

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة 1
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES

قسم الكيمياء
DEPARTEMENT DE CHIMIE

Mémoire présenté par

AZABI Meriem

En vue d'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN CHIMIE
OPTION : CHIMIE DES PRODUITS NATURELS

Titre

**Extraction et caractérisation chimique et biochimique de la
kératine de plumes de volailles**

Soutenu le 30 septembre 2020 devant le jury composé de :

| | | |
|---------------|-----|------------|
| R. Ziane | MAA | Présidente |
| K. Eddouaouda | MCB | Examineur |
| A. Badis | Pr | Promoteur |

ANNEE UNIVERSITAIRE 2019 / 2020

ملخص:

يتكون ريش الدواجن من أكثر من 90% من البروتينات الصلبة ذات طبيعة كيراتينية. تتضمن هذه النفايات الزراعية منتجات ثانوية ذات تصنيف مهم نظرًا لثرائها الغذائي.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو استعادة هذه النفايات من خلال إنتاج منتجات ذات قيمة مضافة عالية مثل الكراتين التي يبحث عنها بشدة في القطاعات الصناعية، وخاصة في مجال صناعة مستحضرات التجميل والأدوية. تم جمع الريش من مسلخ في منطقة البليدة وغسله بالماء ثم جفف في فرن مضبوط على درجة مئوية 170 لإزالة الروائح الكريهة والبقايا.

تم الحصول على الكراتين عن طريق التذويب في DMSO متبوعًا بالترسيب باستخدام الأسيتون المبرد (-80 درجة مئوية). تم قياس معدل البروتين في الكراتين المستخلص بطريقة برادفورد. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء تحاليل فيزيوكيميائية باستخدام: FTIR-DRX-MEB-Rx. تم تحديد معدل الشمع والمعادن في الكراتين عن طريق التحليل البيوكيميائي.

الكلمات المفتاحية: التقييم - ريش الدواجن - الكراتين - التحليل (الكيميائي، الفيزيائي والبيوكيميائي).

Résumé :

Les plumes de volailles sont constituées de plus de 90% de protéines dures de nature kératiniques. Ces agrodéchets renferment des sous-produits de classes importantes vu leurs richesses nutritives.

L'objectif principal de cette présente étude est de valoriser ces déchets en produisant des produits de haute valeur ajoutée tels que les kératines qui sont fortement recherchées en secteurs industriels notamment en cosmétique et en pharmaceutique.

Les plumes ont été collectées à partir d'abattoir de la région de Blida, et lavées à l'eau puis séchées dans une étuve chauffée à 170 °C à fin d'éliminer les odeurs désagréables et les résidus.

La kératine a été obtenue par dissolution dans le DMSO suivie d'une précipitation par l'acétone refroidi à (-80 C°). Le taux de protéines de la kératine extraite a été étudié par la méthode de Bradford. De plus des caractérisations physico/chimiques ont été effectuées en utilisant : IRTF- DRX-MEB-Rx. Le taux des cires et des minéraux dans la kératine a été déterminé par des analyses biochimiques.

Mots clés : Valorisation – Plumes de volailles – Kératine – Analyse (chimique, physique et biochimique).

Abstract

Poultry feather are constituted of more than 90% of hard keratin. This agro-wastes contains by-products of an important classes given their nutrient richness.

The main aim of this present study is to recover this waste by producing a high added value products such as keratins which are highly sought after in industrial sectors, particularly in cosmetics and pharmaceuticals.

The feathers were collected from a slaughterhouse in the Blida region, washed with water and then dried in an oven heated to 170 ° C to remove obnoxious odour and residues.

Keratin was obtained by dissolution in DMSO followed by precipitation with acetone cooled at (-80 ° C). The protein rate of the extracted keratin was studied by the Bradford method. In addition, physicochemical characterizations were carried out using: FTIR-DRX-MEB-Rx. wax and minerals rates in keratin were determined by biochemical analysis.

Keywords: Valorisation - Poultry feathers - Keratin - Analysis (chemical, physical and biochemical).

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu tout puissant, de m'avoir accordé la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer tous mes remerciements et toute ma gratitude à ma promoteur Mr. Abdelmalek BADIS pour sa disponibilité, son aide, sa patience et surtout ses judicieux conseils.

Je remercie toutes les personnes qui m'ont aidé pour la réussite de ce travail.

Tout mon amour à mes parents, mes frères et sœurs, famille et amis.

Sommaire

| | |
|------------------------------------|----------|
| Introduction générale | 1 |
|------------------------------------|----------|

Synthèse bibliographique

| | |
|---------------------------------------|----------|
| Chapitre 1 : La kératine | 3 |
|---------------------------------------|----------|

| | |
|-------------------------|---|
| 1.1. Introduction | 3 |
|-------------------------|---|

| | |
|--------------------------------------|---|
| 1.2. Définition de la kératine | 4 |
|--------------------------------------|---|

| | |
|-------------------------------------|---|
| 1.3. Structure de la kératine | 4 |
|-------------------------------------|---|

| | |
|-----------------------------|---|
| 1.4. Type la kératine | 5 |
|-----------------------------|---|

| | |
|---|---|
| 1.4.1. la différence entre α -kératine et β -kératines | 5 |
|---|---|

| | |
|----------------------------------|---|
| 1.4.1.1. la distribution : | 5 |
|----------------------------------|---|

| | |
|---|---|
| 1.4.1.2. Caractéristiques structurelles : | 5 |
|---|---|

| | |
|------------------------------------|---|
| ✓ Filament-matrice structure | 5 |
|------------------------------------|---|

| | |
|--|---|
| ✓ Structure moléculaire et formation des filaments | 7 |
|--|---|

| | |
|---|---|
| 1.4.1.3. Biochimie des kératine α et β | 9 |
|---|---|

| | |
|--------------------|---|
| ✓ Solubilité | 9 |
|--------------------|---|

| | |
|--------------------------------------|----|
| ✓ Composition en acides aminés | 10 |
|--------------------------------------|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 1.5. Source de la kératine | 11 |
|----------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 1.5.1. La kératine des cheveux humains | 12 |
|--|----|

| | |
|--------------------------------------|----|
| 1.5.2. La kératine de la laine | 13 |
|--------------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1.5.3. La kératine des plumes | 13 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 1.5.4. La kératine des cornes, sabots, ongles et bec | 14 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 1.6. Les propriétés de la kératine | 15 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| 1.6.1. Les propriétés physico-chimiques | 15 |
|---|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1.6.1.1. La masse moléculaire | 15 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1.6.1.2. Le point isoélectrique | 15 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 1.6.1.3. Comportement vis-à-vis à l'humidité | 15 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 1.6.1.4. La dégradation de la kératine | 15 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| ✓ Le traitement par les acides minéraux | 15 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| ✓ Le traitement par les alcalins | 16 |
|--|----|

| | |
|--------------------------------------|----|
| ✓ Le traitement hydrothermique | 16 |
|--------------------------------------|----|

| | |
|---------------------------------------|----|
| 1.6.2. Les propriétés mécaniques..... | 16 |
|---------------------------------------|----|

| | |
|--------------------------------|----|
| 1.6.2.1. Viscoélasticité | 16 |
|--------------------------------|----|

| | |
|--|-----------|
| 1.6.2.2. La sensibilité à l'hydratation | 17 |
| 1.6.2.3. Les Propriétés électriques..... | 17 |
| 1.7. Biodégradation de la kératine..... | 17 |
| 1.7.1. La biodégradation et gestion des déchets de kératine | 17 |
| 1.8. Applications industrielles de la kératine | 18 |
| 1.8.1. L'industrie cosmétique | 18 |
| 1.8.2. L'industrie pharmaceutique | 19 |
| 1.8.2.1. Les nanoparticules de la kératine | 19 |
| ✓ Administration de médicaments | 19 |
| ✓ Les activités anti-cancéreuses et antioxydantes..... | 20 |
| 1.8.2.2. L'hydrogel de kératine : | 20 |
| 1.8.2.3. L'hydrolysate de kératine | 21 |
| ✓ Le pansement hémostatique | 21 |
| ✓ Régénération nerveuse | 21 |
| 1.8.2.4. Films de kératine | 21 |
| 1.8.3. Le traitement du cuir et du textile..... | 22 |
| 1.8.4. La kératine comme engrais | 22 |
| 1.8.5. Autres applications de la kératine | 22 |
| 1.9. Conclusion..... | 23 |
| Chapitre 2 : Plumes de volailles et industrie avicole | 24 |
| 2.1. Introduction..... | 24 |
| 2.2. Structure et morphologie de la plume | 25 |
| 2.3. Types de plumes | 27 |
| 2.4. Propriétés des plumes | 29 |
| 2.4.1. Analyse biochimique..... | 29 |
| 2.4.1.1. Carbone fixe | 29 |
| 2.4.1.2. Matières volatiles | 29 |
| 2.4.1.3. Cendres | 30 |
| 2.4.1.4. Teneur en humidité | 30 |
| 2.4.1.5. Protéine brute | 30 |
| 2.4.1.6. Fibre brute | 30 |
| 2.4.1.7. Matière grasse brute | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.1.8. Analyse CHNS | 31 |
| 2.4.2. Les propriétés chimiques | 31 |
| 2.4.2.1. Durabilité chimique dans les produits chimiques courants | 31 |
| ✓ Durabilité chimique dans les solutions alcalines | 32 |
| ✓ Durabilité chimique dans les solutions acides | 32 |
| ✓ Durabilité chimique dans d'autres produits chimiques | 32 |
| 2.4.2.2. La propriété de gonflement | 34 |
| 2.4.2.3. Test d'hydrophobicité | 34 |
| 2.4.2.4. Test de combustion..... | 34 |
| 2.4.3. Les propriétés physiques | 34 |
| 2.4.3.1. La longueur | 34 |
| 2.4.3.2. La densité | 35 |
| 2.4.3.3. Le diamètre..... | 35 |
| 2.4.3.4. La masse des fractions de la plume | 35 |
| 2.4.4. Propriétés thermiques | 35 |
| 2.4.5. Propriétés électriques | 36 |
| 2.4.6. Propriétés mécaniques..... | 37 |
| 2.5. L'industrie avicole | 37 |
| 2.5.1. La production mondiale de Volaille | 37 |
| 2.5.2. La production de volaille en Algérie | 38 |
| 2.5.3. Déchets de plumes | 39 |
| 2.6. Conclusion..... | 39 |
| Chapitre 3 : valorisation des plumes de volaille | 40 |
| 3.1. Introduction | 40 |
| 3.2. Production de bioénergie | 41 |
| 3.2.1. La production de biodiesel | 41 |
| 3.2.2. La production de biogaz | 42 |
| 3.2.3. La production de biohydrogène..... | 43 |
| 3.3. Applications électriques et électroniques | 43 |
| 3.3.1. Les électrodes de plumes carbonisées | 43 |
| 3.3.2. Les composites de plumes comme matériaux diélectriques | 43 |
| 3.3.3. Les circuits imprimés biodégradables à partir des plume | 44 |

| | |
|---|----|
| 3.4. Industrie du plastique et de l'emballage | 44 |
| 3.4. Plumes en plastiques biodégradables | 44 |
| 3.4.2. Plumes dans les matériaux d'emballage | 45 |
| 3.5. Applications pharmaceutiques | 46 |
| 3.6. Utilisation dans la production des fils textiles | 46 |
| 3.7. Farine de plume | 47 |
| 3.8. Production de biocomposites entièrement biodégradables | 50 |
| 3.9. Production du papier | 50 |
| 3.10. Autres applications | 51 |
| 3.10.1. Ignifuges des plumes | 51 |
| 3.10.2. Plumes dans les industries automobile et aéronautique | 51 |
| 3.10.3. Production de gomme de xanthane | 51 |
| 3.10.4. Films de plumes pour l'adsorption de colorant | 52 |
| 3.10.5. Revêtement protecteur pour les métaux | 52 |
| 3.10.6. Absorbant d'huile verte | 53 |
| 3.11. Conclusion | 53 |

Partie expérimentale

| | |
|--|----|
| Etude expérimentale | 54 |
| I. Introduction | 54 |
| II. Matériel et méthodes | 56 |
| II.1. Collecte des plumes à partir des abattoirs locaux | 56 |
| II.2. Préparation de la farine de plume | 56 |
| II.3. Extraction de la kératine | 57 |
| ✓ La kératine soluble..... | 57 |
| ✓ Précipitation du substrat | 57 |
| ✓ Concentration et récupération du substrat | 58 |
| ✓ Dissolution de kératine | 58 |
| II.4. Caractérisation chimique et physique | 58 |
| II.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB) | 58 |
| II.4.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) | 59 |

| | |
|--|-----------|
| II.4.3. Diffractométrie de rayons X | 59 |
| II.6. Dosage biochimique (taux des protéines, des cires et des minéraux)..... | 59 |
| II.6.1. Taux de protéines (méthode de Bradford) | 59 |
| II.6.2. Taux des cires. | 61 |
| II.6.3. Taux des minéraux..... | 62 |
| Chapitre 4 : Etat de l'art | 63 |
| 4.1. Introduction | 63 |
| 4.2. Prétraitement des plumes | 64 |
| 4.3. Extraction de la kératine | 64 |
| 4.3.1. Par les liquides ioniques | 65 |
| 4.3.2. La réduction..... | 66 |
| 4.3.3. L'hydrolyse alcaline | 67 |
| 4.3.4. L'explosion de vapeur | 68 |
| 4.3.5. Sulfitolyse..... | 68 |
| 4.3.6. Traitement micro-ondes : | 69 |
| ✓ Précipitation de la kératine | 69 |
| 4.4. Caractérisation de la kératine | 69 |
| 4.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB) | 69 |
| 4.4.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) | 70 |
| 4.4.3. L'analyse par Diffractométrie de rayons X (DRX)..... | 72 |
| 4.4.4. Electrophorèse sur gel de dodécyl sulfate de sodium – polyacrylamide (SDS-PAGE). 73 | |
| 4.4.5. Chromatographie d'exclusion stérique | 74 |
| 4.4.6. Résonance magnétique nucléaire RMN | 74 |
| 4.4.7. Taux de protéines | 75 |
| 4.5. Conclusion..... | 77 |
| Conclusion générale | 79 |
| Références | 80 |

Liste des figures :

| | |
|--|----|
| Figure1.1. Illustration schématique de la structure de la kératine montrant les diverses liaisons inter et intramoléculaires (liaisons hydrogènes, ioniques, disulfures). | 5 |
| Figure1.2. Micrographies électroniques à transmission des matières kératiniques typiques avec une structure à matrice filamenteuse : (a) coupe transversale d'un cheveu humain (α -kératine), coloré au tétr oxyde d'osmium, montrant des FI de 7 nm de diamètre enchâssés dans une matrice plus foncée ; (b) coupe transversale d'un rachis de plumes de mouette (β -kératine), coloré au permanganate de potassium, filaments de β -kératine de 3,5 nm de diamètre différenciés par la matrice densément colorée. | 6 |
| Figure1.3. La structure des FI de la kératine α : (a) : un modèle boule et bâton de la chaîne polypeptidique, (b) : dessin schématique de la formation des filaments intermédiaires..... | 8 |
| Figure1.4. Structure des filaments β -kératine : (a) : un modèle boule et bâton de la chaîne polypeptidique, et illustration du feuille plissée β . (b) : dessin schématique de la formation des filaments β -kératines. | 9 |
| Figure 1.5. La structure hiérarchique de la fibre capillaire humaine..... | 12 |
| Figure 2.1. Structure de la plume qui est composée d'une tige creuse (calamus) et d'un rachis, et vexille ou étendard constituée de barbes et barbules. | 26 |
| Figure 2.2. Images d'analyse par le Microscopie électronique à balayage (MEB) de la plume de poulet. | 27 |
| Figure 2.3. Les sept types de plumes rencontrées chez les oiseaux. | 29 |
| Figure 2.4. Graphique de la composition élémentaire de la kératine extraite et des plumes de poulet crues. | 31 |
| Figure 2.5. Structure creuse de la fraction de plumes de poulet (500x). | 36 |
| Figure 3.1. Processus schématique de production de biocarburant à partir de plumes de poule | 41 |
| Figure 3.2. Processus schématique de la production de biogaz à partir de plumes de poulet | 42 |
| Figure 3.3. Diagramme schématique de la production du bioplastique à partir de plumes de poulet. | 45 |
| Figure 3.4. Valorisation possible dans la production de fils et du textile. | 47 |
| Figure 3.5. Diagramme schématique de la production d'aliments pour animaux à partir de plumes de poulet | 49 |
| Figure 3.6. Processus de préparation des feuilles à base de pâte plume/bois..... | 51 |
| Figure 1 : Diagramme montrant les étapes du travail expérimentale | 55 |
| Figure 2 : Les plumes collectées. | 56 |
| Figure 3 : Farine des plumes | 57 |

| | |
|---|----|
| Figure 4.1. Image par MEB de la kératine : A : image obtenue par grossissement x17. B : image obtenue par grossissement x10 000..... | 70 |
| Figure 4.2. Spectre IRTF de l'hydrolysate de kératine comparé à celui de la farine de plumes | 71 |
| Figure 4.3. Le diffractogramme de la kératine. | 73 |
| Figure 4.4. SDS-PAGE de l'hydrolysate de protéines de kératine. | 74 |
| Figure 4.5. Les spectres RMN ¹³ C de la kératine extraite à partir des plumes de poulet..... | 75 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1. La distribution des kératines α et β | 5 |
| Tableau 1.2. Les caractéristiques structurales d' α et β -kératine. | 6 |
| Tableau 1.3. Solubilité de la kératine α et β | 10 |
| Tableau 1.4. Composition en acides aminés (résidus pour 100 résidus) des matières α et β -kératiniques représentatives. | 11 |
| Tableau 1.5. Comparaison de la composition en acides aminés entre les kératines des cheveux humains, des plumes, et de la laine. | 14 |
| Tableau 2.1. Résistance chimique des plumes de poulet | 33 |
| Tableau 2.2. Production de volaille par continent..... | 38 |
| Tableau 2.3. Production mondiale de volaille..... | 38 |
| Tableau 3.1. Gamme typique d'analyses approximatives des caractéristiques de farine de plume hydrolysée ainsi que la composition en acides aminés et teneur en minéraux. | 48 |
| Tableau 1. Description de la méthode de Bradford..... | 60 |
| Tableau 4.1. Résultats sur l'extraction de la kératine par des liquides ioniques dans divers conditions expérimentaux | 65 |
| Tableau 4.2. Rendement d'extraction de la kératine par la méthode de réduction. | 66 |
| Tableau 4.3. Résultats sur l'extraction alcaline de la kératine..... | 67 |
| Tableau 4.4. Résultats sur l'extraction de la kératine par sulfitolyse. | 68 |
| Tableau 4.5. Concentrations de kératine extraite par le sulfure de sodium et la L-cystéine déterminée en utilisant le test Bradford et l'absorbance des protéines à 280 nm | 76 |

APPENDICES

MEB : Microscopie électronique à balayage

IRTF : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

DRX : Diffractométrie de rayons X

DMSO : Diméthylsulfoxyde

kDa : kilodalton

α : Alpha

β : Bêta

FI : Filaments intermédiaires

nm : Nanomètre

pH : Potentiel hydrogène

pI : Point isoélectrique

h : Heure

min : minute

Psi : Livre-force par pouce carré

HK : Hydrolysats de kératine

DOX : Doxorubicine

PEG : Polyéthylène glycol

GSH : Glutathion

MCF-7 : La lignée de cellules tumorales mammaires

SK-OV-3 : Une lignée cellulaire de cancer de l'ovaire humain

Hela : lignée cellulaire cancéreuse

DDPH : 2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl.

ABTS : L'acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulphonique)

ECA : Enzyme de conversion de l'angiotensine

CHNS : Analyse élémentaire de carbone, hydrogène, azote, soufre.

DMF : N,N-Diméthylformamide

μm : Micromètre

500x : Agrandissement

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

mL CH₄ / gVS : Millilitre de méthane par grammes de solides volatils.

KHz : Kilohertz

(M) : Concentration molaire

(N) : Concentration équivalente.

Kv : Kilovolt

R : Résolution

UV : Ultraviolet

λ : Lambda

ASB : Albumine sérique bovine

(v/v) : volumes / volumes

(p/v) : poids / volumes

μL : Microlitre

μg : Microgramme

[Bmim][Cl] : 1-Butyl-3-méthylimidazolium chloride

[Amim][Cl] : 1-Allyl-3-méthylimidazolium chloride

SDS-PAGE : Électrophorèse sur gel de polyacrylamide en présence de dodécylsulfate de sodium

mM : Millimole par litre

DTT : Dithiothréitol

EDTA : Acide éthylènediaminetétraacétique

SDS : Dodécylsulfate de sodium

(p/p) : Poids/ poids

MPa : Mégapascal

(v/p) : Volumes / poids

Tr/min : tour par minute

W : watts

θ : Thêta

a.u : Unité astronomique.

RMN : Résonance magnétique nucléaire

RMN ¹³C : Résonance magnétique nucléaire du carbone 13.

ppm : Partie par million

CHNS /O : Analyse élémentaire de carbone, hydrogène, azote, soufre, oxygène.

Suite à l'évolution de la science, le monde de la population à augmenter de manière phénoménale, notamment la consommation de la viande de volaille. Cependant l'industrie de la volaille est devenue l'une des plus grandes industries alimentaires.

Dans le monde 24 milliards de poulets sont saignés chaque année et environ 8,5 milliards de tonnes de plumes sont produites [1]. Ainsi, libérées dans l'environnement sans traitement approprié, les plumes sont devenues une source de pollution en raison de leur nature récalcitrante, entretenant de nombreux microorganismes pathogènes et émettant divers polluants tels que le protoxyde d'azote, l'ammoniac et le sulfure d'hydrogène, ce qui présente une menace à la santé publique [2].

Dans toutes les parties du monde, les chercheurs scientifiques ont mené des programmes de traitement et de recyclage des déchets en développant des méthodes économiques et amies à l'environnement afin d'augmenter la valeur des plumes pour les valoriser dans divers domaines (biomédicaux, emballage, production de bioénergie et du plastique, etc.).

Les plumes sont constituées de 91% de kératine, une protéine fibreuse d'une teneur élevée en cystéine d'environ (7–13%), ce qui lui confère une nature xénobiotique et une stabilité élevée en formant une structure de réseau reliée par des ponts disulfures. La kératine des plumes est une protéine insoluble d'une structure de feuille β avec un faible poids moléculaire d'environ 10 kDa.[3] Cette dernière peut être extraite à partir des plumes et exploiter comme matière première naturelle pour la production de films, d'hydrogels, de micro/nanoparticules à usage cosmétique, pharmaceutique, médical, etc. [3].

Le travail présenté dans ce mémoire cible principalement la récupération des déchets de plumes et leur exploitation pour la production de la kératine d'où la protection de l'environnement est un enjeu prioritaire.

Le but de ce projet est d'extraire la kératine des plumes collectées à partir d'abattoir de la région de Blida sans modifier sa composition en utilisant le DMSO comme solvant d'extraction, puis effectuer une caractérisation par des analyses physiques, chimiques (FTIR- DRX-MEB-Rx) et biochimiques.

Notre mémoire est structuré selon deux parties :

Une partie de **synthèse bibliographique** constituée de trois chapitres :

- ✓ **Le premier chapitre** est consacré à l'étude de la kératine et ces dérivés, il présente ces différentes propriétés et caractéristiques ainsi que ces applications en pharmaceutique et en cosmétique.
- ✓ **Le second chapitre** s'intéresse à l'étude des plumes de volailles comme source abondante de kératine ainsi que l'industrie avicole.
- ✓ **Le troisième chapitre** introduit les différents domaines de valorisation potentielle des déchets de plumes.

Une partie expérimentale a son tour composée de deux parties :

- ✓ **Etude expérimentale** : présente la méthodologie adoptée pour l'extraction et la caractérisation de la kératine des plumes collectées à partir d'abattoir de la région de Blida.
- ✓ **Le chapitre quatre** : présente une étude comparative entre les différents résultats obtenus dans des travaux antérieurs sur les techniques d'extraction et de caractérisation de la kératine des plumes.

1.1. Introduction [4][5]

La kératine est présente chez presque tous les vertébrés. Elle est issue de la kératinisation des cellules mortes de la peau en s'accumulant dans la couche superficielle. Considérée comme étant le troisième biopolymère non toxique le plus abondant dans l'environnement après la cellulose et la chitine avec des propriétés uniques de biodégradabilité et de biocompatibilité, elle a connu un grand intérêt de la part des chercheurs qui ont réalisé un massif travail en étudiant la caractérisation structurale, la composition chimique, et les propriétés biochimiques/physicochimiques. Ceci a abouti au développement de diverses formes de kératine (gels, films, nano / microparticules), qui ont été exploitées dans divers domaines industriels (pharmaceutique, cosmétique, médical, etc.).

1.2. Définition de la kératine

Le mot « kératine » fut apparu pour la première fois dans la littérature vers 1850 pour décrire le matériau qui composait les tissus durs comme les cornes d'animaux et les sabots (la kératine vient du grec « kera » signifiant corne) [6].

