminée en utilisant le procédé d'EC-EF avec électrodes en aluminium (Ricordel *et al.*, 2013). Les résultats ont montré qu'environ 97 % de la réduction a été obtenu après 35 min de traitement. Les floccs décantés d'électrocoagulation ont été analysés par diffraction des rayons X et ont montré que les floccs formés contenaient des bactéries vivantes. Cette observation suggère que l'élimination des bactéries lors de l'électrocoagulation pourrait être attribuée à une forte adhésion bactérienne sur la surface des particules d'alumine électrogénérées suivie d'une séparation des solides décantés.

Ce travail suggère aussi que la mort cellulaire par électrocoagulation était le résultat de processus concomitants de mortalité due à l'épuisement de l'oxygène et des espèces nutritives en solution et à l'adsorption sur l'alumine et sédimentation.

Le Tableau ci-dessous présente les taux d'inhibition calculés tout au long des traitements pour l'essai sans mucilage et avec 10 mg de mucilage.

Tableau X : Taux de l'élimination de la turbidité (TR%) de solution de levure de boulangerie sans et avec 10 mg de mucilage dans la procédure EC-EF(avant optimisation).
Les valeurs avec les lettres différentes (a, b, c, d, e, f et g) sont significativement différentes (Tukey, $p < 0,05$) pour chaque type de traitement.

Temps de traitement (min)	TR% sans mucilage	TR% avec 10 mg mucilage
0	$0 \pm 0,00^e$	$0 \pm 0,00^g$
5	$4,77 \pm 1,21^e$	$10,79 \pm 1,40^f$
10	$8,84 \pm 2,67^{ed}$	$25,82 \pm 1,14^e$
15	$34,60 \pm 6,83^{dc}$	$61,04 \pm 1,30^d$
20	$60,83 \pm 3,105^{cb}$	$78,43 \pm 0,77^c$
25	$72,90 \pm 14,22^{cba}$	$91,41 \pm 0,06^b$
30	$82,23 \pm 14,71^{ba}$	$96,06 \pm 0,06^a$

35	$87,37 \pm 6,10^{ba}$	$96,01 \pm 0,03^a$
40	$90,24 \pm 6,87^{ba}$	$97,34 \pm 0,05^a$
45	$92,08 \pm 5,43^a$	$97,98 \pm 0,69^a$
50	$94,22 \pm 0,53^a$	$96,56 \pm 0,01^a$
55	$94,23 \pm 3,99^a$	$97,62 \pm 0,02^a$
60	$95,76 \pm 1,75^a$	$97,13 \pm 0,05^a$

À partir de ces résultats, le mucilage de OFI améliore les taux d'élimination de la turbidité tout au long du traitement avec la plus grande valeur (97,98 %) notée au temps de 45 min. Cela dit nous remarquons déjà qu'à 15 min on a une amélioration de 26,44 % et qu'à 25 min il y a une amélioration de 18,51 % par rapport à l'essai sans mucilage. Ainsi les différences significatives sont désignées par les lettres de l'analyse statistique.

II.2.2-Effet du pH :

L'effet du pH est étudié en variant sa valeur initiale de 7 à des valeurs de 5.5 et 8.5 et. Comme observé pour le gel de silice, il n'y a pas d'effet significatif sur le procédé d'EC-EF en présence de 10 mg de mucilage (**Figure 16**).

L'efficacité d'élimination de la turbidité sans mucilage est obtenue avec une valeur de pH 7 proche de celle de **Koby et al., (2007)** où le pH 6.5 a montré le meilleur résultat. La quantité d'ions hydroxyde dans la solution augmente lorsque le pH dépasse 6,5. Ainsi, il est possible que certains ions hydroxyde aient été oxydés à l'anode. Ce processus bloque la production de la même quantité d'ions aluminium. Par conséquent, l'élimination de la turbidité a été moins efficace (**Adhoum et al., 2004**).

Cela dit dans notre cas pour le traitement de levure de boulangerie, il se pourrait que ce résultat soit attribué à la possibilité que les cellules de levure vivante soit inhibées par des pH trop acides ou trop basiques, comme illustré dans la **Figure 16**.

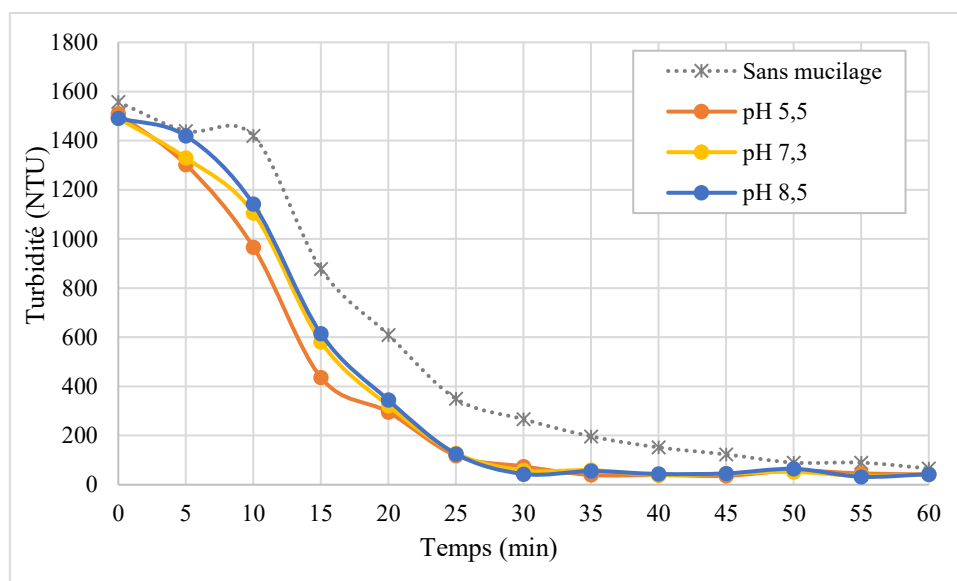


Figure 16 : Effet du pH sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, pH 7) est représenté par des pointillés

II.2.3- Effet de la conductivité :

La conductivité du modèle d'eau utilisée a été ajustée en ajoutant des volumes appropriés de solution de NaCl 1 M. Ainsi nous avons réalisés des essais d'EC-EF en présence de 10 mg de mucilage à des valeurs de conductivité de 1500, 2000 et 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Figure 17**). Nous observons à travers ce graphique que tous les essais avec mucilage améliorent l'abattement de la turbidité en général. Mais l'essai avec la conductivité de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ permet des diminutions plus importantes que les autres essais.

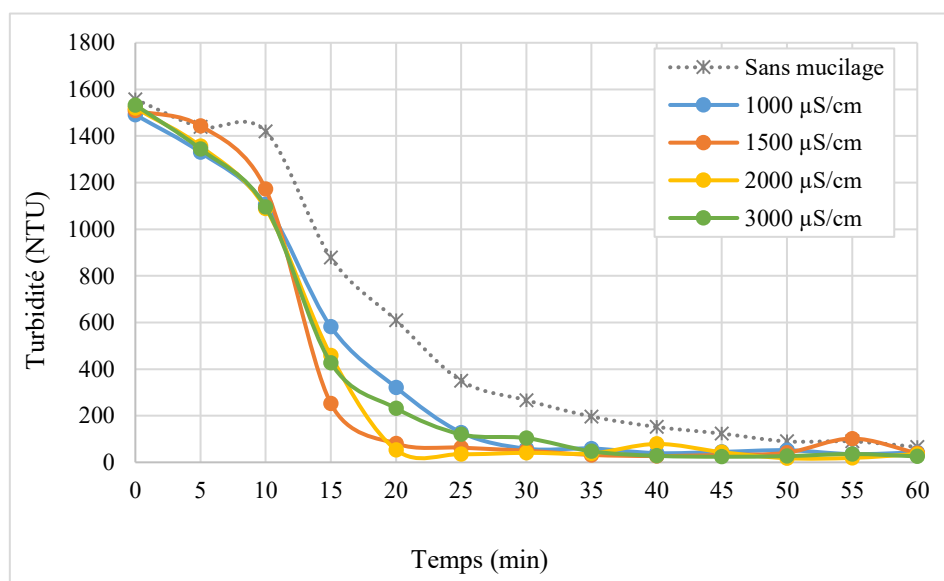


Figure 17 : Effet de la conductivité sur le procédé d'EC-EF assisté par le mucilage à 10 mg (Solution de levure de boulangerie à 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (Sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est représenté par des pointillés

Cela est confirmé par le calcul des TR% représenté en **Tableau XI**.

Tableau XI : Taux d'élimination de la turbidité (TR%) de solution de levure de boulangerie sans et avec mucilage 10 mg par dans le procédure EC-EF (après optimisation).

Les valeurs avec les lettres différentes (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j et k) sont significativement différentes (Tukey, $p < 0,05$) pour chaque type de traitement.

Temps de traitement (min)	TR% sans mucilage (1000 $\mu\text{S/cm}$)	TR% avec 10 mg de mucilage (1500 $\mu\text{S/cm}$)
0	$0 \pm 0,00^e$	$0 \pm 0,00^k$
5	$4,77 \pm 1,21^e$	$4,37 \pm 0,43^j$
10	$8,84 \pm 2,67^{ed}$	$22,33 \pm 0,26^i$
15	$34,60 \pm 6,83^{dc}$	$83,26 \pm 0,10^h$
20	$60,83 \pm 3,105^{cb}$	$94,66 \pm 0,06^f$
25	$72,90 \pm 14,22^{cba}$	$95,83 \pm 0,05^e$
30	$82,23 \pm 14,71^{ba}$	$96,68 \pm 0,24^d$
35	$87,37 \pm 6,10^{ba}$	$97,89 \pm 0,03^{ab}$
40	$90,24 \pm 6,87^{ba}$	$98,20 \pm 0,04^a$
45	$92,08 \pm 5,43^a$	$97,89 \pm 0,05^{ab}$
50	$94,22 \pm 0,53^a$	$97,25 \pm 0,38^{cd}$
55	$94,23 \pm 3,99^a$	$93,24 \pm 0,06^g$
60	$95,76 \pm 1,75^a$	$97,39 \pm 0,006^{bc}$

Selon ce tableau, la valeur la plus importante (98.20 %) notée pour le TR% est celle obtenue à 40 min, cela dit les différences en général sont significatives, et à 20 min nous observons une amélioration de 33.83 % par rapport à l'essai sans mucilage.

