

République Algérienne Démocratique Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة ابن خلدون - تيارت  
Université Ibn Khaldoun – Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière  
كلية علوم المادة  
Département de Chimie  
قسم الكيمياء

## Mémoire

*Présenté par :*

L. BOUCEKKINE  
A. SOFRANI

*Pour obtenir le diplôme de*

***Master***

**Filière : Chimie**

**Spécialité: Chimie Organique**

**Sujet :**

**Préparation et caractérisation d'un Film biocomposites a base du poly(3-hydroxybutyrate –co-3-hydroxyvalérate) et de la curcumine (PHBV/curcumine) pour l'emballage alimentaire.**

**Soutenu le : 00/06/2025**

**Devant le jury:**

**M<sup>me</sup>. BENHAOUA Chahrazed**

**M<sup>me</sup>. DAHANE Soraya**

**M<sup>me</sup>. BALEH Hinane**

**M<sup>f</sup>. BASSAID Saleh**

**Présidente**

**Examinatrice**

**Promotrice**

**Co-Promoteur**

**Pr à UNIV -Tiaret**

**MCA à UNIV -Tiaret**

**MCA à UNIV -Tiaret**

**Pr à UNIV -Tiaret**

**Année universitaire : 2024/2025**

# **Remerciement**

*Ce travail a été réalisé grâce à la contribution de plusieurs personnes auxquelles nous exprimons notre profonde gratitude. Nous souhaitons commencer par remercier :*

*Mme **H. BALEH** et Mr **S. BASSAID**, nos encadrants, pour leur encadrement, leurs conseils avisés, leur disponibilité et leur soutien tout au long de la réalisation de ce travail.*

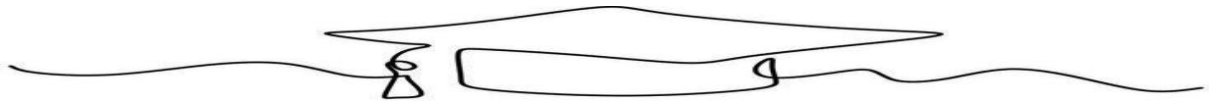
*Les membres de jury : Mme **S. DAHANE** et Mme **C. BENHAOUA** pour avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Le chef de département de chimie Mr **Dj. YESREF**, ainsi que l'ensemble des enseignants du département de chimie qu'ils nous ont formé durant toutes ces années.*

*Les ingénieurs du laboratoire de chimie, ceux du laboratoire de génie physique pour toutes les aides apportées.*

*Les ingénieurs du laboratoire de reproduction des animaux de la ferme, institut des sciences vétérinaire.*

**Merci à tous ...**



## *Dédicace*

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail:*

*A la femme de ma vie **Maman Janette**, la femme qui a été toujours avec moi, qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à donner le meilleur de moi-même. Tu es ma meilleure amie et ma confidente. Tu es toute ma vie. Merci pour ton amour inconditionnel, ta patience et ton soutien. Merci pour tout ce que tu m'as donné.*

*A mon cher grand père, Ta sagesse, ton amour et ton soutien m'inspirent toujours.*

*A mes chers parents, qui m'ont donné l'amour, le soutien et l'encouragement dont j'avais besoin pour réussir. Papa t'es mon héros, mon idole et ma grande source d'inspiration. Merci pour tout.*

*A mon cher oncle **Rachid** que je remercie sincèrement pour son aide précieuse et ses conseils.*

*A mes deux grandes sœurs **Zaho** et **Hanane** ainsi que mes adorables nièces **Anaïs**, **Maciva**, et **Farah**. Je vous aime de tout mon cœur.*

*A mes très chers frères : **Khaled** et **Hichem** ainsi qu'à mes sœurs adorées **Nesrine**, **Nihad**, **Hind**, et **Nora**. Vous êtes ma source de joie et de bonheur, et je suis fier de vous avoir dans ma vie.*

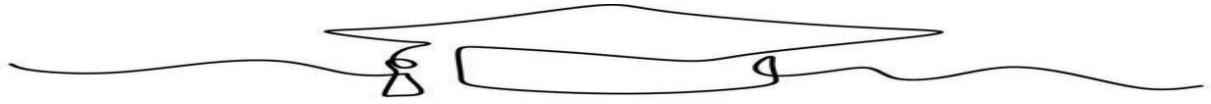
*A mes chers oncles et tantes, cousins et cousines.*

*A mon âme sœur : **Fatiha**, merci d'être toujours là, et que la vie t'offre autant de bonheur.*

*A mes chères amies : **Achouak**, **Sabrina**, **Meroua**, et **Hadjer**. Merci pour votre présence, vos encouragements, et les moments de joie partagés. Votre amitié a été un véritable soutien tout au long de ce parcours. Je vous souhaite le succès dans chacun de vos pas, et que la vie vous offre encore milles belles réussites.*



**Lilia**



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à ma maman que j'aime de tout mon cœur. Merci pour ton amour, ta tendresse et tes prières qui m'ont accompagnée chaque jour.*

*À mon papa, pour ton soutien, tes encouragements et ta confiance en moi.*

*À mon frère et à mes sœurs : **Issa, Houria et Chourouk**, pour votre affection et votre présence dans ma vie.*

*À mes amies chères : **Lylia, Hadjer, Marwa, Sabrina et Amal**. Merci d'avoir été là pour moi et de m'avoir soutenue pendant ce parcours.*



**Achouak**

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Etude bibliographique

<i>TABLEAU I.1 : POLYMERES BIODEGRADABLES D'ORIGINE NATURELLES.....</i>	<i>- 9 -</i>
<i>TABLEAU I.2 : POLYMERES BIODEGRADABLES D'ORIGINE SYNTHETIQUE.....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>TABLEAU I.3 : COPOLYMERES BIODEGRADABLES.....</i>	<i>- 11 -</i>
<i>TABLEAU I.4 : REPERES DE L'HISTOIRE DE L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE.....</i>	<i>- 14 -</i>

### Chapitre II : Partie expérimentale

<i>TABLEAU. II.1: MATERIELS ET PRODUIT UTILISES.....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>TABLEAU II.2 : PROPRIETES DE CHLOROFORME.....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>TABLEAU. II.3 : PROPRIETES PHYSICO CHIMIQUE DU PHBV.....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>TABLEAU. II.4 : PROPRIETES PHYSICO CHIMIQUE DU TIO<sub>2</sub> .....</i>	<i>- 33 -</i>
<i>TABLEAU. II.5 : FORMULATION DES FILMS BIOCOMPOSITES PHBV INCORPORANT LA CURCUMINE ET/OU LE TIO<sub>2</sub>.....</i>	<i>- 34 -</i>

### Chapitre III : Résultats et discussions

<i>TABLEAU III.1 : LES VALEURS ESTIMEES DES ENERGIES DE GAP.....</i>	<i>- 53 -</i>
<i>TABLEAU III.2 : DIAMETRE DES ZONES D'INHIBITION DES ECHANTILLONS SUR LES DEUX SOUCHES BACTERIENNE. ....</i>	<i>- 57 -</i>

# Liste des figures

## Liste des figures

### Chapitre I : Etude bibliographique

<i>FIGURE I.1: CYCLE DE VIE DE POLYMERES BIODEGRADABLES ET BIOSOURCES (EXEMPLE : L'AMIDON)</i> .....	- 6 -
<i>FIGURE I.2: CLASSIFICATION DES POLYMERES BIODEGRADABLES</i> .....	- 8 -
<i>FIGURE I.3 : SECTEUR MONDIAL DE L'EMBALLAGE COMMERCIAL, PAR UTILISATION FINALE</i> .....	- 13 -
<i>FIGURE I.4: CLASSIFICATION DES EMBALLAGES</i> .....	- 15 -
<i>FIGURE I.5 : SCHEMA DE MATERIAU COMPOSITE</i> .....	- 17 -
<i>FIGURE I.6: CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITE</i> .....	- 17 -
<i>FIGURE I.7: STRUCTURE DE PHBV</i> .....	- 19 -
<i>FIGURE I.8: ASPECT GENERAL DE LA CURCUMINE</i> .....	- 22 -
<i>FIGURE I.9 : LA STRUCTURE DE CURCUMINE</i> .....	- 22 -

### Chapitre II : Partie expérimentale

<i>FIGURE .II.1: STRUCTURE CHIMIQUE DE CHLOROFORME</i> .....	- 31 -
<i>FIGURE .II.2: STRUCTURE CHIMIQUE DE PHBV</i> .....	- 31 -
<i>FIGURE .II.3 : LES GRANULES DU PHBV VIERGE</i> .....	- 32 -
<i>FIGURE .II.5 : FILM OBTENU DE PHBV PURE</i> .....	- 33 -
<i>FIGURE .II.6 : FILMS OBTENU DE PHBV/CURCUMINE : A) 1 %, B) 3 %, C) 5 %...</i> - 35 -	- 35 -
<i>FIGURE .II.7 : FILM OBTENU DE PHBV/CURCUMINE ET TIO<sub>2</sub></i> .....	- 35 -
<i>FIGURE II.8 : SCHEMA SIMPLIFIE DES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SPECTROPHOTOMETRE UV-VIS</i> .....	- 37 -
<i>FIGURE II.9 : SPECTROMETRE INFRAROUGE SHIMADZU DE TYPE FTIR - 8400.</i> - 38 -	- 38 -
<i>FIGURE II.10 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN SPECTROMETRE FT-IR</i> .....	- 38 -
<i>FIGURE II.11 : SCHEMA REPRESENTATIF D'UN DIFFRACTOMETRE CLASSIQUE</i> .- 40 -	- 40 -
<i>FIGURE II.12 : LES DIFFERENTES FORMES D'UNE BACTERIE</i> .....	- 41 -
<i>FIGURE II.13 : PAROI BACTERIENNE GRAM POSITIF ET GRAM NEGATIF</i> .....	- 42 -
<i>FIGURE II.14 : LES DISQUES DECOUPES</i> .....	- 44 -
<i>FIGURE II.15 : PREPARATION DES BOITES DE PETRI</i> .....	- 44 -

### Chapitre III : Résultats et discussions

<i>FIGURE III.1 : SPECTRES INFRA ROUGE DU PHBV, DE LA CURCUMINE ET DES COMPOSITES PHBV/ CURCUMINE</i> .....	- 47 -
---	--------

<i>FIGURE III.2 : SPECTRE DRX DE LA CURCUMINE, DU PHBV ET DES COMPOSITES PHBV/CURCUMINE .....</i>	<i>- 49 -</i>
<i>FIGURE III.4 : SPECTRES UV/VISIBLE DU PHBV ET DES COMPOSITES PHBV/CURCUMINE .....</i>	<i>- 51 -</i>
<i>FIGURE III.5 : ENERGIE DE GAP OPTIQUE DE LA CURCUMINE ET DES COMPOSITES PHBV/CURCUMINE .....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>FIGURE III.6 : DIAMETRE D'INHIBITION DU FILM PHBV PUR. ....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>FIGURE III.7: DIAMETRE D'INHIBITION DU FILM PHBV/CURCUMINE1%.....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>FIGURE III.8 : DIAMETRE D'INHIBITION DU FILM PHBV/CURCUMINE3%.....</i>	<i>- 54 -</i>
<i>FIGURE III.9: DIAMETRE D'INHIBITION DU FILM PHBV/CURCUMINE 5%.....</i>	<i>- 55 -</i>
<i>FIGURE III.10: DIAMETRE D'INHIBITION DU FILM PHBV/CURCUMINE/TIO<sub>2</sub>.....</i>	<i>- 55 -</i>
<i>FIGURE III.11 : DIAMETRE D'INHIBITION DU CURCUMINE PURE.....</i>	<i>- 56 -</i>
<i>FIGURE III.12 : DIAMETRE D'INHIBITION DES ANTIBIOTIQUES (AMC ET CIP)....</i>	<i>- 56 -</i>

# Liste des abréviations

**Liste des abréviations**

**PHBV** : poly (3-hydroxybutyrate-co-3- hydroxyvalérate)

**PLA** : acide polylactique

**PHA** : polyhydroxyalcanoates

**PCL** : polycaprolactone

**PBS** : polybutylène succinate

**PGA** : polyglycolide

**PVA** : polyvinyle alcool

**PLGA** : acide polylactique-co-glycolique

**PBSA** : polybutylène succinate adipate

**PBAT** : polybutylène adipate téréphtalate

**PHB** : polyhydroxybutyrate

**PE** : polyéthylène

**PP** : polypropylène

**PET** : polyéthylène téréphtalate

**CMNC** : Nanocomposites à base de céramique.

**MMNC** : Nanocomposites à matrice métallique

**PMNC** : Nanocomposites à base de polymère

**3HV** : 3-hydroxyvalerate

**CNCs** : nanocristaux de cellulose

**FA** : acide férulique

**Kenaf** : Hibiscus cannabinus, plante fibreuse naturelle utilisée comme renfort dans les matériaux composites biodégradables