La kératine est une protéine fibreuse riche en soufre. C'est une molécule insoluble qui représente les principaux constituants structuraux des phanères : (cheveux, ongles, griffes, sabots, écailles, plumes, cornes, bec, etc.) [7].

Elle fournit un moyen de défense et une fonction de protection dans l'adaptation des vertébrés vis-à-vis l'environnement extérieur [8].

1.3. Structure de la kératine

La kératine est un biopolymère complexe d'une structure fibreuse construite à partir d'hélices α (α -kératine) ou des feuilles β plissées (β -kératines) maintenues ensemble par des liaisons hydrogène (H) et des ponts disulfures (S-S) [7].

La présence des liaisons disulfures et hydrogène dans la kératine lui confère une stabilité mécanique, rigidité extraordinaire et résistance à la dégradation par les enzymes protéolytiques comme la trypsine, la pepsine et la papaine (figure 1.1). Cependant, la présence des groupes fonctionnels réactifs, en particulier le squelette peptidique, les ponts disulfures (S-S), la fonction amine ($-\text{NH}_2$), et d'acide carboxylique ($-\text{COOH}$), rend la kératine chimiquement réactive dans des conditions favorables [9].

La chaîne d'acides aminés constituant la protéine de la kératine peut varier d'un tissu à l'autre en nombre et en séquence, ainsi qu'en polarité, charge et taille, ce qui influence leurs propriétés et leur fonction [10].

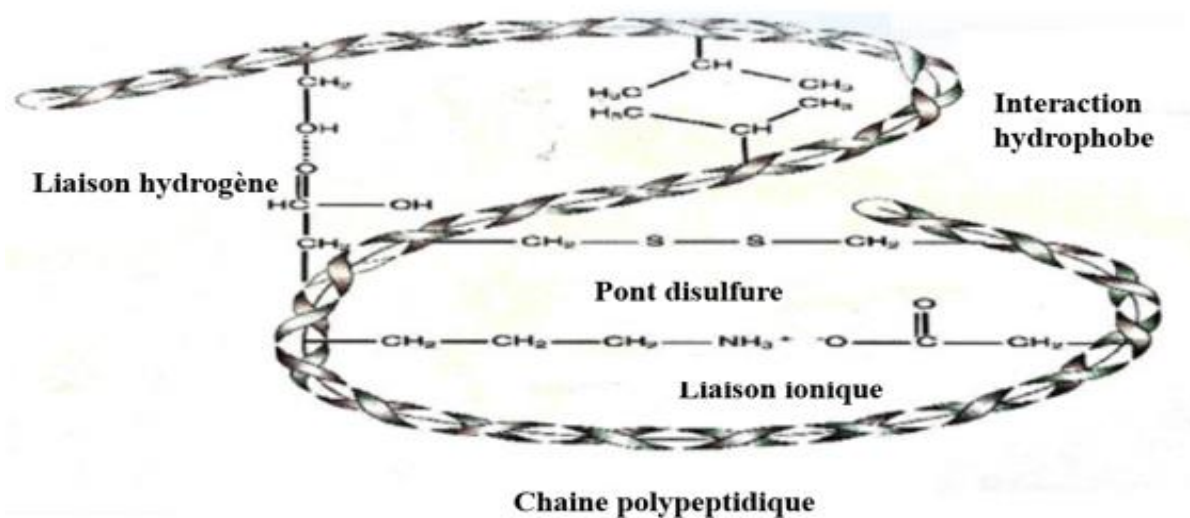


Figure 1.1 : Illustration schématique de la structure de la kératine montrant les diverses liaisons inter et intramoléculaires (liaisons hydrogènes, ioniques, disulfures). [11]

1.4. Type de kératine :

Les polypeptides dans les kératines peuvent se produire dans deux configurations principales : l'hélice α et la feuille β , également connue sous le nom de feuille plissée [12].

1.4.1. Différence entre α -kératines et β -kératines [8]

1.4.1.1. La distribution naturelle (Tableau 1.1.)

Tableau 1.1 : La distribution des kératines α et β . [8]

| | |
|---|--|
| α -kératine | Laine, cheveux, plumes, ongles, cornes, sabots , stratum corneum |
| β -kératines | Plumes, becs et griffes aviaires, griffes et écailles reptiliennes |
| α -kératine et β -Kératine | Épiderme reptilien, écailles de pangolin. |

1.4.1.2. Caractéristiques structurelles

- ✓ La structure filament-matrice (Tableau 1.2 et Figure 1.2)

Tableau 1.2 : Les caractéristiques structurales d' α et β -kératine. [8]

| | α -Kératine | β -kératine |
|--|---|---|
| Similitude: caractéristique structurelle | Structure à matrice filamenteuse : FI et filaments β -kératine incorporés dans une matrice amorphe. Les FI et les filaments β -kératine génèrent des diagrammes de diffraction des rayons X caractéristiques. | |
| Diamètres des filaments | FI : ~ 7 (nm) Basé sur une structure hélicoïdale | Filaments de β -kératine : 3–4 (nm). Basé sur une structure en feuille plissée β |
| Masse moléculaire | (40–68 kDa). | (10-22 kDa). |
| Constituants des protéines | La matrice est constituée de protéines à haute teneur en soufre et en glycine – tyrosine, alors que les FI se composent de plusieurs types de protéines. | Le filament et la matrice sont incorporés dans une seule protéine. |
| Rigidité | Elevée | Moins rigide que l' α kératine |

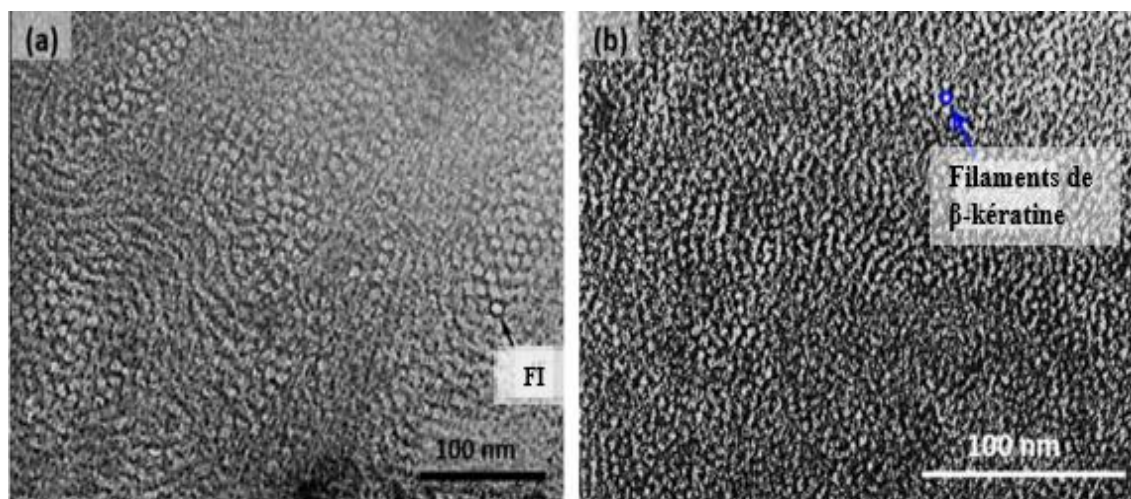


Figure 1.2 : Micrographies électroniques à transmission des matières kératiniques typiques avec une structure à matrice filamenteuse : (a) coupe transversale d'un cheveu humain (α -kératine), coloré au tétr oxyde d'osmium, montrant des FI de 7 nm de diamètre enchâssés dans une matrice plus foncée ; (b) coupe transversale d'un rachis de plumes de mouette (β -kératine), coloré au permanganate de potassium, filaments de β -kératine de 3,5 nm de diamètre différenciés par la matrice densément colorée. [8]

✓ **Structure moléculaire et formation des filaments (Figure 1.3 et Figure 1.4).**

Les chaînes d'hélices individuelles et intrinsèquement flexibles dans la kératine adoptent une forme hélicoïdale qui présente les caractéristiques suivantes :

- La torsion est droitère.
- Chaque tour de l'hélice nécessite 3.6 acides aminés, soit 11 atomes de squelette.
- Les chaînes latérales s'étendent vers l'extérieur de l'hélice et interagissent donc avec l'environnement.
- La stabilité est maintenue par des liaisons hydrogènes intramoléculaires [13].

La figure 1.3.b montre le processus de formation des FI, ce dernier passe par différentes étapes :

1. Deux chaînes α -hélices droites et isolées forment une bobine enroulée gauchère, le diamètre (45 nm de long).
2. Les dimères sont associés de bout en bout et rangés côte à côte par des liaisons disulfures afin de former un protofilament (environ 2 nm de diamètre).
3. Deux protofilaments s'associent latéralement en une protofibrille ; quatre protofibrilles se combinent en FI circulaires ou hélicoïdaux d'un diamètre de 7 nm.

Les FI s'emballent dans une conformation super-enroulée et se lient aux protéines de la matrice.

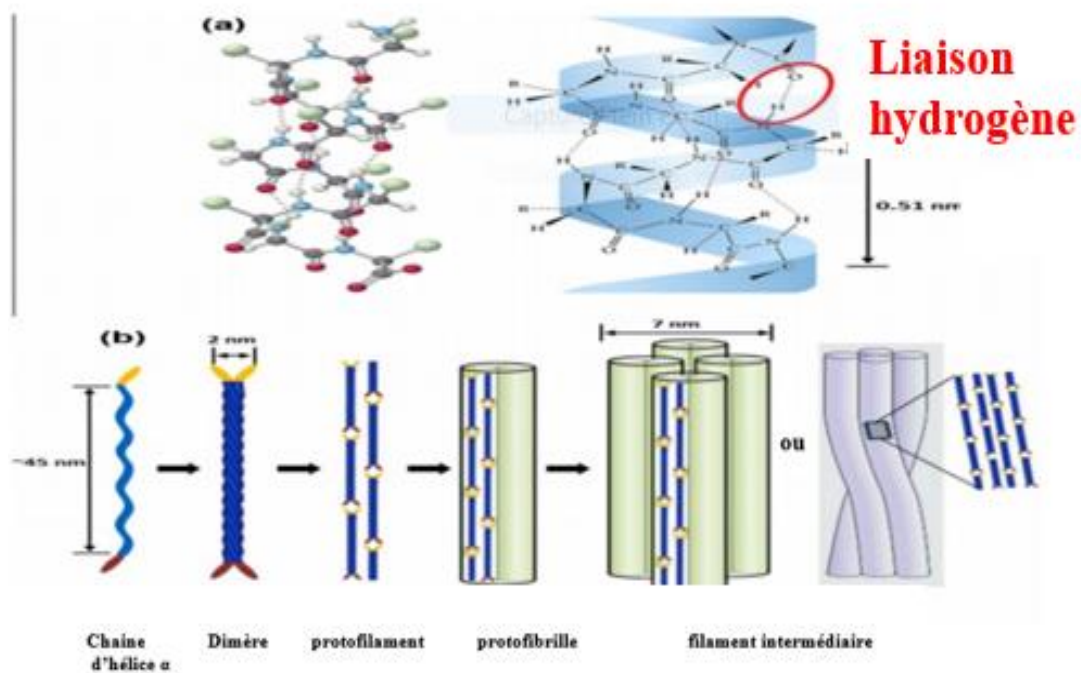


Figure 1.3 : La structure des FI de la kératine α : (a) : un modèle boule et bâton de la chaîne polypeptidique, (b) : dessin schématique de la formation des filaments intermédiaires. [8]

Pour la β -kératine, la feuille plissée se compose de β -brins emballés latéralement qui peuvent être parallèle ou antiparallèle (plus stable), et les chaînes sont maintenues ensemble par l'hydrogène intermoléculaire.

La structure de la feuille plissée est stabilisée par deux facteurs : Les liaisons hydrogènes entre les β -brins contribuent à former une feuille et la planéité de la liaison peptidique oblige cette dernière à être plissée.

La figure 1.4.b montre le processus de formation des filaments de la β -kératine, ce dernier passe par différentes étapes :

1. La région centrale de la chaîne polypeptidique se replie pour former quatre β -brins latéraux qui se lient ensuite par des liaisons hydrogènes, résultant en une feuille plissée.
2. La feuille se déforme pour se trouver dans une hélice gauchère d'une surface réglée.
3. Deux feuilles plissées sont reliées par un diadème horizontal, se superposent et prennent deux sens opposés, formant le filament d'un diamètre de 4 nm.

- Les parties terminales des chaînes peptidiques s'enroulent autour des filaments de β -kératine et forment la matrice.

Les kératines peuvent être considérées comme un composite polymère de filaments cristallins noyés dans une matrice amorphe.

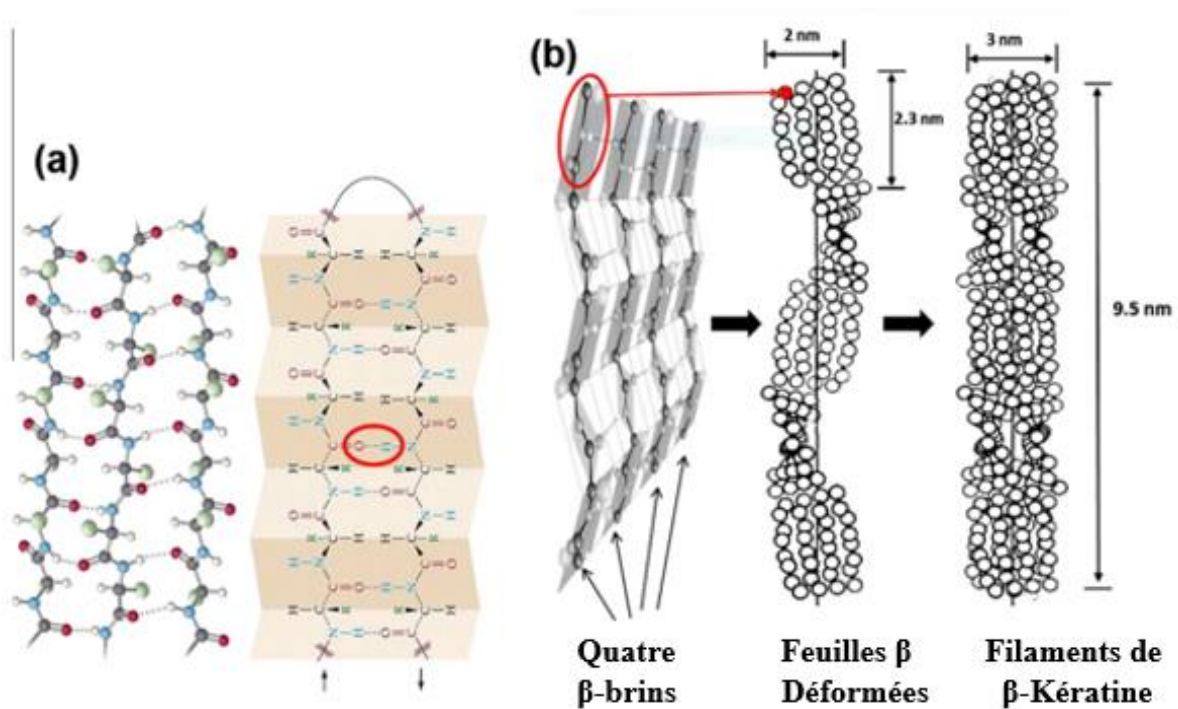


Figure 1.4 : Structure des filaments β -kératine : (a) : un modèle boule et bâton de la chaîne polypeptidique, et illustration du feuillet plissé β . (b) : dessin schématique de la formation des filaments β -kératines. [8]

1.4.1.3. Biochimie des kératine α et β

✓ Solubilité

Due à la présence des réticulations disulfures intra et intermoléculaires, la kératine est insoluble dans tous les solvants tel que l'eau pure, les solutions aqueuses acides ou basiques et les solvants organiques. Par conséquent, la dissolution et l'extraction de la kératine sont difficiles par rapport

à d'autres polymères naturels, tels que le collagène ou l'amidon [14]. La protéine de la kératine est soluble dans des solutions contenant des agents dénaturants, comme l'urée [10].

Plusieurs procédures de purification ont été développées pour obtenir des dérivés de kératine. Pour les α kératines, des méthodes de réduction, d'oxydation et de sulfitolyse ont été utilisées, tandis que pour les β kératines le thioglycolate alcalin et une combinaison d'un réactif de rupture de liaison disulfure et d'un dénaturant protéique ont été décrits dans la littérature (Tableau 1.3).

Tableau 1.3 : Solubilité de la kératine α et β . [8]

| α -kératine | β -kératine |
|--|---|
| <u>Réduction</u> : par le thioglycolate de potassium dans l'urée pour obtenir 80 à 97% de kératine à partir de la corne, du sabot, des cheveux, et par électrophorèse sur gel d'amidon en fractions riches et pauvres en soufre. | Thioglycolate alcalin : par le thioglycolate de sodium dans l'absence d'oxygène à pH 11 pour obtenir 80 à 90% de kératine de plumes |
| <u>Oxydation</u> : en traitant la laine avec de l'acide peracétique et un alcali dilué. <u>Sulfitolyse</u> : par bisulfite de sodium avec de l'urée et un agent oxydant | <u>Sulfitolyse</u> : Combinaison d'un réactif de rupture de liaison disulfure et d'un dénaturant protéique |

✓ Composition en acides aminés :

L'analyse des acides aminés a été réalisée par l'hydrolyse acide des protéines et la chromatographie d'échange d'ions automatisée.

Les kératine α et β ont une teneur élevée en cystéine et une très faible teneur en histidine et en méthionine, cependant les α -kératines sont plus riches en cystéine et d'acide glutamique tandis que les β -kératines sont plus riche en alanine et en glycine, proline et sérine. (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 : Composition en acides aminés (résidus pour 100 résidus) des matières kératiniques représentatives d' α et β -kératine. [8]

| | Laine (représentant la α -kératine) | Rachis de plumes (représentant la β -kératine) |
|---|--|--|
| Alanine | 5.5 | 8.7 |
| Arginine | 6.6 | 3.8 |
| Acide aspartique (y compris l'asparagine) | 6.5 | 5.6 |
| Cystéine | 11.4 | 7.8 |
| Acide glutamique (y compris la glutamine) | 11.3 | 6.9 |
| Glycine | 8.8 | 13.7 |
| Histidine | 0.8 | 0.2 |
| Isoleucine | 3.4 | 3.2 |
| Leucine | 7.8 | 8.3 |
| Lysine | 3.0 | 0.6 |
| Méthionine | 0.5 | 0.1 |
| Phénylalanine | 2.5 | 3.1 |
| Proline | 6.0 | 9.8 |
| Sérine | 9.6 | 14.1 |
| Thréonine | 6.1 | 4.1 |
| Tyrosine | 4.1 | 1.4 |
| Valine | 5.9 | 7.8 |
| | | Tryptophane 0.7 |

1.5. Sources de la kératine [15]

La kératine et selon sa teneur en soufre est divisée en deux catégories :

- ✓ Kératine trichocytaire : également appelée kératine dure avec une teneur élevée en soufre (~ 5%). Elle se trouve dans les structures liées à l'épiderme telles que la laine, les poils, les plumes, et les ongles ainsi que les cornes et les sabots des mammifères, des reptiles et des oiseaux. Elle contient une teneur élevée en cystéine (4–17%) et faible en glycine. Contrairement à la kératine molle, la kératine dure possède une durabilité et une résistance structurelles et agisse comme échafaudage structurel.
- ✓ Kératine épithéliale : également appelée kératine molle avec une faible teneur en soufre (~1%). Elle se trouve dans la couche cornée de la peau, et a une faible teneur en cystéine (<3%). La kératine molle stabilise les cellules de l'épithélium.

1.5.1. La kératine des cheveux humains (Figure 1.5)

Les kératines des cheveux humains sont classées comme des kératines dures, composées de 65 à 96% de protéines, de 1 à 9% de lipides, de 3% de mélanine et de composés mineurs, qui dépendent de la teneur en humidité.

Les fibres des cheveux humains contiennent trois parties distinctes : la cuticule, le cortex et la moelle, dont :

- La cuticule, qui constitue les couches externes des fibres capillaires, est principalement composée de 5 à 12 β -kératines en couche protégeant les couches internes et retenant l'humidité.
- Le cortex est principalement composé d' α -kératines (50-60%), kératines γ (20-30%), et des granules de mélanine piégés à l'intérieur des brins de cortex représentant ainsi 70 à 95% de la masse totale des cheveux.
- La moelle est une partie poreuse de certaines fibres capillaires humaines et elle ne contient qu'un faible pourcentage de masse de fibres. Elle a une faible teneur en cystine et en soufre par rapport à la fibre entière, et des quantités relativement importantes d'acides aminés acides et basiques.

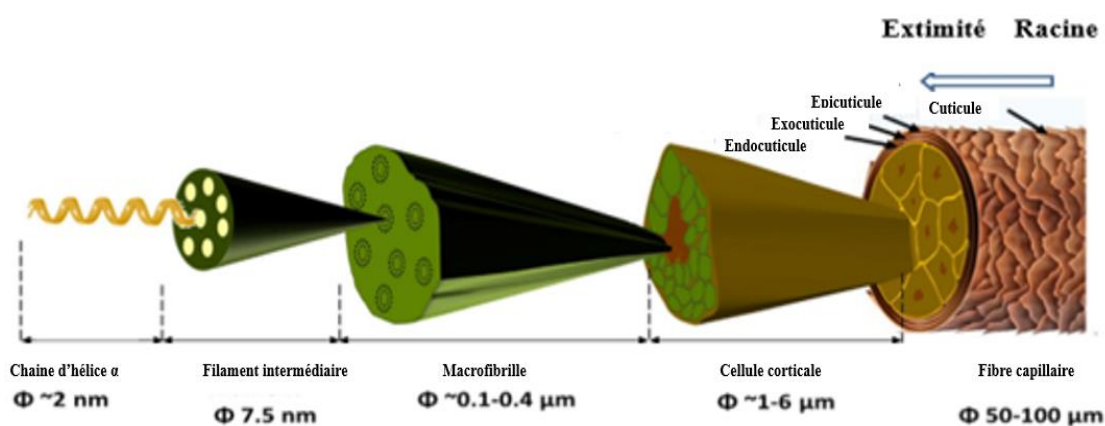


Figure 1.5. La structure hiérarchique de la fibre capillaire humaine. [15]

1.5.2. La kératine de la laine

La structure de la fibre de la laine est extrêmement complexe et contient environ 82% de protéines kératiniques riches en cystéine, et environ 17% de protéines non kératiniques pauvres en cystéine situées dans la membrane cellulaire et environ 1% de matière non protéique constituée de lipides cireux et d'une petite quantité de polysaccharides.

Elle est de 20 à 80 μm de diamètre et d'une longueur pouvant aller jusqu'à 20 cm. L'analyse élémentaire montre que la laine non traitée se compose de : C : 44.72, H : 7.69, N : 14.89, S : 3.49 [16].

1.5.3. La kératine des plumes [15][9]

Les kératines de plumes sont formées de la structure β -kératine qui est des polypeptides d'approximativement 100 acides aminés avec un poids moléculaires variant de 10 à 30 kDa, et quelques structures en hélice α . Il a été constaté qu'une petite quantité d' α -kératine contribue au développement de la plume. Les β -kératines des oiseaux ont une chaîne d'acides aminés plus courte que celle des autres kératines trouvées chez les mammifères.

Par ailleurs, une étude montre que la plume comporte 9,38% d'hélice α , 47,19% de feuille β , 32,25% de β -tour et 11,18% au hasard.

La kératine des plumes diffère également de la kératine de la laine dans la teneur en cystéine ; où les plumes contiennent environ 7% et la laine contient 11 à 17%.

Le Tableau 1.5 résume la composition en acides aminés des kératines des cheveux humains, des plumes, et de la laine.

Tableau 1.5 : Comparaison de la composition en acides aminés entre les kératines des cheveux humains, des plumes, et de la laine.

| Acides aminés | La laine | Les cheveux humains | Les plumes |
|------------------|-----------|---------------------|------------|
| Acide aspartique | 6.4-7.0 | 7.09-9.3 | 5.42-6.7 |
| Acide glutamique | 11.3-13.4 | 11.56-16.6 | 6.9-9.7 |
| Lysine | 2.85-3.4 | 2.62-3.5 | 0.6-1.8 |
| Arginine | 3.3-7.1 | 3.19-7.2 | 1.7-4.96 |
| Histidine | 0.8-0.9 | 0.7-1.1 | 0.2-0.5 |
| Serine | 9.50-10.9 | 9.0-11.66 | 7.2-14.1 |
| Thréonine | 5.8-6.4 | 5.5-19.64 | 0.8-4.1 |
| Tyrosine | 1.96-4.1 | 1.2-2.5 | 4.6-4.15 |
| Cystéine | 5.7-11.4 | 7.6-12.92 | 5.07-7.8 |
| Méthionine | 0.4-0.59 | 0.4-2.49 | 0.1-0.41 |
| Leucine | 6.8-8.1 | 1.2-8.01 | 6.16-8.3 |
| Valine | 5.80-6.4 | 6.18-6.86 | 2.0-7.8 |
| Phénylalanine | 2.1-2.9 | 1.91-2.22 | 3.1-4.3 |
| Glycine | 8.0-9.4 | 5.2-6.56 | 7.16-16.2 |
| Alanine | 5.2-5.81 | 4.70-6.9 | 3.13-8.7 |
| Proline | 6.0-7.1 | 3.8-9.55 | 9.8-18.8 |
| Isoleucine | 3.1-3.5 | 3.12-3.7 | 3.2-4.3 |

1.5.4. La kératine des cornes, sabots, ongles et bec [17]

- La corne est un tissu animal dur et qui se compose principalement de : kératine, des acides aminés libres, des peptides, des lipides, et des restes de microéléments (Calcium, aluminium, chrome, cuivre, fer, manganèse et zinc). La protéine de kératine dans la corne animale est la fibre dure, et son traitement est très difficile.
- La kératine des sabots contient une conformation hélicoïdale α avec un mélange de feuille β et possède une stabilité thermique élevée.
- L'ongle humain est un tissu important du corps humain et composé principalement d'un réseau de kératine réticulé, une scléroprotéine contenant de grandes quantités de soufre (3,8%) avec plusieurs liaisons disulfures. Cette structure unique se traduit par une barrière de perméabilité très efficace.
- Le bec des oiseaux a une coquille externe de kératine dure qui se compose presque totalement en protéines.