Les effets du pH et de la conductivité sur l'EC-EF sont expliqués ci-dessous selon la bibliographie :

En fait, les espèces d'aluminium dominantes produites au cours du procédé d'EC-EF sont différentes selon les pH des solutions à traiter (Adejrou *et al.*, 2015). A faible pH, tel que 2-3 (pH inférieur à 4), il se produit le mécanisme de précipitation, des espèces de monomères cationiques prédominent. Pour un pH plus élevé, un pH compris entre 4 et 9, l'adsorption se produit, les ions Al^{3+} et OH^- générés par les électrodes réagissent pour former diverses espèces monomères telles que $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ et des espèces polymériques telles que

$Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ qui se transforment finalement en amorphe insoluble $Al(OH)_{3(s)}$ par polymérisation/précipitation complexe cinétique. Lorsque le pH est supérieur à 10, le monomère $Al(OH)_4$ prédomine. Ainsi, la majorité des complexes d'aluminium et les précipités responsables de l'adsorption sont formés de manière optimale dans la plage de pH étudié dans ce travail. Par ailleurs, **Vial *et al.*, (2000)**, ont rapporté que les bulles d'hydrogène sont connues pour être les plus petites autour du neutre pH et donc les plus efficaces.

Dans le traitement EC-EF la conductivité a un impact sur la tension de la cellule U ainsi que sur sa consommation d'électricité (**Koby *et al.*, 2006**).

Il est bien connu que l'augmentation de la conductivité électrique entraîne une augmentation de la densité de courant à tension cellulaire constante, où une diminution de la tension cellulaire à densité de courant constante. Cependant, l'effet de la conductivité sur l'élimination de la turbidité n'est pas très simple. L'efficacité de l'élimination de la turbidité reste pratiquement inchangée dans la gamme de conductivité 1000-4000S/cm (**Bayramoglu *et al.*, 2004**).

II.3. Comptage cellulaire :

Après les différents essais d'optimisation du procédé d'EC-EF avec le mucilage, le pH et la conductivité, nous avons réalisés un comptage cellulaire par microscope optique l'aide de la cellule de Malassez. Ces comptages sont effectués sur des échantillons prélevés à différents intervalles de temps de deux essais : l'essai sans mucilage et l'essai final optimisé avec 10 mg de mucilage, pH 7 et conductivité de 1500 S/cm.

Selon les graphes des deux **Figures 18 et 19**, qui représentent respectivement le nombre de cellules compté et la concentration cellulaire déduite du comptage en fonction des temps de traitement, le nombre de cellules chute drastiquement en présence de 10 mg de mucilage dès le temps zéro jusqu'à 30 min de traitement, ce qui en accord avec la concentration cellulaire correspondante. Au temps de 10 min, le nombre de cellules de levure est de 1652 pour l'essai sans mucilage alors qu'il est de 244 pour l'essai avec 10 mg de mucilage, soit une diminution de près de 7 fois moins. Ceci correspond aux concentrations cellulaires de 5.51×10^7 et de 4.88×10^6 pour les deux essais, respectivement.

Ce résultat est dû à l'effet de l'EC-EF et celui du mucilage, expliqué en section effet du mucilage sur la solution de levure de boulangerie.

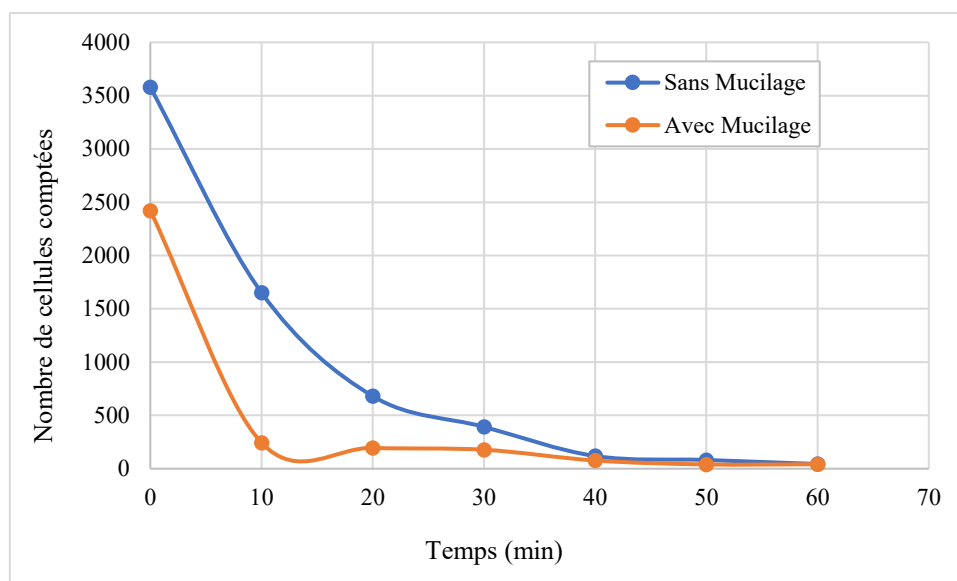


Figure 18 : Nombre de cellules comptées pendant le procédé EC-EF sans mucilage (conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et avec 10 mg de mucilage (conductivité 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Turbidité des solutions 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est représenté en pointillé.