**AgNPs** : nanoparticules de l'argent

**PHBV-g-MWCNTs** : nanotubes de carbone à paroi multiples greffés avec du PHBV

**UFC**: Unités formant des colonies

**Fe-NTA** : Fer-Nitrilotriacétate

**MBGN** : nanoparticules de verre bioactif mésoporeux

**SPION** : nanoparticules super paramagnétiques d'oxyde de fer

**ACM** : l'amoxicilline-acide clavulanique

**CIP** : la ciprofloxacine

# Sommaire

## Sommair

<b>INTRODUCTION</b> .....	- 1 -
<b>CHAPITRE I :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	- 4 -
<b>I.1. INTRODUCTION</b> .....	- 5 -
<b>I.2.LES POLYMERES BIODEGRADABLES</b> .....	- 5 -
<i>I.2.1. Définition d'un polymère biodégradable</i> .....	- 5 -
<i>I.2.2. Facteurs influençant la biodégradation</i> .....	- 6 -
<i>I.2.3. Classification des polymères biodégradables</i> .....	- 7 -
<i>I.2.4. Propriétés des polymères biodégradables et leurs applications</i> .....	- 8 -
<i>I.2.5. Applications des polymères biodégradables</i> .....	- 11 -
<b>I.3. LES EMBALLAGES ALIMENTAIRES</b> .....	- 12 -
<i>I.3. 1.Introduction</i> .....	- 12 -
<i>I.3.2 Définition de l'emballage alimentaire</i> .....	- 12 -
<i>I.3.3. L'histoire de l'emballage alimentaire</i> .....	- 13 -
<i>I.3.4. Matériaux d'emballage</i> .....	- 14 -
<i>I.3.5. Les objectifs de l'emballage</i> .....	- 15 -
<i>I.3. 6.L'emballage alimentaire intelligent et actif</i> .....	- 15 -
<b>I.4. LES COMPOSITES</b> .....	- 16 -
<i>I.4.1. Généralité sur les composites</i> .....	- 16 -
<i>I.4.2. Les nanocomposites</i> .....	- 17 -
<i>I.4. 3.Les biocomposites</i> .....	- 18 -
<b>I.5. LE POLY (3-HYDROXYBUTYRATE-CO-3-HYDROXYVALÉRATE) (PHBV)</b> .....	- 18 -
<i>I.5.2. Propriétés de PHBV</i> .....	- 19 -
<i>I.5.3. Les applications de PHBV</i> .....	- 19 -
<i>I.5.4.Composites à base de PHBV</i> .....	- 20 -
<b>I.6.LA CURCUMINE</b> .....	- 21 -
<i>I.6.1. Définition</i> .....	- 21 -
<i>I.6.2. Les propriétés de la curcumine</i> .....	- 22 -
<b>I.7. COMPOSITES PHBV /CURCUMINE</b> .....	- 23 -
<i>I.7.1 Traitement des plaies et pansements médicaux</i> .....	- 23 -
<i>I.7.2. Ingénierie tissulaire</i> .....	- 23 -
<i>I.7.3. Systèmes d'administration de médicaments</i> .....	- 24 -
<i>I.7.4. Amélioration des propriétés mécaniques et biologiques</i> .....	- 24 -
<i>I.7.5. Réduction de la toxicité des nanoparticules</i> .....	- 24 -
<b>CHAPITRE II : PARTIE EXPERIMENTALE</b> .....	- 29 -
<b>II.1. L'OBJECTIF</b> .....	- 30 -
<b>II.2. MATERIELS ET METHODES</b> .....	- 30 -
<i>II.2.1. produits et les matériels utilisés</i> .....	- 30 -
<i>II.2.2. Le chloroforme</i> .....	- 30 -

II.2.3. <i>Le poly (3-hydrox butyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV)</i> .....	- 31 -
II.2.4. <i>Curcumine commerciale</i> : .....	- 32 -
II.2.5. <i>Dioxyde de titane</i> :.....	- 32 -
II.3. <b>PROTOCOLE EXPERIMENTAL</b> .....	- 33 -
II.3.1. <i>Préparation des films de PHBV</i> .....	- 33 -
II.3.2. <i>Préparation des composites</i> .....	- 33 -
II.4. <b>LES TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS UTILISEES</b> .....	- 35 -
II.4.1. <i>La Spectroscopie UV-Visible</i> .....	- 35 -
II.4.2. <i>La Spectroscopie Infrarouge IR</i> .....	- 37 -
II.4.3. <i>La diffraction des rayons X (DRX)</i> .....	- 39 -
II.4.4. <i>Microscopie électronique à balayage (MEB)</i> .....	- 40 -
II.5. <i>L'activité antibactérienne</i> .....	- 41 -
II.5.2. <i>Souches bactériennes étudiées</i> .....	- 42 -
II.5.3. <i>Les méthodes utilisées pour évaluer l'activité antibactérienne</i> :.....	- 42 -
II.5.4. <i>Protocole expérimental</i> .....	- 43 -
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION</b> .....	- 46 -
<b>III.1. CARACTERISATION DE LA CURCUMINE, DU PHBV ET DES COMPOSITES     PHBV/CURCUMINE PAR SPECTROSCOPIE FTIR</b> .....	- 47 -
<b>III.2. CARACTERISATION DE LA CURCUMINE, DU PHBV ET DES COMPOSITES     PHBV/CURCUMINE PAR DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)</b> .....	- 48 -
<b>III.4. ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE UV-VISIBLE DE LA CURCUMINE, DU PHBV ET DES     COMPOSITES PHBV/CURCUMINE</b> .....	- 51 -
III.4.1. <i>La déduction du gap optique</i> .....	- 52 -
<b>III.5. RESULTATS DE L'ACTIVITE ANTIBACTERIENNE</b> : .....	- 53 -
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	61

# *Introduction Générale*

# Introduction générale

---

## Introduction

L'humanité a depuis longtemps utilisé une diversité de matériaux tels que les récipients en cuir, en feuille, des objets en bois et surtout de la poterie pour conserver et préserver les aliments.

Des progrès scientifiques ont permis des avancées technologiques pour suivre et répondre au besoin en la matière particulièrement au niveau de l'emballage alimentaire qui a évolué progressivement afin de s'adapter à ces innovations et de satisfaire les besoins des consommateurs.

Cette évolution a abouti ces dernières années à l'utilisation des matériaux polymères biodégradables pour répondre aux mêmes besoins et afin de sauvegarder la biodiversité en même temps. C'est ainsi que les technologies de l'emballage alimentaire connaissent une mobilisation importante pour faire évoluer les matériaux et les technologies vers des solutions plus respectueuses à la fois de l'environnement et du consommateur. Les emballages actifs et biodégradables est une solution très prometteuse.

Les matériaux polymères biodégradables, et plus précisément ceux dérivés de ressources renouvelables, suscitent actuellement un intérêt indéniable dans le contexte du développement durable. Leur développement est marqué par une croissance significative, estimée entre 10 et 20 % par an, et cette tendance devrait se maintenir dans les années à venir [1].

Le PHBV est un matériau thermoplastique qui présente une excellente résistance à la chaleur et se distingue par sa biodégradabilité, ce qui en fait un choix idéal pour de nombreuses applications [2]. Il présente une haute tolérance immunitaire, une inactivité chimique accrue et a déjà été développé à une échelle industrielle. Certaines limitations de ce matériau incluent une hydrophobicité marquée, une grande fragilité, une faible résistance aux chocs et une instabilité thermique. Cependant, ces problématiques peuvent être adressées en renforçant le PHBV avec d'autres matériaux, tels que divers polymères, des fibres naturelles nanométriques, et autres [3].

La curcumine, le pigment jaune dérivé du *Curcuma longa*, est l'élément principal du curcuma. Il est souvent employé dans divers domaines grâce à ses propriétés anti-inflammatoire et anti-oxydante [4].

# Introduction générale

---

Plusieurs études sur les composites à base de PHBV et de curcumine ont démontré que l'incorporation du pigment jaune dans la matrice polymérique améliore les propriétés mécaniques et biologiques des composites [5] [6].

C'est dans ce contexte que notre étude est effectuée. En premier lieu des films nanocomposites PHBV/curcumine ont été préparés en solution, puis la caractérisation de ces films est faite par IRTF, DRX, MEB et spectroscopie UV/visible et enfin la recherche d'une éventuelle activité antibactérienne des films et de la curcumine envers deux types de bactéries a été recherchée.

Ce manuscrit est structuré en 3 chapitres :

Le premier chapitre consiste une étude bibliographique qui comporte trois parties : la première est consacrée à la définition, la classification, et les différentes applications des polymères biodégradables, la deuxième partie explique l'importance de l'emballage alimentaire, tandis que la dernière partie s'intéresse aux composites et nanocomposites.

Le second chapitre porte sur la synthèse et les différentes méthodes de caractérisation.

Dans le chapitre trois, les résultats obtenus seront discutés.

Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale.

# Introduction générale

---

## Références

1. Avérous, L. (2013). Les polymères biodégradables et biosourcés : des matériaux pour un futur durable. *L'Actualité Chimique*, 2013, 83–90.
2. Ben Meziane, H., & Djemaoune, L. (2014). Étude des composites à base de poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV) / Alfa et cellulose [Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia]
3. Rodríguez-Cendal, A. I., Gómez-Seoane, I., de Toro-Santos, F. J., Fuentes-Boquete, I. M., Señarís-Rodríguez, J., & Díaz-Prado, S. M. (2023). Biomedical applications of the biopolymer poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV): drug encapsulation and scaffold fabrication. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11674.
4. Menon, Venugopal P., and Adluri Ram Sudheer, (2007). "Antioxidant and anti-inflammatory properties of curcumin." *The molecular targets and therapeutic uses of curcumin in health and disease* : 105-125
5. Wu, J., Hong, Y., Zheng, Y., Wang, Y., & Qin, Y. (2018). Electrospun poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) nanofibrous mats incorporated with curcumin for /Alfa et Cellulose wound dressing. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 29(5), 663–678
6. Gupta, P., Vermani, K., & Garg, S. (2017). Curcumin-loaded electrospun PHBV nanofibers as potential wound-dressing material. *Materials Science and Engineering: C*, 76, 1278–1286

## ***Chapitre I :Etude Bibliographique***

**I.1. Introduction**

Avec l'augmentation constante de la pollution environnementale, les déchets plastiques sont devenus une menace majeure pour les écosystèmes. Leur accumulation pose un problème sérieux en raison de leur faible dégradabilité. Pour y remédier, une solution prometteuse consiste à remplacer les polymères synthétiques par des alternatives biodégradables.

**I.2. Les polymères biodégradables****I.2.1. Définition d'un polymère biodégradable**

Les polymères biodégradables sont des matériaux qui peuvent être convertis en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O ou CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O sous des conditions aérobies ou anaérobies respectivement en présence de microorganismes [1].

Des normes européennes permettent de définir si un matériau peut être qualifié de biodégradable. Pour qu'un matériau plastique soit considéré comme biodégradable, il doit satisfaire quatre critères [2] :

- Contenir au moins 50% de matière organique et avoir des teneurs en métaux lourds restreintes.
- Se fragmenter, de sorte que la masse des fragments de taille supérieure à 2 mm ne dépasse pas 10 % après une période de 12 semaines.
- Atteindre un taux de biodégradabilité d'au moins 90% dans un délai de 6 mois. Ce seuil est fixé sur la base d'essais standardisés selon des normes établies.
- Ne pas être toxique après dégradation. Les morceaux et molécules éliminés lors du processus de décomposition ne devraient pas influencer la qualité du compost

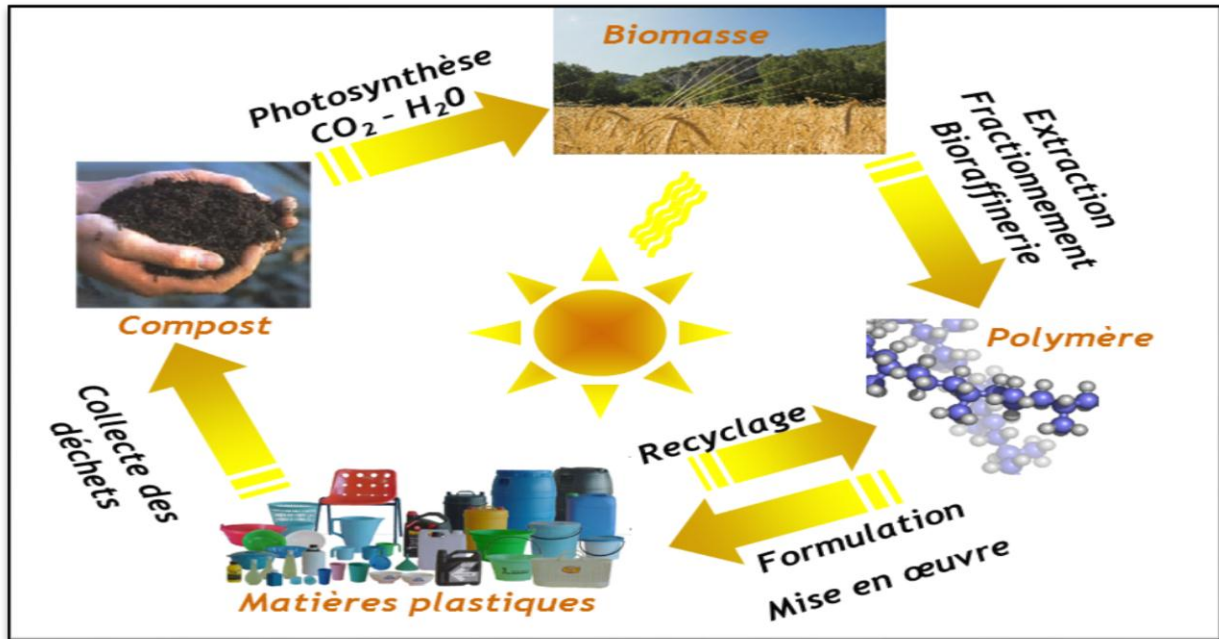


Figure I.1: Cycle de vie de polymères biodégradables et biosourcés (exemple : l'amidon) [3]

### I.2.2. Facteurs influençant la biodégradation

La biodégradation est affectée par divers facteurs pouvant être classés en quatre catégories distinctes [4]:

#### a) Les paramètres physico-chimiques du milieu de dégradation

Ces paramètres sont essentiels et facilitent l'activité des micro-organismes. Trois éléments doivent être pris en compte :

- La température, qui favorise l'activité microbienne.
- La teneur en eau du milieu, qui doit être suffisante pour permettre l'expression des fonctions des micro-organismes.
- Le pH.

#### b) Les paramètres microbiologiques du milieu de dégradation

La présence de micro-organismes et d'enzymes spécifiques dans le milieu de dégradation augmentera le processus de dégradation. Selon le cas, ces micro-organismes entraîneront une dégradation aérobie ou anaérobie, incluant des bactéries et des cyanophycées.

**c) La structure et les propriétés des polymères constituant le matériau**

Le degré de polymérisation exerce une influence significative sur la biodégradation. Un polymère présentant une faible cristallinité et une masse molaire relativement basse se dégrade plus aisément. En revanche, l'hydrolyse d'un polymère dont la structure est bien organisée (cristalline) s'avère plus complexe.

**d) Le procédé de fabrication du matériau**

Le procédé de fabrication et les conditions de mise en forme du matériau, telles que la température, la pression et l'utilisation de plastifiants ou d'additifs, influencent significativement les caractéristiques des matériaux. Ces derniers peuvent présenter des variations notables tant au niveau de leur cristallinité que de leur composition, et également en ce qui concerne leur comportement face à l'eau, entraînant ainsi des biodégradations distinctes. Un matériau de grande pureté se distinguera par des propriétés mécaniques notables. Par ailleurs, l'épaisseur du matériau constitue un paramètre déterminant dans le processus de dégradation d'un polymère. En règle générale, la cinétique de dégradation d'un matériau épais est relativement lente, lorsque l'on considère la dégradation comme une érosion surfacique.