1.6. Propriétés de la kératine

1.6.1. Les propriétés physico-chimiques [10]

1.6.1.1. La masse moléculaire

La séparation et la comparaison entre la kératine humaine et bovine en utilisant l'électrophorèse sur gel bidimensionnelle ainsi que l'immunotransfert montre que la masse moléculaire des kératines chez les mammifères varie de 40 à 70 kDa.

1.6.1.2 Le point isoélectrique

Les kératines peuvent être distinguées en fonction de leur point isoélectrique. La distinction entre les kératines dites du type I (acide ou sous-famille A) et celles dites du type II (basique ou sous-famille B), est basée sur le pH auquel les protéines sont neutres. Ce dernier correspond au point isoélectrique. Le pI des kératines peut être changé en raison de la modification post-traductionnelle de leurs acides aminés.

Exemples :

- Chez l'homme, les kératines de type I ont un pI de 4,9 à 5,4, tandis que les kératines de type II ont un pI de 6,5 à 8,5.
- Chez les bovins, les kératines de type I ont un pI <5,6 et les kératines de type II ont un pI > 6,0.
- La kératine des cheveux, les ongles et de la laine a un pI de 4.7 à 5.4.

1.6.1.3. Le comportement vis-à-vis à l'humidité [18]

Les fibres de la kératine sont hygroscopiques, néanmoins elles présentent un caractère hydrophobe prononcé en surface. Ce comportement est important pour l'utilisation de la laine au niveau de l'habillement, due au fait que l'intérieur de la fibre adsorbe la vapeur d'eau, alors que l'eau liquide est repoussée par la surface extérieure hydrophobe de la cuticule.

1.6.1.4. La dégradation de la kératine [19][9]

✓ Le traitement par les acides minéraux

L'hydrolyse acide fournit des conditions très sévères qui peuvent détruire certains acides aminés utiles.

Combiner un traitement acide à la température d'ébullition pendant environ 2-3 h pourrait ouvrir les ponts disulfures de la kératine et former des polypeptides hydrosolubles et des oligopeptides ou parfois quelques acides aminés libres. L'inconvénient de ce processus est la dégradation des acides aminés et des chaînes polypeptidiques à haute température qui affecte les valeurs d'amélioration nutritionnelle.

✓ **Le traitement par les alcalins**

Les kératines se dissolvent dans les alcalins à des pH d'environ 10 à 11 ou plus élevé, et cette dissolution se fait assez rapidement à des températures élevées.

La kératine des plumes d'oiseau peut être obtenue par hydrolyse alcalin. Au cours de ce processus, des produits chimiques comme le sulfure d'ammonium ou le sulfure de sodium peuvent réduire le groupe disulfure en groupe thiol. Aussi, en utilisant du β -mercaptoéthanol, les groupes SH libres peuvent être partiellement modifiés. Le processus a été effectué pendant 90 min à 45–80 °C. Le poids moléculaire de la kératine obtenu était approximativement entre 1 kDa et 11 kDa.

Pour la production de la kératine à partir des plumes de poulet, l'utilisation de 2-mercaptoéthanol et le bisulfite de sodium donne environ 84% et 82% de kératine, toutefois l'utilisation de l'hydroxyde de sodium (2,5%) a amélioré la production de la kératine jusqu'à 94%.

✓ **Le traitement hydrothermique**

Le traitement hydrothermique dépend d'une pression de vapeur élevée de 10 à 15 psi avec ou sans température élevée (80-140 °C) en présence des solutions acides (acide chlorhydrique, acide sulfurique et autres acides) ou des solutions alcalines (hydroxyde de sodium, hydroxyde de potassium, carbonate de sodium et autres).

1.6.2. Les propriétés mécaniques [8]

1.6.2.1. Viscoélasticité

La viscosité représente la résistance d'un fluide à l'écoulement, elle est mesurée par le rapport de la contrainte de cisaillement au gradient de vitesse.

La viscoélasticité est d'une importance primordiale pour les tissus kératiniques car elle fournit un support mécanique, absorbe l'énergie et amortit les fluctuations de charge.

Généralement, avec l'augmentation du taux de déformation, les tissus kératiniques deviennent plus rigides et plus forts avec une contrainte de rupture décroissante.

1.6.2.2. La sensibilité à l'hydratation

Les propriétés mécaniques des kératines sont fortement influencées par la teneur en eau. Quand l'humidité augmente, la rigidité et la résistance diminuent alors que la contrainte de la rupture augmente.

La diffraction des rayons X et les études expérimentales ont révélé que les protéines de la matrice pourraient être considérées comme sensible à l'eau, alors que les FI sont cristallins et ne sont pas affectés mécaniquement. Cela peut être appliqué aux matières kératiniques car les FI sont identiques dans toutes les kératines dures des mammifères.

1.6.2.3. Les propriétés électriques [18]

La kératine est un matériau isolant qui piège facilement l'électricité statique. Elle a une tendance à développer de la charge statique une fois frottée avec différents matériaux, la peau humaine, le plastique, etc.

1.7. Biodégradation de la kératine [20]

1.7.1. La biodégradation et gestion des déchets de kératine

La kératine est un polymère organique biodégradable où la biodégradation est liée à de fortes liaisons covalentes et à sa réticulation prolongée au sein de sa structure causant ainsi un problème de gestion des déchets.[21]

Chaque année plus de 65 millions de tonnes de déchets kératiniques sont mis en décharge ce qui est dangereux pour l'environnement [22].

Plusieurs systèmes de traitement thermique, chimique et biologique de ces déchets ont été utilisés y compris l'incinération, l'hydrolyse acide ou alcalin et thermo-hydrolyse. Néanmoins l'utilisation de ces systèmes n'est pas efficace. Cela est due aux inconvénients suivants :

- L'incinération consomme de l'énergie et génère une grande quantité de dioxyde de carbone.
- Le traitement thermique alcalin détruit certains acides aminés essentiels.

La biodégradation par les microorganismes présente plusieurs avantages, c'est un procédé sûr, rentable et diminue la production de dioxyde de carbone. Malheureusement, l'emploi des mésophiles permet la propagation de nombreux agents pathogènes humains et animaux, y compris les champignons kératolytiques qui provoquent des maladies de la peau. D'autre part, l'utilisation de thermophiles et d'hyperthermophiles à une température élevée est plus sûre contre les agents pathogènes et les microorganismes producteurs de toxines.

1.8. Applications industrielles de la kératine

La kératine des plumes est une source potentielle de biomatériaux abondants, peu coûteux, respectueux à l'environnement et commerciaux, elle est d'une importance incontournable dans l'industrie pharmaceutique, cosmétique, biotechnologique, médicale, ...etc. [23].

1.8.1. L'industrie cosmétique

La kératine est devenue quasi incontournable dans l'industrie cosmétique, elle rentre dans la production de divers produits tels que les crèmes et les shampoings. Ainsi leur existence dans la cuticule des cheveux et la couche cornée aide à préserver l'hydratation de la peau tout en interagissant avec les cosmétiques [23].

Plusieurs applications ont été décrites au fil du temps citant :

- La kératine hydrolysée et la kératine capillaire hydrolysée ont été utilisées pour le traitement des cheveux. Jusqu'à 0,2% de kératine a été rapportée dans le mascara, alors que la quantité est $\approx 0,028\%$ dans les savons de bain et détergents.
- Capacité de rétention d'eau, hydratation et élasticité de la peau s'est améliorée avec l'application de la kératine [24].
- La kératine à haut poids moléculaire est principalement utilisée pour les soins de la peau en raison de son individualité comme filmogène et hydrophile.
- Film de kératine où le revêtement sur la peau procure une sensation douce [23].

- Des protéines associées à la kératine à partir de différentes sources ont été développées et appliquées en tant que micro-échafaudages en cosmétique [25].
- L'hydrolysate de kératine (HK) affecte l'hydratation de la peau, il peut agir à la fois comme humectant et occlusifs (réduisant la perte d'eau trans-épidermique).
- HK figure dans les shampooings et après-shampooings, lotions et sérums nutritifs pour les cheveux, ainsi que les mascaras, vernis à ongles et agents de maquillage pour les yeux. Leurs effets sont de former un film protecteur, lissage de la structure des cheveux ou des ongles, réguler la consistance des produits et favoriser la formation de mousse.
- HK réduit la tension superficielle, cependant ajouté en cosmétique permet de réduire la quantité d'émulsifiant ajoutée pour stabiliser les crèmes.
- HK limite les effets d'irritation déclenchés par les agents nettoyants (tensioactifs) sur la peau, les yeux et les cheveux.
- Le haut pouvoir tampon d'HK est exploité pour stabiliser le pH des cosmétiques [26].

1.8.2. L'industrie pharmaceutique

Due à la préoccupation environnementale croissante, les matériaux biosourcés tels que la kératine peuvent remplacer les produits pétrochimiques pour des applications pharmaceutiques [27].

Les nanoparticules de la kératine, ainsi que les hydrogels, films et éponges à base de kératine ont été proposés comme un système d'administration des médicaments anti-inflammatoires, antitumoraux ou antibiotiques [28].

1.8.2.1. Les nanoparticules de la kératine

✓ Administration des médicaments

En raison de leurs grandes surfaces, les nanoparticules sont préférées à l'association et la libération de divers produits pharmaceutiques pour divers avantages tels que : Cibler précisément le site de livraison, prolonger et contrôler la libération [29].

Le développement de nanoparticules de kératine-g-polyéthylène glycol chargées de la doxorubicine (DOX) a indiqué que l'efficacité de chargement augmente avec l'augmentation de la teneur en kératine dans les nanoparticules de kératine-g-PEG, ceci est due à la formation des liaisons hydrogènes entre la kératine et le médicament. Ainsi la libération du médicament a été étudiée à différentes concentrations de Glutathion (GSH) correspondant à celles présentes dans

les cellules et le plasma sanguin. La présence de trypsine et une concentration plus élevée en GSH a déclenché la libération du DOX chargée dans les nanoparticules. Étant donné que les nanoparticules de kératine-g-PEG ne présentent aucune cytotoxicité pour les cellules MCF-7, elles pourraient avoir des applications en tant que porteur de médicament pour le traitement du cancer [15].

Les nanoparticules de la kératine pourraient se dégrader efficacement dans le corps. Due à leur biocompatibilité et leur grande disponibilité, elles sont favorisées pour l'administration des médicaments par rapport aux polymères synthétiques et aux glucides. Elles pourraient être des véhicules d'administration des médicaments efficaces ciblant les reins et le foie pour une libération prolongée, et potentiels face à des maladies du bétail. Ainsi enduire les nanoparticules d'argent par les nanoparticules de la kératine permet d'améliorer leur stabilité dans l'eau [30].

✓ **Les activités anti-cancéreuses et antioxydantes**

Les nanoparticules de la kératine sont dotées d'une activité anti-cancéreuse. Une étude sur ses capacités d'agir comme un système d'administration pour la thérapie photodynamique du cancer a montré que les nanoparticules chargées de la kératine ont révélé une excellente capacité à traverser les cellules tumorales et entraîne une mort cellulaire plus important (90%) par rapport au chlore e6 libre. [31]

Dans une autre étude, les microparticules de la kératine montrent quelles sont aussi de puissants anti-cancéreux contre : HeLa (cervicale) et SK-OV-3 (ovaire). Cependant, une efficacité antioxydante très significative a été observée pour les microparticules de kératine traduisant de fortes activités à piéger des radicaux libres envers la DPPH et ABTS. [27]

1.8.2.2. L'hydrogel de kératine

L'hydrogel à base de kératine est entièrement biocompatible et favorise la libération lente des antibiotiques fournissant ainsi une activité antimicrobienne soutenue sans gêner la réparation des plaies dans le traitement des brûlures et lutte contre les infections. Un exemple illustrant cette capacité est l'hydrogel de kératine chargé de ciprofloxacine qui a réduit de manière significative la quantité de *P. aeruginosa* et *S. aureus* dans la brûlure de > 99% (4, 7, 11 et 15 jours) après la blessure comparé au traitement à la sulfadiazine d'argent [32].

1.8.2.3. L'hydrolysat de kératine [33]

Des études récentes ont montré que les kératines contiennent des séquences d'acides aminés avec des activités biologiques élevées telles que les activités antioxydantes, antimicrobiennes, enzyme de conversion de l'angiotensine I, inhibitrices de la dipeptidyl peptidase IV.

Une forte activité antioxydante a été enregistrée par l'hydrolysat enzymatique d'un mélange de corne et de sabot et de plume de poulet ainsi qu'une activité inhibitrice de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ECA) dans des hydrolysats de kératine des plumes de volailles.

✓ **Le pansement hémostatique**

Une étude animale sur l'application d'hydrogel de kératine comme un pansement pour les plaies sur une souris avec un foie artificiellement blessé a montré une perte de sang plus faible, et un maintien d'une pression artérielle moyenne stable ce qui a démontré l'utilisation potentielle d'hydrogels de kératine comme agent hémostatique [24].

✓ **Régénération nerveuse**

Plusieurs études in vitro ont montré que l'hydrogel à base de kératine des cheveux humains peuvent être utilisées pour induire une régénération nerveuse efficace [34].

1.8.2.4. Films de kératine [6]

Des études ont montré les diverses applications des films à base de kératine. Ils sont plus favorables à la prolifération cellulaire par rapport au verre et au collagène, néanmoins les films de kératine purs sont trop fragiles pour une utilisation pratique. Cependant, l'addition de glycérol a donné un film transparent, relativement solide, flexible et biodégradable. Des molécules bioactives telles que les phosphatases alcalines sont associées à des films de kératine pour des applications à libération contrôlée. Les films de kératine-Fibroïne de soie ont montré des propriétés d'antithrombogénicité améliorées et une biocompatibilité accrue en comparaison avec les films de fibroïne de soie ou de kératine seules. De plus, les films de kératine ont montré une meilleure transmission de la lumière et une meilleure résistance biomécanique par rapport au membrane amniotique humaine, ce qui rend ces derniers un alternatif prometteur pour la reconstruction de la surface oculaire. [35]

1.8.3. Le traitement du cuir et du textile [23][36]

- L'hydrolysat de kératine a été utilisé dans le traitement du cuir, en particulier pendant les opérations de tannage du chrome pour améliorer l'absorption du sel de chrome par le cuir.
- L'utilisation de l'hydrolysat de kératine issu des plumes de poulet et des cheveux humains dans le processus de retannage influence l'effet lubrifiant qui améliore la douceur des grains caractéristiques des cuirs.
- Fils filés à la main peuvent être fabriqués en mélangeant des fibres de plumes (barbes) avec du coton.
- Les plumes peuvent servir d'agent d'encollage pour les fils textiles. Cependant elles aident à améliorer la résistance à la traction et la résistance à l'abrasion des fils.
- Les plumes peuvent être de bonnes alternatives de polyvinyle pour le calibrage des textiles.

1.8.4. La kératine comme engrais [23]

Une solution d'acides aminés liés au soufre tiré de la kératine est utilisée pour préparer un engrais organique qui améliore le métabolisme des plantes. La kératine représente une bonne source d'azote. Néanmoins, l'utilisation des plumes de poulet comme un biofertilisant est limitée à cause des liaisons cystéines qui les rendent difficiles à dégrader. Cependant des traitements avec des microorganismes ont été utilisés afin d'augmenter l'utilité des déchets de plumes comme un biofertilisant.

1.8.5. Autres applications de la kératine [23][36]

- Les matières kératiniques sont utilisées comme additifs dans la préparation du béton et de la céramique.
- HK issu des plumes est utilisé comme un complément alimentaire pour la nourriture des ruminants en raison de sa composition similaire avec la protéine de soja.
- La modification enzymatique par enrichissement en lysine conduit à une augmentation de la valeur nutritive des aliments.
- L'oxydation des matières kératiniques clive et oxyde certaines liaisons disulfures pour former des peptides hydrosolubles et cette matière est utilisée comme agent de cicatrisation des plaies.

- La composition anti-incendie est préparée à partir d'une solution de colloïde organique dérivée de l'hydrolysate des cornes et des sabots.
- La présence d'une grande quantité d'azote dans les plumes lui rend un matériau utile comme retardateur de flamme. Ainsi une haute ignifugation a été transmise aux tissus après un traitement par le retardateur de flamme à base de plumes.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit les principales caractéristiques et propriétés de la kératine qui lui confère une importance incontournable dans différentes industries. Nous avons aussi présenté les différentes sources biologiques de cette protéine bioactive et non-toxique d'où les plumes représentent le biopolymère kératinique le plus abondant fournissant ainsi une source potentielle, facilement accessible et peu coûteuse pour la production de kératine (91%). [23][37]

2.1. Introduction [38][39]

Les plumes sont la caractéristique des oiseaux qui représentent environ 10% de leur poids corporel et fournissent de nombreuses fonctions. Elles assurent l'isolation et l'imperméabilité chez les volailles, elles permettent également à la plupart des oiseaux de voler en formant des surfaces qui donnent un élément aérodynamique dans le rôle est de soulever les ailes et la queue. La forme du corps profilée réduit la résistance de l'air pendant le vol. Chez les oiseaux aquatiques, le plumage assure la flottabilité.

Par ailleurs, la couleur du plumage peut fournir un camouflage ou des motifs utilisés à des fins sexuelles ou des affichages agressifs. Cette dernière peut résulter de deux manières : Soit par la présence des pigments (mélanines, caroténoïdes ou porphyrines), soit la structure de la plume fournit une couleur irisée ou non irisée.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'étude de la morphologie et les propriétés chimiques, physiques, thermiques, mécaniques et électriques ainsi que l'analyse biochimique des plumes afin de nous orienter vers les méthodes adéquates pour leur exploitation comme étant une source de kératine.

2.2. Structure et morphologie de la plume [4][40][41] (Figure 2.1 et Figure 2.2)

Les plumes sont des arrangements non homogènes d'une structure tégumentaire la plus complexe trouvée chez les vertébrés, avec des motifs de ramification hiérarchiques, ce qui leur confère une immense diversité.

La plume est formée d'un axe longitudinal inséré dans un follicule par un segment basale tubulaire appelé calamus qui est cylindrique, transparent et creux. Le calamus contient deux ouvertures : l'ombilic supérieur qui représente l'intersection entre le rachis et le calamus et l'ombilic inférieur à travers lequel la plume est nourrie pendant sa croissance. L'autre partie est le rachis, un élément central de la plume qui est situé en avant, et selon le type de plume, il est de section circulaire à rectangulaire qui se rétrécit vers la pointe de la plume.

Contrairement au calamus, le rachis n'est pas creux, mais rempli d'une moelle spongieuse composée de grandes cellules médullaires polygonales, et consiste en une alternance de couches de fibres orientées de façon opposée. Le noyau médullaire, fabriqué à partir de kératine, montre deux niveaux de porosité, ce qui minimise le poids des plumes, notamment parce qu'il occupe une grande partie du volume du rachis. En outre, le rachis est rempli de substances mortes, de pigments et de protéines, et sa base inférieure peut comporter une plume secondaire, appelée hyporachis.

Dans les marges latérales du rachis pousse le vexille, une structure comme une lame divisée en deux parties opposées. C'est le corps visible couvrant la plus grande zone de la plume formée par un réseau compliqué de crochets entrelacés appelées les barbicelles. Ces dernières proviennent du côté aplatis du rachis et grandissent en rangées ordonnées parallèles opposées les unes aux autres et dirigées vers l'extérieur et vers le bout de la plume et ont pour rôle de relier les barbules les unes aux autres, emboîtant ainsi les barbes qui représentent l'unité principale de ramification des plumes et qui sont généralement en série alignée fusionnée dans le rachis d'une structure en forme de feuilles ou de pales et d'une morphologie caractérisée par une coupe transversale légèrement ovoïde. Selon le type et la taille de la plume, les barbes pouvant être rigides ou flexibles et leur nombre peut varier de quelques dizaines de barbes à plusieurs centaines. Le rachis et les barbes sont des structures biologiques légères construites en kératine, utilisant le motif commun d'une coque solide et d'un intérieur cellulaire.

Chaque barbule est essentiellement une tige de cellules uniques. Basé sur le type de la plume, la morphologie des barbules peut être hautement spécialisée d'où la forme change en fonction de la partie où elles poussent. De plus, la direction ascendante dépend également de la distance sur la surface des barbes : les barbules sur le bord supérieur s'étendent perpendiculairement à l'extérieur du barbillon, mais les barbules sur le bord inférieur se produisent plus parallèlement au barbillon.

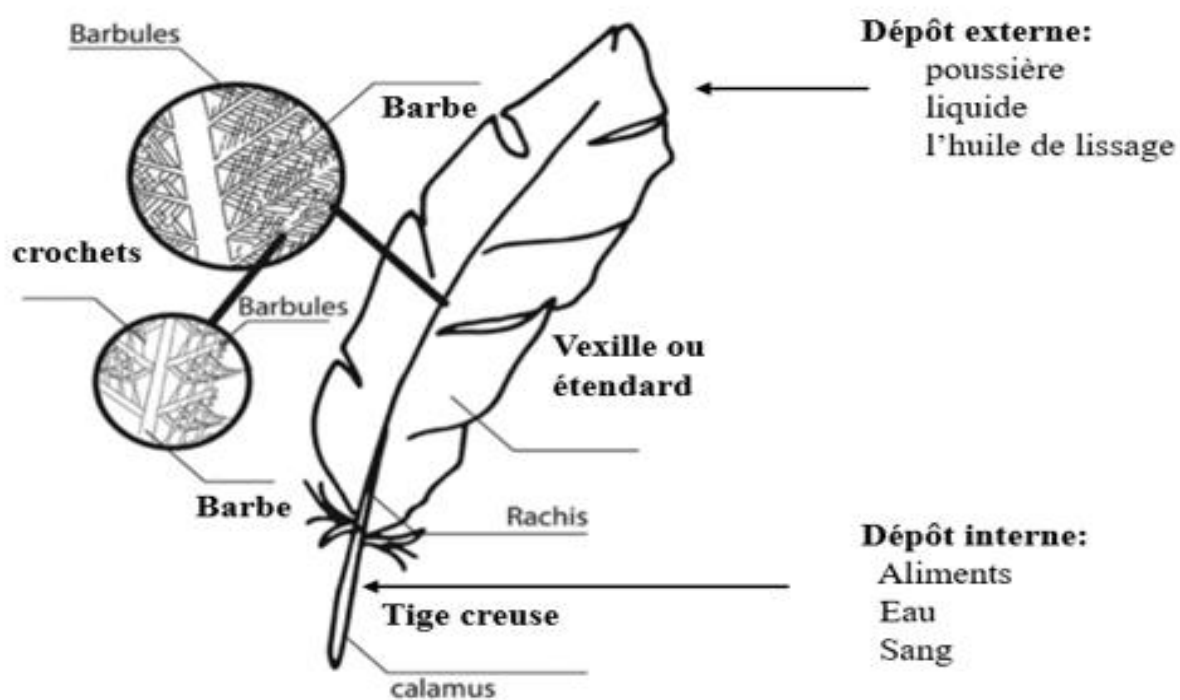


Figure 2.1 : Structure de la plume qui est composée d'une tige creuse (calamus) , d'un rachis, et d'un vexille ou étendard constitué de barbes et barbules. [42][43]

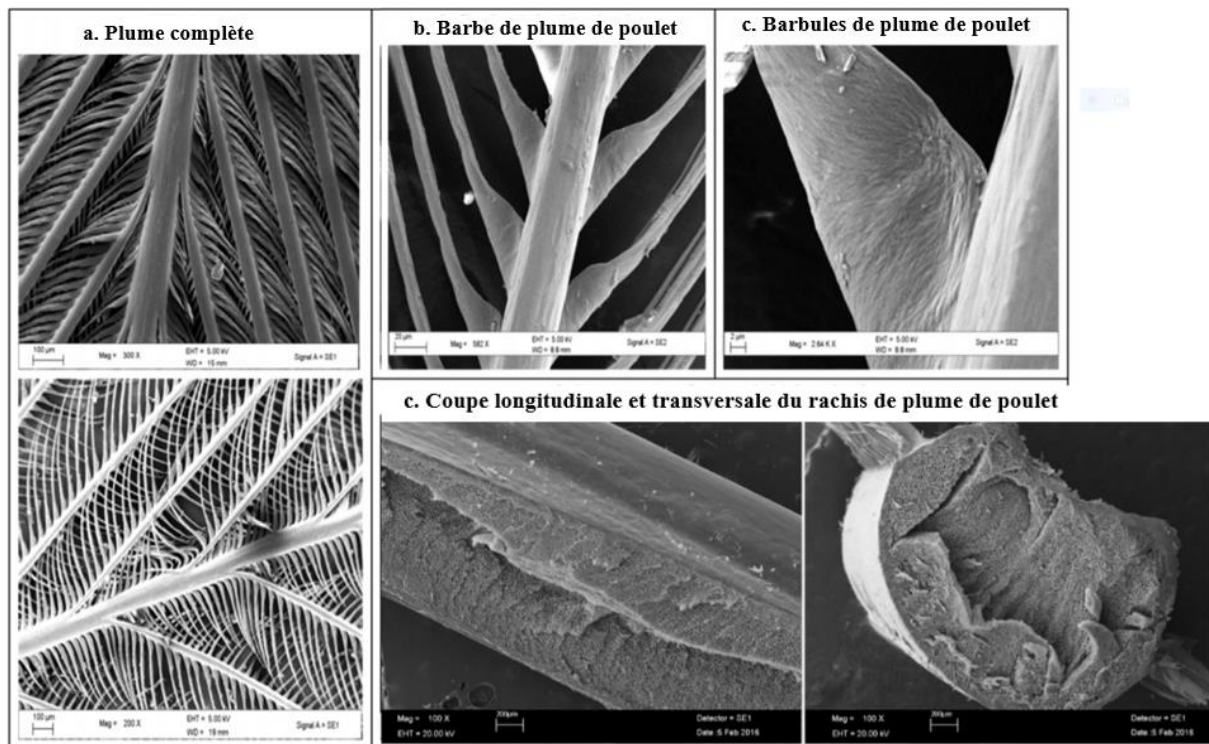


Figure 2.2 : Images d'analyse par le Microscopie électronique à balayage (MEB) de la plume de poulet. [44][45]

2.3. Types de plumes [41][46]

Au niveau macroscopique, les plumes des oiseaux varient considérablement en morphologie. On distingue deux types : les filaments, et les pennes.