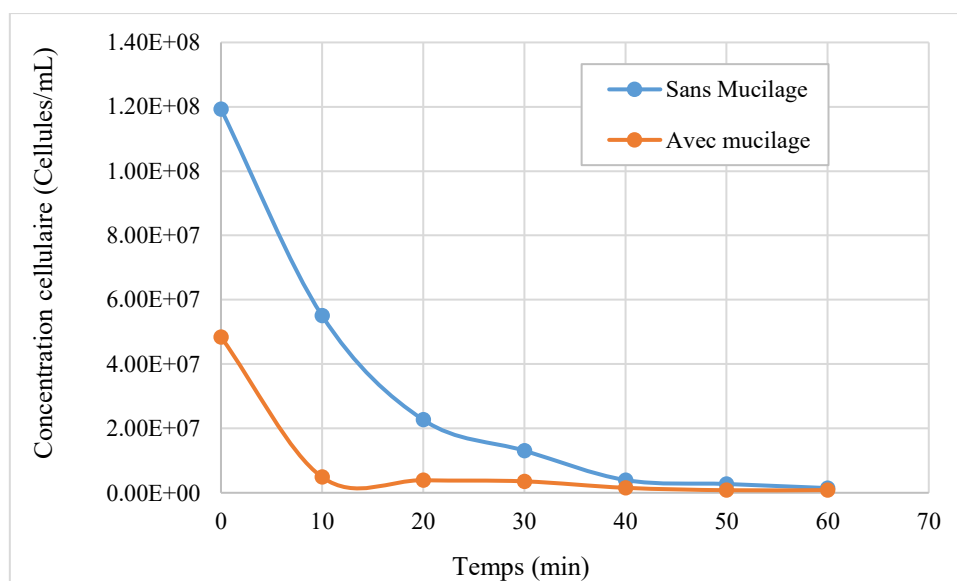
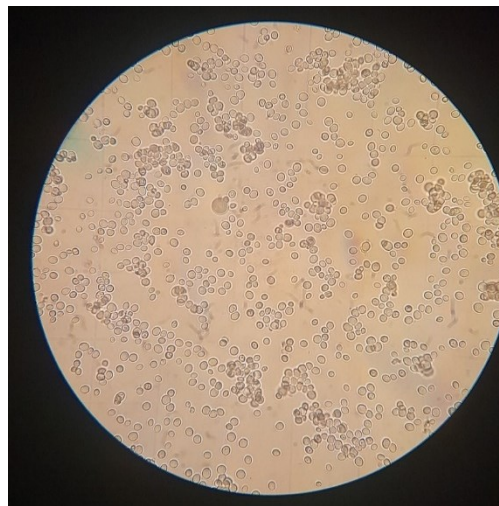
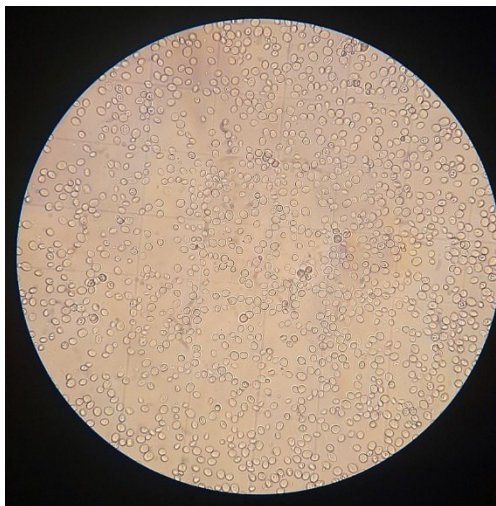
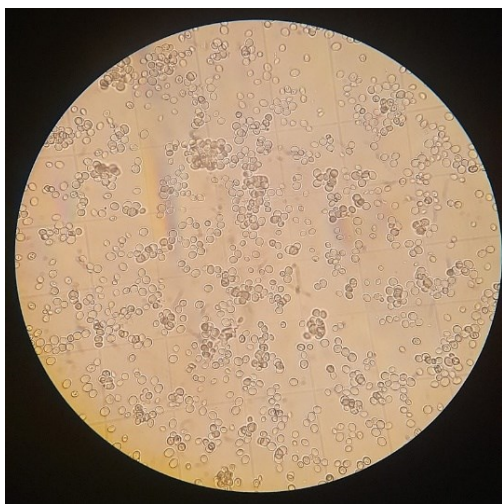
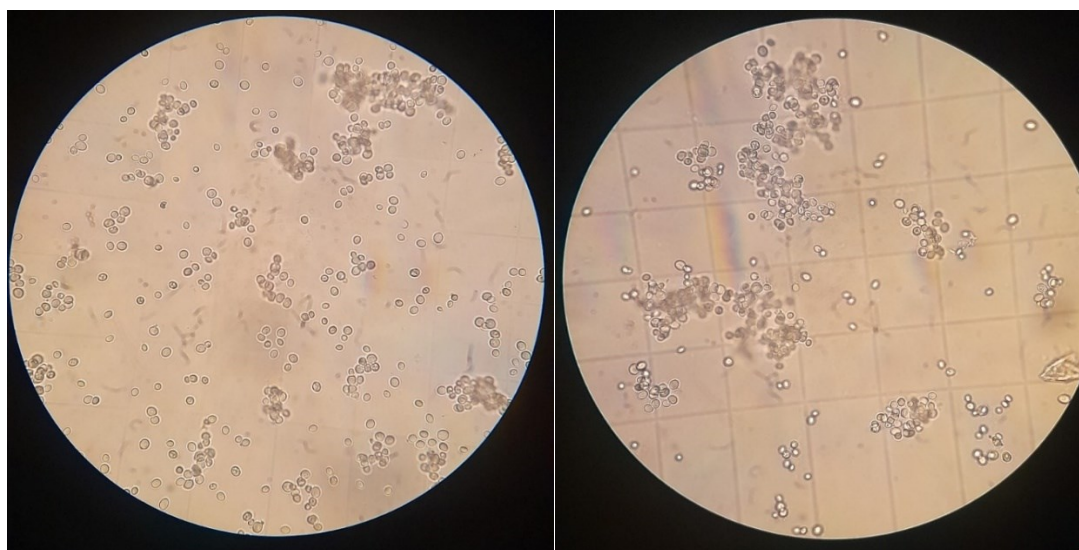
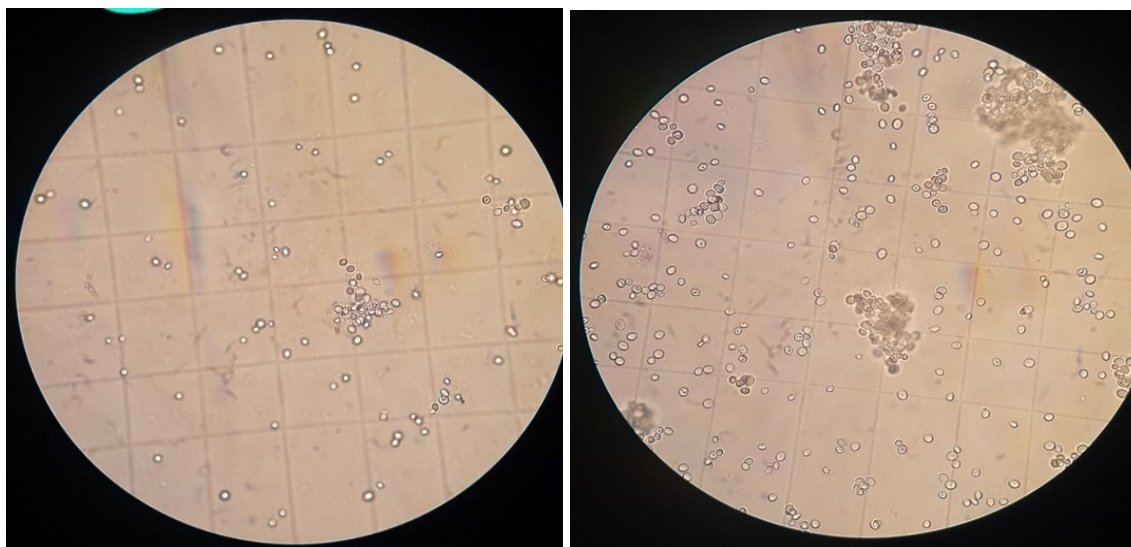
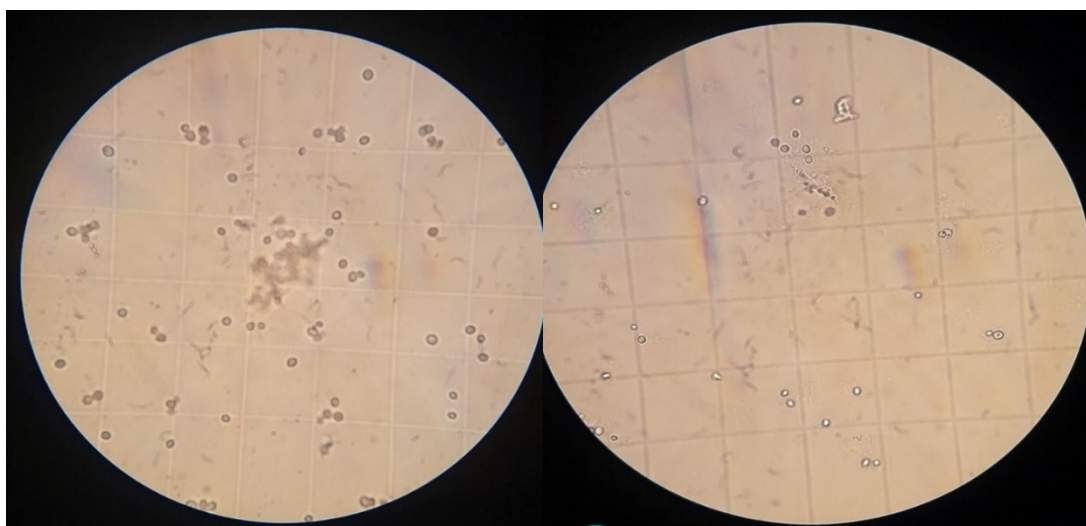


Figure 19 : Nombre de cellules par mL pendant le procédé EC-EF sans mucilage (Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et avec 10 mg de mucilage (conductivité 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Turbidité des solutions 1500 NTU, pH 7, voltage 20 V). Le test blanc (sans ajout du mucilage, Conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est représenté en pointillé.

Les observations microscopiques lors du comptage cellulaire, par cellule de Malassez, ont permis d'obtenir les photographies suivantes (**Figure 20**), cette figure représente la comparaison des observations faites lors de l'EC-EF sans et avec 10 mg de mucilage.

Traitement EC-EF sans mucilage (pH 7, conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20V)	Traitement EC-EF avec 10 mg mucilage (pH 7, conductivité 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20V)
---	---

a. 0 min**b. 10 min**

c. 20 min**d. 30 min****e. 40 min**

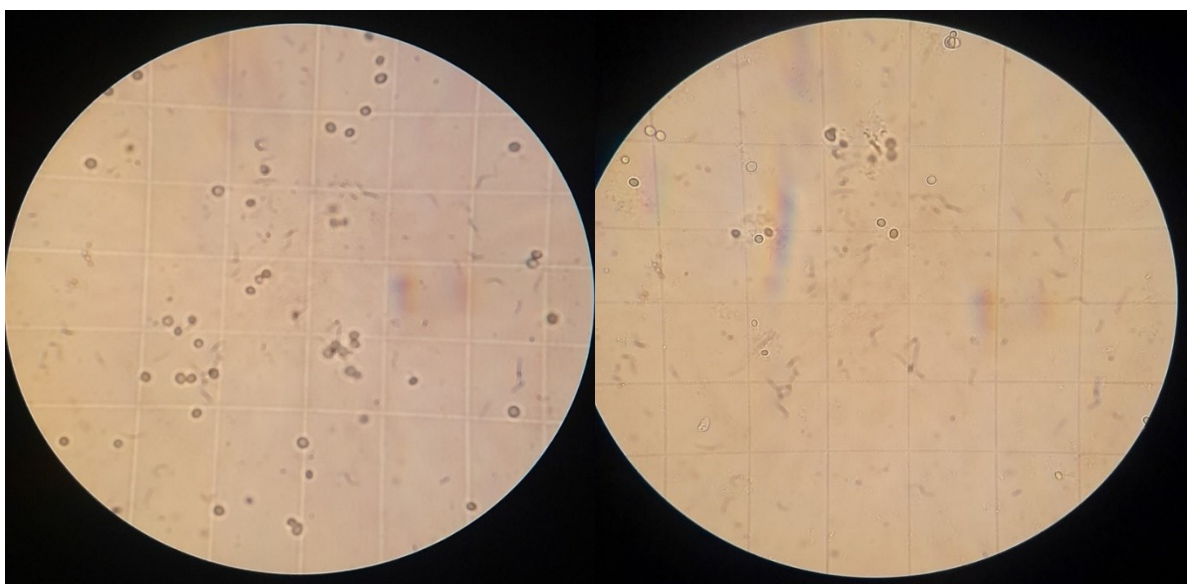
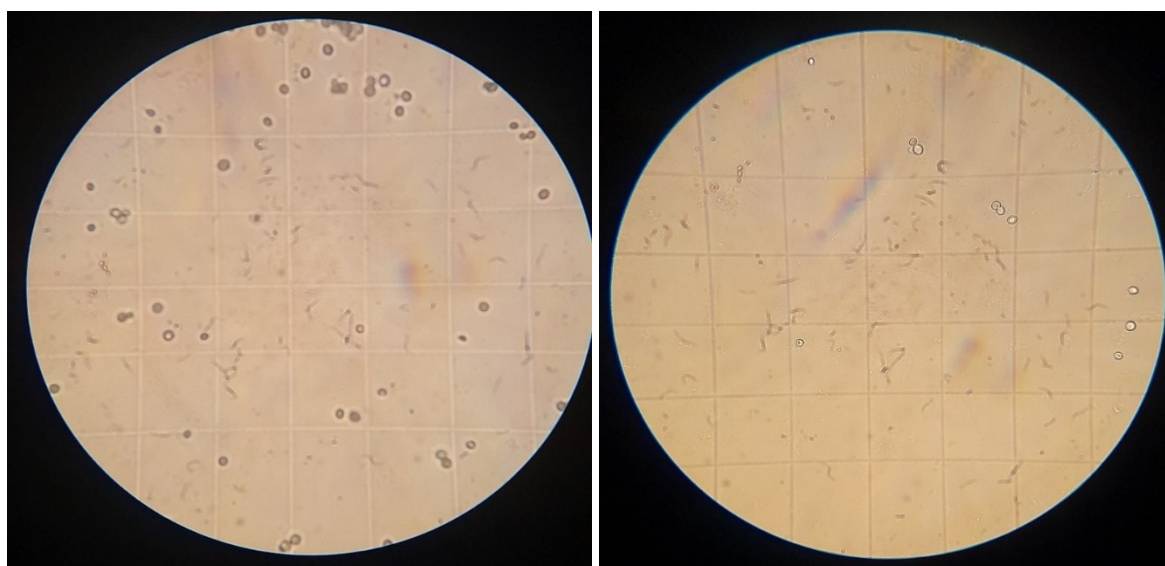
f. 50 ming. 60 min