**I.2.3. Classification des polymères biodégradables**

Les polymères biodégradables se classent selon leur origine comme cité dans le tableau suivant

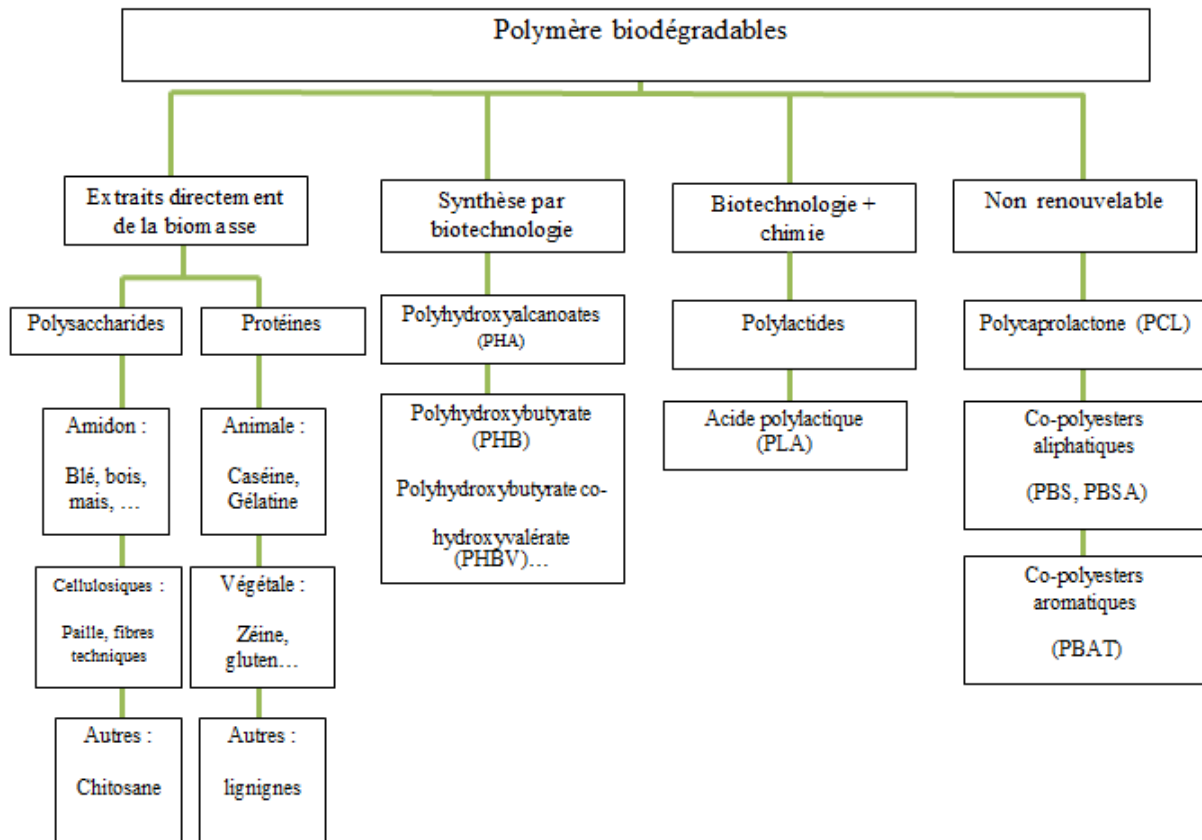


Figure I.2: Classification des polymères biodégradables [3]

**I.2.4. Propriétés des polymères biodégradables et leurs applications**

Selon leur origines, qu'elle soit synthétique ou biodégradables, sont utilisés dans plusieurs domaine d'après leur propriétés physico-chimiques.

**a) Polymères Biodégradables d'Origine naturelles**

Polymère	Origine	Propriétés	Application
<b>Acide Polylactique (PLA)</b>	Produit par la fermentation de sucres tels que le maïs et la canne à sucre [5].	Présente une rigidité élevée, une bonne résistance à la traction, ainsi qu'une biodégradabilité en conditions industrielles,	Utilisé dans l'emballage alimentaire, les textiles et les implants médicaux [5].

		notamment par compostage [5].	
<b>Polyhydroxyalcanoates (PHA)</b>	Synthétisés par des micro-organismes à partir de sucres ou d'huiles végétales [6].	Capacité de biodégradabilité dans divers environnements tels que le sol et l'eau de mer, ainsi qu'une excellente résistance à l'humidité [6].	Utilisés dans le domaine de l'emballage, en agriculture (films de mulching) et dans le secteur biomédical [6].
<b>Amidon</b>	Extraits de plantes (maïs, pomme de terre, blé) [7].	Biodégradabilité rapide, coût faible, cependant résistance mécanique limitée sans modification [7].	Emballage, sacs biodégradables, secteur agricole [7].
<b>Cellulose</b>	Composant principal des parois cellulaires des plantes [8].	Biodégradable, renouvelable, mais requiert une modification chimique pour être converti en polymère [8].	Films d'emballage, textiles, produits pharmaceutiques [8].
<b>Chitine et Chitosane</b>	Extrait de la carapace des crustacés tels que les crevettes et les crabes [9].	Biodégradable, biocompatible et présentant des propriétés antimicrobiennes [9].	Dans le domaine biomédical (sutures, pansements) et pour la filtration de l'eau [9].

Tableau I.1 : Polymères Biodégradables d'Origine naturelles

## b) Polymères Biodégradables d'Origine Synthétique

Polymère	Origine	Propriétés	Application
<b>Polycaprolactone (PCL) :</b>	Polymère synthétique d'origine pétrolière, mais biodégradable [10].	Biodégradabilité lente (s'étendant sur plusieurs années), grande flexibilité, excellente résistance à l'impact [10].	Emballage, implants médicaux, secteur agricole [10].
<b>Polybutylène Succinate (PBS) :</b>	Synthétisé à partir d'acide succinique et de butanediol [11].	Biodégradabilité en compost, ainsi qu'une bonne résistance mécanique et thermique [11].	Emballage, agriculture et textiles [11].
<b>Polyglycolide (PGA) :</b>	Polymère synthétique issu de l'acide glycolique [12].	Biodégradabilité rapide et résistance mécanique élevée [12].	Sutures chirurgicales et implants biodégradables [12].
<b>Polyvinyl Alcool (PVA) :</b>	Polymère synthétique hydrosoluble [13].	Biodégradable dans l'eau, présentant une bonne résistance mécanique et une barrière efficace aux gaz [13].	Emballage, films solubles, adhésifs [13].

Tableau I.2 : Polymères Biodégradables d'Origine Synthétique

## c) Copolymères Biodégradables

Copolymère	Origine	Propriétés	Application
<b>Polyhydroxybutyrate-co-valérate (PHBV) :</b>	Il s'agit d'un copolymère appartenant à la famille des PHA, élaboré par des micro-organismes [14].	Il présente une biodégradabilité tant dans le sol que dans l'eau de mer, ainsi qu'une flexibilité supérieure à celle du PHB pur [14].	L'emballage, l'agriculture et le secteur biomédical [14].
<b>Acide Polylactique-co-glycolique (PLGA) :</b>	Copolymère de l'acide lactique et de l'acide glycolique [15].	Biodégradabilité contrôlée et biocompatibilité [15].	Implants médicaux et systèmes de libération contrôlée de médicaments [15].

Tableau I.3 : Copolymères Biodégradables

## I.2.5. Applications des polymères biodégradables

Les polymères biodégradables connaissent une utilisation dans plusieurs secteurs notamment la médecine, la pharmacie, les emballages alimentaires, et l'agriculture.

En médecine et en pharmacie, les polymères biodégradables sont largement utilisés pour la fabrication d'implants chirurgicaux, de membranes, d'hydrogels, ainsi que pour la microencapsulation de principes actifs, grâce à l'utilisation de polymères naturels tels que la gélatine ou de polymères synthétiques adaptés. Dans le secteur de l'emballage, notamment alimentaire, ces matériaux constituent une alternative écologique aux plastiques traditionnels, tout en assurant des fonctions essentielles telles que la protection, la conservation et la sécurité des produits. En agriculture, les polymères biodégradables sont employés pour la fabrication de films de paillage, de systèmes de libération contrôlée d'engrais ou de pesticides, ainsi que de contenants pour semis, contribuant ainsi à la réduction des déchets plastiques dans les sols. Ces diverses applications illustrent le potentiel des polymères

biodégradables en tant que solutions durables répondant aux exigences techniques et environnementales contemporaines [16].

Les polymères biodégradables trouvent également des applications dans divers secteurs industriels. Dans le domaine de l'automobile, ils contribuent à la réduction du poids des véhicules par l'utilisation de bioplastiques et de biocomposites. En électronique, des matériaux tels que le PLA et le kenaf sont incorporés dans des composants composites. Dans le secteur de la construction, les fibres de PLA sont notamment utilisées pour le rembourrage ainsi que pour la fabrication de dalles de tapis [16].

### **I.3. Les emballages alimentaires**

#### **I.3. 1.Introduction**

Dans le secteur de la production alimentaire, divers facteurs peuvent compromettre la qualité et la sécurité des denrées, parmi lesquels figurent les micro-organismes, les insectes et les rongeurs. Ces agents peuvent engendrer des pertes significatives à différentes étapes de la chaîne alimentaire. L'emballage revêt alors une importance cruciale en protégeant les aliments contre les contaminations, en prolongeant leur durée de conservation et en facilitant leur transport et leur stockage. Il contribue ainsi à la sécurité alimentaire, à la réduction des déchets et à la lutte contre le gaspillage [17].

#### **I.3.2 Définition de l'emballage alimentaire**

Selon Pothet(1998), « Emballage, étymologiquement, vient du préfixe <<en>> et de <<balle>> lequel dérive lui-même de l'ancien allemand <<balla>> dont le sens était de serrer avec une idée de pelotonner ; emballer c'est donc mettre en balle et, par extension, un emballage est donc un assemblage de matériaux destinés à protéger un produit qui doit être transporté. »

L'emballage joue un rôle crucial dans l'atteinte des objectifs de sécurité alimentaire et de prévention des déchets [17]. Il est défini comme un système coordonné visant à préparer les aliments pour leur transport, leur distribution, leur stockage, leur vente au détail et leur utilisation finale, dans le but de satisfaire le consommateur tout en optimisant les coûts [18].

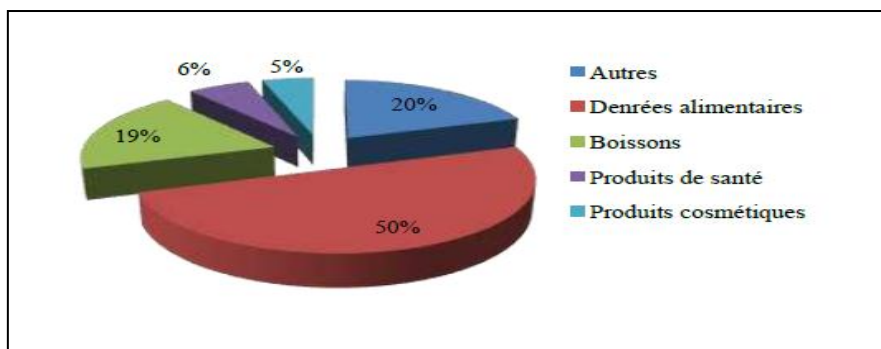


Figure I.3 : Secteur mondial de l’emballage commercial, par utilisation finale [19]

### I.3.3. L’histoire de l’emballage alimentaire

Le tableau suivant donne un aperçu sur l’évolution de l’emballage alimentaire depuis 1809.

Dates	Repères
1809	Nicolas Appert découvre le procédé de conservation par la chaleur des denrées alimentaires contenues dans des bocaux en verre.
1810	Le procédé est appliqué à des boîtes en fer blanc (boîtes de conserve)
1858	L’Américain Mason crée le couvercle métallique à vis pour les pots en verre
1871	Jones (États-Unis) invente le carton ondulé
1883	Stilwell (États-Unis) commercialise les premiers sacs en papier.
1885	Painter (États-Unis) dépose le brevet de la première capsule de bouteille jetable.
1934	L’American Can Company commercialise les premières « boîtes boissons ancêtres des canettes pour la brasserie américaine Kru Eger.
1951	Invention en Suède de l’ancêtre du Tetrapak: emballage tétraédrique jetable en papier plastifié.
1969	Après Lesieur en 1960, Vittel commercialise ses premières maxibouteilles rondes en PVC (polychlorure de vinyle).
1976	Pepsi-Cola vend ses premières bouteilles en PET (polyéthylène).

2000	Apparition du Doy pack: sachet en plastique souple tenant debout.
2005	Fabricant Tetrapak lance le Tetrapak Wedge Aseptic Clear: emballage transparent.

**Tableau I.4: Repères de l'histoire de l'emballage alimentaire [19]**

### I.3.4. Matériaux d'emballage

L'industrie de l'emballage se divise en divers secteurs selon les matériaux employés [20] :

- Le papier et le carton.
- Le verre.
- Le métal.
- Les emballages multicouches et composites.
- Le bois.
- Le plastique (PE, PP, PET et selon la composition des polymères).

La demande de plastique au sein de l'UE-25 a atteint 47 millions de tonnes en 2004 [21].

Le papier et le carton constituent les matériaux d'emballage les plus utilisés à l'échelle mondiale. Aux États-Unis, plus de 50 % de tous les emballages sont basés sur le papier, y compris ceux destinés aux aliments [18].

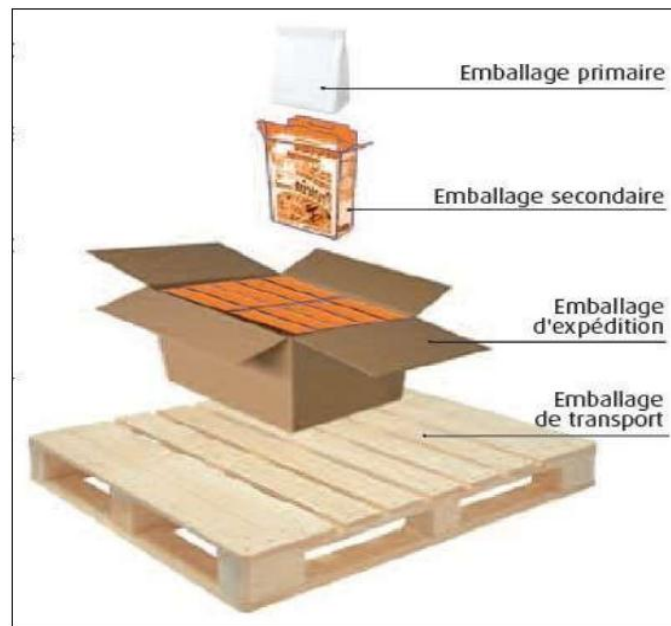
Ces matériaux sont utilisés dans trois grandes catégories d'emballage [22]:

-L'emballage primaire, qui est en contact direct avec les produits et qui est rapporté à domicile par les consommateurs.