Les filaments comprennent trois sous-types :

- Les plumes sétiformes ou soies : caractérisées par un rachis raide et long, afin de protéger les yeux et le visage, les barbes sont courtes et raides, et réduites en nombre. Elles sont peu couvertes de barbules, qui sont simplifiés et rigides. Le calamus est court.
- Filoplumes : Elles ont un rachis minuscule et raide, portant quelques barbes apicales, qui ont de courtes barbules non spécialisées. Un calamus court est développé à l'extrémité proximale. Elles ont une fonction sensorielle.

- Le duvet : Leur rachis est très court portant ~ 10–30 ramifications latérales de longues barbes, chacune porte une double rangée de barbules sans crochets, ainsi le calamus est court. Leur rôle est l'isolation thermique du corps (thermorégulation) et sert comme un revêtement corporel pour les oiseaux nouveau-nés.

Les quatre sous-types de plumes ont tous un axe central, le rachis en forme de plume et des barbes ramifiées latéralement. Le rachis est inséré du côté dorsal du calamus, parfois associé à un hyporachis supplémentaire et ventral. Les plumes pennées comprennent :

- Des semi-plumes : Ses barbes composées de rameaux de rachis central, d'où les barbules manquent de crochets, résultant un vexille ouvert et duveteux. Leur rôle est l'isolation thermique.
- Plumes de contour : Se compose d'un rachis central, des barbes et des barbules qui ont des crochets, formant un vexille fermé qui fournit une couverture profilée au corps.
- Les plumes caudales ou rétractées : Similaires aux plumes de contour, peuvent se déployer pour le contrôle de vol ou l'affichage.
- Les plumes des ailes ou rémiges : Forment une solide structure alaire pour un vol propulsé. Pour remplir leur fonction aérodynamique, les barbes des rémiges et des rectrices sont plus rigides et possèdent des barbules pennées entraînant un vexille fermé, duveteux proximales d'où l'hyporachis est réduit ou absent. Cependant le calamus est allongé et profondément ancré dans la peau.



Figure 2.3 : Les sept types de plumes rencontrées chez les oiseaux. [46]

2.4. Propriétés des plumes

2.4.1. Analyse biochimique [47]

2.4.1.1. Carbone fixe

Le carbone fixe est le combustible solide restant dans le four après la distillation de la matière volatile. Il se compose principalement de carbone mais contient également de l'hydrogène, de l'oxygène, du soufre et de l'azote non chassé avec les gaz, et donne une estimation approximative de la valeur calorifique de la biomasse. Les plumes contiennent des quantités importantes de carbone fixe (17–21%).

2.4.1.2. Matières volatiles

La matière volatile se compose des gaz combustibles comme le méthane, les hydrocarbures, l'hydrogène et le monoxyde de carbone ainsi que des gaz incombustibles comme le dioxyde de carbone et l'azote.

Le contenu volatil moyen des plumes est très élevé (81,56%), cela indique que les plumes ont un bon point d'inflammation, éliminant la demande excessive d'oxygène pour un processus de combustion complet d'où la demande chimique en oxygène varie de 1200 à 1408 g / kg [40].

2.4.1.3. Cendres

La cendre est une impureté qui ne brûle pas, et est une mesure approximative des sels minéraux et de matières inorganiques dans les plumes.

La faible teneur en cendres des échantillons de plumes (inférieur à 1,5%) indique qu'elles pourraient être utilisées comme combustible.

2.4.1.4. Teneur en humidité

La teneur en humidité dans les fractions des plumes de poulet varie entre 8,8 et 12,3%, impliquant ainsi que les plumes de poulet peuvent absorber suffisamment d'eau pour éviter l'accumulation d'électricité statique.

2.4.1.5. Protéine brute

Ceci a été déterminé en mesurant la teneur en azote des plumes et en le multipliant par un facteur (C) (= 6,25). Ce facteur est basé sur le fait que la plupart des protéines contiennent 16% d'azote. Le taux de protéines était déterminé en utilisant une méthode de digestion Kjeldahl. Les plumes peuvent être valorisées comme une bonne source de matière protéique avec une teneur en protéine à 80%.

2.4.1.6. Fibre brute

Les plumes contiennent des quantités négligeables de fibres brutes : Ce qui s'explique par le fait que la biomasse des plumes, contrairement à la biomasse cellulosique, ne contient pas de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

2.4.1.7. Matière grasse brute

C'est une estimation de la teneur totale en matières grasses, y compris la graisse réelle (triglycérides), l'alcool, les cires, les terpènes, les stéroïdes, les pigments, les esters, les aldéhydes et d'autres lipides.

Une teneur importante en matière grasse dans les plumes (environ 3%) indique une voie potentielle de valorisation de ces dernières pour la production de biodiesel.

2.4.1.8. Analyse CHNS

Les quantités de carbone, d'azote, d'hydrogène et de soufre dans les plumes de poulet ont été déterminées à l'aide d'un analyseur CHNS (Leco VTF-900 / CHNS-932).

L'analyse a révélé que les plumes contiennent 47,4% C ; 7,2% H ; 15,1% N ; 2,9% S ; et 27,4% d'oxygène + matière inorganique.

L'analyse des éléments chimiques dans la kératine extraite à partir des plumes de poulet a montré qu'elle se compose de : 46,64% de carbone, 7,72% d'hydrogène, 10,82% d'azote, 5,02% de soufre et 29,74% d'autres éléments, y compris l'oxygène d'où la (figure 2.4) montre la comparaison entre cette composition avec celle de plumes de poulet [48].

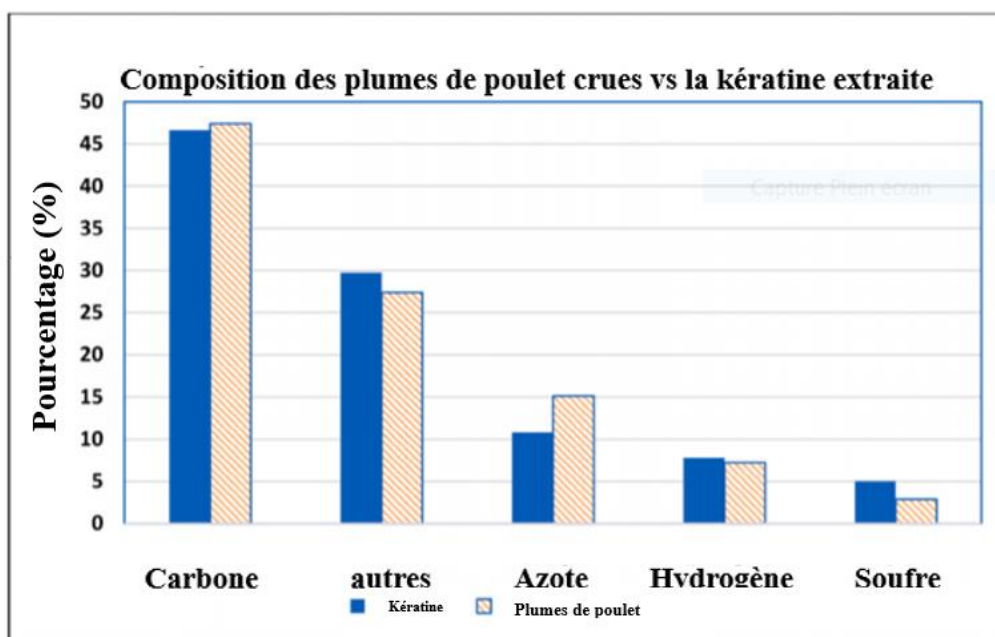


Figure 2.4 : Graphique de la composition élémentaire de la kératine extraite et des plumes de poulet crues. [48]

2.4.2. Les propriétés chimiques [47] (Tableau 2.1)

2.4.2.1. Durabilité chimique dans les produits chimiques courants

La durabilité ou la dégradation est une réduction d'un ou de plusieurs propriétés d'un matériau polymère en raison du contact avec un produit chimique.

✓ **Durabilité chimique dans les solutions alcalines**

En mettant les plumes dans une solution alcaline (à la fois forte et faible), elles se sont dissoutes rapidement et complètement.

Les plumes sont instables dans des environnements fortement alcalins.

✓ **Durabilité chimique dans les solutions acides**

Les plumes ont une bonne résistance à l'acide faible mais une mauvaise résistance à l'acide fort dans lequel elles se dissolvent complètement. Les acides forts endommagent les plumes et causent des pertes de poids importantes.

✓ **Durabilité chimique dans d'autres produits chimiques**

- L'eau de Javel et les détergents ne sont pas fortement alcalins ou acides et peuvent donc être utilisés en toute sécurité sur les plumes, avec un faible effet sur la structure et la ténacité de celles-ci.
- Les solutions oxydantes comme l'hypochlorite de sodium ne doivent pas être utilisées que froides et diluées, et uniquement pendant de courtes périodes.
- Le trempage dans l'eau chaude élimine certains composants des plumes tels que les composés inorganiques, le sable, les gommes et les matières colorantes.

Tableau 2.1 : Résistance chimique des plumes de poulet. [47]

| Catégorie | Produits chimiques | Réaction observée immédiatement | Après 2h |
|--------------|------------------------------|--|--|
| Eau | Chaude/froide | Pas de changement observé au niveau de la structure ou la forme | En eau froide, il n'y a pas de changement du tout mais le pliage et le recourbement de la plume sont observés. |
| Acide fort | Acide sulfurique concentré | Les fibres se sont désintégrées et dissoutes et ont changé de couleur du blanc au brun | Les fibres se sont désintégrées et complètement dissoutes |
| | Acide nitrique concentré | Aucun changement est observé au niveau de la structure. La couleur des fibres a changé du blanc au brun, puis a été blanchie | Un affaiblissement marqué des fibres. La fibre a été partiellement dissoute |
| | Acide chlorhydrique | La fibre n'a pas changé de couleur ou de structure | La fibre a été affaiblie et partiellement dissoute |
| Acide faible | Acide acétique | La fibre n'a pas changé de couleur ou de structure | La fibre n'a pas changé de couleur ou de structure |
| | Acide citrique | La fibre a été blanchie et aucun changement au niveau de la structure | La fibre est restée résistante et blanchie. |
| | Acide oxalique | La fibre a été blanchie et aucun changement au niveau de la structure | La fibre n'a pas changé de couleur ou de structure |
| Base forte | Hydroxyde de sodium | La fibre n'a pas changé de couleur ou de structure | Pliage et bouclage de la fibre. Un visible Distorsion des fibres a été remarquée |
| Base faible | Hypochlorite de sodium | Fibre blanchie, pas de changement de structure | Fibre affaiblie et désintégrée |
| | Hydrogénocarbonate de sodium | Aucune réaction n'a été observée | Aucune réaction n'a été observée |
| | Hydroxyde d'ammonium | Aucune réaction n'a été observée | Aucune réaction n'a été observée |

2.4.2.2. La propriété de gonflement

La propriété de gonflement des plumes pourrait être affectée par la présence des solvants polaires. Le comportement de gonflement dans différents solvants est le suivant : eau > éthanol > DMF > n-Butanol, cela indique que l'eau pénètre plus facilement et plus profondément dans les fractions des plumes ce qui entraîne un gonflement plus important que dans les solvants organiques. Aussi, les fractions des plumes ont montré plus de gonflement dans le méthanol que dans l'éthanol (groupe éthyle (C_2H_5-) plus volumineux dans l'éthanol, ce qui empêche la sorption). De plus, la présence des groupes alkyles dans les fractions des plumes les rend de nature hydrophobe, par conséquent, ces chaînes hydrophobes ont une forte affinité pour les solvants non polaires comme le DMF. La stabilité des plumes dans le n-butanol est assez bonne mais il y a une dissolution importante dans le DMF.

2.4.2.3. Test d'hydrophobicité

Les plumes de poulet séchées, la fibre de coton et la pulpe de cellulose ont été immergées séparément dans un excès d'un mélange éther éthylique-eau, agité vigoureusement puis laissé reposer pendant une nuit à une température ambiante. Les résultats montrent que le coton et la pâte de bois s'étaient agrégés dans la deuxième couche (couche d'eau) indiquant la mouillabilité complète des fibres. Cependant, les fractions des plumes de poulet (barbes et rachis) se sont agrégées dans l'interphase entre la couche d'eau et celle d'éther éthylique. Cela indique que les fractions des plumes de poulet ont une faible mouillabilité par rapport à la fibre de coton et à la pâte de bois.

2.4.2.4. Test de combustion

C'est une façon de vérifier les types des fibres et aussi de vérifier leur propriété résistante au feu. Les plumes de poulet ne supportent pas la combustion continue, et libèrent une odeur comme celle des cheveux brûlés, elles donnent une couleur orange de pulvérisation et ne fondent pas. Lorsque la flamme s'éteint, les plumes soutiennent la combustion très lentement pendant une courte période. Ce qui indique que les plumes de poulet sont autoextinguibles et sont classées comme une fibre protéique.

2.4.3. Les propriétés physiques [49]

2.4.3.1. La longueur

L'ordre des longueurs dans la plume est le suivant : barbules > rachis > barbes dont :

- La longueur du rachis de plumes variait entre 40 mm et 150 mm.
- Les barbes ont des longueurs allant de 1 mm à 45 mm.
- La longueur des barbules est comprise entre 1 et 800 μm .

2.4.3.2. La densité

La densité des plumes de poulet et leurs fractions mesurent de 0,44 à 0,91 g / cm³. Ces valeurs sont bien corrélées avec les valeurs de la littérature pour les protéines et les fibres cellulosiques mais inférieures à celles de fibres animales et végétales telles que la laine (1,31 g / cm³), soie (1,27 g / cm³), jute (1,3 g / cm³), fibre de coco (1,2 g / cm³) et coton (1,5e1,6 g / cm³).

2.4.3.3. Le diamètre

Le diamètre des fibres affecte la flexibilité et la qualité de filage de la fibre, plus la fibre est fine, plus la qualité de filage est améliorée. Les diamètres des composants de la plume sont les suivants : Les barbules 4,93 mm, la barbe avec un diamètre relativement petit correspond à 46,65 μm , et le rachis 2,2 mm.

La distribution des diamètres des barbes et des barbules de plumes de poulet était très uniforme sur toute leur longueur, ce qui n'était pas le cas pour le rachis qui a montré une distribution non cohérente des diamètres le long de ce dernier.

2.4.3.4. La masse des fractions de la plume

La masse du rachis de la plume est environ 48.28 mg représentant ainsi 52.13% de la plume complète. Pour les barbes de la plume le poids est 44.27 mg d'où une seule barbe a un poids de 0.10 mg.

2.4.4. Propriétés thermiques [50]

L'analyse thermogravimétrique et calorimétrique différentielle à balayage permet d'étudier la stabilité thermique de la plume de poulet et de ses fractions ainsi que l'effets de la transition thermique sur les propriétés mécaniques et de sorption des plumes.

La première perte de poids correspond à la perte d'humidité (12,9–13,4%) dans un intervalle de température de 25 à 230 °C, la deuxième (~46%) correspond à la décomposition partielle des fractions de la plume dans un intervalle de température de 230 à 380 °C. La troisième perte de

poinds (81.75–83.70%) correspond à la décomposition totale de la plume dans un intervalle de température de 380 °C à 550 °C.

En conclusion, vue que les plumes sont constituées de 91% de protéines, elles sont influencées par l'effet thermique, c'est-à-dire, l'augmentation de la température conduit à la dégradation de la plume, par conséquent, ainsi la température de traitement de la plume de poulet et de ses fractions pour la production de différents matériaux précieux comme la fabrication de composites devrait être contrôlée en dessous de 230 °C.

2.4.5. Propriétés électriques [50]

Grace à la structure ressemblant au nid d'abeilles (figure 2.5) qui fournit une grande porosité capturant une quantité importante d'air, les plumes ont une constante diélectrique exploitable qui égale à 1.7.

Les plumes sont non conducteurs d'électricité. Elles peuvent être utilisées comme isolateurs électriques puisqu'elles ont une résistivité élevée. Néanmoins la résistance électrique des plumes diminue avec l'augmentation de la tension appliquée.

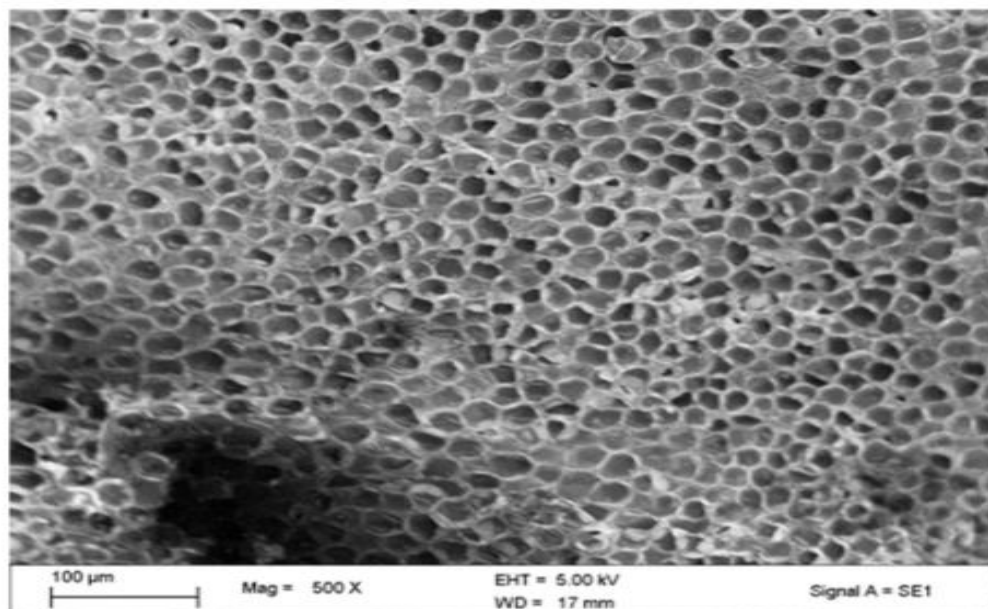


Figure 2.5 : Structure creuse de la fraction de plumes de poulet (500x).[50]

2.4.6. Propriétés mécaniques [50]

La propriété de traction donne une idée sur la résistance de la plume et son allongement.

La partie externe du corps de poulet produit les fibres les plus résistantes tandis que la partie intérieure produit les fibres les plus faibles.

La résistance de la fibre à l'état humide est inférieure à celle de la fibre à l'état sèche. Néanmoins l'allongement à la rupture est plus élevé lorsque la fibre est à l'état humide.

La résistance et l'allongement des barbes des plumes de poulet sont similaires à celles de la laine. Cependant leur force est semblable à celle de la laine et supérieur à celle de la fibre de coton mais inférieur à celle du rachis avec un allongement plus faible à la rupture.

2.5. L'industrie avicole

La production avicole est généralement classée en systèmes de production d'œufs et de viande.

L'amélioration globale du mode de vie et l'évolution d'alimentation humaine a entraîné une augmentation de la consommation de poulet et des œufs.[51]

2.5.1. La production mondiale de Volaille [52]

Pour répondre à la demande croissante, la production mondiale de viande de volaille a augmentée, atteignait 120,5 millions tonnes en 2017.[51]

En 2016, elle représentait environ 36% de la production mondiale de viande, selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture FAO.

Les États-Unis sont actuellement le premier producteur mondial de viande de volaille avec 18% de la production mondiale, suivie par la Chine (15%), le Brésil (11%) et la Russie (4%).

Selon la FAO, la production mondiale de viande de volaille devrait atteindre 137 millions de tonnes en 2020, soit 2,4% de plus qu'en 2019. [53]

Tableau 2.2 : Production de volaille par continent (x1000) : [53][54][55]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Asie | 40 855 | 39 716 | 46396 | 50 809 | 53 538 |
| Afrique | 5 834 | 5 943 | 6082 | 6 189 | 6275 |
| Amérique centrale et Caraïbes | 4 697 | 4 806 | 5084 | 5215 | 5314 |
| Amérique du Sud | 20 488 | 21 153 | 23190 | 23790 | 23889 |
| Amérique du nord | 22 910 | 23 448 | 23773 | 24480 | 24450 |
| Europe | 20 975 | 21 151 | 21217 | 21568 | 21813 |
| Océanie | 1 459 | 1 500 | 1514 | 1523 | 1537 |

Tableau 2.3 : Production mondiale de volaille (x1000) : [53][54][55]

| | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|------------------|---------|---------|--------|--------|---------------------------------|
| États-Unis | 21 527 | 22 001 | 22298 | 22 967 | 22 921 |
| Chine | 17 214 | 15 483 | 20117 | 23 516 | 26 414 |
| Brésil | 13 223 | 13 765 | 15498 | 15885 | 15 980 |
| Russie | 4 299 | 4 334 | 4543 | 4529 | 4 545 |
| Turquie | 1 885 | 1 939 | 2229 | 2209 | 2 145 |
| Union européenne | 14 651 | 14 753 | 14492 | 14723 | 14 900 (y compris l'Angleterre) |
| Afrique du sud | 1 825 | 1 893 | 1762 | 1822 | 1 891 |
| Inde | 3 111 | 3 329 | 3616 | 3873 | 3 563 |
| Mexique | 3173 | 3 269 | 3377 | 3 488 | 3 564 |
| Le monde | 117 217 | 117 717 | 127256 | 133575 | 136 815 |

La production mondiale d'œufs a atteint près de 74 millions de tonnes métriques en 2016. Cette production a presque doublé depuis 1990 [51].

La Chine est le plus grand pays producteur d'œufs à l'heure actuelle, avec 40% de production par rapport aux deuxième et troisième producteurs, les États-Unis (7%) et l'Inde (6%).

2.5.2. La production de volaille en Algérie

La production en Afrique du nord est plus grande que la production dans les Etats du Conseil de coopération du Golf et Yémen. Le Maroc, c'est le troisième producteur de volaille dans la région (650 000 tonnes), avec une croissance annuelle de 7.8 %. Iran, le plus grand producteur de la région (1.7 million de tonnes) a également enregistré une forte croissance dans la

production annuelle qui atteint 6.9 %. L'Algérie, c'est le cinquième producteur de volaille dans la région (280 000 tonnes), avec une croissance annuelle de 1.3%. [56]

Parmi les pays du grand Maghreb, l'Algérie figure dans les toutes premières places dans l'élevage du poulet avec 124 millions de têtes en 2007, est en 2ème Place derrière le Maroc avec 140 000 000 de têtes, il représente 34,71 % du cheptel de volaille de la région. [57]

Selon le département d'agriculture, l'Algérie produit annuellement environ 460 000 tonnes de viande blanche et 6 milliards d'œufs. [58]

2.5.3. Déchets de plumes : [59]

La consommation quotidienne de poulet augmente chaque année, considéré comme une source de protéines les moins chères et les plus saines. Environ 3 milliards de plumes de poulet sont générées chaque année dans le monde.