Figure 20 : Photographies du microscope optique (x40) de l'EC-EF sans mucilage (pH 7, conductivité 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20V) (à gauche) et avec 10 mg de mucilage (pH 7, conductivité 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, voltage 20V) (à droite) à 0 min (a), 10 min (b), 20 min (c), 30 min (d), 40 min (e), 50 min (f), 60 min (g)

Selon ces photographies, nous observons un plus faible nombre de cellules dès le début du procédé (0 min) et des amas de cellules plus importants en présence du mucilage (aux temps de 10, 20 et 30 min). Les résultats du comptage cellulaire sont en général en accord avec les observations microscopiques obtenues.

II.4. Mécanisme d'action de mucilage :

Les particules de coagulant naturel notamment de mucilage d'OFI pourraient interagir par des mécanismes différents en présence de différents polluants suspendus en eau (Adjero, 2017). Selon la bibliographie (figure 21 et figure 22), ces mécanismes concernent le piégeage de particules par formation de floes et décantation ou bien par adsorption et formation de ponts.

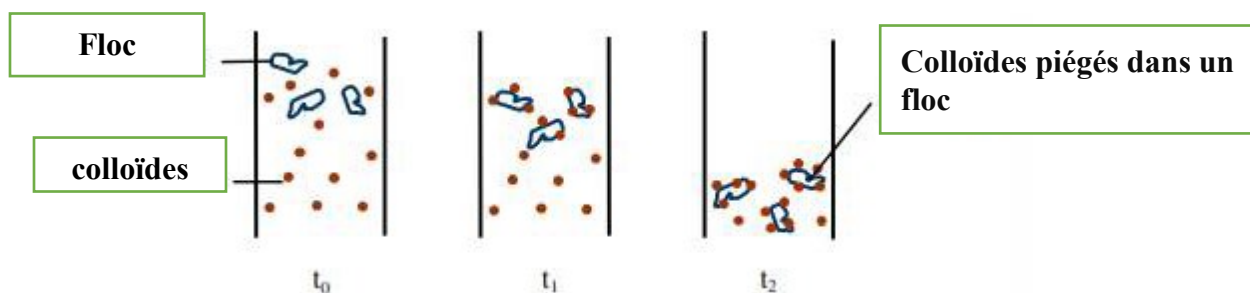


Figure 21 : Piégeage des particules en floes lors de la décantation (Bensadok *et al.*, 2008).

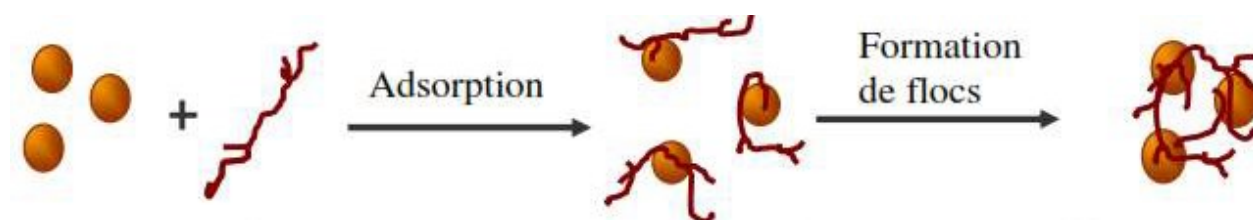
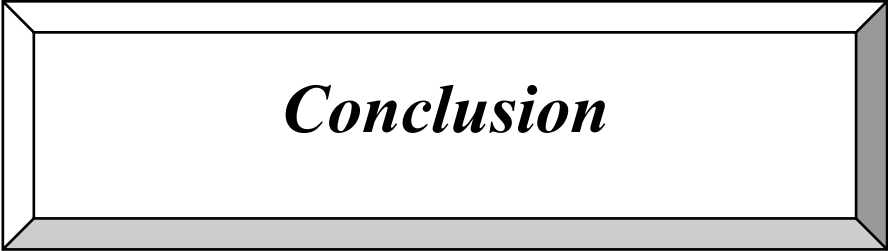


Figure 22 : Adsorption et formation de ponts au moyen de polymères (Bensadok *et al.*, 2008).

Ainsi, selon les observations microscopiques, la formation d'amas pourrait correspondre à des amas de mucilage interagissant avec les matières en suspensions (levure) pour être en accord avec les hypothèses d'interaction de bio-coagulant proposés en bibliographie. Toutefois, d'autres analyses doivent être réalisés (rayon X, EDX ou MEB) pour une confirmation de la nature de ces amas formés et pour une tentative de compréhension des mécanismes d'action du mucilage en association avec les espèces d'aluminium libérés au cours de l'EC-EF.



Conclusion

Le cladode d'*Opuntia ficus-indica* a été exploité pour sa capacité à fournir des polysaccharides qui sont très demandés dans l'industrie, notamment dans le secteur agroalimentaire. Cependant, ces polymères sont de plus en plus intéressants dans les processus de traitement des eaux usées en tant que biocoagulants et ont été largement utilisés dans les processus de purification, de séparation et de récupération le plus souvent dans des tests de traitements basiques comme le système jar test.

Notre objectif à travers ce travail est d'améliorer l'efficacité d'un procédé de traitement d'eaux usées bien connu (EC-EF) par l'utilisation de substances naturelles jouant le rôle de bio-coagulant et permettant de limiter la toxicité due à l'usage de produits chimiques, potentiellement ajouté à l'EC-EF, ainsi que de réduire les coûts des traitements des effluents industriels.

Nous avons constaté lors de notre étude de l'extraction par la méthode assistée aux microondes a donné un résultat très proche de celui de l'extraction conventionnelle. Le résultat obtenu avec la méthode conventionnelle est de $45.21 \pm 0.65\%$ après 3 heures d'extraction, par contre l'extraction assistée par microonde a donné un rendement de $50,75 \pm 0.82\%$ en 3 minutes et 50 secondes. L'avantage de l'utilisation des microondes, en tant que méthode d'extraction innovante, est un gain de temps et un gain d'énergie considérables.

Le mucilage d'OFI a été testé sur le traitement d'eaux usées synthétiques de gel de silice et levure de boulangerie (*Saccharomyces cerevisiae*) en combinaison avec le procédé d'électrocoagulation-électroflottation (EC-EF). Les résultats obtenus ont montré qu'une quantité optimale de mucilage de 10mg (concentration de 5 mg/L) permet d'améliorer l'efficacité du traitement à 30 minutes de 20,43 % pour le gel de silice, et de 26,44 % à 15 minutes pour la levure de boulangerie. Pour ce même essai amélioré, le comptage cellulaire a donné au temps de 10 min un nombre de cellules de levure de 244 cellules en comparaison à 1652 cellules pour l'essai sans mucilage, soit une diminution de près de 7 fois moins. Ces chiffres correspondent aux concentrations cellulaires de 5.51×10^7 et de 4.88×10^6 pour les deux essais, respectivement.

L'approche d'optimisation par variation du pH et de la conductivité a été plus observée pour les essais EC-EF sur la levure, ou nous avons remarqué que la conductivité de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en présence de 10mg mucilage à pH 7 améliore le rendement de 33,83 % par rapport à l'essai sans mucilage.

Conclusion

Nos résultats suggèrent la possibilité d'utiliser le mucilage d'OFI en tant que coagulant naturel afin d'améliorer la qualité de l'eau et d'éviter l'ajout des adjuvants chimiques au procédé EC-EF pour améliorer son rendement.

Dans le contexte des biotechnologies et du développement durable, différentes recherches mettent en évidence les bénéfices et encouragent la mise en pratique du mucilage OFI en tant que biocoagulant dans les secteurs du traitement des eaux usées. Toutefois, l'utilisation concrète d'un coagulant naturel pour des traitements d'eaux usées à l'échelle industrielle n'a pas encore vu le jour.