-L'emballage secondaire, qui enveloppe les emballages de plus grande taille tels que les boîtes, est utilisé pour le transport de quantités de produits primaires conditionnés.

-L'emballage d'expédition : Plusieurs types d'emballages secondaires sont disponibles pour assurer la manutention et la protection des contenants pendant le transport.

-L'emballage tertiaire ou de transport, qui désigne l'emballage destiné au transport de grandes quantités de marchandises, inclut des éléments tels que des palettes en bois et des emballages en plastique.



**Figure I.4: Classification des emballages [19]**

### **I.3.5. Les objectifs de l'emballage**

L'emballage ne se limite pas à contenir un produit, mais répond également à divers besoins fonctionnels et stratégiques [23]:

- Protection et effet barrière.
- Confinement ou agglomération.
- Transmission de l'information.
- Marketing.
- Minimiser les risques liés à la sécurité lors de l'expédition.
- Commodité.
- Contrôle des portions.

### **I.3. 6.L'emballage alimentaire intelligent et actif**

#### **a. L'emballage alimentaire actif**

L'emballage actif prolonge la durée de conservation des aliments tout en préservant leur qualité nutritionnelle. Il inhibe la croissance des micro-organismes pathogènes et nuisibles,

prévient et/ou indique la migration des contaminants, et signale toute fuite d'emballage, garantissant ainsi la sécurité alimentaire [24].

Selon (Kerry et al. (2006), L'emballage actif intègre des méthodes efficaces pour réguler l'oxydation, la prolifération microbienne et l'humidité, tandis que l'emballage intelligent favorise la surveillance de la qualité des aliments.

#### **b. L'emballage alimentaire intelligent**

L'emballage alimentaire intelligent désigne tout dispositif offrant "une valeur ajoutée" en sus de la conservation et de la protection des aliments. Ces "valeurs ajoutées" peuvent inclure, par exemple, une prolongation de la durée de conservation, des indicateurs de pH, des mesures de température, ainsi que la surveillance de l'humidité et de la fraîcheur, ou encore un système de suivi [25].

Selon (Yam et al. (2005)), Un emballage est considéré comme intelligent s'il est en mesure de suivre le produit, de détecter et d'évaluer l'atmosphère interne et externe de l'emballage, tout en communiquant avec le consommateur.

Les emballages intelligents peuvent être classés en deux catégories [23] :

- l'emballage intelligent simple
- l'emballage intelligent interactif ou réactif.

### **I.4. les composites**

#### **I.4.1. Généralité sur les composites**

On peut caractériser un matériau composite comme la combinaison de plusieurs matériaux aux caractéristiques diverses. Les composites comprennent généralement une matrice dans laquelle nous répartissons de manière contrôlée ou aléatoire des renforts (fibres, nanoparticules, nanotubes ...etc.). La matrice conserve les renforts et garantit le transfert de charges, alors que ces derniers contribuent essentiellement par leurs propriétés mécaniques supérieures (modules, limites d'élasticité, résistance mécanique...)

L'objectif de cette association est d'obtenir un matériau dont les caractéristiques spécifiques surpassent celles des composants pris individuellement. L'idée de matériau composite, en sélectionnant les composants et leurs proportions respectives, ainsi que la forme, les dimensions et l'arrangement des renforts, rend possible la création d'un matériau ayant les caractéristiques spécifiques désirées [26].

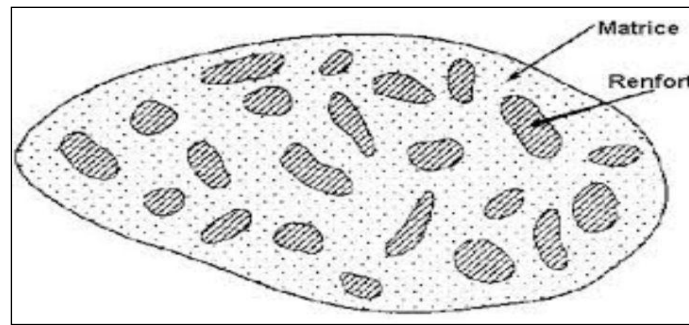


Figure I.5 : schéma de matériau composite.

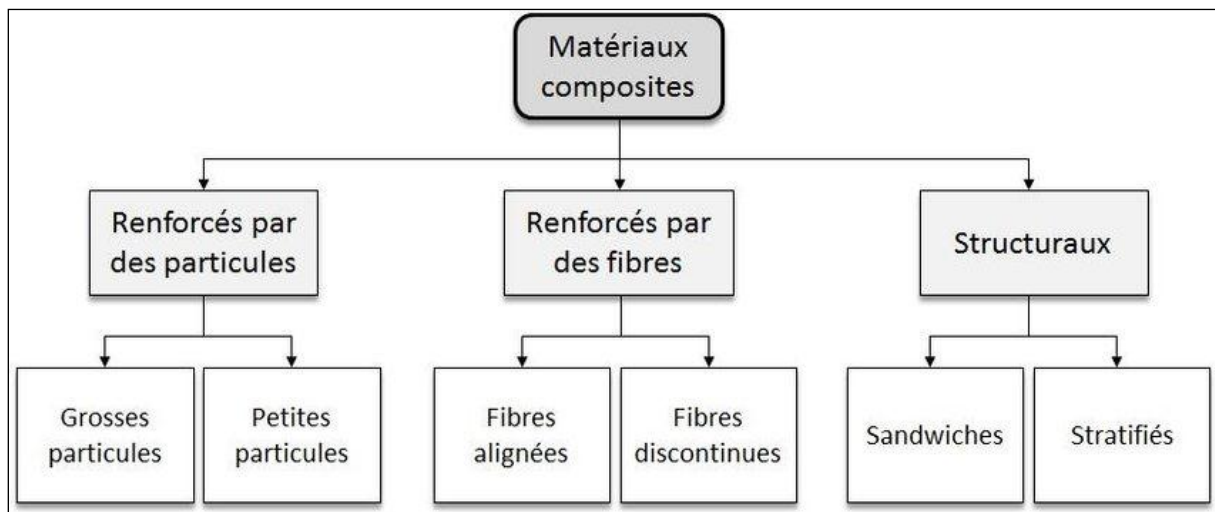


Figure I.6: classification des matériaux composite [26].

## I.4.2. Les nanocomposites

### I.4.2.1. Définition

Un nanocomposite est un matériau composite où l'élément de renforcement a au moins une des trois dimensions qui est de l'ordre du nanomètre. Ils peuvent être classés de façon similaire aux composites, en fonction de la morphologie du renfort qui y est dispersé et plus précisément du nombre de leurs dimensions à l'échelle nanométrique [27].

### I.4.2.2. Catégorisation des nanocomposites :

On peut regrouper les nanocomposites en trois catégories distinctes, basées sur la matrice hôte [27] :

- CMNC : Nanocomposites à base de céramique.
- MMNC : des nanocomposites à matrice métallique

- PMNC : des nanocomposites à base de polymère

### **I.4. 3.Les biocomposites**

#### **I.4.3.1.Définition**

Les biocomposites, qui sont des composites biodégradables, constituent une catégorie spécifique de matériaux composites. On qualifiera un matériau de « biocomposite » s'il contient au moins un composant biodégradable dans sa matrice et son renfort. Ainsi, on distinguera un matériau biocomposite intégralement biodégradable, formé d'un renfort et d'une matrice biodégradables, d'un composite partiellement biodégradable, qui a soit une matrice soit un renfort biodégradable [28].

#### **I.4.3.2. Les applications de biocomposites :**

Les biocomposites, en général, présentent d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques, largement influencées par les matériaux qui les composent. Les bioplastiques, quant à eux, trouvent leur utilité dans diverses sphères, parmi lesquelles [28] :

- Emballages : Ils servent à fabriquer des emballages alimentaires, des sacs-poubelles, des sacs de caisse, des sacs pour fruits et légumes, ainsi que des couverts, gobelets et boîtes.
- Hygiène et cosmétique : Les bioplastiques s'intègrent dans divers produits comme les cotons tiges, les couches et autres produits d'hygiène.
- Agriculture : Ils sont employés dans la conception de films de paillage biodégradables, de pots de culture, d'agrafes pour plantes et de sacs à compost.
- Automobile : Ils peuvent être intégrés aux pneus des véhicules ou utilisés pour la fabrication de pièces automobiles.
- Applications diverses : On les retrouve également dans des produits variés, tels que des liens pour parachutes, des manches de couteaux suisses ou des coques de téléphone.

### **I.5. Le poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV)**

#### **I.5.1. Définition**

Le poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate)) est un copolymère appartenant à la famille des polyhydroxyalcanoates (PHA). Il est obtenu par l'incorporation d'unités de 3-

hydroxyvalérate (3HV) dans la structure du PHB. Grâce à cette composition, le PHBV présente des propriétés thermiques et mécaniques améliorées, telles qu'une meilleure flexibilité, une résistance accrue et une structure moléculaire plus souple. Ces caractéristiques font du PHBV un biopolymère très prometteur pour remplacer les plastiques d'origine pétrochimique, notamment dans les domaines de l'ingénierie des tissus, des biomatériaux et des applications médicales [2].

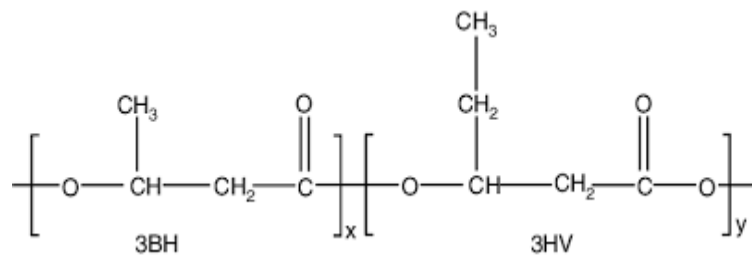


Figure I.7: Structure de PHBV.

### I.5.2. Propriétés de PHBV

Le PHBV est un matériau thermoplastique qui présente une excellente résistance à la chaleur et se distingue par sa biodégradabilité, ce qui en fait un choix idéal pour de nombreuses applications. Il est rapidement et entièrement métabolisé, mais ses atouts ne s'arrêtent pas là. En effet, ce polyester possède des propriétés uniques qui méritent d'être valorisées au-delà de sa seule capacité à se dégrader. Les objets fabriqués à partir de PHBV, tels que les couverts ou les ustensiles ménagers, se caractérisent par une teinte agréable et une finition brillante. Grâce à un ensemble de propriétés remarquables comme sa biodégradabilité, sa biocompatibilité, son absence de toxicité, sa piézoélectricité et sa capacité à résister à des températures supérieures à 100 °C, le PHBV suscite un réel intérêt dans le monde industriel. Toutefois, son coût de production élevé représente encore un frein à son adoption à grande échelle [2].

### I.5.3. Les applications de PHBV

Le PHBV trouve de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine des emballages alimentaires, comme la fabrication de sacs de stockage, de sacs de courses, ou

encore de films d'emballage. On le retrouve aussi dans les encres flexographiques, les pièces automobiles, les revêtements pour cartons, les bouteilles d'eau et les films agricoles.

Ce polymère attire particulièrement l'attention dans le secteur biomédical grâce à sa biocompatibilité, qui lui permet d'être utilisé à l'intérieur du corps humain sans provoquer de réactions de rejet. Sa structure chimique offre également la possibilité de le fonctionnaliser, permettant ainsi l'incorporation de principes actifs pour développer des systèmes de libération contrôlée de médicaments. Parmi ses usages médicaux, on peut citer les implants osseux brevetés, les attaches de suture, les mailles chirurgicales, ainsi que les dispositifs de réparation pour le ménisque, les tendons, les valves ou encore diverses pièces cardiovasculaires. Cependant, le PHBV reste moins compétitif face aux thermoplastiques classiques, en raison de sa forte cristallinité qui le rend rigide et cassant. De plus, lors de sa mise en forme, il est sensible à la dégradation thermique, ce qui entraîne une baisse de sa masse molaire [29].

#### **I.5.4.Composites à base de PHBV**

Les recherches récentes ont montré un progrès significatif dans le développement de films d'emballage alimentaire à base de poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV) renforcés par des charges fonctionnelles. L'association du PHBV avec des nanocristaux de cellulose (CNCs) représente notamment une approche innovante pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques de ce polymère biodégradable. Grâce à leur surface spécifique élevée et leur excellente rigidité, les CNCs permettent d'augmenter la résistance à la traction et à la flexion tout en réduisant la fragilité du matériau. Ils contribuent également à élever la température de ramollissement et de dégradation, élargissant ainsi les domaines d'application du PHBV, en particulier dans l'emballage alimentaire, les dispositifs médicaux et les biomatériaux [30].

En parallèle, l'incorporation de l'acide férulique (FA), un composé phénolique aux propriétés antioxydantes, a permis d'améliorer considérablement la barrière à l'oxygène, atteignant une réduction de perméabilité de 66 %, tout en respectant les exigences de sécurité liées à la migration dans les aliments [31]. L'ajout de nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) a renforcé les propriétés thermiques et optiques du PHBV, tout en conférant une activité antimicrobienne grâce à la formation de liaisons hydrogène entre les particules et la matrice polymérique [32]. De même, les nanoparticules d'argent (AgNPs) ont montré une réduction de 56 % de la perméabilité à l'oxygène et une efficacité antimicrobienne durable contre des

pathogènes tels que *Salmonella enterica* et *Listeria monocytogenes* [33]. L'utilisation d'extrait de thym (*Thymus vulgaris*), riche en composés bioactifs, a aussi contribué à renforcer les propriétés antimicrobiennes du film PHBV tout en limitant la migration des substances actives vers les aliments [34].

Dans cette même dynamique, des films à base de PHBV renforcés par des nanotubes de carbone à parois multiples greffés avec du PHBV (PHBV-g-MWCNTs) ont été développés par une méthode simple de coulée en solution. Ces films, transparents à la lumière visible, ont démontré une amélioration significative de la stabilité thermique, des propriétés mécaniques, des performances barrières, ainsi qu'une réduction de la migration des composés. Ces résultats confirment le potentiel de ces matériaux composites pour des applications exigeantes dans le domaine de l'emballage alimentaire. Enfin, ces systèmes d'emballage ont montré leur efficacité dans la préservation de la qualité microbiologique des viandes en maintenant les charges microbiennes sous le seuil critique de 5 log CFU/g et en réduisant l'oxydation des huiles, avec une baisse de près de 50 % de la formation de peroxydes par rapport aux matériaux d'emballage conventionnels [35].

Dans cette lignée, une autre approche prometteuse a consisté à utiliser des fibres de noix de coco imprégnées d'huile essentielle d'origan pour renforcer la matrice de PHBV, en élaborant des feuilles composites écologiques par moulage par compression.