Les plumes de poulet sont plus fréquemment traitées comme des déchets et souvent brûlées ou transportées au décharge, polluant ainsi l'environnement. Celles-ci sont riches en kératine et sont considérées comme récalcitrants environnementaux contaminants.

Ces plumes étaient valorisées en farine destinée à la consommation animale. 245 000 tonnes de plumes humides sont transformées en farine de plumes hydrolysée. La teneur élevée en protéines de la plume conférait à la farine de plumes une valeur marchande proche de celle de la farine de soja. [60]

2.6. Conclusion

Les déchets de plumes générés par l'industrie des volailles posent un énorme souci dans la matière de protection environnementale. L'étude de la morphologie, les propriétés chimiques, physiques, thermiques, mécaniques et électriques ainsi que l'analyse biochimique indique qu'on peut palier de ce problème en valorisant ces plumes dans de vastes domaines industriels.

Le chapitre qui suit, est consacré aux potentielles valorisations des plumes de volailles dans le cadre de gestion des déchets.

3.1. Introduction :

Une immense quantité de plume est générée chaque année par les abattoirs de volailles et les fermes avicoles qui nécessite une grande surface pour être enfouie ce qui contamine les eaux souterraines et cause un grand problème pour la protection de l'environnement.

Une petite quantité de plumes est transformée en farine de plumes pour la production d'aliment pour les animaux et comme engrais en raison de leur forte teneur en azote. Par ailleurs, la plus grande quantité des plumes de volailles est traitée de certaines manières telles que la mise en décharge, l'incinération qui causent des problèmes de stockage, de manipulation et de contrôle des émissions et d'élimination des cendres. [1]

Afin de résoudre le problème, plusieurs utilisations potentielles des plumes dans divers industries ont suscité l'intérêt des laboratoires tels que : la production de bioénergie, industrie pharmaceutique, textile, plastique et emballage, etc.

Ce chapitre présente les différents domaines de valorisation des plumes de volailles, dans le cadre de gestion des déchets et protection de l'environnement.

3.2.2. La production de biogaz [62] (Figure 3.2)

La fraction organique des déchets et des matières organiques solides (déchets agricoles, boues, animaux, sous-produits, cultures énergétiques et autres substrats) est utilisée pour la production de biogaz, d'où les déchets des plumes correctement prétraités (par hydrolyse enzymatique), peuvent servir de matière première précieuse pour la production de biogaz. Dans ce contexte plusieurs études ont été réalisées citant :

- L'utilisation de l'hydrolysate des plumes obtenu par la dégradation avec *Bacillus* sp. C4, une bactérie qui produit à la fois des α - et β -kératinases, comme substrat pour la production de biogaz en utilisant des boues anaérobies ou des granules de bactéries comme inoculum, a amélioré le rendement en méthane de 292 et 105%. Cependant, les granules des bactéries ont fonctionné efficacement sur le bouillon total, qui a donné 445 mL CH₄ / gVS de méthane, soit 124% de plus que celui obtenu avec le même type de l'inoculum des plumes non traitées.

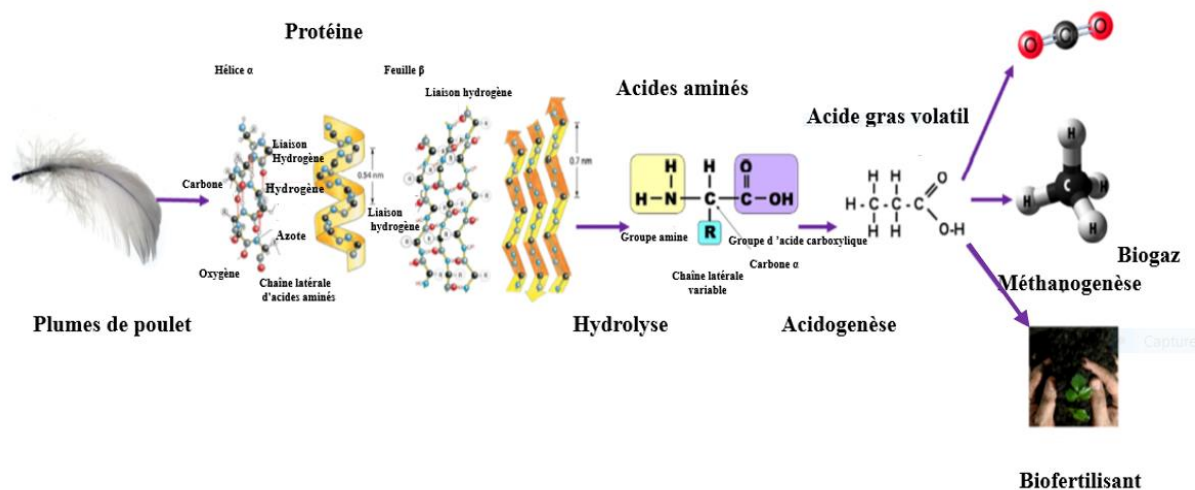


Figure 3.2 : Processus schématique de la production de biogaz à partir des plumes de poulet [61]

3.2.3. La production de biohydrogène [63]

En raison de l'épuisement rapide des carburants et les problèmes environnementaux qui en résulte telles que les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique mondial, il y a un besoin pressant de développer une source d'énergie non polluante et renouvelable.

L'hydrogène, l'élément le plus abondant dans l'univers, un carburant propre et renouvelable a suscité l'attention des scientifiques qui ont développé plusieurs voies de production de ce dernier. Cependant les voies biologiques en utilisant les déchets de plumes riches en kératine présentent un alternatif potentiel et économique à la conversion des combustibles fossiles en hydrogène. Une étude montre l'efficacité de la production de biohydrogène par le processus anaérobie (fermentation sombre) dans un bouillon de plumes avec la poudre de kératine obtenue par dégradation avec *Pseudomonas aeruginosa* à pH 11, avec un rendement de 210 mL/L d'hydrogène. Ainsi, en utilisant la plume de poulet comme substrat, le bouillon de plumes produit l'hydrogène avec un rendement de 140 mL/L à pH 11 par *Pseudomonas aeruginosa* et de 150 ml/L en utilisant la kératine comme substrat.

3.3. Applications électriques et électroniques [64]

3.3.1. Les électrodes de plumes carbonisées

Grâce à leur structure creuse, leur faible coût et la présence d' α hélice, les plumes sont idéales pour le développement des matériaux microporeux uniformes avec une superficie élevée en tant que matériaux d'électrode, qui sont également respectueux à l'environnement.

Carbonisées, les plumes ont été utilisées comme électrodes pour les supercondensateurs d'une performance excellente grâce à la présence de pores creux qui pourraient agir comme des réservoirs d'électrolytes et facilitent le transport des ions pendant la charge / décharge à grande vitesse.

3.3.2. Les composites de plumes comme matériaux diélectriques

L'air est considéré comme un matériau diélectrique idéal avec une constante diélectrique minimale de 1 car il n'offre aucune résistance. Cependant, il y a très peu de matériaux diélectriques ayant une constante diélectrique proche de 1.

Puisque les plumes contiennent une structure creuse, les chercheurs supposaient que les composites fabriqués à partir de ces dernières pourraient être utiles comme matériaux diélectriques. Dans le but de vérifier cette supposition, plusieurs études ont été développées. Dans une de ces études, les plumes ont été mélangées avec de l'époxy d'où la constante diélectrique des composites résultant était inférieur à celle des isolants semi-conducteurs conventionnels comme le dioxyde de silicium, les époxydes et les poly imides. De plus, les composites de plumes étaient légers et rigides et donc parfaitement adaptés aux applications électriques.

Dans une autre étude, au lieu d'utiliser une matrice époxy, des polyesters insaturés avec et sans modification avec l'anhydride maléique ont été utilisés comme matrice avec des plumes de poulet. Les composites contenant 10% de plumes obtenus, avaient une permittivité de 1,753 et un facteur de dissipation (tan delta) de 0,0203 à 1000 kHz, similaire à celle du matériau isolant commercial. Cependant, les composites fabriqués à partir de polyesters insaturés et renforcés de fibres des plumes et de fibres de kénaf avaient une constante diélectrique de 2,02 à une fréquence de 1 MHz qui est considérablement plus élevée que la constante diélectrique idéale de 1,0.

3.3.3. Les circuits imprimés biodégradables à partir des plumes

Les circuits imprimés sont l'un des composants les plus courants des déchets électroniques non biodégradables. Afin de développer des circuits imprimés biodégradables, les plumes ont été mélangées avec des résines à base d'huile de soja. Les composites obtenus ont été utilisés pour fabriquer des circuits imprimés en gravant le cuivre et en éliminant les parties non polymérisées avec de l'hydroxyde de sodium. La résistivité volumique et superficielle était de l'ordre de 10^{15} considérée comme bonne pour les circuits imprimés.

3.4. Industrie de plastique et de l'emballage

3.4.1. Plumes en plastiques biodégradables [61]

Vue que les plumes de poulet sont bon marché et inépuisables, elles sont de parfaites ressources non fossiles pour la fabrication de plastique biodégradable.

Les plumes sont intrinsèquement non thermoplastiques et ne fondent pas. Afin de régler ce problème, une simple hydrolyse alcaline les rendent thermoplastiques et adaptées à développer des films après une réticulation à l'aide d'acide citrique. En outre, une polymérisation par greffage à l'aide des monomères acryliques pourrait conférer une thermoplasticité qui permette la transformation des plumes en films (figure 3.3).

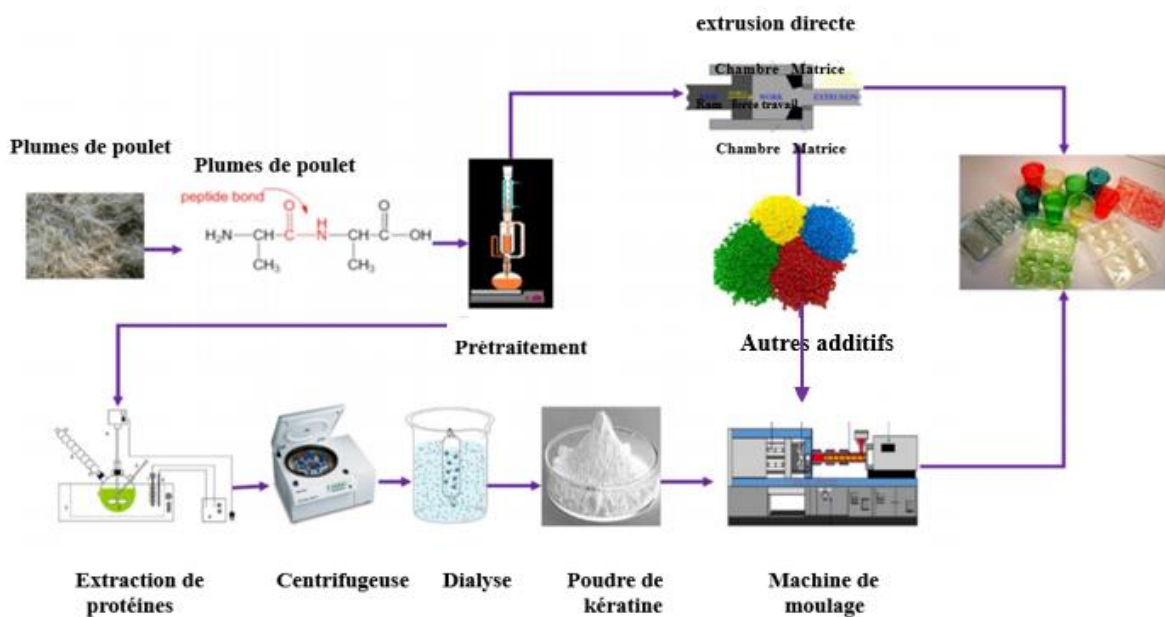


Figure 3.3 : Diagramme schématique de la production du bioplastique à partir de plumes de poulet. [61]

3.4.2. Plumes dans les matériaux d'emballage [65]

Le polystyrène expansé est largement utilisé pour les livraisons réfrigérées. Néanmoins, le haut volume de ce dernier combiné à la contamination due au transport des aliments, augmente le coût du recyclage des emballages thermiques à polystyrène expansé. Par ailleurs, les performances thermiques des doublures d'emballage en fibre de plumes non tissées ont été comparées pour des livraisons réfrigérées.

Considérée comme étant un matériau naturel efficace, durable, léger et biodégradable, ainsi que la présence de grandes quantités d'air dans les fibres creuses et la structure caractéristique des

produits non-tissés des plumes, ils ont le potentiel de remplacer les matériaux actuellement utilisés pour la livraison des aliments réfrigérés, congelés et d'autres produits susceptibles de se dégrader à des températures élevées lors de la livraison en fournissant un emballage thermiquement isolant. D'où les résultats indiquent que les textiles en plumes d'une densité spécifique de 25 kg/m^3 et d'une épaisseur de 28 mm peuvent surpasser les polystyrènes expansés disponibles dans le commerce.

3.5. Applications pharmaceutiques [61]

Les graisses des plumes sont de bonnes sources de cholestérol qui est nécessaire au bon fonctionnement du corps et à la fabrication des hormones. Il pourrait être utilisé comme élément constitutif de synthèse de différents produits pharmaceutiques. Par exemple :

- Le cholestérol peut être un pionnier dans la production de vitamine D3. Une vitamine nécessaire pour la formation des dents et les os.
- Le cholestérol peut être un précurseur des acides biliaires qui sont essentiels dans le mélange d'hormones stéroïdes. Les stéroïdes sont utilisés pour une bonne digestion des aliments et l'absorption des graisses dans l'intestin, les syndromes de la ménopause, et ils empêchent également le gonflement des seins.
- Vu que les acides biliaires peuvent décomposer et émulsionner les graisses, le cholestérol pourrait également être utilisé comme bio-émulsifiant / biosurfactant dans l'industrie cosmétique.

3.6. Utilisation dans la production des fils textiles [44]

Les barbes de plumes de poulet sont appropriées pour des applications textiles, vu les propriétés uniques qu'elles possèdent telles que : la faible densité, la bonne flexibilité, la résistance modérée, en plus de la longueur, durabilité et le regain d'humidité élevé. Ainsi, mélanger les barbes de faible densité avec d'autres fibres naturelles (comme la laine, soie et coton) offre un potentiel pour développer des textiles aux propriétés uniques. L'utilisation appropriée de la barbe des plumes ouvre des possibilités de recherche.



Figure 3.4 : Valorisation possible dans la production de fils et du textile. [44]

3.7. Farine de plume : [61][66][67]

Compte tenu de la teneur en azote et en protéines, les plumes de volailles ont un grand potentiel pour diverses utilisations. Cependant, la mauvaise digestibilité de la farine des plumes de la part des animaux ainsi que la haute stabilité mécanique des protéines qu'elle contient et sa résistance à la dégradation par les enzymes protéolytiques courantes nécessite un traitement adéquat. Dans ce contexte plusieurs études ont été menées citant :

Pour la génération de farine de plumes, le rachis doit être dégradé par hydrolyse pour le rendre digestible. Un processus typique est le suivant : (Figure 3.4)

- Après leur collection à partir des usines de transformation, les plumes sont lavées à l'eau.
- Un assèchement par pression mécanique plutôt que la chaleur, est établi.
- Après élimination de l'eau, les plumes sont cuites à la vapeur humide pour l'hydrolyse sous pression pendant 1–2 h.
- Les plumes sont ensuite refroidies, séchées et broyées.

- La farine obtenue passe à travers des détecteurs de métaux, afin d'éliminer les grosses particules métalliques.

Tableau 3.1 : Gamme typique d'analyses approximatives des caractéristiques de la farine de plume hydrolysée ainsi que la composition en acides aminés et la teneur en minéraux. [68]

| Caractéristiques | | Valeurs typiques |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| Matière sèche (%) | | 91,5–93,3 |
| Protéine brute (%) | | 81,2–92 |
| Extrait d'éther (%) | | 6,2–7 |
| Cellulose brute (%) | | 1–1,1 |
| Cendres (%) | | 3–3,5 |
| Couleur | | Blanc cassé à brun |
| Acides aminés | % en protéine brute | Teneur en minéraux |
| Alanine | 5,09 | Ca 0,33-0,48%) |
| Arginine | 6,93–6,99 | P (0,45–0,50%) |
| Asparagine | 2.03 | Mg (0.22%) |
| Acide aspartique | 3.56 | K (0.10–0.33%) |
| Cystéine | 5.07–5.09 | Na (0.34%) |
| Glutamine | 3.48 | Cl (0.20–0.26) |
| Acide glutamique | 5.86 | S (1.39–1.20%) |
| Glycine | 10.90 | Cu (10mg/Kg) |
| Histidine | 1.07–1.15 | Fe (76mg/Kg) |
| Isoleucine | 4.62–4.8 | Mn (10mg/Kg) |
| Leucine | 8.22–8.51 | Se (0.69mg/Kg) |
| Lysine | 2.57–2.63 | Zn (90–111mg/Kg) |
| Méthionine | 0.75–0.91 | Mo (0.8mg/Kg) |
| Phénylalanine | 4.81–4.93 | |
| Proline | 14.37 | |
| Sérine | 10.72 | |
| Thréonine | 4.73–4.84 | |
| Tryptophane | 0.73–0.97 | |
| Tyrosine | 2.48 | |
| Valine | 7.02–7.52 | |



Figure 3.5 : Diagramme schématisé de la production d'aliments pour animaux à partir de plumes de poulet. [61]

Une autre méthode couramment utilisée pour former un gel comestible pour un mélange d'aliments, consiste à traiter les plumes dans un autoclavage à haute pression à plus de 133 °C, sous pression de 3 bars. Par ailleurs des traitements biologiques en utilisant des bactéries capables de dégrader les plumes (du genre *Bacillus*) ou des enzymes aptes à dégrader la kératine des plumes telles que les kératinases est une autre méthode courante pour convertir les plumes en hydrolysate de plumes, une protéine digestible riche en acides aminés.

Le traitement thermo-chimique de la farine de plume fournit une source riche en protéines (environ 90% du poids sec) suffisantes en cystine, mais relativement déficientes en acides aminés lysine et méthionine avec une digestibilité beaucoup plus élevée (au moins 75%) par rapport au plumes (5%). Ce traitement implique l'utilisation des températures et pressions élevées en combinaison avec une solution alcaline ou acide.

Après le traitement thermo-chimique, le produit en plumes peut contenir jusqu'à 65% d'humidité. Alors, on poursuit par un post-traitement avec une filtration, séchage, broyage et tamisage. Le

produit final (farine des plumes) doit contenir environ 8% d'humidité pour garantir sa durée de conservation et la possibilité d'être utilisé comme ingrédient dans l'alimentation animale.

3.8. Production des biocomposites entièrement biodégradables : [69]

Une étude consiste à développer des biocomposites composés de 50 et 60% en poids de plumes de poulet et de matrices thermoplastiques biodégradables d'où les biopolymères choisis étaient l'acide polylactique (PLA), le polybutylène adipate téréphtalate (PBAT) et un mélange PLA / mélange de copolyester thermoplastique, a montré qu'ils pourraient convenir aux éléments de panneau, au revêtement de sol ou matériaux de construction comme un alternatif au composite en bois. De plus, les biocomposites obtenues sont entièrement biodégradables et fournissent des matériaux légers et thermiquement isolants par rapport aux matériaux purement bioplastiques.

La présence de la structure en nid d'abeilles dans les plumes de poulet offre aux biocomposites des capacités d'isolation d'air et de la chaleur, qui pourraient être utilisés comme des composants d'isolateurs dans les bâtiments pour réduire le transfert de la chaleur et donc diminuer la consommation d'énergie.

3.9. Production du papier : [70]

Dans le monde, plus de 90% de la production totale de fibre destinée à la production de papier provient du bois, provoquant ainsi d'énormes problèmes environnementaux dus à la déforestation, ce qui nécessite la recherche de nouvelles ressources non ligneuses comme les fibres des plumes qui pourraient remplacer les produits en papier à base de pâte de bois tels que les papiers filtres et les papiers décoratifs. Pour cela les fibres des plumes ont été combinées avec la pâte de bois et la performance du papier qui en résulte était comparable à celle des feuilles fabriquées avec de la pâte du bois à 100%. A cet effet, les résultats obtenus montrent que les fibres des plumes ont le potentiel à remplacer la pâte de bois pour la fabrication du papier. (figure 3.5).



Figure 3.6 : Processus de préparation des feuilles à base de pâte plume/bois. [70]

3.10. Autres applications

3.10.1. Ignifuges des plumes [64]

La présence de grandes quantités d'azote dans la plume est convenable au développement de retardateurs de flamme. Une étude montre une ignifugation considérablement élevée est conférée aux tissus du coton après le traitement avec l'ignifuge à base de plumes d'où les plumes combinées au borax et à l'acide borique avaient les propriétés nécessaires pour une utilisation comme retardateur de flamme.

3.10.2. Plumes dans les industries automobile et aéronautique [61]

Grâce à leur force remarquable, et leur nature légère ainsi que leur qualité, les plumes pourraient être utilisées pour produire des composites destinés aux industries automobiles et aéronautiques comme dans les tableaux de bord, les pièces automobiles, les sièges et les coussins, les garnitures intérieures, pour réduire leur poids tout en les renforçant.

3.10.3. Production de gomme de xanthane [71]

Le type et la concentration de la source d'azote affectent la production de xanthane, en particulier, les sources d'azote organique se sont avérées meilleures que les sources d'azote

inorganique. Une étude montre que parmi toutes les sources d'azote organique testées (tryptone, bacto peptone, extrait de levure), la meilleure production de xanthane (24,45 g/L) était obtenue lors de l'utilisation de peptone de plume de poulet comme source d'azote supplémentaire. Par ailleurs, l'addition de peptone de plume de poulet a considérablement augmenté la bioconversion de sucre en xanthane par *X. campestris* MO-03. Par conséquent, la peptone de plume de poulet est un activateur pour la production de la gomme de xanthane à haute teneur en pyruvate améliorant ainsi la qualité de la gomme de xanthane.

3.10.4. Films de plumes pour l'adsorption de colorant [72]

Les industries textiles rejettent des colorants organiques dans les plans d'eau qui sont ennuyeux à l'environnement, car ils peuvent inhiber la pénétration de la lumière du soleil, réduisant ainsi la réaction photosynthétique ce qui provoque un déséquilibre dans l'écosystème aquatique. De plus, certains colorants synthétiques sont considérés graves pour la santé en raison de leur puissance toxique, voire cancérigène. Cependant, les plumes ont été signalées comme étant des potentiels adsorbants de ces derniers. Dans ce contexte des plumes de poulet ont été utilisées pour préparer des films adsorbants d'où le cristal violet et le bleu de méthylène ont été utilisés comme adsorbants modèles. Les résultats montrent que le film obtenu à partir des plumes immergées dans une solution aqueuse de colorant de cristal violet et de bleu de méthylène à la fois, fournit une décoloration de la solution aqueuse par élimination de colorant avec un pourcentage dépassant les 90% en 5h et presque 100% en 24h.

3.10.5. Revêtement protecteur pour les métaux [73]

Afin de protéger l'acier au carbone de la corrosion, un revêtement époxy rempli de fibres des plumes de poulet a été développé d'où l'utilisation des fibres des plumes a réduit la mouillabilité de la surface du revêtement et a fourni une dispersion bonne, uniforme et qui résiste à la corrosion par la forte adhérence interfaciale avec la matrice de revêtement époxy. Par ailleurs, les fibres des plumes rendent le revêtement biodégradable tout en assurant une réduction des déchets solides des élevages avicoles, ce qui peut être bénéfique à l'industrie pétrolière, gazière, et celle de la construction et de l'automobile.

3.10.6. Absorbant d'huile verte [74]

En raison du développement de l'industrie pétrolière à grande échelle, et l'augmentation du transport maritime du pétrole, la pollution pétrolière est devenue l'une des menaces les plus graves pour l'écosystème aquatique au cours des 30 dernières années. Cependant le traitement des déversements d'hydrocarbures dans les eaux entraîne une amélioration de la qualité d'eau, la récupération du pétrole, et la protection du biote aquatique. Les déchets des plumes ont été exploités comme un moyen de traitement physique pour remplacer les adsorbants synthétiques actuellement utilisés tel que le polyuréthane, polychlorure de vinyle qui sont coûteux et non respectueux à l'environnement.

Grace à leur caractère oléophile, leur structure creuse, ainsi que leur teneur élevée en kératine, et la taille de leurs pores, les plumes sont des absorbants idéaux pour les déversements d'hydrocarbures d'où les plumes de poulet non traitées et traitées montrent un potentiel prometteur. Néanmoins, les fractions des plumes de poulet traitées absorbent l'huile jusqu'à environ 16 fois leur poids contrairement aux plumes non traitées, qui n'absorbent qu'environ 6 fois leur poids d'origine en raison de la teneur élevée en graisse et en d'autres déchets contaminants sur ses surfaces qui entrave l'adsorption d'huile ce qui rend leur utilisation non recommandée en raison de la nature dangereuse des déchets.

Par ailleurs, les plumes de poulet entières sont plus efficaces pour éliminer l'huile que les fractions des plumes individuelles, ce qui ne nécessite pas de fractionner les plumes.