Cela, dit, ce travail ouvre des perspectives et des pistes de recherche, tant au niveau de la connaissance scientifique, qu'à celui d'une possibilité de valorisation de la matière végétale de notre pays. D'autres études complémentaires peuvent être envisagées comme :

- ✓ Des analyses physico-chimiques plus approfondies des floccs formés pour comprendre le mécanisme d'action du mucilage au sein d'un procédé EC-EF
- ✓ L'identification des composants du mucilage par caractérisation chromatographique.
- ✓ L'optimisation d'autres paramètres de l'EC-EF (variation du voltage et de l'ampérage, analyse des coûts des procédés, tester les électrodes en fer...etc.)
- ✓ L'élimination d'autres types de microorganismes, notamment des bactéries pathogènes ou non pathogènes (effet antibactérien) en testant le mucilage de l'OFI en combinaison avec le procédé d'EC-EF.

Références bibliographiques

A

- Abidi, S., & Ben Salem, H. (2007, October). Potential use of spineless cactus cladodes as a source of soluble carbohydrates and water for sheep on *Atriplex nummularia* foliage. In VI International Congress on Cactus Pear and Cochineal 811 (pp. 353-358).
- Adjerroud, N. , El Abbas, S., Merzouk, B., Hammoui, Y. Felkai-Haddache, L., Remini. H., Leclerc, J. P.& Madani, K.(2018). Effect of *Opuntia ficus indica* mucilage on copper removal from water by electrocoagulation/electroflotation technique. Journal of Electroanalytical chemistry. 26_36
- Adjerroud, N., Dahmoune, F., Merzouk, B., Leclerc, J.-P., Madani, K., 2015. Improvement of electrocoagulation–electroflotation treatment of effluent by addition of *Opuntia ficus indica* pad juice. Separation and Purification Technology 144, 168-176.
- Adjerroud-Abdellatif, N., Hammoui, Y., Boudria, A., Agab., S., Cholak,F., Lectrec,J.P., Merzouk, B.& Madani, K. (2020). Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus indica* cladode on electrocoagulation_electroflotation water treatment process. Journal of environmental analytical chemistry.
- Ahmed Samir Naje, A. S. N., & Abbas, S. A. (2013). Electrocoagulation technology in wastewater treatment: a review of methods and applications.
- Alinsafi, M. Khemis, M.N. Pons, J.P. Leclerc, A. Yaacoubi, A. Benhammou, A. Nejmeddine, Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater, Chem. Eng. Process. 44 (2005) 461–470.
- AlJaberi FY, Abdulmajeed BA, Hassan AA, Ghadban ML (2020) Assessment of an electrocoagulation reactor for the removal of oil content and turbidity from real oily wastewater using response surface method. Recent Innov Chem Eng (Former Recent Pat Chem Eng) 13:55–71
- Aljaberi FY, MohammedWT (2018) Analyzing the removal of lead from synthesis wastewater by electrocoagulation technique using experimental design. DesalinWater Treat 111:286–296
- Angulo-Bejarano, P. I., Martínez-Cruz, O., & Paredes-López, O. (2014). Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: nopal (*Opuntia ficus-indica*). Current Nutrition & Food Science, 10(3), 196-217.

- Araba, M. (2009, May). Le cactus *Opuntia*, une espèce fruitière et fourragère pour une agriculture durable au Maroc. In Actes du Symposium International AGDUMED-durabilité des systèmes de culture en zone méditerranéenne et gestion des ressources en eau et en sol (pp. 14-16). Rabat: Cana Print.
- Arbabi M, Shafiei S, Mehraban S, Khodabakhshi A, Abdoli A, Arbabi A. Electrocoagulation process using aluminum electrodes for treatment of baker's yeast industry wastewater. Int J Env Health Eng 2022;11:3.FAO, 2023. Water scarcity means less water for agriculture production which in turn means less food available, threatening food security and nutrition.
- Attour, M. Touati, M. Tlili, M. Ben Amor, F. Lapique, J.P. Leclerc, Influence of operating parameters on phosphate removal from water by electrocoagulation using aluminum electrodes, Sep. Purif. Technol. 123 (2014) 124–129.
- Ayadi, M. A., Abdelmaksoud, W., Ennouri, M., & Attia, H. (2009). Cladodes from *Opuntia ficus indica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. Industrial Crops and Products, 30(1), 40-47.
- Ayat, A., & Arris, S. (2022). Biomatériaux et leurs applications comme coagulants/floculants dans le traitement des eaux usées (Doctoral dissertation, Université Constantine 3 Salah Boubnider, Faculté de génie des procédés pharmaceutiques).

B

- Barka, N., Abdennouri, M., El Makhfouk, M., & Qourzal, S. (2013). Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes. Journal of Environmental Chemical Engineering, 1(3), 144-149.
- Beagles B (2009) Electrocoagulation (EC) – science and applications. Green Pages.
- Belkacem, M., Khodir, M., & Abdelkrim, S. (2008). Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. Desalination, 228(1–3), 245-254.
- Bendhifi, M., Baraket, G., Zourgui, L., Souid, S., Salhi-Hannachi, A., 2013. Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. Scientia Horticulturae 1581-7.

•Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, 26-36.

•BOUDJEMA NOUARA (2014). Traitement des eaux usées de l'Oued El Harrach par Électrocoagulation : Effets et Mécanismes du Champ Électrique sur les Micro-organismes. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

•BOUTAKIOUT, A.(2015). Etude physico-chimique, biochimique et stabilité d'un nouveau produit : jus de cladode du figuier de Barbarie marocain (*Opuntia ficus-indica* et *Opuntia megacantha*).l'Université d'Angers (France) sous le label de L'Université Nantes Angers et l'Université de Sultan Moulay Slimane (Maroc). 212.

C

•C. Barrera-Diaz, G. Roa-Morales, L. Avila-Cordoba, T. Pavon-Silva, B.Bilyeu, Electrochemical treatment applied to food-processing industrial wastewater, *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 34–38.

•C.T. Wang, W.L. Chou, L.S. Chen, S.Y. Chang. *J. Hazard. Mater.*, 2009, 161: 344–350.

•Catherine Ricordel, Claire Miramon, Dimiter Hadjev & André Darchen (2014) Investigatons of the mechanism and efficiency of bacteria abatement durng electrocoagulation using alumnum electrode Desalination and Water Treatment, 52:2830, 53805389, DO: 10.1080/19443994.2013.807474

•Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* 38, 11-41.

•Chopra, A. K., Sharma, A. K., & Kumar, V. (2011). Overview of Electrolytic treatment: An alternative technology for purification of wastewater. *Archives of Applied Science Research*, 3(5), 191-206.

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

- Ciriminna, R., Chavarria-Hernández, N., Rodríguez-Hernández, A. I., & Pagliaro, M. (2019). Toward unfolding the bioeconomy of nopal (*Opuntia* spp.). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(6), 1417–1427.
- Contreras-Padilla, M., Rodríguez-García, M. E., Gutiérrez-Cortez, E., del Carmen Valderrama-Bravo, M., Rojas-Molina, J. I., & Rivera-Muñoz, E. M. (2016). Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus mucilage* at three different maturity stages of cladode *European Polymer Journal*, 78, 226–234.
- Cruz-Rubio, J. M., Mueller, M., Viernstein, H., Loeppert, R., & Praznik, W. (2021). Prebiotic Potential and Chemical Characterization of the Poly and Oligosaccharides Present in the Mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. *Food Chemistry*, 362, 130167.
- CS Eskilsson, E Björklund - *Journal of chromatography A*, 2000 – Elsevier.

D

- Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*, 91(4), 751-756.
- Djerroud-Mohellebi, N., Adjeroud-Abdellatif, N., Azzouz, Z., Elabbas, S., Merzouk, B., Kobya, M., & Madani, K. (2023). Treatment of wastewaters from food Aromsa and ingredients production by electrocoagulation (EC) treatment aided by mucilage of *Opuntia ficusindica*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 25.

E

- Ebba, M., Asaithambi, P., & Alemayehu, E. (2022). Development of electrocoagulation process for wastewater treatment: optimization by response surface methodology. *Heliyon*, 8(5).
- El Kharrassi, Y. (2015). Mise en évidence de la diversité des populations de cactus (*Opuntia* spp.) au Maroc et de la modulation du métabolisme lipidique par des extraits naturels et de phytostérols issues de cactus ou d'huile d'Argan dans les cellules microgliales BV2 (Doctoral dissertation, Université de Bourgogne).
- Elabbas, S., Adjeroud, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Pons, M. N., Leclerc, J. P., & Ouazzani, N. (2022). Eggshell adsorption process coupled with electrocoagulation for

improvement of chromium removal from tanning wastewater. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 102(13), 2966-2978.

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

F

- F.C. Stintzing, A. Schieber, R. Carle, Phytochemical and nutritional significance of cactus pear, Eur. Food Res. Technol. 212 (2001) 396–407.

- FAO, 2023. Water scarcity means less water for agriculture production, which in turn means less food available, threatening food security and nutrition.

- Felkai-Haddache, L., Dahmoune, F., Remini, H., Lefsih, K., Mouni, L., & Madani, K. (2016). Microwave optimization of mucilage extraction from *Opuntia ficus indica* Cladodes. International journal of biological macromolecules, 84, 24-30.

- Felkai-Haddache, L., Remini, H., Dulong, V., Mamou-Belhabib, K., Picton, L., Madani, K., Rihouey, C., 2016. Conventional and microwave-assisted extraction of mucilage from *opuntia ficus-indica* cladodes: physico-chemical and rheological properties. Food and bioprocess technology 9, 481-492.

- Festy, B., Hartemann, P., Ledrans, M., Levallois, P., Payment, P., & Tricard, D. (2003). Qualité de l'eau. Environnement et santé publique-Fondements et pratiques, 333-368.

- 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.