Même à faible concentration (3 % en poids), ces biocomposites ont présenté un effet bactériostatique notable contre *Staphylococcus aureus*. Ces résultats soulignent l'intérêt de ces matériaux en tant que vecteurs de composés bioactifs, avec un fort potentiel d'application dans l'allongement de la durée de conservation des aliments via des solutions d'emballage intelligentes et durables [35].

## **I.6. La curcumine**

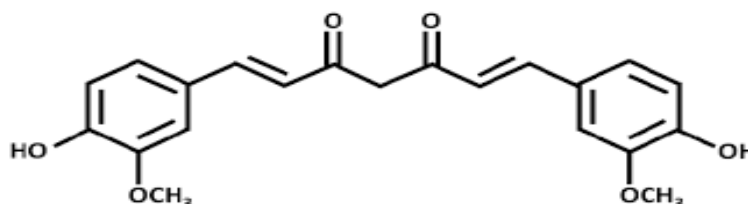
### **I.6.1. Définition**

La curcumine est le principe actif extrait du curcuma qui est une plante vivace de la même famille que le gingembre, les Zingibéracées. Elle peut atteindre une hauteur d'environ un mètre. Son rhizome, comestible et très ramifié, ressemble beaucoup à celui du gingembre. De ce rhizome émergent de longues feuilles disposées de manière distique, c'est-à-dire en deux rangées opposées.

Depuis des siècles, la curcumine occupe une place essentielle dans la médecine ayurvédique, la médecine traditionnelle indienne. Elle est largement reconnue pour ses propriétés bénéfiques dans la prévention et le traitement de nombreuses maladies [36].



**Figure I.8: Aspect général de la curcumine**



**Figure I.9 : la structure de curcumine**

## **I.6.2. Les propriétés de la curcumine**

### **I.6.2.1. Activité antimicrobienne**

Dans des études, la curcumine a montré une capacité remarquable à inhiber la croissance de différentes souches bactériennes, y compris celles résistantes aux antibiotiques. Elle s'est également révélée efficace contre certains types de champignons et de virus. Des études ont démontré son action sur les bactéries à Gram positif et Gram négatif, ainsi que son activité antivirale en culture cellulaire, ce qui en fait un composé naturel prometteur dans la lutte contre les infections microbiennes [37].

### **I.6.2.2. Activité anti-inflammatoire**

De nombreuses études ont démontré que la curcumine possède diverses propriétés biologiques, dont l'effet anti-inflammatoire est particulièrement remarquable, ce qui en fait

une option prometteuse pour le traitement de nombreuses affections inflammatoires. Elle contribue à réduire l'inflammation en régulant les voies de signalisation impliquées dans la réponse inflammatoire et en limitant la production de médiateurs pro-inflammatoires. Des recherches récentes ont également montré que son efficacité pouvait être améliorée grâce à de nouvelles formulations et à son association avec d'autres composés, renforçant ainsi son potentiel thérapeutique [38].

### **I.6.2.3. Activité antioxydante**

Les radicaux libres jouent un rôle clé dans le développement de nombreuses maladies dégénératives telles que l'athérosclérose, le cancer, le diabète, la cirrhose ou encore le vieillissement. Ainsi, les composés capables de neutraliser ces radicaux libres présentent un fort potentiel pour prévenir ou ralentir ces pathologies. Les antioxydants figurent parmi ces composés grâce à leur capacité à piéger les radicaux. Les curcumines, en particulier, se distinguent par leur efficacité en tant qu'agents antiradicalaires. Elles stimulent l'activité de plusieurs enzymes impliquées dans la neutralisation du stress oxydatif, telles que la superoxyde dismutase, la glutathion peroxydase, la glutathion réductase, la glucose-6-phosphate déshydrogénase et la catalase. De plus, la curcumine inhibe fortement la peroxydation lipidique induite par des agents oxydants comme le ferric nitrilotriacetate (Fe-NTA) ou le peroxyde d'hydrogène [39].

## **I.7. Composites PHBV /Curcumine**

### **I.7.1 Traitement des plaies et pansements médicaux**

Les nanotechnologies ont permis de concevoir de nouveaux types de pansements, caractérisés par une large surface spécifique, une fabrication simple et un coût réduit. Parmi ces matériaux, on trouve des nanofibres de PHBV associées à la curcumine, obtenues par électrofilage. Ces fibres ont été étudiées pour mieux comprendre leurs propriétés physiques et biologiques et confirmer leur intérêt en médecine [40].

### **I.7.2. Ingénierie tissulaire**

En ingénierie tissulaire, le PHBV est employé comme support biodégradable. L'ajout de curcumine stimule la croissance des cellules, aide à la production de collagène et favorise la formation de nouveaux vaisseaux sanguins. Cela permet une meilleure régénération des tissus, qu'il s'agisse de la peau ou des os. Des recherches ont confirmé que ce type d'échafaudage

créé un environnement propice au développement cellulaire, grâce aux propriétés antioxydantes et antimicrobiennes de la curcumine [41].

### **I.7.3. Systèmes d'administration de médicaments**

Des équipes ont mis au point des microsphères composées de PHBV et de nanoparticules de verre bioactif mésoporeux (MBGN) chargées en curcumine. Ce système permet d'encapsuler la curcumine avec un rendement élevé (plus de 90 %) et d'assurer sa libération progressive sur plusieurs jours. L'encapsulation contribue aussi à améliorer la compatibilité des MBGN avec les cellules [42].

### **I.7.4. Amélioration des propriétés mécaniques et biologiques**

L'intégration de curcumine dans des nanofibres de PHBV a entraîné une légère baisse de la résistance mécanique, en particulier à la traction. Cependant, sur le plan biologique, des essais ont montré que cette combinaison favorise la multiplication des fibroblastes, ce qui en fait une solution intéressante pour les pansements ou les applications en ingénierie tissulaire [43].

### **I.7.5. Réduction de la toxicité des nanoparticules**

Pour diminuer la toxicité des nanoparticules super paramagnétiques d'oxyde de fer (SPION), celles-ci ont été intégrées dans une matrice formée de PHBV et de curcumine. Ce procédé a permis de réduire les effets toxiques tout en maintenant les propriétés magnétiques des nanoparticules. La libération contrôlée de la curcumine a également contribué à limiter les effets secondaires, ce qui ouvre des perspectives en imagerie et en thérapie ciblée [44]

**Références**

1. Kerouani, S. (2019). Etude de la biodégradation du polyéthylène thermo-oxydé [Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif-1, Faculté de Technologie].
2. Lariche, M., & Lariche, N. (2018). Préparation et caractérisation des films bionanocomposites polyhydroxyalcanoates/oxyde de zinc (PHA/ZnO) (Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun–Tiaret, Algérie)
3. Avérous, L. (2013). Les polymères biodégradables et biosourcés : des matériaux pour un futur durable. *L'Actualité Chimique*, 2013, 83–90.
4. Sambha'A, L. (2011). Contribution à l'étude de la structure et de la texture du PLA : Effet de la dégradation hydrothermale [Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace].
5. Avérous, L. (2004). Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review. *Journal of Macromolecular Science, Part C*, 44, 231–274.
6. Chen, G. Q. (2009). A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio- and materials industry. *Chemical Society Reviews*, 38, 2434–2446.
7. Avérous, L., & Pollet, E. (2012). Environmental silicate nano-biocomposites. Springer.
8. Habibi, Y. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110, 3479–3500.
9. Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31, 603–632.
10. Woodruff, M. A., & Hutmacher, D. W. (2010). The return of a forgotten polymer: Polycaprolactone in the 21st century. *Progress in Polymer Science*, 35, 1217–1256.
11. Xu, J., & Guo, B. H. (2010). Poly(butylene succinate) and its copolymers: Research, development and industrialization. *Biotechnology Journal*, 5, 1149–1163.
12. Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (2000). Synthetic biodegradable polymers as medical devices. *Medical Plastics and Biomaterials Magazine*, 7(2), 44–49.
13. Chiellini, E., Corti, A., D'Antone, S., & Solaro, R. (2003). Biodegradation of poly(vinyl alcohol) based materials. *Progress in Polymer Science*, 28, 963–1014.
14. Chen, G. Q. (2009). A microbial polyhydroxyalkanoates (PHA) based bio- and materials industry. *Chemical Society Reviews*, 38, 2434–2446.
15. Middleton, J. C., & Tipton, A. J. (2000). Synthetic biodegradable polymers as medical devices. *Medical Plastics and Biomaterials Magazine*, 7(2), 44–49.
16. Patwary, M. A. S., Surid, S. M., & Gafur, M. A. (2020). Properties and applications of biodegradable polymers. *Journal of Research Updates in Polymer Science*, 9, 32–41.

17. Paine, F. A., & Paine, H. Y. (2012). A handbook of food packaging. Springer Science & Business Media.
18. Shin, J., & Selke, S. E. (2014). Food packaging. *Food processing: principles and applications*, 249-273.
19. Achi, A. (2023). Emballage alimentaire : Caractéristiques d'emballage métallique et rôle des interactions matériaux-aliments dans la valorisation des produits alimentaires (Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie, Spécialité : Qualité de produit et la sécurité alimentaire).
20. Latreche, F., & Mansour, A. (2020). Utilisation des biopolymères dans les emballages alimentaires [Mémoire de Master, Université A. Mira – Bejaia]
21. Dainelli, D. (2008). Recycling of food packaging materials: an overview. *Environmentally Compatible Food Packaging*, 294-325.
22. Arvanitoyannis, I. S., & Kasaveti, A. (2008). Consumer attitude to food packaging and the market for environmentally compatible products. In *Environmentally compatible food packaging* (pp. 161-181). Woodhead Publishing.
23. Ghoshal, G. (2018). Recent trends in active, smart, and intelligent packaging for food products. In *Food packaging and preservation* (pp. 343-374). Academic Press.
24. Ozdemir, M., & Floros, J. D. (2004). Active food packaging technologies. *Critical reviews in food science and nutrition*, 44(3), 185-193.
25. Sobhan, A., Muthukumarappan, K., & Wei, L. (2021). Biosensors and biopolymer-based nanocomposites for smart food packaging: Challenges and opportunities. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100745.
26. Latifa, Mlle BOUDJEMA Hayet. "Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables." Mémoire de doctorat (2016).
27. Aggoune, F., & Benyahia Ahmed, C. (2019). Synthèse et valorisation dans le domaine médical des nanocomposites de Ag-TiO<sub>2</sub> [Thèse de doctorat, Université Saad Dahlab Blida 1].
28. Mokrane, A., Riazi, F., & Bachir, C. (2023). Synthèse et caractérisation des biocomposites à base d'argile et biopolymère (amidon et chitosane) (Master's thesis).
29. Behloul Lhamid, & Hamdaoui, L. (2015). Effet d'un renfort biodégradable sur les propriétés physico-mécaniques d'un biopolymère PHBV (Master's thesis, Université A.Mira,Bejaia).

30. Zaveri, P., & Hassan, M. K. (2011). Mechanical and thermal properties of PHBV/cellulose nanocrystals composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 120(3), 1389–1397.
31. Wang, L., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2021). Ferulic acid as an antioxidant additive for PHBV films: Impact on oxygen barrier and food safety. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117532. 256,117532.
32. Zhang, Y., Liu, Q., Wang, T., & Zhang, X. (2019). ZnO nanoparticles in PHBV matrices: Antimicrobial activity and thermal stability enhancement. *Materials Science and Engineering: C*, 102, –717.
33. Kumar, S., Nehra, M., Dilbaghi, N., Marrazza, G., & Kim, K. H. (2019). Silver nanoparticles in PHBV films: Antimicrobial efficacy against foodborne pathogens. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 1231–1240.
34. Ahmed, J., Mulla, M., & Jacob, H. (2019). Thyme extract-loaded PHBV films: Bioactive properties and migration limits. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100420.
35. Ibrahim, M. I., Alsafadi, D., Alamry, K. A., & Hussein, M. A. (2021). Properties and applications of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) biocomposites. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(4), 1010–1030.
36. Benaouda, A. D. (2021). Etude de l'effet de la curcumine sur les propriétés photocatalytiques de ZnO vis-à-vis d'un polluant organique (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret).
37. Zorofchian Moghadamtousi, S., Abdul Kadir, H., Hassandarvish, P., Tajik, H., Abubakar, S., & Zandi, K. (2014). A review on antibacterial, antiviral, and antifungal activity of curcumin. *BioMed Research International*, 2014, 186864.
38. Benkacimi, M. K. (2022). Elaboration d'un nanogel transdermique à base de curcumine et à matrice polymère (Master's thesis, Université de Blida 1).
39. Layaida, H. (2024). Extraction, étude par DFT, Docking moléculaire et évaluation des propriétés biologiques de la curcumine et ses dérivés (Doctoral dissertation).
40. Wu, J., Hong, Y., Zheng, Y., Wang, Y., & Qin, Y. (2018). Electrospun poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) nanofibrous mats incorporated with curcumin for Alfa et Cellulose wound dressing. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 29(5), 663–678.

41. Wang, Y., Zhang, L., Xu, Y., & Zhang, Y. (2017). Curcumin-loaded electrospun PHBV scaffolds with controlled release for tissue engineering applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 28(6), 92.
42. Xu, Y., Wu, M., Liu, Y., Xu, Y., Guo, Y., & Zhang, L. (2021). Curcumin encapsulated mesoporous bioactive glass nanoparticles embedded in PHBV microspheres for controlled drug delivery and enhanced biocompatibility. *International Journal of Nanomedicine*, 16, 4641–4656.
43. Gupta, P., Vermani, K., & Garg, S. (2017). Curcumin-loaded electrospun PHBV nanofibers as potential wound-dressing material. *Materials Science and Engineering: C*, 76, 1278–1286.
44. Samadian, H., Salehi, M., Ehterami, A., Farzamfar, S., Vaez, A., & Ai, J. (2022). Reduced cytotoxicity and improved magnetic properties of curcumin-loaded PHBV microspheres containing SPIONs for biomedical applications. *Frontiers in Biomaterials Science*, 2, Article 951343.

*Chapitre II : Partie  
Expérimentale*

## II.1. L'objectif

Dans cette partie du manuscrit, nous décrivons les produits utilisés ainsi que le protocole expérimental de la préparation des films biocomposites à base de poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV) et de curcumine. Les techniques d'analyse qui sont utilisées pour la caractérisation des matériaux obtenus seront aussi citées.

## II.2. Matériels et méthodes

### II.2.1. produits et les matériels utilisés

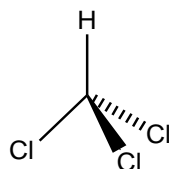
Au cours de notre travail, nous avons utilisé du matériel et des produits commerciaux : les éléments nécessaires sont présentés dans le tableau II.1.