3.11. Conclusion :

Les déchets des plumes sont des composés de haute valeur qui doivent être mieux exploitées ce qui permet d'ouvrir de nouvelles industries et opportunités d'emploi, rendre l'industrie avicole plus compétitive d'une part [47], et d'atténuer la pénurie des ressources protéiques en améliorant également l'environnement d'une autre part [59].

I. Introduction

La partie expérimentale a pour but de produire et de caractériser la kératine des plumes dans le cadre de valorisation des déchets de plumes issues d'abattoir de la région de Blida.

Le travail expérimental sera déroulé comme suit :

1. Collecte des plumes à partir des abattoirs locaux.
2. Traitement mécanique (lavage, séchage et broyage).
3. Production de la farine de plume par lyophilisation.
4. Extraction de la kératine en se basant sur des protocoles standardisés.
5. Purification de la kératine selon des techniques de référence.
6. Caractérisation chimique et physique moyennent les analyses suivantes : IRTF- DRX- MEB-Rx.
7. Dosage biochimique (taux des protéines, des cires et des minéraux).

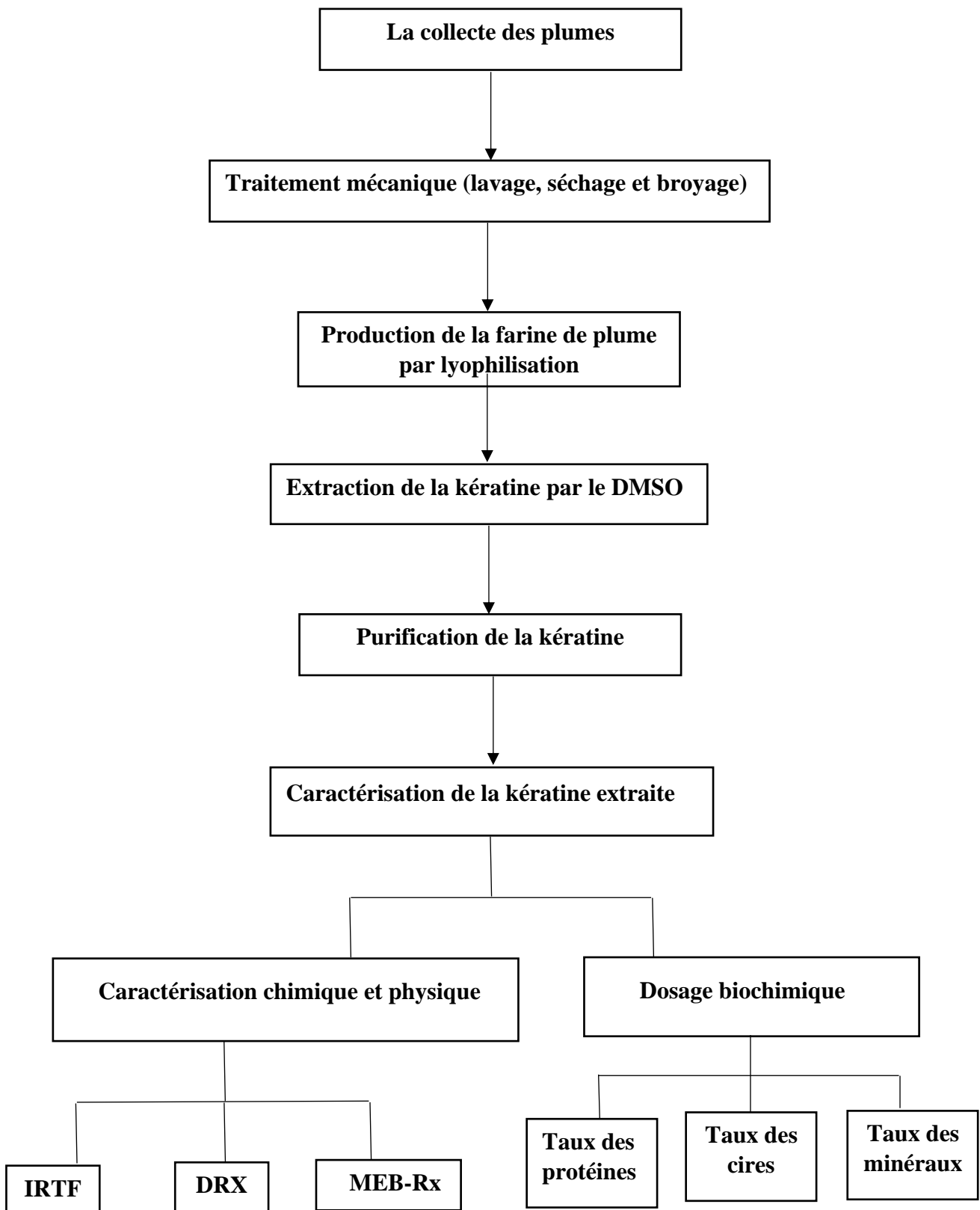


Figure 1 : Diagramme montrant les étapes du travail expérimentale

II. Matériel et méthodes

II.1. Collecte des plumes à partir des abattoirs locaux

Les plumes sont collectées à partir d'abattoir situé dans la région de Blida. (Figure1)



Figure 2 : Les plumes collectées.

II.2. Préparation de la farine de plume

- Les plumes subissent plusieurs lavages à l'eau du robinet puis rincer à l'eau distillée. Laisser sécher à l'air libre.
- Les plumes séchées subissent un deuxième séchage dans une étuve chauffée à 170 °C pendant 2h puis découpées en petits morceaux à l'aide d'un ciseau.
- Broyer à l'aide d'un broyeur et tamiser pour éliminer les grosses particules et avoir une farine homogène de diamètre 200 micro mètre.



Figure 3 : Farine des plumes

II.3. Extraction de la kératine

Une méthode de solubilisation de la kératine a été développée en utilisant des solvants organiques, par exemple : le diméthylsulfoxyde (DMSO) d'où une précipitation de protéines dissoutes avec de l'acétone est nécessaire. Lorsque les deux solvants sont éliminés. Il n'y a aucun changement dans la structure des protéines causé par cette procédure qui est souvent utilisée par de nombreux Chercheurs à l'échelle laboratoire afin d'obtenir un substrat pour la détermination d'activité kératinolytique. [33]

✓ La kératine soluble

La farine de plumes (5 g) est dissoute dans 250 mL de DMSO, ensuite le mélange est chauffé dans un rota vapeur à 80 °C pendant 4 h.

✓ Précipitation du substrat

La kératine soluble est ensuite précipitée pendant 2h par addition de 500 mL d'acétone déjà refroidi à (-80 °C) en utilisant un liquide réfrigérant (l'azote liquide).

✓ **Concentration et récupération du substrat**

Le précipité est récupéré par filtration sous vide pendant 20 min, puis lavé deux fois avec l'eau distillée et séché à 50 °C jusqu'à l'obtention d'une poudre et ensuite conservée à une température ambiante jusqu'à l'analyse.

✓ **Dissolution de la kératine**

1g de la poudre est dissout dans 20 mL de NaOH (0,05 M). Le pH est ajusté à 8 par une solution de HCl (1N), puis la solution est diluée à 200 mL avec du tampon Tris-HCl (0,05 M), puis le pH est ajusté à 8.

II.4. Caractérisation chimique et physique

II.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)

✓ **Description [75]**

Lorsque la source d'excitation atteint l'échantillon, divers types d'interactions ont lieu, résultant en l'émission de différents signaux. Dans certains cas, ces signaux sont émis par le même côté sur lequel la source d'excitation de l'échantillon est incidente et sont appelés signaux dispersés. La technique qui capture les signaux diffusés est appelée microscopie électronique à balayage.

Le MEB est une technique utilisée pour la visualisation et la caractérisation des surfaces qui ne peuvent pas être observées avec l'œil nu. Il permet de capturer et interpréter certains signaux émis lors de l'interaction du faisceau d'électrons avec l'échantillon.

Le principe de cette technique est basé sur l'interaction forte entre les électrons secondaires émis et rétro diffusés qui permet de reconstituer l'image de l'objet. Les tensions de travail sont généralement comprises entre 10 et 30 kV, ce qui permet d'avoir un grossissement pouvant aller jusqu'à 30.000 fois.

Des photographies seront obtenues avec différents grossissements (400x, 800x, 6000x, 12000x). On peut aussi utiliser le MEB pour obtenir directement les proportions en masses des divers éléments dans la kératine.

II.4.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

✓ Description [76]

IRTF est une technique qui permet de déterminer les composants chimiques du produit à analyser en identifiant la variété des groupes fonctionnels qu'il contient. Elle est applicable pour une large gamme de matériaux solide, liquide ou gazeux, et pourrait être utilisé pour une analyse qualitative et quantitative.

IRTF repose sur le principe d'interférence de rayonnement entre deux faisceaux qui se traduit par un signal appelé interférogramme [77]

Les groupes fonctionnels de la kératine ont été analysés par le Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). Les spectres IRTF sont réalisés, pour un nombre d'onde compris entre 500 à 4000 cm^{-1} avec une résolution ($R= 8$). Nous préparons le mélange de poudre à analyser en le broyant finement avec du KBr. La pastille est préparée en comprimant le mélange dans une matrice en acier. Les échantillons sont analysés à l'état solide sous forme d'une poudre.

II.4.3. Diffractométrie de rayons X (DRX)

✓ Description [78]

La diffraction des rayons X est une technique non destructive puissante pour la caractérisation des matériaux cristallins. Il fournit des informations sur les structures, les phases, les orientations cristallines préférées (texture) et d'autres paramètres structurels, tels que la taille moyenne des grains, la cristallinité, la déformation et les défauts cristallins. Les pics DRX sont produits par interférence constructive d'un faisceau monochromatique de rayons X diffusé à des angles spécifiques à partir de chaque ensemble de plans de réseau dans un échantillon. Les intensités des pics sont déterminées par les positions atomiques dans les plans du réseau. Par conséquent, le motif DRX est l'empreinte des arrangements atomiques périodiques dans un matériau donné.

II.5. Dosage biochimique (taux des protéines, des cires et des minéraux)

II.5.1. Taux de protéines :(méthode de Bradford) [79][80]

✓ **Description de la méthode :**

La méthode de Bradford est une méthode d'analyse spectroscopique destinée à la détermination de la concentration exacte des protéines dans la solution de la kératine.

Tableau 1 : description de la méthode de Bradford.

| Principe | Sensibilité | Sélectivité | Durée | Facilité |
|--|-------------|--|-------|--|
| Le colorant bleu de Coomassie Chargé négativement (forme anionique) se lie aux protéines chargées positivement, et donne une couleur bleue qui absorbe à 595 nm dans le spectrophotomètre UV | 1 µg / ml | Acides aminés aromatique, l'arginine, tryptophane, proline à λ 465-595nm (très utile). | 15min | La réaction de Bradford est rapide, facile et stable pendant une heure |

Afin de déterminer la teneur en protéines de la kératine, un dosage de Bradford a été réalisé en utilisant un spectrophotomètre. Albumine sérique bovine (BSA) a été utilisé comme une protéine standard pour générer une courbe d'étalonnage à partir de l'absorption mesurée à 595 nm. La linéarité est conservée dans la méthode de Bradford pour une gamme de concentration lors de l'utilisation de BSA comme standard de 0,1 à 1,5 mg / mL de protéine.

✓ **Matériel**

- Bleu de Coomassie.
- Acide phosphorique (H₃PO₄).
- Ethanol.
- **Réactif de Bradford** Dissoudre 100 mg de bleu de Coomassie G-250 dans 50 ml d'éthanol à 95% (v / v), puis ajouter 100 mL 85% (p / v) d'acide phosphorique et agiter pendant une nuit. Diluer à 1 L avec l'eau et conserver jusqu'à 3 mois à 4 ° C. Filtrer avec du papier Whatman n° 1 pour éliminer les précipités du colorant juste avant l'utilisation.
- Solutions étalons de protéines (1 mg / mL de BSA) : diluer en préparant une gamme de 20 à 100 µg / mL pour un volume total de 100 µL. Aliquote et conserver à -20 ° C.

✓ **Équipement**

1. Spectrophotomètre.

2. Papier Whatman n ° 1 (Whatman).

✓ **Méthode**

- Préparez une gamme étalon de protéine standard BSA de 20 à 100 µg dilué dans le même tampon que l'inconnu. Ici on utilise la solution H₂O / 0,15 M NaCl pour un volume final de 100 µL.
- Préparer deux blancs en pipetant 100 µL de tampon en deux tubes de microfuge.
- Pipeter 20 à 100 µg de l'échantillon de la kératine de concentration inconnue dans des tubes de microcentrifugeuse dans un volume total de 100 µL (ajoutez un volume égal de NaOH (1 M) aux échantillons et aux étalons pour éviter les précipitations lors de l'ajout de Réactif de Bradford).
- Ajouter 5 ml de réactif de Bradford et bien mélanger en utilisant un vortex. Laisser les échantillons reposer pendant 2 à 60 min à une température ambiante (évitiez de mousser car cela entraînera une mauvaise reproductibilité).
- Allumez le spectrophotomètre UV et régler le à une longueur d'onde à 595 nm. Laisser l'instrument se stabiliser pendant 15 à 20 min.
- Étalonnez l'instrument à l'absorbance nulle en utilisant l'air comme vide.
- Transférer les échantillons de la kératine et les standards dans des cuvettes et déterminer l'absorption à 595 nm.
- Réaliser une courbe standard en traçant l'absorbance à 595 nm par rapport à la concentration des standards. Utilisez la courbe standard pour déterminer systématiquement par extrapolation la concentration inconnue des protéines dans l'échantillon de la kératine.

II.5.2. Taux des cires [1]

Le taux des cires a été déterminé comme suit :

Dans une fiole conique de 100 mL contenant 5 g ou 5 mL d'échantillon de la kératine extraite, 20 mL de méthanol et 10 mL de chloroforme ont été ajoutés et le mélange a été agité à l'aide d'un vortex pendant 2 min, puis 10 mL de chloroforme ont été ajoutés et le mélange a été agité vigoureusement pendant 2 min. 18 mL d'eau distillée ont été ajoutés et le mélange a été de nouveau agité au vortex pendant 2 min. la couche de chloroforme a été séparée par

centrifugation à 2000 tr / min pendant 10 min. la couche inférieure a été transférée dans un ballon en forme de poire avec une pipette Pasteur. La deuxième extraction a été faite avec 20 mL de méthanol à 10% (v / v) dans le chloroforme sous agitation par vortex pendant 2 min.

Après centrifugation, la phase de chloroforme a été ajoutée au premier extrait. Après l'évaporation, le résidu obtenu a encore été séché à 104 ° C pendant 1 h.

II.5.3. Taux des minéraux [47]

La cendre est un résidu inorganique obtenu après combustion de la biomasse et est une mesure approximative des sels minéraux et des matières inorganiques dans les plumes. La teneur en cendres a été calculée par rapport au poids sec de l'échantillon d'origine après une nuit d'inflammation de l'échantillon à 575 ± 25 °C dans un four à moufle.

4.1. Introduction

Plusieurs études ont été réalisées pour l'extraction et la caractérisation de la kératine à partir des plumes afin de l'exploiter sous différentes formes et dans divers secteurs industriels. Par conséquent, de nombreuses méthodes et techniques ont été développées fournissant des résultats impressionnants qui peuvent être un outil de valeur et un appui scientifique pour les prochaines recherches.

Le but de cette partie est de présenter une étude comparative entre quelques méthodes d'extraction, et de caractérisation de la kératine à partir des plumes de poulet qui ont été menées ces dernières années.

4.2. Prétraitement des plumes

Les plumes crues sont des déchets mélangés à de la graisse d'abats, des débris, sang, huile et autres déchets provenant du processus de production de volaille, ce qui rend ces déchets dangereux. Contaminées par des bactéries, ces plumes sont odoriférantes et impropres à la valorisation telles quelles. Par conséquent, un prétraitement des plumes est nécessaire avant une éventuelle valorisation.

Plusieurs méthodes de décontamination et du prétraitement des plumes ont été réalisées, une étude montre que le prétraitement de ces dernières par l'hypochlorite de sodium (NaOCl) améliore d'une façon significative l'indice de blancheur et diminue la teinte jaune. De plus, l'utilisation de l'éthanol a encore augmenté leur indice de blancheur en raison de l'élimination d'huile responsable de la couleur jaune des plumes [48].

Par ailleurs, ces résultats sont en accord avec une étude qui montre la relation inversement proportionnelle entre la valeur de blancheur et l'indice de couleur jaune. En outre, cette même étude montre que le prétraitement des plumes par le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) donne une luminosité et une valeur de blancheur plus élevée avec de faible changement de couleur contrairement aux prétraitements par le NaOCl et L'hydrosulfite de sodium ($Na_2S_2O_4$). Les effets des composés oxydants (H_2O_2 et NaOCl) et réducteurs ($Na_2S_2O_4$) comme agents de décontamination ont été étudiés sur des plumes de poulet. Les résultats ont montré que les agents de blanchissement étaient efficaces pour éliminer les micro-organismes des plumes d'où l'ordre de réduction microbienne était le suivant : $H_2O_2 > NaOCl > Na_2S_2O_4$. Cependant, la décontamination par autoclave a montré la plus grande réduction du nombre microbien [81].

4.3. Extraction de la kératine :

La kératine est une molécule insoluble dans la plupart des solvants. A cet effet, plusieurs méthodes d'extraction par le clivage des liaisons disulfures intra et intermoléculaires et des liaisons hydrogènes ont été développées telle que : réduction, oxydation, sulfitylse et traitements chimiques et / ou physiques.

4.3.1. Par les liquides ioniques

Yimei *et al.* [82], ont montré, qu'un rendement très élevé d'environ 75% de kératine et un taux de dissolution des plumes de canard d'environ 96,7% ont été obtenus en utilisant le 1-Butyl-3-méthylimidazolium chloride [Bmim] [Cl] comme solvant avec le sulfite de sodium et l'eau comme additifs pour faciliter la dissolution. Les conditions optimales de cette extraction sont : 20% en poids d'eau dans 1L – eau, 10% en poids de Na₂SO₃ en phase liquide, le rapport pondéral liquide / plume = 20, température d'extraction à 90 °C et temps d'extraction de 60 min.

Une autre étude consiste en l'utilisation de 1-hydroxyéthyl-3-méthylimidazolium bis (trifluorométhanesulfonyl) amide pour dissoudre les plumes dans un système agité à 80 °C pendant 4 heures, révèle une dissolution assez élevée. Néanmoins, le rendement en kératine était limité à environ 21% en raison de la dégradation du reste de kératines en acides aminés et en petits peptides. L'utilisation de [Bmim] [Cl] donne les meilleurs résultats en termes de coût, de dissolution, de rendement et de récupération [83].

L'utilisation de l'acétate de sodium – urée comme un alternatif pour les solutions ioniques dans le rapport molaire de 1 : 2 à 100 °C et pour un temps de dissolution de 6 h a permis de dissoudre environ 86% des plumes avec un rendement en kératine régénérée de 45% [84].

Tableau 4.1 : Résultats sur l'extraction de la kératine par des liquides ioniques dans divers conditions expérimentales [85].

| Solvants | Rapport(solide /liquide)(p / p) | Température (°C) | Temps (h) | Rendement (%) | Poids Moléculaire (kDa) |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------|---------------|-------------------------|
| [Bmim][Cl] | 1 :20 | 80 | 2 | 2.5 | 20-30 et 10 |
| [Bmim][Cl] | 1 :20 | 130 | 2 | 59 | 20-30 et 10 |
| [Amim][Cl] | 1 :20 | 130 | 2 | 57 | 20-30 et 10 |
| [Choline] [Thioglycolate] | 1 :20 | 130 | 2 | 51 | / |
| [Bmim][Cl] +10% Na ₂ SO | 1 :20 | 80 | 2 | 70 | / |
| [Bmim][Cl] +10% Na ₂ SO | 1 :40 | 80 | 2 | 62 | / |
| [Bmim][Cl] +10% Na ₂ SO | 1 :20 | 80 | 1 | 58 | / |
| [Bmim][Cl] +10% Na ₂ SO | 1 :20 | 90 | 1 | 72 | / |

4.3.2. La réduction

L'extraction de la protéine de kératine à partir des plumes de poulet par les agents réducteurs est souvent préférée car elle est plus rapide et plus efficace que l'extraction par des agents oxydants. En outre, il a été démontré que le sulfure de sodium est un agent réducteur très efficace pour extraire la kératine des plumes, car il s'oxyde et s'élimine en résultant une kératine sans résidu chimique.

Dans une étude, les plumes ont été immergées dans 150 mL de solution contenant de l'urée (0,33 mol / L), laurylsulfate de sodium (0,05 mol / L), 2-mercaptoéthanol (0,085 mol / L) et un tampon tris (hydroxyméthyl) aminométhane. Le mélange a été chauffé à 70 °C pendant 2 h sous atmosphère d'azote. Un rendement de 93% de kératine a été obtenu en utilisant cette technique. La kératine extraite contenait de l'alanine (29,5%), cystéine (14,4%), proline (10,1%) et la sérine (7,0%) comme composants principaux [38].

Une autre étude montre que le rendement de la kératine extraite en utilisant du sulfure de sodium et de L-cystéine était de 88% et 66%, respectivement. Le rapport de masse de plumes à l'agent réducteur était de 1 :20 et la température de réaction était de 40 °C pendant 6 h [5]. Par ailleurs, 60% de kératine a été obtenue en utilisant L-cystéine 10% par rapport à la plume dans les conditions suivantes : Urée 8M ; NaOH augmentait le pH à 10,5, le rapport du poids de la solution d'urée à la plume de poulet était de 17 : 1 [86].

Tableau 4.2 : Rendement d'extraction de la kératine par la méthode de réduction. [14]

| Thiol | Conditions | | | Temps et température | Rendement (%) |
|------------------------------|------------|------------------------|------|------------------------|---------------|
| | Urée (M) | Tensioactif / tampon | pH | | |
| Acide thioglycolique (0,2 M) | 6 | | 10.5 | 40 °C, pendant 3 h | 85 |
| Acide thioglycolique (0,2 M) | 6–10 | | 11 | 40 °C, pendant 2 h | 91 |
| Thiourée (2,4 M) | 15 | 15% DTT, 25 mM Tris | 8.5 | 50 °C, pendant 2 jours | 67 |
| Mercaptoéthanol (0.6M) | 8 | 1 M Tris / 0,25 M EDTA | 11 | 20°C pendant 16 h | 73 |

4.3.3. L'hydrolyse alcaline :

Dans une étude, les plumes de poulet ont été traitées avec une solution de NaOH (0,1 N) pendant 15 min à 90 ° C. les résultats obtenus montre que la composition en acides aminés dans le produit final était différente à celle des échantillons de plumes non traitées. La kératine extraite par cette méthode avait de faibles teneurs en sérine, arginine, cystine. Alors que la quantité de lysine, méthionine et d'acide glutamique était élevée. [11]

Tableau 4.3 : Résultats sur l'extraction alcaline de la kératine. [85]

| Source de kératine | Conditions expérimentales | Remarques |
|--------------------|---|--|
| Plumes de poulet | 0,2 N Na ₂ CO ₃ (100 mL / g de plumes) 1 h à 90 °C ou 0,1 N NaOH (différents volumes / g de plumes) pendant 30 à 90 °C | Rendement d'extraction 40% (0,2 N Na ₂ CO ₃). Rendement d'extraction à partir de 90% (40 mL de NaOH 0,1 N / g de plumes). |
| Plumes de poulet | <ul style="list-style-type: none"> • Le réactif de Schweitzer [Cu (NH₃)₄ (H₂O)₂]₂ <li style="text-align: center;">+ • Poudre de plume / réactif (1,0 g / 50 mL) à température ambiante pendant 24 h en présence d'air | Le produit est un complexe kératine-cuivre <ul style="list-style-type: none"> • Les résidus de cystine étaient convertis en acide cystéique et pas de formation de lanthionine. • Une faible teneur en acides aminés aromatiques |
| Plumes de poulet | 1 N NaOH (300 mL) pendant 24 h à température ambiante. Après une centrifugation la solution était neutralisée avec HCl (1N) | L'analyse SDS – PAGE a montré une bande principale unique de 5,8 kDa |
| Plumes de poulet | 1 M NaOH (plumes / bain 1 g / 25 mL). La kératine de plumes soluble était récupérée par filtration (53 µm maille métallique). Le filtrat a été neutralisé avec du HCl et centrifugé. | <ul style="list-style-type: none"> • Récupération de la kératine : 54,5% (par poids après lyophilisation) • Teneur en azote dans la kératine : 4,9% |

4.3.4. L'explosion de vapeur

Un processus d'explosion de vapeur suivi d'une extraction alcaline a été appliqué pour extraire la kératine des plumes de canard. Une explosion des plumes de canard à différentes pressions de vapeur (1,4 à 2,0 MPa) pendant 0,5 à 5 min, puis une extraction alcaline a été réalisée dans les conditions suivantes : 0,4% NaOH (solvant /matériau 20/1 (v / p), pendant 1 h à 25 °C. Un taux d'extraction des plumes de 65,78% et un rendement en kératine de 42,78% ont été obtenus pour (1,6 MPa, 1 min) [87].