G

- G. Chen, Electrochemical technologies in wastewater treatment, Sep. Purif. Technol. 38(2004) 11-41.

- G. Chen, X. Chen, P.L. Yue, Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater, J. Environ. Eng. 126 (2000) 858–863.

•Galati, E.M.; Tripodo, M.M.; Trovato, A.; D'Aquino, A.; Monforte, M.T. Biological Activity of *Opuntia ficus-indica* Cladodes II: Effect on Experimental Hypercholesterolemia in Rats. *Pharm. Biol.* 2003, 41, 175–179.

•Ginestra, G., Parker, M. L., Bennett, R. N., Robertson, J., Mandalari, G., Narbad, A., Lo Curto, R. B., Bisignano, G., Faulds, C. B., & Waldron, K. W. (2009). Anatomical, chemical, and biochemical characterization of cladodes from prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10323–10330.

H

•H. Betatache, A. Aouabed, N. Drouiche, H. Lounici, Conditioning of sewage sludge by prickly pear cactus (*Opuntia ficus Indica*) juice, *Ecol. Eng.* 70 (2014) 465-469.

•H. D. Bassala, G. K. Dedzo, C. B. N. Bememba, P. M. T. Seumo, J. D. Dazie, *Process. Safety. Env. Protect.*, 111 (2017) 122-127.

•H. Essadki, M. Bennajah, B. Gourich, C. Vial, M. Azzi, H. Delmas, *Chem. Eng. Process.*, 47 (2008) 1211–1223.

•Habibi, Y. (2004). Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux: caractérisation et modification chimique (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).

•Hassan F, El-Razek A and Hassan AA. Nutritional Value and Hypoglycemic Effect of Prickly Cactus Pear (*Opuntia Ficus-Indica*) Fruit Juice in Alloxan-Induced Diabetic Rats. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2012;5(10): 356-377, 2011.

I

•I.A. Sengil, M. Ozacar, Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, *J. Hazard. Mater.* 137 (2006) 1197–1205.

•Ibanes, C. R. and Meckes, L.M. (1983): Effet of semi-purified product obtained from *Opuntia streptacantha* (a cactus) on glycemia and triglyceridemia of rabbit. *J. Chromtogr.* 913: 415-420

•Inglese, P. (2018). *Ecologie, Culture Et utilisations du Figuier De Barbarie*.

•Inglese, P.; Mondragon, C.; Nefzaoui, A.; Saenz, C.; Taguchi, M.; Makkar, H.; Louhaichi, M.; Inglese, P.; Mondragon, C. Nefzaoui, A.; et al. *Crop Ecology, Cultivation and Uses of Cactus Pear. Comput. Geosci.* 2017, 20, 244.

J

•J.Q. Jiang, N. Graham , C. Andre, G.H. Kelsall, N. Brandon. Water Res., 2002, 36: 4064- 4078.

K

•KELLER, A. L., GIRARD, C., & CHAUMONT, J. P. (2009). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill, le figuier de barbarie ou nopal, une plante aux multiples usages. La Phytothérapie européenne, (51), 24-27

•Koby, M., & Delipinar, S. (2008). Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. Journal of hazardous materials, 154(1-3), 1133-1140.

L

•Lee, E.B., Hyan, J. E., Lida, W. and Moon, Y. I. (2002): Effet of *Opuntia ficus-indica* var. Saboten stem on gastric damages in rats. Arch. Pharm. Res. 25, 1: 67-70.

M

•M. Bayramoglu, M. Koby, O.T. Can, M. Sozbir. Sep. Purif. Technol., 2004, 37: 117–125.

•M. Koby, E. Demirbas, A. Dedelia, M.T. Sensoy. Journal J. Hazard. Mater., 2010, 173: 326–334.

•M. Koby, O.T. Can, M. Bayramoglu. J. Hazard. Mater. B. 2003, 100: 163–178.

•M. Vepsäläinen, Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. University of Mikkeli, Finland. PhD Thesis (2012).

•M.Koby, H. Hiz, E. Senturk, C.Aydiner, E. Demirbas, Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation, Desalination 190(2006) 201–211.

•M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke, Electrocoagulation (EC)—science and applications, J. Hazard. Mater. 84 (2001) 29-41.

•Majdoub, H., Roudesli, S., Picton, L., Le Cerf, D., Muller, G., & Grisel, M. (2001). Prickly pear nopal pectin from *Opuntia ficus-indica* physico-chemical study in dilute and semi-dilute solutions. Carbohydrate polymers, 46(1), 69-79.

- Malainine, M-E. Dufresne, A., Dupeyre, D., Mahrouz, M., Vuong, R. & Vignon, M. R. (2001). Structure et morphologie des raquettes et des épines du figuier de barbarie. *Phys. Chem. News* 4. 126-130.
- Malviya, R., Srivastava, P., & Kulkarni, G. T. (2011). Applications of mucilages in drug delivery-a review. *Advances in Biological Research*, 5(1), 1-7.
- Mao, Y., Zhao, Y., & Cotterill, S. (2023). Examining current and future applications of electrocoagulation in wastewater treatment. *Water*, 15(8), 1455
- Marin-Bustamante, M. Q., Chanona-Pérez, J. J., Guemes-Vera, N., ArzateVázquez, I., Perea-Flores, M. J., Mendoza-Pérez, J. A., Calderón Domínguez, G., & Casarez-Santiago, R. G. (2018). Evaluation of physical, chemical, microstructural and micromechanical properties of nopal spines (*Opuntia ficus-indica*). *Industrial Crops and Products*, 123, 707–718.
- Mariod A. A. (2019). *Wild Fruits: Composition, Nutritional Value and Products*. Springer Nature: Switzerland.
- Martins, M.; Ribeiro, M.H.; Almeida, C.M.M. Physicochemical, Nutritional, and Medicinal Properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and Its Main Agro-Industrial Use: A Review. *Plants* 2023, 12, 1512
- Matsuhira, B., Lillo, L. E., Sáenz, C., Urzúa, C. C., & Zárate, O. (2006). Chemical characterization of the mucilage from fruits of *Opuntia ficus indica*. *Carbohydrate polymers*, 63(2), 263-267.
- Mechelhoff M, Kelsall GH, Graham NJD (2013) Electrochemical behaviour of aluminium in electrocoagulation processes. *Chem Eng Sci* 95:301–312
- Medina-Torres, L., Brito-De La Fuente, E., Torrestiana-Sanchez, B., & Kathain, R. (2000). Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food hydrocolloids*, 14(5), 417-424.
- Merzouk, B. Gourich, A. Sekki, K. Madani, M. Chibane, Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique a case study, *J. Hazard. Mater.* 164 (2009) 215–222
- Merzouk, B., Madani, K., Sekki, A., 2010. Using electrocoagulation–electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. *Deination* 250, 573-577.

- MollahMYA, Morkovsky P, Gomes JAG, KesmezM, Parga J, CockeDL (2004) Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J Hazard Mater 114:199–210
- MollahMYA, Schennach R, Parga JR, Cocke DL (2001) Electrocoagulation (EC)-science and applications. J Hazard Mater 84(1):29–41.
- Moreno Alvarez, M. J., Medina, C., Antón, L., García, D., & Belén Camacho, D. R. (2003). Uso de pulpa de tuna (*Opuntia boldinghii*) en la elaboración de bebidas cítricas pigmentadas. Interciencia, 28(9), 539-543.
- Moussaoui B., (2020). Les propriétés biologiques d'extraits des cladodes d'*Opuntia ficus indica* (L.). Thèse de doctorat en Sciences Biologiques. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algérie.
- Mulas, M., & Mulas, G. (2004). Potentialités d'utilisation stratégique des plantes des genres *Atriplex* et *Opuntia* dans la lutte contre la désertification. Short and Medium-Term Priority Environmental Action Programme (SMAP). Université des études de SASSAR, 112.

N

- N. Adhoum, , L. Monser, N. Bellakhal J.E. Belgaied. J. Hazard. Mater. B., 2004, 11: 207– 213
- N. Barka, M. Abdennouri, M. El Makhfouk, S. Qourzal, Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (*Opuntia ficus indica*) cladodes, J. Environ. Chem. Eng. 1 (2013) 144-149.
- N. Barka, S. Qourzal, A. Assabbane, A. Nounah, Y. Ait-Ichou, Removal of Reactive Yellow 84 from aqueous solutions by adsorption onto hydroxyapatite, J Saudi Chem Soc. 15 (2011) 263-267.
- N. Fedala, H. Lounici, N. Drouiche, N. Mameri, M. Drouiche, Physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Opuntia ficus-indica* cactus, Ecol. Eng. 77 (2015) 33-36.
- N. Kannan, G. Karthikeyan, N. Tamilselvan, Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated Areca catechu nut carbon, J. Hazard. Mater. 137 (2006) 1803–1809.

• Naima Djerroud, Nawel Adjeroūd , Lamia Felkai-Haddache , Yasmina Hammoui, Hocine Remini , Farid Dahmoune , Belkacem Merzouk , Khodir Madani , Amélioration de l'électrocoagulation et de l'électroflottation pour l'élimination de la turbidité par le mucilage de cladodes d'*Opuntia ficus indica* 2018.

• Nawel ADJEROUD.(26/01/2017). Traitement des eaux usées par la technique d'Electrocoagulation-Electroflottation. Etude de l'extrait aqueux des raquettes de la plante: *Opuntia ficus indica*.

• Ncibi, S., Othman, M. B., Akacha, A., Krifi, M. N., & Zourgui, L. (2008). *Opuntia ficus indica* extract protects against chlorpyrifos-induced damage on mice liver. Food and chemical toxicology, 46(2), 797-802.