Matériels	Produits
Agitateur magnétique + chauffage	Chloroforme
Barreau magnétique	Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate)PHBV(ENMAT
balance	Y1000P)
verrerie de laboratoire	Curcumine commerciale
	Dioxyde de titane

**Tableau. II.1: Matériels et produit utilisés**

### II.2.2. Le chloroforme

Il s'agit d'un liquide transparent et incolore, présentant une odeur étherée, principalement commercialisé à une concentration élevée ( $\geq 99\%$ ) et enrichi d'un agent antioxydant tel que l'éthanol, le méthanol ou l'amylène (2-méthylbut-2-ène).



**Figure .II.1: Structure chimique de chloroforme**

Le chloroforme est un composé hautement volatil susceptible de s'auto-oxyder en raison d'une exposition à la lumière ou à l'air.

Pour obtenir des nanocomposites à base de PHBV et de curcumine, ces deux produits ont été solubilisés dans le chloroforme.

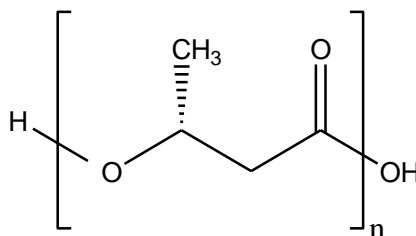
### Les propriétés physico chimiques du chloroforme

Formule chimique	CHCl <sub>3</sub>
Masse molaire	119,378 g/mol
Masse volumique	1,49 g/cm <sup>3</sup>
Densité	1,49 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion (Tf)	-63,5 °C

**Tableau II.2 : propriétés de chloroforme.**

### II.2.3. Le poly (3-hydrox butyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV)

Le polymère utilisé est le poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (GRADE : ENMAT Y1000), provenant à plus de 90 % (conformément à la norme ASTM D6866) de ressources végétales annuellement renouvelables.



**Figure .II.2: Structure chimique de PHBV**

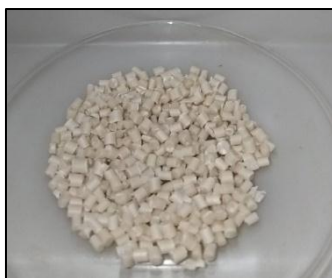


Figure .II.3 : Les granulés du PHBV vierge

### Les propriétés physico chimiques du PHBV

Propriétés	Valeurs
Masse molaire	93,734g. mol <sup>-1</sup>
Densité	1,25
Température de fusion	170-176°C
Module en flexion	3520-4170MPa
Contrainte de traction au seuil élastique	31 MPa

Tableau. II.3 : Propriétés physico chimique du PHBV

#### II.2.4. Curcumine commerciale :

La curcumine commerciale est généralement obtenu par extraction à partir du curcuma, suivi d'une purification. Elle se présente sous forme de poudre jaune-orange, peu soluble dans l'eau, mais solubles dans des solvants organiques comme l'éthanol.

#### II.2.5. Dioxyde de titane :

Le dioxyde de titane est un produit chimique très utilisé en photocatalyse.

Il existe sous 3 formes cristallines : anatase, rutile et brookite [1].

Le dioxyde de titane utilisé dans cette étude est de type anatase sous forme de poudre blanche. Ce matériau est connu pour ses propriétés photocatalytiques, sa blancheur intense et sa stabilité chimique, ce qui le rend intéressant comme renfort dans les films biocomposites. De nombreuses applications microbiennes et médicales sont liées à son utilisation.



Figure .II.4: Structure chimique de TiO<sub>2</sub>

Formule chimique	TiO <sub>2</sub>
Masse molaire	79,87g. mol <sup>-1</sup>
Masse volumique	3,9 g.cm <sup>-3</sup> à 4,3 g.cm <sup>-3</sup>
Point d'ébullition	2500°C à 3000°C
Point de fusion	1855°C

**Tableau. II.4 : Propriétés physico chimique du TiO<sub>2</sub>**

### II.3. Protocole expérimental

#### II.3.1. Préparation des films de PHBV

Pour la préparation des films de PHBV, 6g de granulés de PHBV ont été prélevés et mélangés avec 100 ml de chloroforme dans un erlenmeyer. L'erlenmeyer est maintenu sous chauffage avec un agitateur magnétique. Le mélange a été agité jusqu'à dissolution complète du PHBV à 60 ° C pendant 5h. La solution a ensuite été versée dans des boîtes de Pétri propres et sèches, puis laissée à température ambiante pendant 24 heures afin de permettre l'évaporation du solvant. Les films formés ont été délicatement retirés et ensuite récupérés, puis conservés dans un dessiccateur pour des analyses ultérieures.



**Figure .II.5 : Film obtenu de PHBV pure**

#### II.3.2. Préparation des composites

Suite à la préparation des films vierges, des films biocomposites ont été élaborés par l'incorporation de curcumine dans la matrice de PHBV.

**Préparation de l'échantillon contenant le PHBV/ la curcumine**

Des proportions en poids de 1 %, 3 % et 5 % de curcumine, par rapport à la masse de PHBV, ont été intégrées à la solution polymérique. Chaque mélange a été maintenu sous agitation à 60 °C pendant 2 heures afin d'assurer une dispersion homogène de la curcumine. Les solutions obtenues ont ensuite été versées dans des boîtes de Pétri et séchées à température ambiante. Une fois sèches, les films composites ont été démoulés et conservés dans un dessiccateur en vue des analyses ultérieures.

**Préparation de l'échantillon contenant le PHBV/ la curcumine/ TiO<sub>2</sub>**

Dans un premier temps, une quantité de PHBV a été dissoute dans 100ml de chloroforme sous agitation magnétique pendant 5 heures à une température de 60 °C. Par la suite, 1,5 % de curcumine (en poids par rapport au polymère) a été ajoutée, et le mélange a été maintenu sous agitation pendant 2 heures supplémentaires afin d'assurer une bonne dispersion. Ensuite, 1,5 % de TiO<sub>2</sub> a été incorporé dans la solution, suivi d'une agitation pour homogénéiser le mélange. Enfin, la solution a été versée dans des boîtes de Pétri et laissée à température ambiante pour permettre l'évaporation complète du solvant. Les films obtenus ont été conservés dans un dessiccateur en vue d'analyses ultérieures

Echantillon	PHBV	Curcumine	TiO <sub>2</sub>
Film « a »	99%	1%	0%
Film « b »	97%	3%	0%
Film « c »	95%	5%	0%
Film « d »	97%	1.5%	1.5%

**Tableau. II.5 : Formulation des films biocomposites PHBV incorporant la curcumine et/ou le TiO<sub>2</sub>**

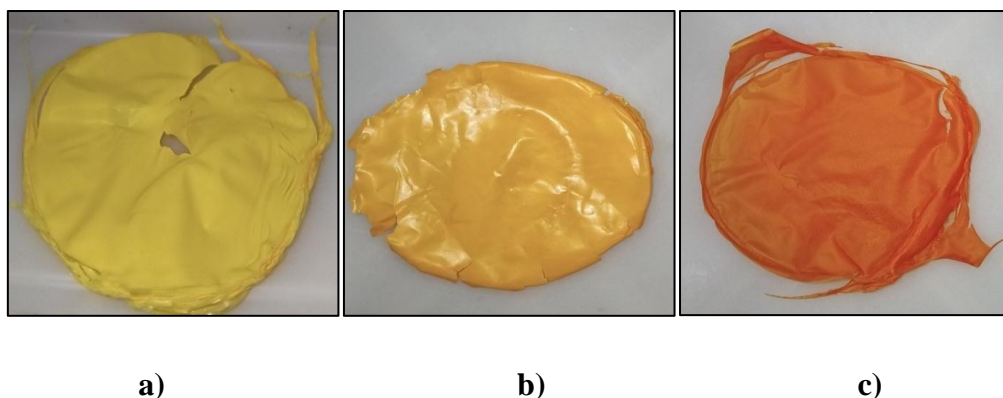


Figure .II.6 : Films obtenu de PHBV/curcumine : a) 1 %, b) 3 %, c) 5 %



d)

Figure .II.7 : Film obtenu de PHBV/curcumine et TiO<sub>2</sub>

## II.4. Les techniques de caractérisations utilisées

Les films obtenus ont été caractérisés par les diverses techniques d'analyse, dont les principes seront exposés dans ce chapitre.

### II.4.1. La Spectroscopie UV-Visible

#### II.4.1.1. Définition

La spectroscopie constitue une technique analytique permettant de mesurer la quantité de longueurs d'onde discrètes dans l'ultraviolet ou la lumière visible, qui sont absorbées ou transmises à travers un échantillon, en comparaison avec un échantillon de référence ou un échantillon vide. Cette propriété est influencée par la composition de l'échantillon, fournissant ainsi des informations sur sa nature et sa concentration.

### II.4.1.2. Principe

Le principe de la spectroscopie UV-Vis repose sur l'absorption de la lumière ultraviolette ou de la lumière visible par des composés chimiques, engendrant divers spectres. La spectroscopie repose sur l'interaction entre la lumière et la matière. Lorsque la matière absorbe la lumière, elle est excitée et désamorcée, ce qui aboutit à la production d'un spectre [2].

La loi de Beer-Lambert est le principe d'absorption spectroscopie.

L'expression de la loi de Beer-Lambert est la suivante :

$$A = \log (I_0/I) = \xi l C \text{ (II.1)}$$

\* A = absorbance

\*  $I_0$  = est l'intensité de la lumière incidente

\* I = est l'intensité après passage à travers la cuve contenant la solution (intensité transmise)

\* C = concentration molaire du soluté

\* l = est la distance traversée par la lumière (épaisseur de la cuve) (en cm)

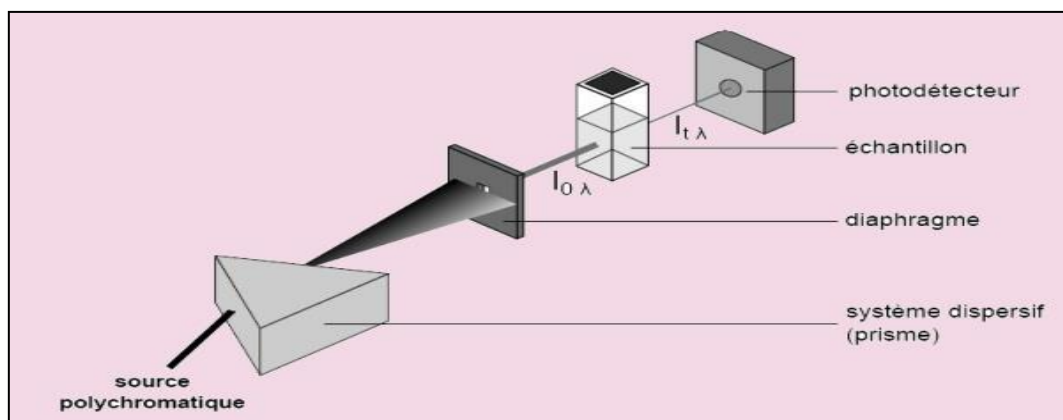
\*  $\xi$  = est le coefficient d'extinction molaire ; c'est une caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée.

### II.4.1.3. Instrumentation

Les composants essentiels du spectrophotomètre UV-VIS sont les suivants [2] :

1. Source
2. Monochromateur
3. Cellule d'échantillonnage
4. Détecteur
5. Système de lecture
6. Amplificateur

## 7. Affichage



**Figure II.8 : Schéma simplifié des principaux composants d'un spectrophotomètre UV-Vis.**

#### II.4.1.4. Applications

La spectroscopie UV-visible présente de nombreuses applications variées. Parmi ses applications les plus courantes, on peut citer :

- Dosage de substances (quantification par la loi de Beer-Lambert)
- Identification de composés organiques contenant des chromophores
- Analyse de l'ADN, ARN et des protéines en biochimie
- Suivi de réactions chimiques

#### II.4.2. La Spectroscopie Infrarouge IR

##### II.4.2.1. Définition

La spectroscopie infrarouge (IR) constitue l'une des techniques spectroscopiques les plus largement employées par les chimistes, tant organiques qu'inorganiques. En termes simples, elle consiste en la mesure de l'absorption de diverses fréquences infrarouges par un échantillon placé dans le chemin d'un faisceau IR. La spectroscopie IR s'affirme comme un outil essentiel et prisé pour l'élucidation structurale et l'identification des composés [3].

Un instrument de laboratoire fréquemment utilisé pour cette technique est la spectroscopie infrarouge à transformation de Fourier (FTIR).



Figure II.9 : Spectromètre infrarouge SHIMADZU de type FTIR - 8400.

#### II.4.2.2. Principe

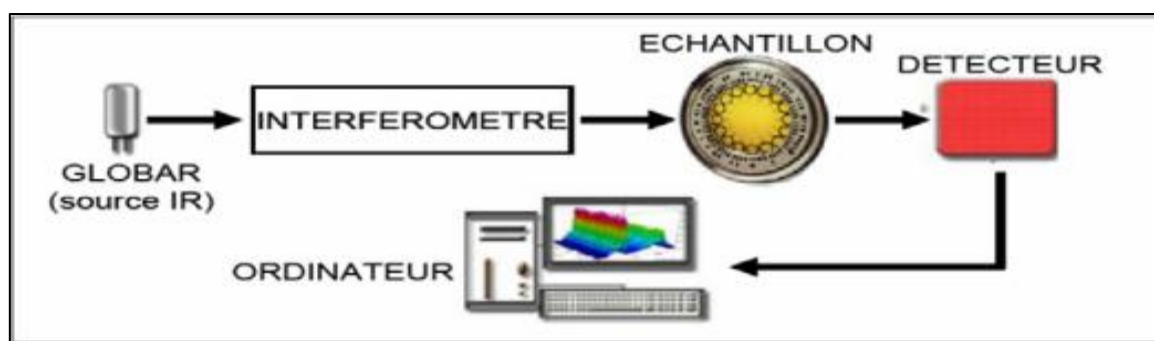


Figure II.10 : Schéma de principe d'un spectromètre FT-IR

#### II.4.2.3. Applications

La spectroscopie infrarouge est largement employée tant dans le secteur industriel que dans le domaine de la recherche. Il s'agit d'une technique à la fois simple et fiable pour la mesure, le contrôle de qualité et l'analyse dynamique. De plus, elle est utilisée dans le cadre de l'analyse médico-légale, tant pour les investigations civiles que criminelles.

La spectroscopie infrarouge permet d'obtenir des informations détaillées concernant :

- La structure chimique des macromolécules et la composition des polymères.