Une méthode d'explosion de vapeur à haute densité a été utilisée pour augmenter la digestibilité des plumes, suivi par un traitement avec 0,2% d'hydroxyde de potassium, eau désionisée et un tampon phosphate (avec et sans urée). Les résultats étaient les suivants :

La plus grande dissolubilité des kératines de plume a été rapportée dans le cas du traitement avec 0,2% d'hydroxyde de potassium et a augmenté de 3,0% à 72,8% [83].

Une autre méthode d'explosion de vapeur à haute densité a été utilisée. La digestibilité des plumes a été améliorée de 93%, et les poids moléculaires de la kératine ont été préservés avec deux types de protéines (10 et 30 kDa) [38].

4.3.5. Sulfitolyse :

Un rendement de 62 % a été obtenu en utilisant la méthode de sulfitolyse pour extraire la kératine des plumes dans les conditions suivantes : les plumes ont été mélangées avec du sulfate de sodium (10g/L) en présence du gaz N₂, puis incubées pendant 24h à 30 °C dans un agitateur-incubateur réglé à une vitesse de 130 tr/min [14].

Tableau 4.4 : Résultats sur l'extraction de la kératine par sulfitolyse [85].

| Extraction solution | Rapport (solide : liquide) (p/p) | Température (°C) | Temps (h) | Rendement (%) |
|--|----------------------------------|------------------|-----------|---------------|
| Urée 8 M ; métabisulfite de Sodium 0,5 M ; SDS 0.2M | 1 :25 | 50 | 2 | 63 |
| Urée 8 M; bisulfite de Sodium 0,5 M; SDS 0.2 M | 1 :25 | 50 | 2 | 82 |
| Urée 8 M ; métabisulfite de Sodium 0,2 M ; SDS (g) / plume (g) 0,6 M | 1:36 | 65 | 5 | 88 |

4.3.6. Traitement micro-ondes

Dans une étude faite par Swati *et al.* [88] visant la production d'hydrolysats de protéines par un traitement alcalin en utilisant les micro-ondes, une concentration de protéine soluble d'environ 26,74 mg/mL a été obtenue sous les conditions suivantes : une puissance de 800 W, une concentration en NaOH de 0,5 M, et un temps de traitement de 10 min. Par ailleurs, l'hydrolysats de protéine provenant de ce traitement contenait une concentration significativement plus élevée en acides aminés (69,4 mg/g de plumes) par rapport au traitement alcalin en utilisant l'autoclave (19,0 mg/g de plumes) et le traitement thermo-alcalin (27,8 mg/g de plumes).

✓ Précipitation de la kératine :

Une expérience utilise trois types de précipitants (HCl, éthanol, acétone) pour précipiter les protéines de la kératine extraite par hydrolyse alcaline montre qu'une meilleure précipitation a été obtenue en employant HCl [89].

4.4. Caractérisation de la kératine :

4.4.1. Microscopie électronique à balayage (MEB) [90] (Figure 4.1)

L'analyse par le MEB de la kératine extraite à partir des plumes montre qu'elle présente une structure hautement poreuse en surface avec de petites microsphères rondes en forme de boule à surface lisse. La kératine séchée est constituée de microparticules globulaires compactes et de microstructures disposées au hasard. Ces résultats sont compatibles aux résultats obtenus dans une étude précédente d'où les images obtenues par le MEB ont montré que la poudre de la kératine apparaissait comme de petites particules sous forme de poussière et qui s'agrégent lorsqu'elles sont agrandies à 10000. La taille des grains d'une poudre de kératine était de l'ordre de 1 μm et 200 μm [91].

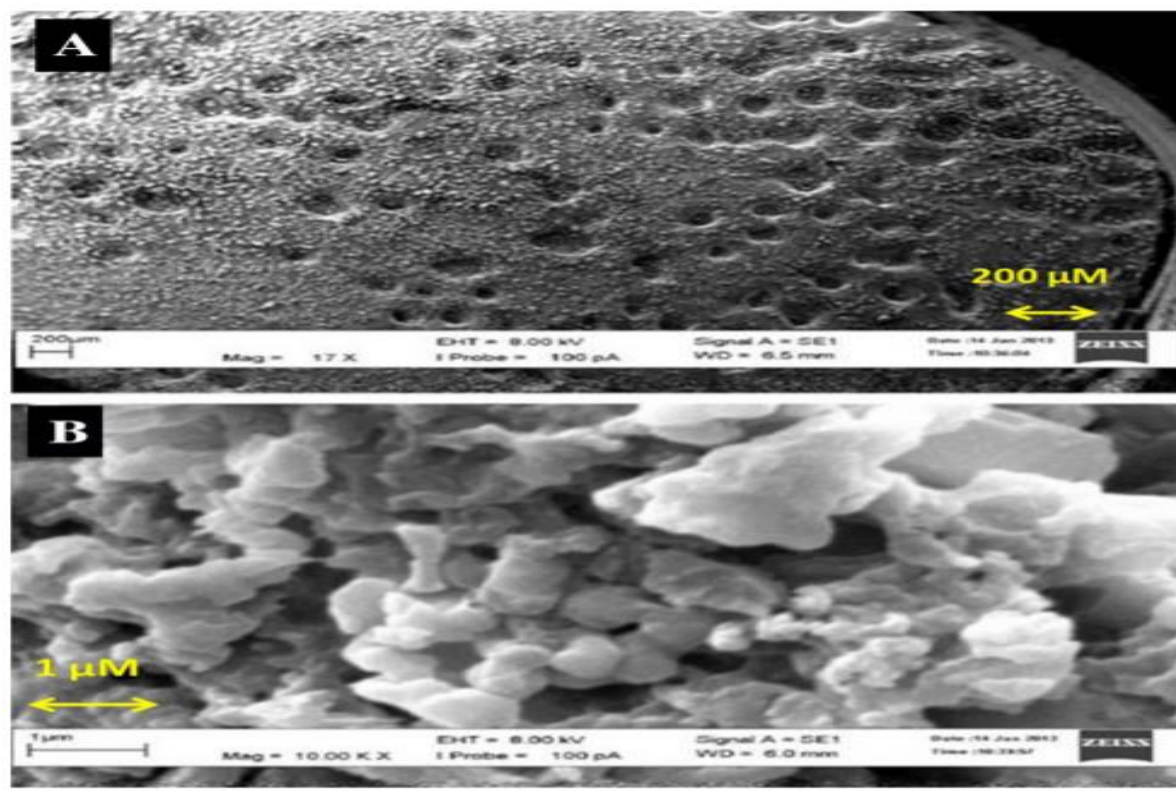


Figure 4.1 : Image par MEB de la kératine : A : image obtenue par grossissement x17. B : image obtenue par grossissement x10 000.[91]

4.4.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) [48][92][89] (Figure 4.2)

Dans différentes études, l'analyse par le IRTF a été utilisée pour comprendre la structure chimique de la kératine extraite. Les spectres d'absorbance de tous les échantillons ont montré la conservation de la structure secondaire de la protéine pendant l'extraction par rapport aux plumes brutes. De plus, des bandes caractéristiques similaires correspondant aux liaisons peptidiques (-CONH) proviennent des bandes appelées amide A, amide I, amide II et amide III ont été observées. Ces bandes sont utilisées pour confirmer la présence de la matière protéique. Les analyses ont été effectuées pour des nombres d'onde allant de 4000 à 550 cm^{-1} . Cependant :

- Les fortes bandes de transmission dans la région (1700cm^{-1} à 1600cm^{-1}) correspondent à l'amide I.

- Les bandes de transmission dans la région (1600cm^{-1} à 1480cm^{-1}) correspondent à l'amide II.
- Les bandes faibles dans la région (1210cm^{-1} à 1300cm^{-1}) correspondent à l'amide III.
- Une large bande de transmission dans la région (3500cm^{-1} à 3200cm^{-1}) correspond à l'amide A.
- Un pic à 550cm^{-1} correspond à des liaisons disulfures suggère qu'il y a encore des traces de liaisons disulfure ininterrompues après l'extraction de la kératine.

Une étude montre l'effet du prétraitement des plumes sur le spectre IRTF d'où les plumes de poulet autoclavées et non traitées avaient des bandes caractéristiques des groupes C=O d'ester d'acide gras et des groupes alkyles C-H, CH₂, CH₃ de la longue chaîne carbonée. Ces signaux peuvent être attribués aux graisses naturelles comme l'ester d'acide adipique présent sur les peaux des animaux [81].

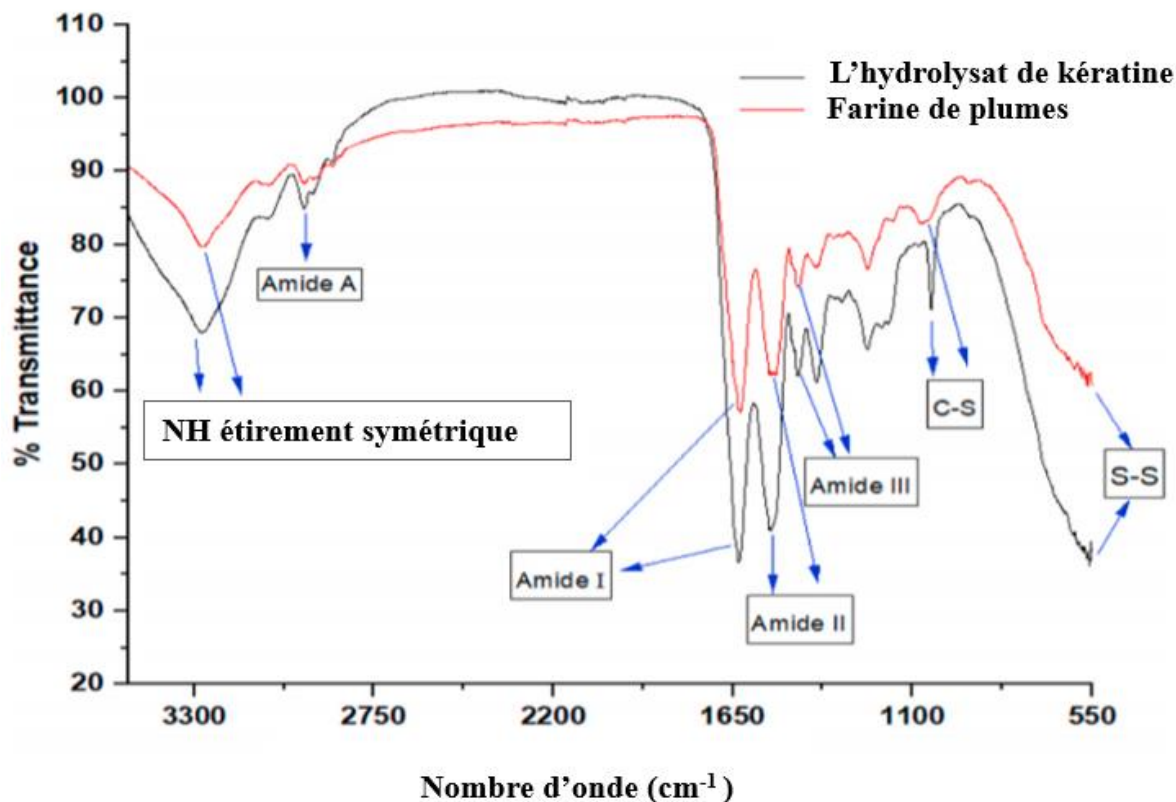


Figure 4.2 : Spectre IRTF de l'hydrolysate de kératine comparé à celui de la farine de plumes.[3]

4.4.3. L'analyse par diffractométrie de rayons X (DRX) [90] (Figure 4.3)

L'analyse DRX a été utilisée afin de déterminer la structure cristalline de la kératine extraite. Les résultats de l'analyse montrent que cette dernière avait une forme semi- cristalline, et possédait deux types de structure cristalline α et β . Ces résultats étaient assimilables à ceux obtenus dans une autre étude [84].

Le diffractogramme (les modèles ont été collectés avec une source de rayonnement du Cu K α) obtenu dans la figure 4.3 montre :

- Un Pic à $32,75^\circ$, qui a déterminé la présence de nanoparticules de kératine.
- Le pic de diffraction à $2\theta = 10,77^\circ$ est associé à l'hélice α et à $2\theta = 20,50^\circ$ correspond au feuille β .
- Un pic à $45,77^\circ$ est associé à une structure amorphe.

Le clivage des liaisons disulfures et des chaînes polypeptidiques ainsi que le changement d'interactions telles que les liaisons hydrogènes présentes dans la kératine de plume peut engendrer la perte de la structure cristalline et la structure secondaire ordonnée de la kératine extraite, d'où une expérience montre que le degré de cristallinité est passé de 58,5% à 42,0% après un traitement des plumes par l'acétate de sodium – urée pendant 16h. [84]

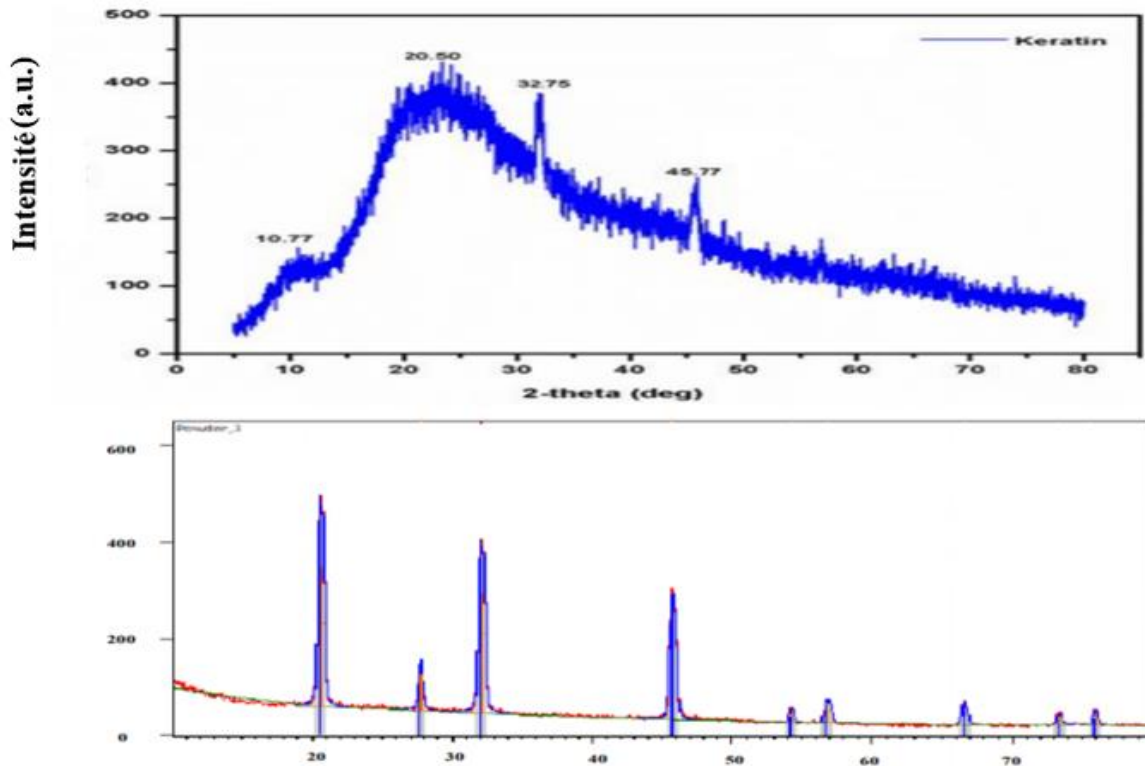


Figure 4.3 : Le diffractogramme de la kératine. [90]

4.4.4. Electrophorèse sur gel de dodécyl sulfate de sodium – polyacrylamide (SDS-PAGE)

Le poids moléculaire de la kératine extraite à partir des plumes a été déterminée par l'analyse SDS-PAGE. L'analyse montre deux types de kératine : à faible poids moléculaire (3kDa) et à poids moléculaire élevé (62 kDa). Ces résultats sont similaires à plusieurs études [3][91][48].

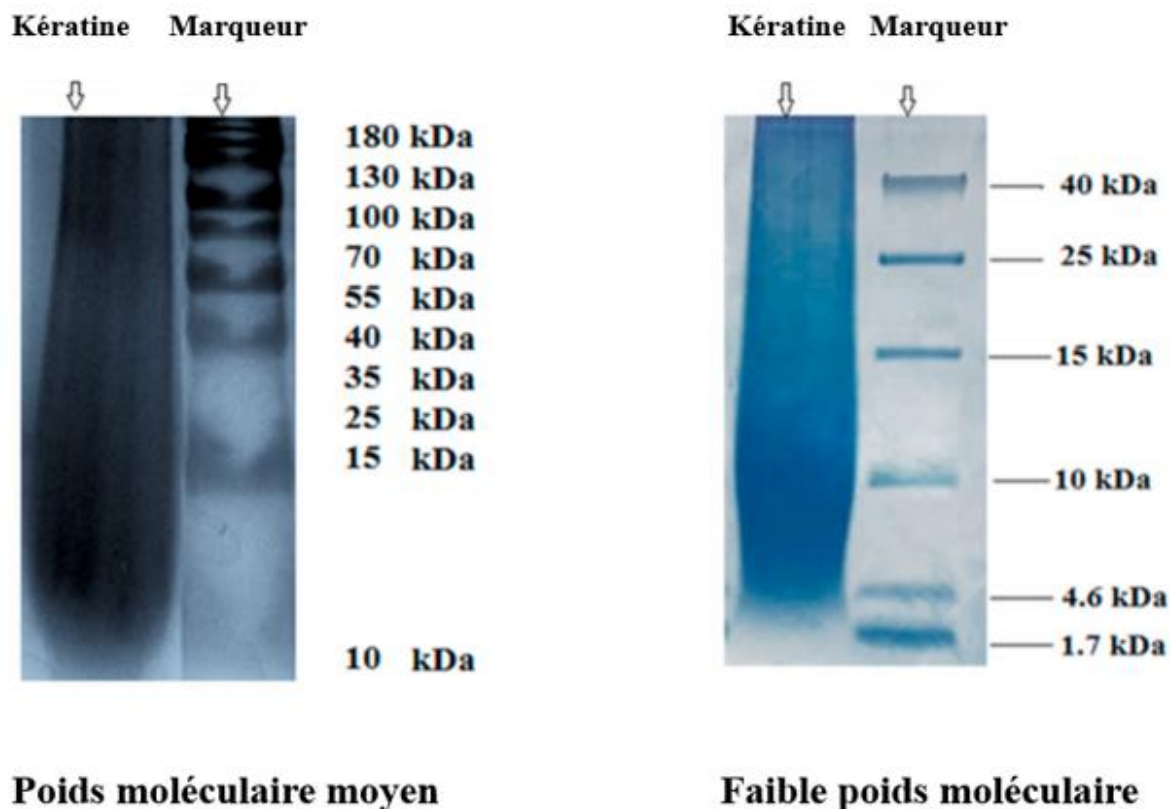


Figure 4.4 : Résultat de l'analyse SDS-PAGE de la protéine de kératine. [3]

4.4.5. Chromatographie d'exclusion stérique [91]

Une chromatographie d'exclusion stérique de la protéine de kératine a été exécutée avec deux standards de protéines (l'ovalbumine et ASB), et la vitamine B12.

Les poids moléculaires (kDa) sont : ASB = 66.5, l'ovalbumine = 44.3, Vitamine B12 = 1.36. Selon l'ordre d'éluion ASB en premier > l'ovalbumine > protéine de la kératine > vitamine B12, le poids moléculaire de la kératine a été estimée entre 1.36 et 44.3 kDa.

4.6. Résonance magnétique nucléaire RMN [48]

Les spectres RMN ^{13}C de la kératine extraite présentent les pics suivants :

- Des pics à 25 ppm, qui correspondent aux chaînes latérales d'alkyle.

- Des pics 40 ppm, qui correspondent au carbone β présent dans la leucine et les résidus de cystéine réticulés.
- Des signaux à 60 ppm, qui correspondent au carbone α .
- Des pics à 130 ppm, correspondent au carbone aromatique, ce qui confirme la présence d'acides aminés dans la kératine extraite.
- Un faible signal à 170 ppm représentait le carbonyle d'amide de la protéine de kératine.

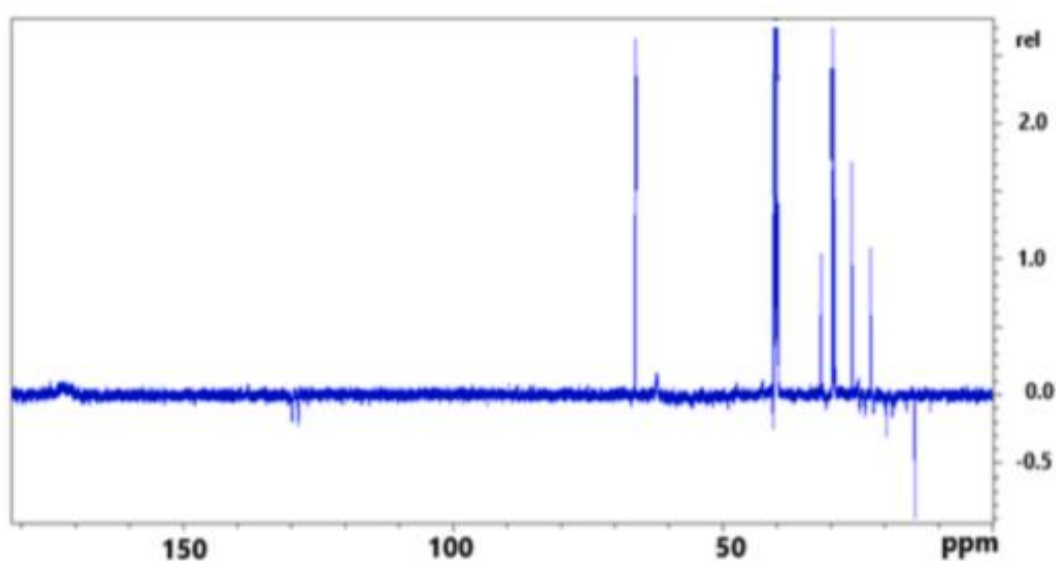


Figure 4.5 : Les spectres RMN ^{13}C de la kératine extraite à partir des plumes de poulet [48].

4.4.7. Taux de protéines

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la détermination du taux de protéines dans la kératine extraite à partir des plumes comme la méthode de Bradford et la méthode de Biuret.

Dans une étude, l'analyse du taux des protéine par CHNS /O a montré que la kératine extraite contenait 67.63% de protéines brutes d'où la valeur a été obtenue en multipliant la teneur moyenne en azote (10.82%) par un facteur de conversion azote-protéine de 6.25. La présence de protéine a été confirmée par la méthode de Bradford qui a montré une concentration protéique de 0,021 $\mu\text{g} / \text{mL}$. Cette concentration a été obtenue en utilisant l'Albumine sérique bovine (ASB) comme standard pour générer une courbe d'étalonnage à partir de l'absorption

mesurée à 595 nm, et les solutions de kératine ont été préparées en dissolvant 35 mg dans 1 mL d'eau déminéralisée avant la mesure de l'absorption.[48]. Ces résultats indiquent que les plumes sont d'une bonne source de protéine.

Dans une autre étude, la concentration en protéine de la kératine extraite a été estimée par absorbance des protéines à 280 nm et par la méthode de Bradford. Les résultats montrent que la concentration varie selon la méthode d'extraction adoptée et selon la partie de la plume utilisée pour l'extraction. (Tableau 4.5).[5]

Tableau 4.5 : Concentrations de kératine extraite par le sulfure de sodium et la L-cystéine déterminée en utilisant la méthode de Bradford et l'absorbance des protéines à 280 nm. [5]

| | Absorbance des protéines à 280 nm (mg/mL) | Méthode de Bradford (mg/mL) |
|-------------------------------------|---|-----------------------------|
| Extraction par sulfure de sodium | | |
| Plumes de poulet complètes | 1.08 | 1.48 |
| Feuille β de plumes de poulet | 3.78 | 4.81 |
| Hélice α de plumes de poulet | 1.98 | 1.87 |
| L-cystéine | | |
| Plumes de poulet complètes | 0.13 | 0.32 |
| Feuille β de plumes de poulet | 0.15 | 0.45 |
| Hélice α de plumes de poulet | 0.02 | 0.16 |

Une analyse qualitative par le test de Biuret a été utilisée pour mettre en évidence la présence de protéine de kératine.

Des solutions de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de potassium à 1% ont été préparées, et 6 mL de la solution de kératine pure a été recueillie et mélangée avec une solution d'hydroxyde de potassium avec un rapport de 1 :1. Puis, trois gouttes d'une solution de sulfate de cuivre ont été ajoutées au mélange. Par ailleurs, un échantillon de protéine de kératine extraite après purification a été préparé et dilué. Un changement de couleur a été obtenu à partir du test de Biuret (apparition de la couleur violet) avec une absorbance dans l'UV de 2.385 à 315nm et de 0.287 à 253nm ce qui signifie que la kératine a été extraite effectivement à partir des plumes [93].