• Neffar, S. (2012). Etude de l'effet de l'âge des plantations de figuier de Barbarie (*Opuntia ficus indica* L. Miller) sur la variation des ressources naturelles (sol et végétation) des steppes algériennes de l'Est. Cas de Souk Ahras et Tébessa. PhD Thesis, University of Annaba, Algeria.p23.

• Nharingo, T., Moyo, M., 2016. Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters. A critical review. Journal of environmental management 166, 55-72.

O

• O.T. Can, M. Kobya, E. Demirbas, M. Bayramoglu, Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation, Chemosphere 62 (2006) 181–187.

• Omwene, P. I., & Kobya, M. (2018). Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: a comparative study. Process Safety and Environmental Protection, 116, 34-51.

P

• P.K. Holt, G.W. Barton, C.A. Mitchell. Chemosphere, 2005, 59: 355-367.

• P.K. Holt, G.W. Barton, M. Wark, C.A. Mitchell. Coll. Surf. Part A Physicochem. Eng. Aspects., 2002, 211: 233–248

• Panico, A. M., Cardile, V., Garufi, F., Puglia, C., Bonina, F., & Ronsisvalle, S. (2007). Effect of hyaluronic acid and polysaccharides from *Opuntia ficus indica* (L.) cladodes on the metabolism of human chondrocyte cultures. Journal of ethnopharmacology, 111(2), 315-

321. Pattern, and Antioxidant Properties of Cactus Pear (*Opuntia* spp.) Clones. *J. Agric. Food Chem.* 2005, 53, 442–451

- Perucini-Avendaño, M., Nicolás-García, M., Jiménez-Martínez, C., Perea-Flores, M. D. J., Gómez-Patiño, M. B., Arrieta-Báez, D., & Dávila-Ortiz, G. (2021). Cladodes: Chemical and structural properties, biological activity, and polyphenols profile. *Food Science & Nutrition*, 9(7), 4007-4017.

- Petera, B., Delattre, C., Pierre, G., Wadouachi, A., Elboutachfati, R., Engel, E., ... & Fenoradosoa, T. A. (2015). Characterization of arabinogalactan-rich mucilage from *Cereus triangularis* cladodes. *Carbohydrate Polymers*, 127, 372-380.

R

- R. Wallace, A. Gibson, Evolution and systematics. In: *Cacti: Biology and Uses*. Eds: Nobel PS, University of California Press Berkeley-Los Angeles-London. 1-21.2002

- Retamal, N., Durán, J. M., & Fernández, J. (1987). Seasonal variations of chemical composition in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) miller). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38(4), 303-311.

- Robinson V (2009) Electroflocculation in the treatment of polluted water. Electropure Australia Ltd., Wadonga, VIC, Australia.

- Royer M, Robert Houde, M .Sci.(2010). technologies de conversion potentiel de développement lié aux extractibles: état des connaissances et revue des

S

- S. Khristoskova, Possibility of purification and decoloring wastewater from the yeast industry by electrocoagulation, *Nauchni Tr-Plovdivski Univ.* (Bul. 22 (1984) 177–185.

- S.I. Chaturvedi, Electrocoagulation: A novel wastewater treatment method, *Int. J. Mod. Eng. Res.* 3 (2013) 93-100

- S.M. Miller, E.J. Fugate, V.O. Craver, J.A. Smith, J.B. Zimmerman, Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment, *Environ. Sci. Technol.* 42(12) (2008) 4274-4279

- Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of arid environments*, 57(3), 275-290.

- Saih, F. E. (2018). Effets d'extraits de raquette du cactus-*Opuntia ficus indica*-sur la modulation du stress oxydant et du processus inflammatoire liés à la déficience en acyl-CoA oxydase 1 et caractérisation d'une lignée cellulaire BV-2 inactivée pour l'ACOX 1 (Doctoral dissertation, Bourgogne Franche-Comté)..
- Salem-Fnayou, A. B., Zemni, H., Nefzaoui, A., & Ghorbel, A. (2014). Micromorphology of cactus-pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) cladodes based on scanning microscopies. *Micron*, 56, 68–72.
- Schweizer, M. 1997. Docteur Nopal Le Medcien Du Bon Dieu. rue du Faubourg Saint-Honoré F-75008 Paris, France.
- Sepúlveda, E. S. C. A. E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of arid environments*, 68(4), 534-545.
- Shammas, N.K.; Pouet, M.; Grasmick, A. Wastewater Treatment by Electrocoagulation–Flotation. In *Flotation Technology*; Wang, L., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2010; pp. 99-124
- Sharma D, Chaudhari PK, Dubey S, Prajapati AK (2020) Electrocoagulation treatment ofelectroplating wastewater: a review. *J Environ Eng* 146:03120009
- Sijelmassi, A. Les plantes médicinales du Maroc. 4eme édition. Edition le Fennec. C S. B. Maataoui1 , R. B. Maataoui2 , B. Almesrar3 and S. Hilali1 November 2018: ANTI ULCER ACTIVITY OF PRICKLY PEAR (*OPUNTIA FICUS INDICA*) CLADODES EXTRACTS.asablanca, Maroc. 1996.
- Stintzing FC, Carle R. Cactus stems (*Opuntia* spp.): a review on their chemistry, technology, and uses. *Mol Nutr Food Res*. 2005 Feb;49(2):175-94. doi: 10.1002/mnfr.200400071. PMID: 15729672.

T

- T. Zayas, V. Romero, L. Salgado, M. Meraz, U. Morales. *Sep. Purif. Technol.* 2007, 57: 270–276.X. Chen, G. Chen, P. L. Yue; *Sep. Purif. Technol.*, 2000, 19: 65–69.P.R. Kumar, S. Chaudhari, K.C. Khilar, S.P. Mahajan. *Chemosphere*, 2004, 55: 1245–1252.
- Tesoriere,L.,Attanzio,A.,Allegra,M., Gentile,C., and Livera,M.A. Indicaxanthin inhibits NADPH oxidase (NOX)-1 activation and NF-κB-dependent release of inflammatory mediators and the increase of epithelial permeability in IL-1β-exposed Caco-2 cells.*Br.J.Nutr.*111,415-423 (2014).

V

• Ventura-Aguilar, R. I., Bosquez-Molina, E., Bautista-Baños, S., & RiveraCabrera, F. (2017). Cactus stem (*Opuntia ficus-indica* Mill): Anatomy, physiology and chemical composition with emphasis on its biofunctional properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(15), 5065–5073.

W

• W. Baran, E. Adamek, M. Jajko, A. Sobczak, *Chemosphere.*, 194 (2018) 381-38

Y

• Y. Yavuz, EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater, *Sep. Purif. Technol.* 53 (2006) 135–140.

• Yang Y (2020) Recent advances in the electrochemical oxidation water treatment: spotlight on byproduct control. *Front Environ Sci Eng* 14.

• Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437-1444.

Z

• Zorgui, L., Ayed-Boussema, I., Ayed, Y., Bacha, H., & Hassen, W. (2009). The antigenotoxic activities of cactus (*Opuntia ficus-indica*) cladodes against the mycotoxin zearalenone in Balb/c mice: prevention of micronuclei, chromosome aberrations and DNA fragmentation. *Food and Chemical Toxicology*, 47(3), 662-667.

WEBOGRAPHIE :

Lien 1 : <https://www.tela-botanica.org>

ANNEXES

Annexe 01:

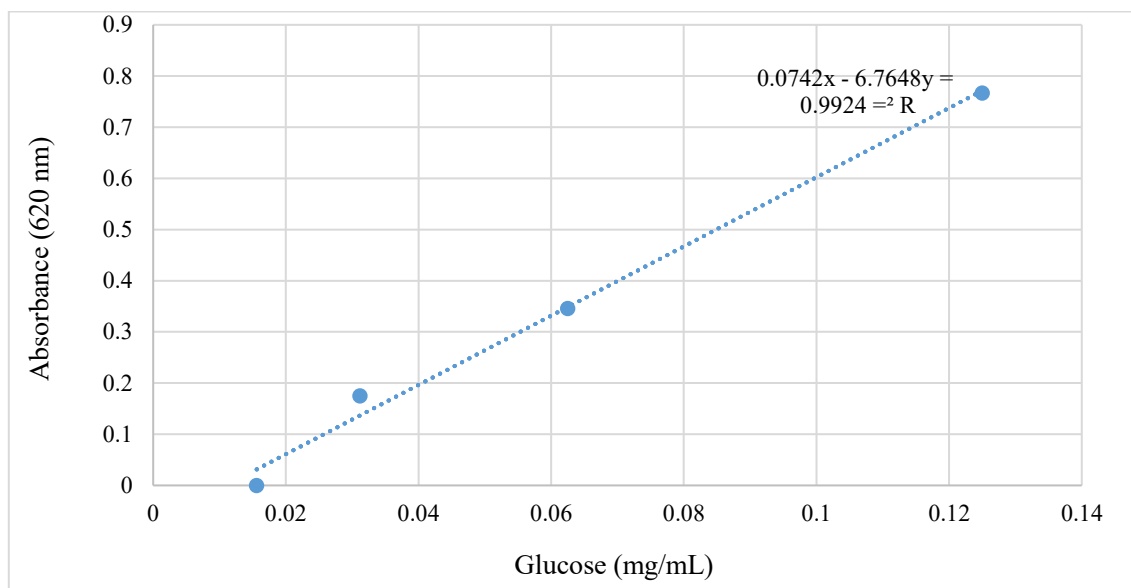


Figure 01. Courbe d'étalonnage du Glucose

Annexe 02:

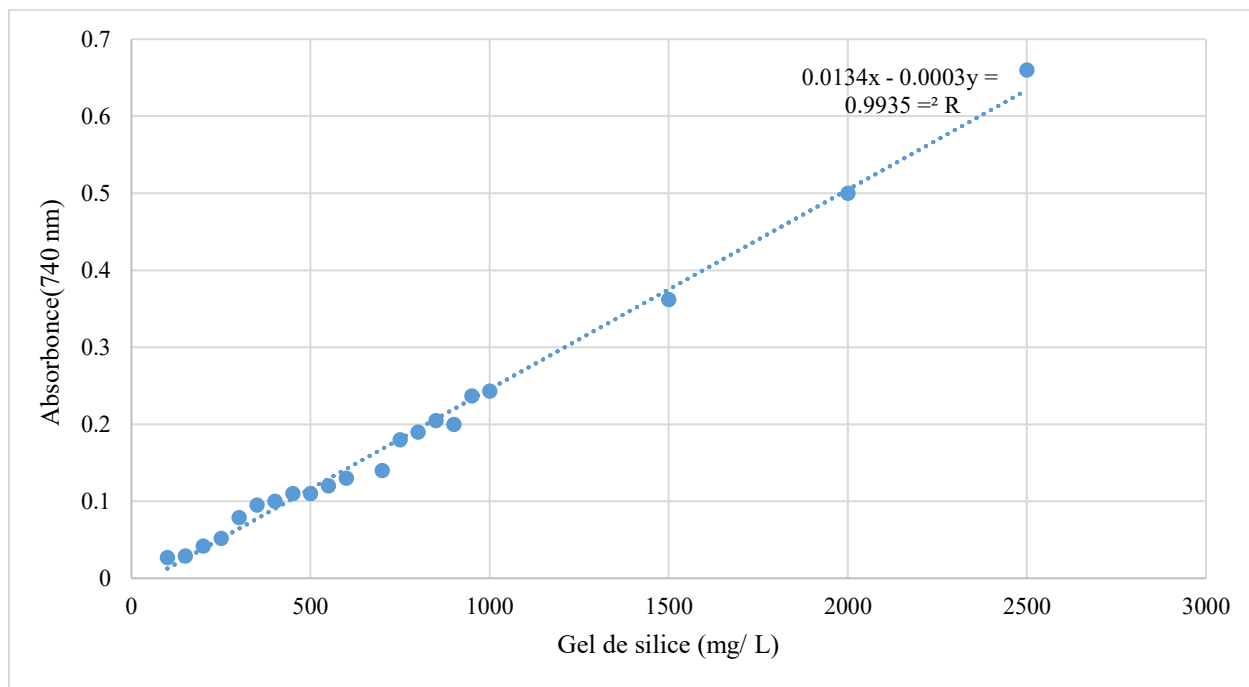


Figure 02. Courbe d'étalonnage du Gel de silice

Annexe 03:

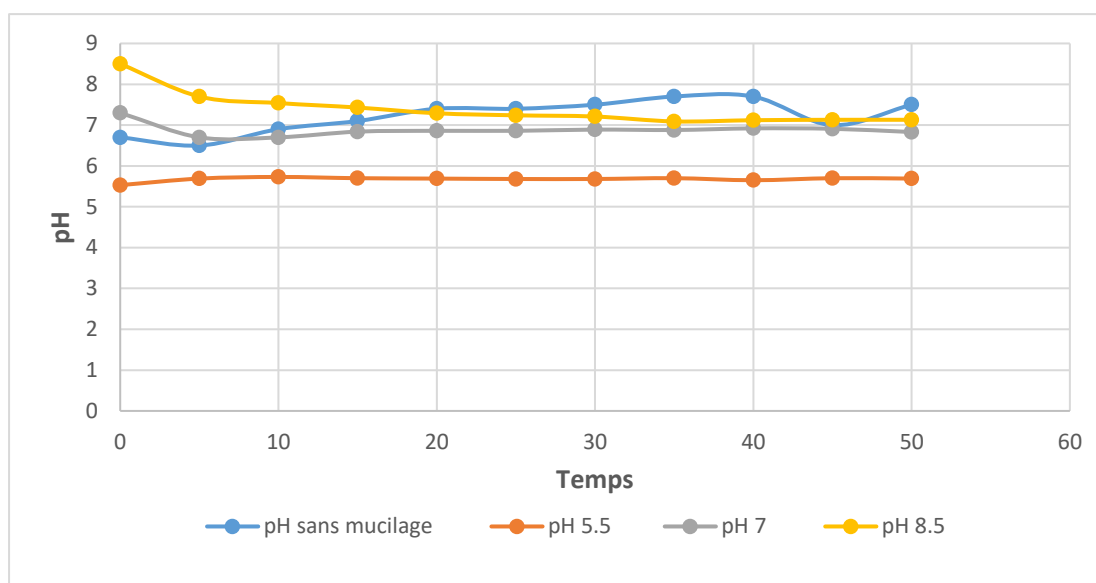


Figure 03 : Suivi du pH de solution de gel de silice avec 10 mg de mucilage (pH 5,5; 7 et 8,5) et sans mucilage (pH 7) lors de traitements EC-EF.

Résumé

Dans cette étude, nous avons travaillé sur l'*Opuntia ficus indica* qui est le nom scientifique du figuier de Barbarie, une plante connue et disponible en Algérie. Le mucilage a été extrait des cladodes en utilisant une extraction assistée par micro-ondes (MAE) qui a permis un gain de temps vis-à-vis de l'extraction conventionnelle (CE), puis il a été testé sur une solution trouble de gel de silice et une solution trouble de levure (*Saccharomyces cerevisiae*) pour l'élimination de la turbidité (TR%) en association avec le processus de traitement de l'eau : l'électrocoagulation-électroflotation (EC-EF). Les résultats montrent que l'ajout de 10 mg de poudre de mucilage améliore l'efficacité de l'élimination EC-EF pour les deux types d'eaux turbides : avec une amélioration de 20,43 % à 30 minutes pour le gel de silice, et de 26,44 % pour la levure de boulangerie à 15 minutes de traitement. L'efficacité d'élimination de la turbidité (TR%) était de 33,83 % (elle est passée de 60,83 à 94,66 %) après optimisation des paramètres du pH (7) et de la conductivité (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les valeurs de concentration cellulaire après comptage des cellules sont de 5.51×10^7 et de 4.88×10^6 et pour l'EC-EF sans et avec 10 mg de mucilage à 10 minutes de traitement. Les observations microscopiques lors du comptage des cellules ont montré que la poudre de mucilage agit comme un réseau naturel qui rassemble les cellules de levure. Ce travail encourage l'utilisation du mucilage comme biocoagulant efficace et prometteur pour l'élimination de la turbidité en eau.

Mots-clés : Figuiers de Barbarie, mucilage, gel de silice, *Saccharomyces cerevisiae*, EC-EF.

Abstract:

In this study, we worked on *Opuntia ficus indica*, which is the scientific name for the prickly pear, a known and available plant in Algeria. Mucilage was extracted from cladodes using microwave-assisted extraction (MAE) which allows a gain of time by comparison to conventional extraction (CE), then it was tested on a cloudy silica gel solution and a cloudy solution of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) for turbidity removal (TR%) in combination with the electrocoagulation-electroflotation (EC-EF) water treatment process. The results show that the addition of 10 mg of mucilage powder improves the EC-EF removal efficiency for both types of turbid waters: with an improvement of 20.43% at 30 minutes for silica gel, and of 26.44% for baker's yeast at 15 minutes of treatment. The turbidity removal efficiency (TR%) was 33.83% (it increased from 60.83 to 94.66%) after optimizing pH (7) and conductivity (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) parameters. The cell concentration values after cell counting were of 5.51×10^7 and 4.88×10^6 and for EC-EF without and with 10 mg of mucilage at 10 minutes of treatment. Microscopic observations during cell counting showed that the mucilage powder acts as a natural network that brings together yeast cells. This work encourages the use of mucilage as an effective and promising biocoagulant for the elimination of turbidity in water.

Keywords: Prickly pear, mucilage, silica gel, *Saccharomyces cerevisiae*, EC-EF.

المخلص

اشغلنا في هذه الدراسة على نبات *Opuntia ficus indica* وهو الاسم العلمي للتين الشوكي وهو نبات معروف ومتوفر في الجزائر. تم استخلاص الهلام من الواح النبات باستخدام المعقد السكري (الصمغ) بمساعدة الميكروويف (MAE) مما وفر الوقت مقارنة بالاستخلاص التقليدي (CE)، تم اختياره على محلول غائم من هلام السيليكا ومحلول غائم من الخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*). نسبة التعكر (TR%) المرتبطة بعملية معالجة المياه: التخثير الكهربائي-التعويم الكهربائي (EC-EF). أظهرت النتائج أن إضافة 10 ملغ من مسحوق الهلام يحسن كفاءة إزالة EC-EF لكلا النوعين من المياه العكرة: مع تحسن بنسبة 20.43% عند 30 دقيقة لهلام السيليكا، و 26.44% لخميرة الخباز عند 15 دقيقة من المعالجة. بلغت كفاءة إزالة العكارة 33.83% (TR%) زادت من 60.83 إلى 94.66% بعد تحسين معاملات الرقم الهيدروجيني (7) والتوصيل (1500 ميكرو سيمنز/سم). قيم تركيز الخلايا بعد عد الخلايا هي 5.51×10^7 و 4.88×10^6 وبالنسبة لـ EC-EF بدون ومع 10 ملغ من الصمغ في 10 دقائق من العلاج. أظهرت الملاحظات المجهرية أثناء عد الخلايا أن مسحوق الصمغ يعمل كشبكة طبيعية تجمع خلايا الخميرة معا. يشجع هذا العمل على استخدام الصمغ كمخثر حيوي فعال وواعد للتخلص من تعكر المياه.

الكلمات المفتاحية: التين الشوكي، الصمغ، هلام السيليكا، *Saccharomyces cerevisiae*، EC-EF.