- Les interactions intra- ou intermoléculaires, la conformation des chaînes, la cristallinité des polymères et l'organisation des macromolécules.

### **II.4.3. La diffraction des rayons X (DRX)**

#### **II.4.3.1. Définition**

La diffraction des rayons X (XRD) constitue une technique non destructive efficace pour la caractérisation des matériaux cristallins. Elle offre des informations précieuses sur les structures, les phases, les orientations cristallines préférées (texture) ainsi que sur d'autres paramètres structurels tels que la taille moyenne des grains, la cristallinité, la déformation et les défauts du cristal [4].

#### **II.4.3.2. Principe :**

Lorsque des rayons X monochromatiques interagissent avec une substance, ils engendrent des interférences. Ce phénomène donne lieu à un motif d'intensités variables, présentant des zones d'intensité élevée et faible, en raison des interférences constructives et destructives, conformément à la loi de Bragg. Dans le cas des substances cristallines, ce motif génère des schémas tridimensionnels de diffraction en fonction des longueurs d'onde des rayons X, en corrélation avec l'espacement des plans dans un réseau cristallin.

#### **II.4.3.3. Applications**

La diffraction des rayons X (XRD) présente de nombreuses applications variées [4] :

- industrie pharmaceutique
- sciences judiciaires
- applications géologiques
- industrie de la microélectronique
- analyse de la corrosion

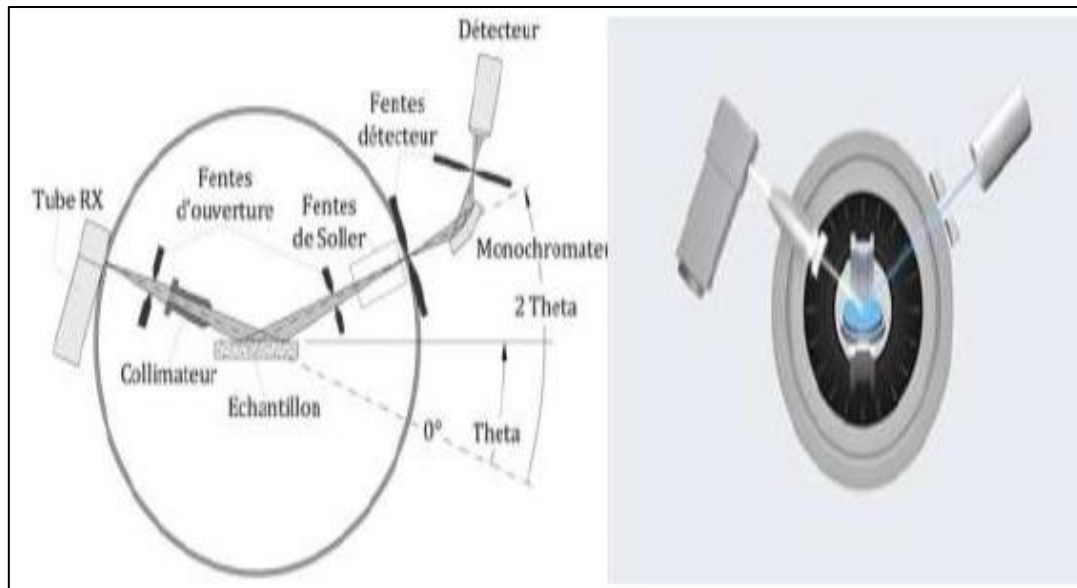


Figure II.11 : Schéma représentatif d'un diffractomètre classique.

#### II.4.4. Microscopie électronique à balayage (MEB)

##### II.4.4.1. Définition

La microscopie électronique à balayage (MEB) constitue une technique de microscopie permettant d'obtenir des images topographiques à l'échelle nanométrique. Cette méthode est utilisée pour réaliser des études morphologiques de surface des échantillons. Sa résolution élevée permet de caractériser des matériaux à l'échelle nanométrique.

##### II.4.4.2. Principe

La microscopie électronique repose sur le principe des interactions entre les électrons et la matière, permettant ainsi de générer des images à haute résolution de la surface d'un échantillon. Un faisceau d'électrons focalisé est dévié à travers des lentilles électromagnétiques, ce qui lui permet de balayer la surface de l'échantillon à analyser, lequel, en retour, émet différents types d'émissions [5].

##### II.4.4.3. Applications

- Étude des interactions entre matériaux.
- Analyse de la dispersion de particules ou d'additifs dans une matière.
- Analyse de la topographie des échantillons.

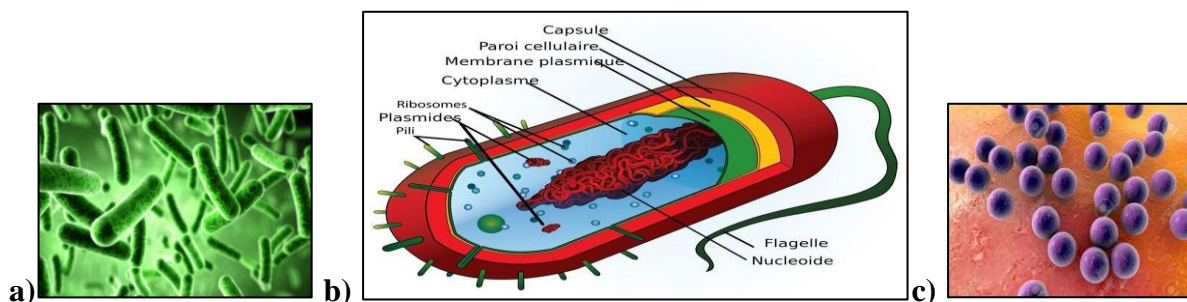
- Observation de la morphologie de surface à haute résolution.

## II.5. L'activité antibactérienne

### II.5.1. Les bactéries

Les bactéries constituent des microorganismes unicellulaires dont la taille varie de 1 à 10 microns ( $\mu\text{m}$ ), les rendant ainsi visibles uniquement à l'échelle microscopique. En moyenne, une bactérie est 10 à 100 fois plus petite qu'une cellule humaine. Son matériel génétique n'est pas localisé dans un noyau. Pour leur croissance, les bactéries nécessitent des conditions physico-chimiques favorables présentes dans leur environnement, ainsi que des nutriments répondant à leurs besoins énergétiques essentiels et spécifiques. En pratique, les milieux conçus par l'homme pour l'étude des bactéries sont désignés sous le terme de milieux de culture.

Leurs formes sont variées : elles peuvent être sphériques (coques), en bâtonnets (bacilles) ou encore spiralées, et sont classées en deux grandes catégories en fonction de la structure de leur paroi cellulaire, selon le procédé de coloration de Gram : les Gram positifs et les Gram négatifs. Ces deux types de paroi exercent une influence significative sur le comportement des bactéries vis-à-vis de leur environnement [1].



a) Forme bâtonnet d'une bactérie, b) Structure générale d'une bactérie, c) Forme sphérique

**Figure II.12 : Les différentes formes d'une bactérie**

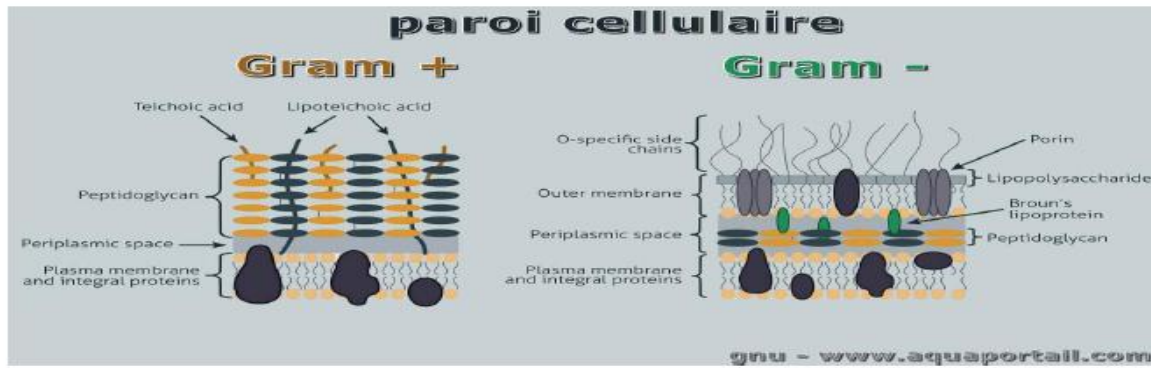


Figure II.13 : Paroi bactérienne gram positif et gram négatif

### II.5.2. Souches bactériennes étudiées

Afin d'évaluer l'activité antibactérienne du film biocomposite PHBV/curcumine, deux souches bactériennes ont été choisies : Une bactérie de gram positif (*Staphylococcus aureus*) et une bactérie de gram négatif (*Escherichia coli*). Tout d'abord, nous allons donner quelques généralités concernant ces bactéries.

#### a) *Staphylococcus aureus* :

Le *staphylococcus aureus* est une bactérie de gram positif de forme arrondie (coccus). Il se présente sous forme de diplocoques (coccis associés par deux) ou sous forme d'une grappe de raisins.

#### b) *Escherichia Coli* :

L'*Escherichia Coli* est une bactérie de gram négatif. Elle existe sous forme de bâtonnets mobiles. On la trouve chez l'homme et les autres mammifères. C'est une bactérie anaérobie qui se trouve dans l'intestin.

### II.5.3. Les méthodes utilisées pour évaluer l'activité antibactérienne :

Pour évaluer l'activité antibactérienne on a choisi la méthode de diffusion en gélose par les disques ou les puits.

#### a) La méthode des puits

Il s'agit d'une méthode visant à étudier l'effet antimicrobien d'une substance, communément désignée sous le terme de technique de diffusion sur gélose, permettant d'identifier les matériaux présentant une activité antibactérienne à l'égard d'un microorganisme. Cette méthode implique l'utilisation de boîtes de pétri contenant un milieu

de culture, tel que l'agar Mueller Hinton, spécifiquement pour les bactéries. Les microorganismes utilisés doivent être issus de cultures jeunes, et l'ensemencement s'effectue par écouvillonnage. Après le séchage des boîtes, des puits sont perforés à l'aide d'une pipette Pasteur. Les puits ainsi formés sont ensuite remplis avec une solution des matériaux à tester, d'un volume d'environ 40 µl. Les boîtes de pétri sont ensuite incubées pendant 24 heures à 37 °C. L'activité inhibitrice des échantillons se manifeste par la formation d'une auréole autour des puits. L'évaluation des résultats s'effectue par la mesure du diamètre des zones d'inhibition à l'aide d'un pied à coulisse. Un produit est actif si son diamètre est supérieur à 8mm [1].

### **b) La méthode des disques**

Cette méthode repose sur le même principe que la méthode des puits, la seule différence étant qu'après l'ensemencement de la bactérie sur le milieu gélosé, des disques imprégnés d'agents antibactériens sont placés à la surface de celui-ci. Après incubation, l'analyse des résultats s'effectue de la même manière que pour les puits, en mesurant les diamètres d'inhibition (zones claires) entourant les disques.

## **II.5.4. Protocole expérimental**

### **II.5.4.1. Préparation des souches**

Tout d'abord on a fait le repiquage, c'est une technique de microbiologie qui consiste à transférer des bactéries d'un milieu de culture vers un autre afin de rejeuner les bactéries. Elles étaient ensemencées par stries dans une gélose nutritive. Après incubation à 37°C pendant 24 heures, des colonies bien isolées ont été prélevées et émulsionnées à l'aide d'un vortex dans de l'eau physiologique stérile à 0,9% en NaCl. L'inoculum est ajusté à 0,5 Mc Farland correspondant à une densité optique de (0,08-0,13) à 625 nm. La concentration de l'inoculum correspond à 10<sup>5</sup>UFC/ml.

### **II.5.4.2. Préparation des échantillons**

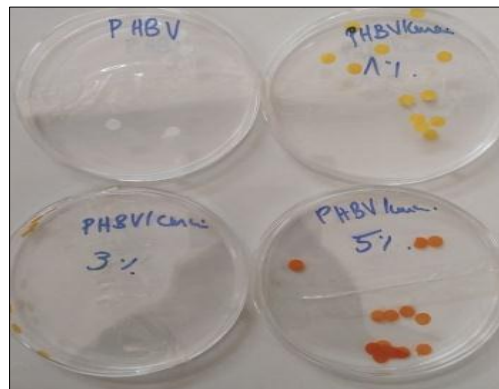
Une solution d'échantillon de la curcumine commerciale a été préparée en solubilisant 0.1g de la poudre d'échantillon dans 1ml de diméthylsulfoxyde (DMSO).

Les films biocomposites préparés ont été découpés en disques à l'aide d'un emporte-pièce circulaire de diamètre approprié (Figure II.15). Cette opération a été effectuée sur une surface propre et plane afin d'assurer des découpes nettes et régulières, tout en évitant toute

contamination ou altération des échantillons. Les disques obtenus ont par la suite été conservés dans des conditions adéquates en vue des différentes analyses.

### II.5.4.3. Mode opératoire

Après avoir fait fondre le milieu de culture, 10ml de celui-ci a été mis dans chaque boîte de pétrie (Figure II.16). Une fois que le milieu a été solidifié, des puits de 6mm de diamètres ont été creusés dans les boîtes à l'aide d'une pipette Pasteur. La suspension bactérienne de chaque souche a été ensuite ensemencée dans les boîtes grâce à un écouvillon stérile. A l'aide d'une micropipette un volume de l'échantillon a été mis dans un puits. En revanche, les disques de films biocomposites ont été directement placés à la surface du milieu de culture après solidification, sans passer par la formation de puits. Ensuite les boîtes ont été incubées à 37°C pendant 24h.



**Figure II.14 : Les disques découpés**



**Figure II.15 : Préparation des boîtes de pétri**

Dans le but d'évaluer l'efficacité antibactérienne du film, un test comparatif a été effectué en utilisant deux antibiotiques standards (disques commerciaux) contre les mêmes souches bactériennes.