4.5. Conclusion

Des travaux massifs ont été réalisés pour l'extraction et la caractérisation de la kératine à partir des plumes de poulet. Les résultats obtenus montrent que :

- Le prétraitement de la kératine est une étape indispensable, car elle permet d'éliminer la graisse et les impuretés et influence favorablement les propriétés physico-chimiques et mécaniques des plumes de poulet, ce qui facilite l'extraction et l'analyse de la kératine.
- Plusieurs techniques d'extraction ont été développées : la réduction, la sulfitoxydation, le traitement par des solutions ioniques et alcalines, explosion de vapeur, traitement micro-ondes. Cependant :
 - Le traitement alcalin utilise une grande quantité de produit alcalin et d'acide pour la neutralisation.
 - La réduction a montré un meilleur rendement de kératine extraite 93%, néanmoins l'utilisation de mercaptoéthanol est coûteuse et peut être toxique.
 - L'utilisation de sulfure de sodium pour l'extraction par sulfitoxydation est un bon alternatif à faible coût de mercaptoéthanol [14].
 - Les liquides ioniques sont des solvants verts respectueux à l'environnement d'où l'utilisation [Bmim] [Cl] donne les meilleurs résultats en termes de coût, de dissolution, de rendement et de récupération.
- La kératine extraite à partir des plumes présente une structure poreuse nettement observée par le MEB avec des poids moléculaires de 3kDa et 62 kDa selon le SDS-PAGE.
- Les bandes caractéristiques de la kératine observées par l'analyse IRTF sont celles des fonction Amides I, II, III et A.
- La kératine des plumes est d'une structure semi-cristalline et se présente en feuille β dominante et d'hélice α selon l'analyse par DRX.
- La méthode de Bradford est une méthode fiable, rapide est très utilisée au niveau des laboratoires pour la détermination de la concentration en protéine. Elle confirme que les plumes sont une source de matière protéique.

Selon ces résultats, la kératine est une protéine d'une structure unique avec des propriétés physicochimiques très intéressantes, ce qui explique son importance incontournable dans le secteur industriel, plus spécialement l'industrie pharmaceutique et cosmétique.

Dans ce projet nous nous sommes intéressés aux plumes de volailles comme une source potentielle de kératine, Vue leur richesse en cette protéine.

Les plumes sont très abondantes et facilement accessibles, ce qui les rend la matière kératinique la plus adéquate pour la production de la kératine dans le cadre de valorisation de ces agrodéchets qui présente un problème de pollution pour l'environnement.

La méthode qu'on a adoptée consiste à produire la kératine à partir des plumes sans altérer sa structure en utilisant le DMSO comme solvant d'extraction. La kératine obtenue est ensuite caractérisée par des analyses physiques, chimiques et biochimiques. Les techniques utilisées sont des techniques de laboratoires, facile à manipuler et effectives.

Le sujet présenté a suscité l'intérêt de plusieurs laboratoires qui ont développé diverses méthodes d'extraction (réduction, sulfitylose, traitement alcalin, etc.) et de caractérisation (par MEB, IFTR, DRX, SDS-PAGE, etc.)

Les résultats obtenus montrent que le prétraitement des plumes est une étape primordiale avant l'extraction d'où L'utilisation de sulfure de sodium comme solvant d'extraction par sulfitylose semble être préférable en termes de coûts.

L'analyse par MEB, DRX et SDS-PAGE montre que la kératine a une structure poreuse, semi cristalline avec des poids moléculaires de 3kDa et 62 kDa. En outre, les bandes caractéristiques de la kératine observées par l'analyse IRTF sont celles des fonctions Amides I, II, III et A.

Les plumes sont une source riche de matière protéique confirmée par la méthode de Bradford (0,021 µg /mL) et l'analyse alimentaire CHNS /O (67.63% de protéines brutes).

Néanmoins, les plumes restent toujours mal gérées et peu exploitable malgré leur composition riche et leur bon marché, ce qui nécessite plus d'effort de la part des chercheurs afin de développer de nouvelles approches pour la régénération de la kératine vu les propriétés promettantes qu'elle a révélé en s'appuient sur les résultats phénoménaux atteint auparavant, ce qui nous permettra d'éliminer les déchets des plumes d'une façon bénéfique à l'environnement en premier lieu et au secteur industrielle en seconde lieu.

- [1] A. Purandaradas, T. Silambarasan, K. Murugan, R. Babujanarthanam, Arumugam D. Gandhia, Kayal V. Dhandapani, D. Anbumani, P. Kavitha. (2018). Development and quantification of biodiesel production from chicken feather meal as a cost-effective feedstock by using green technology. *Biochemistry and Biophysics Reports*. 14:133-139.
- [2] Q. Li. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste. *Frontiers in Microbiology*. 10:1-15.
- [3] Olajumoke D. Fagbemi, B. Sithole, T. Tesfaye. (2020). Optimization of keratin protein extraction from waste chicken feathers using hybrid pre-treatment techniques. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 17:1-12.
- [4] Cynthia G. Flores-Hernandez, B. Murillo-Segovia, Ana L. Martinez-Hernandez. C. Velasco-Santos. (2017). Keratin as Renewable Material to Develop Polymer Composites: Natural and Synthetic Matrices. *Handbook of Composites from Renewable Materials: Polymeric Composites*. Vijay K. Thakur, Manju K. Thakur, Michael R. Kessler (Eds). Wiley. 6:1-29.
- [5] F. Pourjavaheri, Saeideh O. Pour, Oliver A.H. Jones, Peter M. Smooker, R. Brkljača, F. Sherkat, Ewan W. Blanch, A. Gupta, Robert A. Shanks. (2019). Extraction of keratin from waste chicken feathers using sodium sulfide and L-cysteine. *Process Biochemistry*. 82:205-214.
- [6] Jillian G. Rouse, Mark E. Van Dyke. (2010). A Review of Keratin-Based Biomaterials for Biomedical Applications. *Materials*. 3(2):999-1014.
- [7] Hyeon S. Jin, Seon Y. Park, K. Kim, Yong J. Lee, Gae W Nam, Nam J. Kang, Dong W. Lee. (2017). Development of a keratinase activity assay using recombinant chicken feather keratin substrates. *Plos one*.12(2):1-18.
- [8] B. Wang, W. Yang, J. McKittrick, Marc A. Meyers. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*. 76: 229-318.
- [9] S. Sharma, A. Gupta, A. Kumar. (2019). Keratin: an introduction. *Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications*. S. Sharma, A. Kumar (Eds). Springer.1-18.

- [10] Hermann H. Bragulla, Dominique G. Homberger. (2009). Structure and functions of keratin proteins in simple, stratified, keratinized and cornified epithelia. *Journal of Anatomy*. 214(4): 516-559.
- [11] S. Feroz, N. Muhammad, J. Ratnayake, GDias. (2020). Keratin - Based materials for biomedical applications. *Bioactive Materials*. 5(3):496-509.
- [12] T. Kornilłowicz-Kowalska, J. Bohacz. (2011). Biodegradation of keratin waste: Theory and practical aspects. *Waste Management*.31(8):1689-1701.
- [13] E. Renuart, C. Viney. (2000). Biological fibrous materials: Self assembled structures and optimised properties. *Pergamon Materials Series*. M. Elices (Eds). Elsevier. 4:223-267.
- [14] A. Shavandi, Tiago H. Silva, Adnan A Bekhit, A. Bekhit. (2017). Dissolution, Extraction and Biomedical Application of Keratin. *Biomaterials Science*. 5(9): 1699-1735.
- [15] M. Rajabi, Mohammad A. Ali, M. McConnell, J. Cabral. (2020). Keratinous materials: Structures and functions in biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*. 110:1-22.
- [16] P. Mathur, Javed N. Sheikh, K. Sen. (2020). Durable flame-retardant wool using sulphamic acid. *Polymer Degradation and Stability*. 174:1-9.
- [17] Tarun K. Kumawat, V. Sharma, A.Sharma, S. Chandra. (2018). Keratin Waste: The Biodegradable Polymers. *Intechopen*.150-169.
- [18] L. Khtaoui. (2012). Etude de la protection thermique et UV des cellules photovoltaïques par un dépôt des fibres kératiniques afin d'améliorer leurs rendements. Université mouloud Mammeri, Tizi-ouzou.
- [19] A.Shah, S. Tyagi, Ram N. Bharagava, D. Belhaj, A. Kumar, G. Saxena, Ganesh D. Saratale, Sikandar I. Mulla. (2019). Keratin Production and Its Applications: Current and Future Perspective. *Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications*. S. Sharma, A. Kumar (Eds). Springer. 19-34
- [20] W. Kanoksilapatham, W. Intagun. (2017). A Review: Biodegradation and Applications of Keratin Degrading Microorganisms and Keratinolytic Enzymes, Focusing on Thermophiles and Thermostable Serine Proteases. *American Journal of Applied Sciences*.14(11):1016-1023.

- [21] Basma Y. Alashwal, Mohamed S. Bala, A. Gupta, S. Sharma, P. Mishra. (2020). Improved properties of keratin-based bioplastic film blended with microcrystalline cellulose: A comparative analysis. *Journal of King Saud University – Science*.32(1):853-857.
- [22] L. Guoa, L. Lu, M. Yin, R. Yang, Z. Zhang, W. Zhaoa, (2020). Valorization of refractory keratinous waste using a new and sustainable bio-catalysis, *Chemical Engineering Journal*. 397:1-11.
- [23] S. Sharma, A. Gupta. (2016). Sustainable Management of Keratin Waste Biomass: Applications and Future Perspectives. *Brazilian Archives of biology and technology*. 59:1-14.
- [24] N. Reddy. (2017). Miscellaneous Applications. *Keratin-based Biomaterials and Bioproducts*. N. Reddy (Eds). Smithers. 153-167.
- [25] A. Lipkowski, B. Gajkowska, A. Grabowska, K. Kurzepa. (2009). Keratin-associated protein micromaterials for medical and cosmetic applications. *Polimery*. 54(5):386-388.
- [26] P. Mokrejs, J. Pavlackova, M. Hutta, P. Egner, (2017). The cosmetic and dermatological potential of keratin hydrolysate. *Journal of Cosmetic Dermatology*.16(14):1-7.
- [27] S. Sharma, A. Gupta, Syed M. Saufi. Gek K. Chua, Doo H. Kim, B. Mistry. G. Sharma. (2017). Characterization of keratin microparticles from feather biomass with potent antioxidant and anticancer activities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 104(Pt A):189-196.
- [28] T. Posati, D. Giuri, M. Nocchetti, A. Sagnella, M. Gariboldi, C. Ferroni, G. Sotgiu, G. Varchi, R. Zamboni, A. Aluigi. (2018). Keratin-hydroxycalcites hybrid films for drug delivery applications. *European Polymer Journal*. 105:177-185.
- [29] N. Reddy. (2017). Keratin Micro/Nanoparticles. *Keratin-based Biomaterials and Bioproducts*. N. Reddy (Eds). Smithers. 139-152.
- [30] H. Xu, Z. Shi, N. Reddy, Y. Yang. (2014). Intrinsically Water-Stable Keratin Nanoparticles and Their in Vivo Biodistribution for Targeted Delivery. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 62(37):9145–9150.

- [31] A. Aluigi, G. Sotgiu, C. Ferroni, S. Duchi, E. Lucarelli, C. Martini, T. Posati, A. Guerrini, M. Ballestri, F. Corticelli. (2016). Chlorin e6 keratin nanoparticles for photodynamic anticancer therapy. *RSC Advances* 6 (40):33910–33918.
- [32] Daniel C. Roy, S. Tomblyn, Kameel M. Isaac, Christine J. Kowalczewski, David M. Burmeister, Luke R. Burnett, Robert J. Christy. (2016). Ciprofloxacin-loaded keratin hydrogels reduce infection and support healing in a porcine partial-thickness thermal burn. *Wound Repair and Regeneration*. 24(4):657-668.
- [33] I. Sinkiewicz, H. Staroszczyk, A. Sliwinska. (2018). Solubilization of keratins and functional properties of their isolates and hydrolysates. *Journal of Food Biochemistry*. 42(2):1-11.
- [34] H. Lee, K. Noh, Sang C. Lee, Il K. Kwon, Dong W. Han, In S. Lee, Yu S. Hwang. (2014). Human Hair Keratin and Its-Based Biomaterials for Biomedical Applications. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 11(4):255-265.
- [35] S. Reichl, M. Borrelli, G. Geerling. (2011). Keratin films for ocular surface reconstruction. *Biomaterials*. 32(13):3375-3386.
- [36] R. Karthikeyan, B. Srinivasan, P K. Sehgal. (2007). Industrial applications of keratins – A review. *Journal of Scientific & Industrial Research*. 66(9):710-715.
- [37] Hafiz M. N. Iqbal, T. Keshavarz. (2017). Keratin-Based Materials in Biotechnology. *Handbook of Composites from Renewable Materials*. Vijay K. Thakur, Manju K. Thakur, Michael R. Kessler (Eds). Wiley. 1:271–288.
- [38] N.Reddy, M.S. Santosh. (2016). Recovery and Applications of Feather Proteins. *Protein Byproducts Transformation from Environmental Burden Into Value-Added Products*. Gurpreet S. Dhillon (Eds). Academic press. 255-274.
- [39] A. Dawson. (2015). Avian Molting. *Sturkie's Avian Physiology (Sixth Edition)*. Colin G. Scanes (Eds). Academic press. Springer. 907-917.
- [40] Elena P. Ramos, Hernández M. Dj, Q. Cruz. C. Pérez (2017). Degradation of Chicken Feathers: A Review. *Indian Journal of Biotechnology*. 13(6):1-24.

- [41] C. Foth. (2020). Introduction to the Morphology, Development, and Ecology of Feathers. *The Evolution of Feathers: From Their Origin to the Present*. Christian Foth, Oliver W. M. Rauhut. (Eds). Springer. 1-11.
- [42] E. Dieckmann, S. Dance, L. Sheldrick, C. Cheeseman. (2018). Novel sound absorption materials produced from air laid non-woven feather fibres. *Heliyon*. 4(9):1-13.
- [43] M. Rutkowska, Justyna P. Wasylka, Martyna L. Szczygeł, A. Różańska, Justyna M. Ciesielska, J. Namieśnik. (2018). Birds' feathers – suitable samples for determination of environmental pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 109:97-115.
- [44] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath. (2015). Valorisation of chicken feather barbs: Utilisation in yarn production and technical textile applications. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 8:38-49.
- [45] N. Paşayev, S. Kocatepe, N. Maraş, M. Soylak, M. Erol. (2017). Investigation some characteristics of chicken feather's rachis. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 254(19):1-8.
- [46] Michael J. Benton, D. Dhouailly, B. Jiang, M. McNamara. (2019). The Early Origin of Feathers. *Trends in Ecology & Evolution*. 34(9):856-869.
- [47] T. Tesfay, B. Sithol, D. Ramjugernath, V. Chunilall. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of chemical properties. *Waste Management*. 68: 626-635.
- [48] M. Khumalo, B. Sithole, T. Tesfaye. (2020). Valorisation of waste chicken feathers: Optimisation of keratin extraction from waste chicken feathers by sodium bisulphite, sodium dodecyl sulphate and urea. *Journal of Environmental Management*. 262:1-7.
- [49] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, V. Chunilall. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of physical properties and morphological structure. *Journal of Cleaner Production*. 149: 349-365.
- [50] T. Tesfayeab, B. Sitholeac, D. Ramjugernatha, T. Mokhothud. (2018). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of thermal, mechanical and electrical properties. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 9: 27-34.

- [51] G. Renab, T. Lin, Y. Ying, G. Chowdhary, Kuan C. Ting. (2020). Agricultural robotics research applicable to poultry production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 169:1-14.
- [52] F. Kanani, Mohammad D. Heidari, Brandon H. Gilroyed, N. Pelletier. (2020). Waste valorization technology options for the egg and broiler industries: A review and recommendations. *Journal of Cleaner Production*.262:1-19.
- [53] FAO. 2020 Food Outlook - Biannual Report on Global Food Markets: June 2020. Food Outlook, 1.Rome. <http://www.fao.org/3/ca9509en/ca9509en.pdf> , Date d'accès juillet 2020.
- [54] FAO. 2017. Meat and meat product. http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Meat/Documents/Food_Outlook_June_2017_Meat_.pdf. date d'accès juillet 2020.
- [55] FAO. 2020. Meat Market Review, Overview of global meat market developments in 2019, April 2020. Rome. <http://www.fao.org/3/ca8819en/CA8819EN.pdf>. date d'accès juillet 2020.
- [56] K. Benmessaouda. (2016). Etude sur les aspects de la viande de poulet, le marché du poulet en découpe et les tendances des consommateurs au niveau de la région de Batna. Université Batna1 – Batna.
- [57] M.A. Nouad. (2011). Étude technico-économique de projets de valorisation/gestion de déchets liés à la filière avicole en Algérie. REME.
- [58] R. Belala , A. Talah . (2018). Suivi d'élevage de Poulet de chair au niveau de la Daire de Khemis Miliana. Univesrité Saad Dahleb-Blida-1.
- [59] S. Kodak, T. Gharge, V. Chavan, G. Sibi. (2019). Microbial Degradation of Poultry Feather Wastes under the Influence of Temperature and pH – A Review. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*. 21(3):87-92.
- [60] N. Boucherba. (2014). Valorisation des résidus agro-industriels. Université Abderrahmane Mira de Béjaïa.

- [61] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath. (2017). Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route—current status and future prospects. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 19(10):2363-2378.
- [62] Regina J. Patinvoh, E. Feuk-Lagerstedt, M. Lundin, I. S. Horváth, Mohammad J. Taherzadeh. (2016). Biological Pretreatment of Chicken Feather and Biogas Production from Total Broth. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 180(7):1401-1415.
- [63] Gujuluva H. Dinesh, Ramu S. Murugan, K. Mohanrasu, N. Arumugam, Muthuramalingam J. Basu, A. Arun. (2019). Anaerobic Process for Biohydrogen Production using Keratin Degraded Effluent. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 13(2):1135-1143.
- [64] N. Reddy. (2015). Non-food industrial applications of poultry feathers. *Waste Management*. 45:91-107.
- [65] E. Dieckmann, B. Nagy, K. Yiakoumetti, L. Sheldrick, C. Cheeseman. (2019). Thermal insulation packaging for cold-chain deliveries made from feathers. *Food Packaging and Shelf Life*. 21:1-8.
- [66] S. Ozdemir, K. Yetilmezsoy. (2020). A mini literature review on sustainable management of poultry abattoir wastes. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 22(1):11-21.
- [67] C. Chuck-Hernandez, C. Ozuna. (2019). Protein Isolates From Meat Processing By-Products. *Proteins: Sustainable Source, Processing and Applications*. Charis M. Galanakis (Eds). Academic Press. 131-162.
- [68] Talia M. Hicks, C.J.R. Verbeek. (2016). Meat Industry Protein By-Products: Sources and Characteristics. *Protein Byproducts Transformation from Environmental Burden Into Value-Added Products*. Gurpreet S. Dhillon. (Eds). Academic Press. 37-61.
- [69] I. Aranberri, S. Montes, I. Azcune, A. Rekondo, Hans J. Grande. (2017). Fully Biodegradable Biocomposites with High Chicken Feather Content. *Polymers*. 9(11):1-15.
- [70] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath, V. Chuniilall. (2017). Valorization of chicken feathers: application in paper production. *Journal of Cleaner Production*. 164: 1324–1331.

- [71] M. Ozdal, Esabi B. Kurbanoglu. (2018). Valorisation of chicken feathers for xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* MO-03. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 16(2):259-263.
- [72] P. Pradhan, A. Bajpai. (2020). Preparation and characterization of films from Chicken feathers for dye adsorption. *Materials today: proceedings*. 29(4):1204-1212.
- [73] Poornima P. Vijayan, Asha A.V. Bhanu, S.R. Archana, A. Babu, S. Siengchin, J. Parameswaranpillai. (2020). Development of chicken feather fiber filled epoxy protective coating for metals. *Materials today: proceedings*. 1-5.
- [74] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath. (2018). Valorisation of Waste Chicken Feathers: Green Oil Sorbent. *International Journal of Chemical Sciences*. 16(3):1-13.
- [75] Marcelo de Assumpção Pereira-da-Silva, Fabio A. Ferri. (2017). Scanning Electron Microscopy. *Nanocharacterization Techniques Micro and Nano Technologies*. Alessandra L. Da Róz, M. Ferreira, Fabio D. Leite. Osvaldo N. Oliveira, Jr (Eds). William Andrew. 1-35
- [76] Mohamed A.Mohamed, J.Jaafar, Ahmad F.Ismail, Mohd H.D.Othman, Mukhlis A. Rahman. (2017). Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. *Membrane Characterization*. N. Hilal, Ahmad F. Ismail, T. Matsuura, D. Oatley-Radcliffe (Eds). Elsevier. 3-29.
- [77] S. Yurdakal, C. Garlisi, L. Özcan, M. Bellardita, G. Palmisano. (2019). (Photo)catalyst Characterization Techniques: Adsorption Isotherms and BET, SEM, FTIR, UV-Vis, Photoluminescence, and Electrochemical Characterizations. *Heterogeneous Photocatalysis Relationships with Heterogeneous Catalysis and Perspectives*. G. Marci, L.Palmisano. (Eds). Elsevier. 87-152.
- [78] Rajiv Kohli, K.L. Mittal. (2019). Methods for Assessing Surface Cleanliness. *Developments in Surface Contamination and Cleaning, Methods for Assessment and Verification of Cleanliness of Surfaces and Characterization of Surface Contaminants*. R. Kohli, K.L. Mittal (Eds). Elsevier. 12: 23-105.
- [79] Abhishesh K. Mehata, D. Dahari. (2020). Bradford assay as a high-throughput bioanalytical screening method for conforming pathophysiological state of the animal. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*. 10(1-s):105-110.

- [80] Eva M. Campion, Sinéad T. Loughran, Dermot Walls. (2017). Protein Quantitation and Analysis of Purity. *Protein Chromatography: Methods and Protocols, Methods in Molecular Biology*. Dermot Walls, Sinéad T. Loughran (Eds). Humana Press. 1485: 225-255.
- [81] T. Tesfaye, B. Sithole, D. Ramjugernath. (2018). Valorisation of waste chicken feathers: Optimisation of decontamination and pre-treatment with bleaching agents using response surface methodology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 8: 21-37.
- [82] Y. Ji, J. Chen, J. Lv, Z. Li, L. Xing, S. Ding. (2014). Extraction of keratin with ionic liquids from poultry feather. *Separation and Purification Technology*. 132: 577-583.
- [83] Chandrakant R. Holkar, Saransh S. Jain, Ananda J. Jadhav, Dipak V. Pinjari. (2017). Valorization of keratin-based waste. *Process Safety and Environmental Protection*. 115:85-98.
- [84] Emmi M. Nuutinen, P. Willberg-Keyriläinen, T. Virtanen, A. Mija, L. Kuutti, R. Lanttoa, Anna S. Jääskeläinen. (2019). Green process to regenerate keratin from feathers with an aqueous deep eutectic solvent. *RSC Advances*. 9(32): 19720–19728.
- [85] C. Vineis, A. Varesano, G. Varchi, A. Aluigi. (2019). Extraction and Characterization of Keratin from Different Biomasses. *Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications*. S. Sharma, A. Kumar. (Eds). Springer. 35-77.
- [86] B. Ma, X. Qiao, X. Hou, Y. Yang. (2016). Pure keratin membrane and fibers from chicken feather. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89: 614-621.
- [87] Y. Zhang, W. Zhao, R. Yang. (2015). Steam Flash Explosion Assisted Dissolution of Keratin from Feathers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 3(9): 2036-2042.
- [88] Yen S. Lee, Lai Y. Phang, Siti A. Ahmad, Peck T. Ooi. (2016). Microwave-Alkali Treatment of Chicken Feathers for Protein Hydrolysate Production. *Waste and Biomass Valorization*, 7(5):1147–1157.
- [89] S. Sharma, A. Gupta, Syed M. Saufi, T. Chik, C. Yeo, Gek K. Chua, P. Podder, J. Thraisingam, M. Subramaniam. (2016). Extraction and characterization of keratin from chicken feather waste biomass: a study. *Proceedings of The National Conference for Postgraduate Research (NCON-PGR 2016)*. 693-699.

- [90] B. Alashwal, A. Gupta, Mohamed S.B. Husain. (2019). Characterization of dehydrated keratin protein extracted from chicken feather. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 702:1-7.
- [91] Nuruldiyanah B. Kamarudin, S. Sharma, A. Gupta, Gek K. Chua, Syed M.S.B.T Chik, R. Gupta. (2017). Statistical investigation of extraction parameters of keratin from chicken feather using Design-Expert. 3 Biotech. 7(2):7-127.
- [92] S. Sharma, A. Gupta, Syed M. Saufi, Gek K. Chua, P. Poddar. (2017). Dissolution and characterization of biofunctional keratin particles extracted from chicken feathers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 191(1):1-5.
- [93] Gadissa T. Gindaba, Samuel G. Filate, Bulcha B. Etana. (2019). Extraction and Characterization of Natural Protein (Keratin) From Waste Chicken Feather. International Journal of Modern Science and Technology. 4(7):174-179.