**Références**

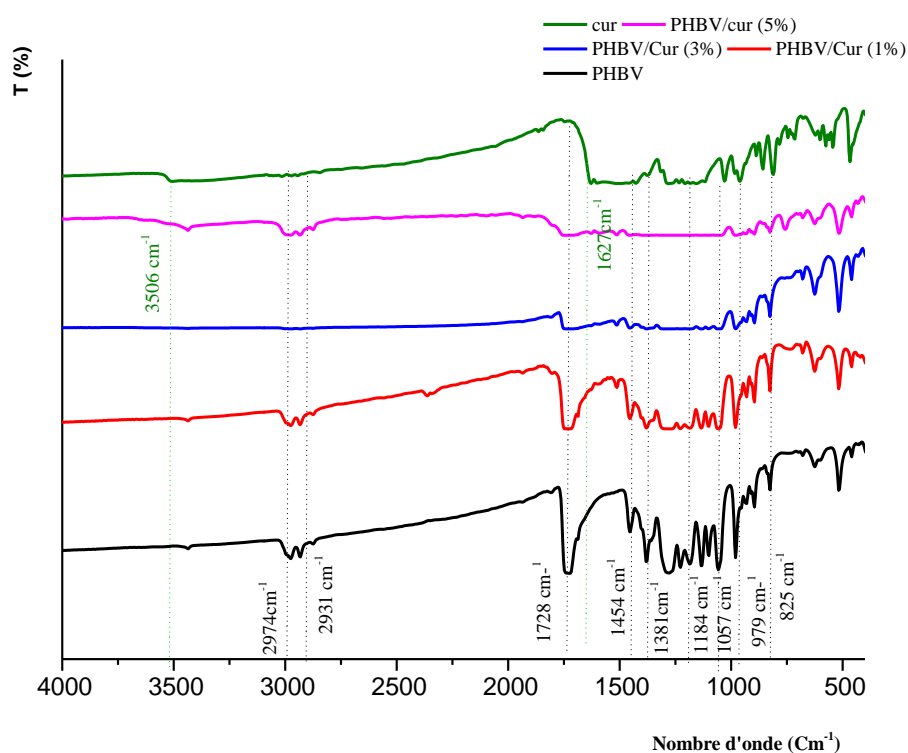
1. Baleh, H. (2022). Étude des propriétés optiques et électroniques des copolymères thiophènes benzaldéhydes dopés par des oxydants (Thèse de doctorat, Université Mustapha Stambouli de Mascara).
2. Dnyaneshwar, S. A., & Tiwari, N. (2022). A complete review on UV-Visible spectroscopic technique. *International Journal of Pharmaceutical Research and Applications*, 7(6), 1288–1299.
3. Hsu, C. P. S. (1997). Infrared spectroscopy. *Handbook of instrumental techniques for analytical chemistry*, 249.
4. Bunaciu, A. A., UdriȘtioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.
5. Berkouk, A. (2019). Étude mécanique et dynamique de compositions polymériques à base de PVC [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences de la Matière].

***Chapitre III :***  
***Résultats et***  
***discussion***

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé le PHBV pur ainsi que les composites PHBV/Curcumine. Nous avons utilisé plusieurs techniques pour analyser leurs propriétés structurales et de surface, notamment le FTIR pour la structure chimique, le DRX pour la structure cristalline, le MEB pour la morphologie de surface et le UV-Visible pour les propriétés optiques. En plus de ces analyses, nous avons également évalué l'activité antibactérienne des films, afin d'étudier leur potentiel pour des applications dans le domaine de l'emballage alimentaire actif.

### III.1. Caractérisation de la curcumine, du PHBV et des composites PHBV/curcumine par spectroscopie FTIR

La figure III.1 représente les spectres infra rouges du PHBV, de la curcumine et des composites PHBV/ curcumine



**Figure III.1 : Spectres infra rouge du PHBV, de la curcumine et des composites PHBV/curcumine**

**Discussion**

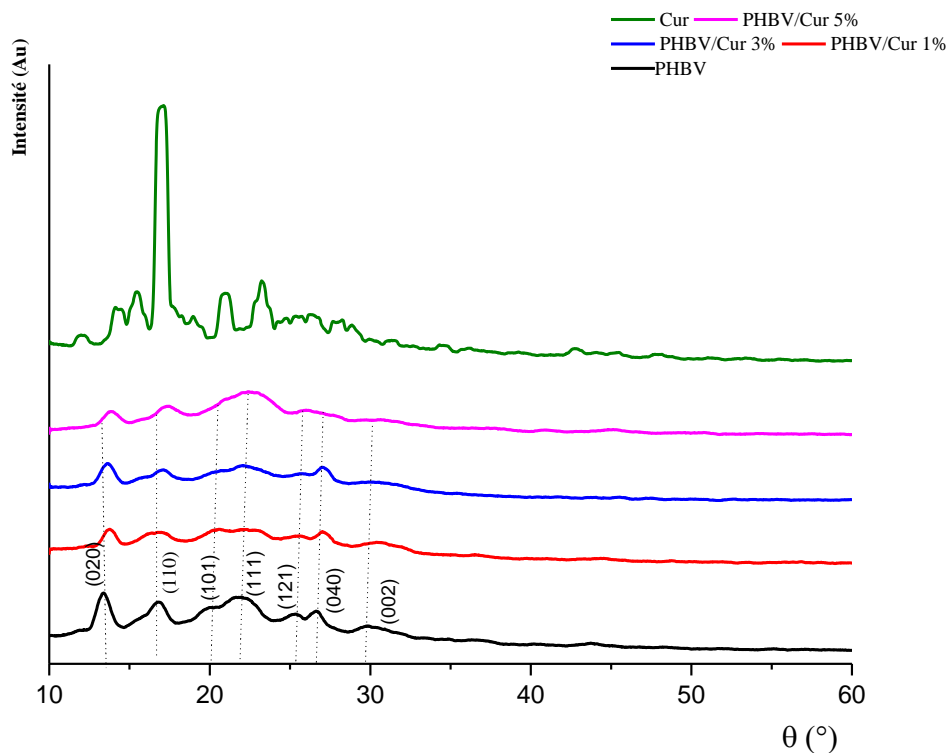
D'après la figure III.1 Le spectre du PHBV présente des bandes d'absorption caractéristiques à  $2974\text{ cm}^{-1}$ ,  $2931\text{ cm}^{-1}$ , correspondant respectivement aux vibrations d'élongation C–H des groupes méthine, méthylène et méthyle. Une bande intense à  $1728\text{ cm}^{-1}$  est attribuée à l'élongation du groupe carbonyle. Des pics supplémentaires à  $1381\text{ cm}^{-1}$  et  $1454\text{ cm}^{-1}$  correspondaient respectivement aux modes symétriques de balancement et de flexion des groupes méthyle [1], [2], [3].

Pour la curcumine, on trouve la bande à  $3506\text{ cm}^{-1}$  qui correspond à la déformation de la liaison Ar-OH. Les bandes entre  $1600\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  correspondent à la déformation de la C-C aromatique. Les bandes à  $959\text{--}500\text{ cm}^{-1}$  sont attribuées aux vibrations de flexion de la liaison C–H des groupes alcènes  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  [4].

Dans les spectres des composites on remarque la diminution de la bande caractéristique du groupement carbonyle par rapport au PHBV pure, cela peut être dû à la formation de liaison entre le polymère et la curcumine.

**III.2. Caractérisation de la curcumine, du PHBV et des composites PHBV/curcumine par diffraction des rayons X (DRX)**

Les diffractogrammes de la curcumine, du PHBV et des composites PHBV/curcumine sont donnés par la figure III.2.



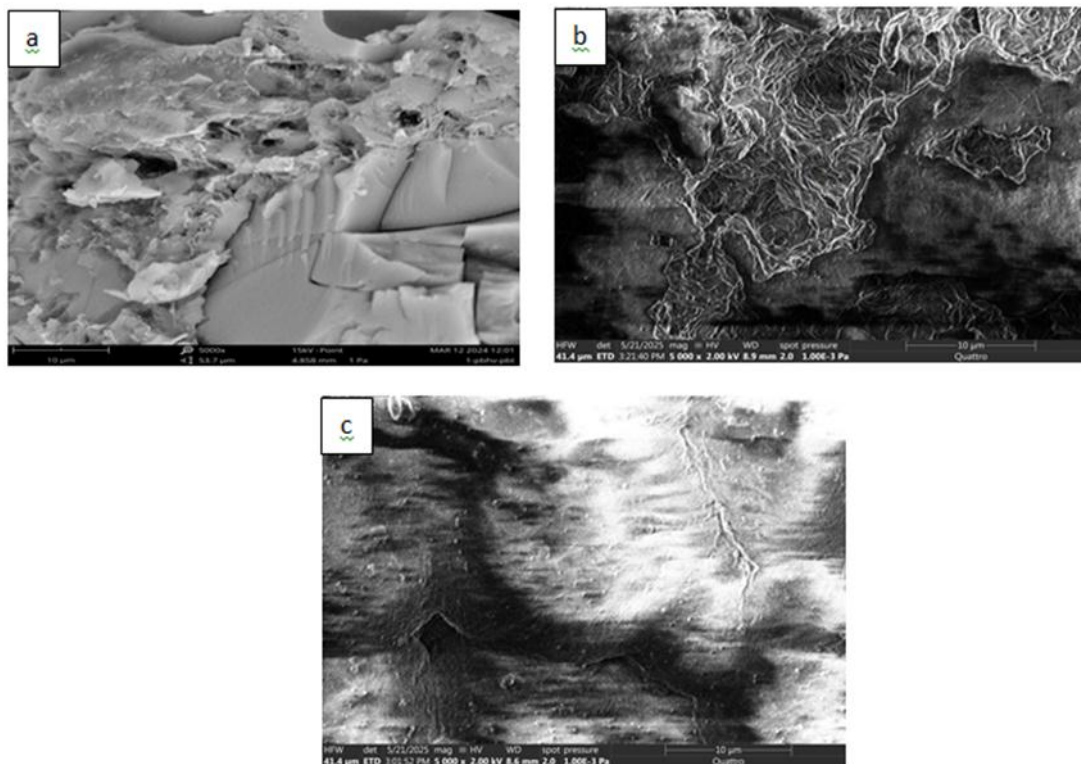
**Figure III.2 : spectre DRX de la curcumine, du PHBV et des composites PHBV/curcumine**

### Discussion

Le diffractogramme du PHBV présente des pics cristallins distincts aux valeurs  $2\theta$  de  $13,32^\circ$  ;  $17,6^\circ$  ;  $19,92^\circ$  ;  $22,2^\circ$  ;  $25,24^\circ$ ,  $26,62^\circ$  et  $29,96^\circ$ , qui correspondent aux plans (020), (110), (101), (111), (121), (040) et (002). Ces pics correspondent à la conformation hélicoïdale lamellaire de la forme  $\alpha$  du PHBV et peuvent être attribués à des plans cristallographiques spécifiques [5].

Les résultats de la DRX montrent que la curcumine est à l'état hautement cristallisé et présentait plusieurs pics de diffraction nets à  $2\theta$  de  $9^\circ$  à  $30^\circ$  ( $12,22$ ,  $14,12$ ,  $15,42$ ,  $17,08$ ,  $18,96$ ,  $21,00$  ;  $23,24$ ) [6].

### III.3. Caractérisation morphologique du PHBV et des composites PHBV/curcumine à 3 % et 5 % par microscopie électronique à balayage (MEB)



**Figure III.3 : Micrographe du : a) PHBV (Vue en tranche) b) PHBV/Curcumine 3% et c) PHBV/curcumine 5%**

#### Discussion

L'analyse par MEB des échantillons a été faite pour examiner l'adhésion interfaciale entre les phases la matrice polymérique et la curcumine ainsi que le dispersion de cette dernière dans la matrice. La figure III.3 (a) montre la surface fracturée du film du PHBV dense avec la présence de certains pores probablement dues à l'évaporation du solvant lors de la formation du film [7], [8]. Les figures III.3 (b et c) représente les images MEB effectués sur les surfaces des composites PHBV/curcumine 3 % et 5 %. On remarque que les deux surfaces sont denses avec une bonne dispersion de la charge dans la matrice polymérique. Dans le micrographe du composite PHBV/curcumine 3 %, on remarque une hétérogénéité dans la surface cela peut être due la présence du solvant qui n'a pas été bien évaporé pendant la préparation de l'échantillon.

### III.4. Analyse par spectroscopie UV-Visible de la curcumine, du PHBV et des composites PHBV/curcumine

La spectroscopie UV/visible est utilisée afin de connaître les propriétés électroniques des systèmes étudiés. Les spectres UV/visibles des échantillons solubilisés dans le chloroforme sont donnés par la figure III.4.

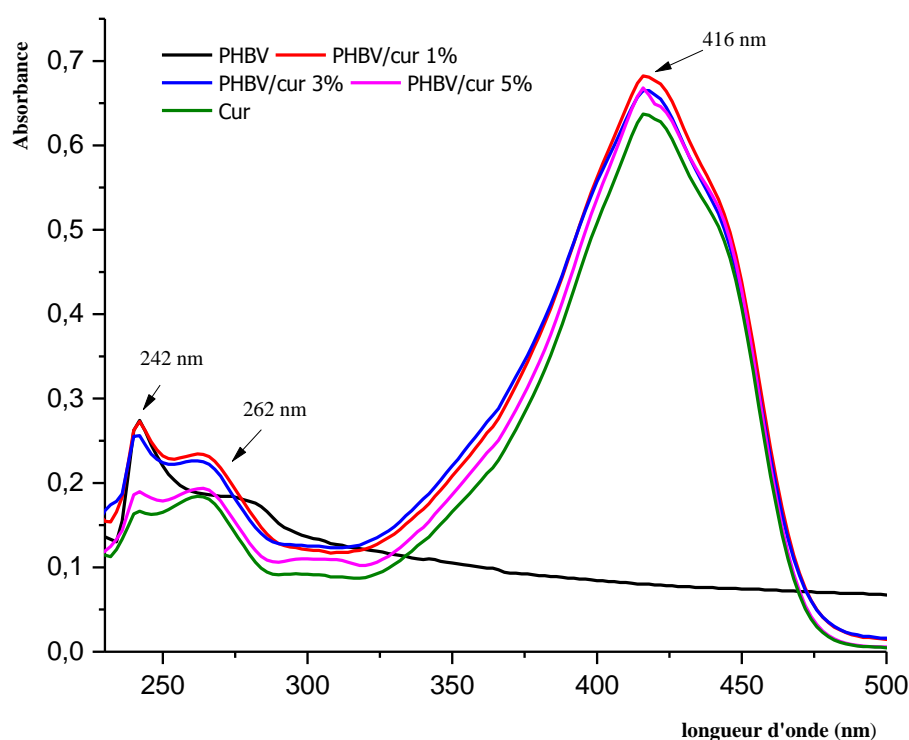


Figure III.4 : spectres UV/visible du PHBV et des composites PHBV/curcumine

#### Discussion

D'après la figure III.4, le spectre UV/visible du PHBV pure montre deux bandes d'absorptions dans l'UV qui sont dû aux transitions  $\pi-\pi^*$  et  $n-\pi^*$  du groupement carbonyle [9], [7]. Dans le spectre de la curcumine et des composites, on trouve des bandes larges qui sont dû à la présence de transitions électroniques entre les niveaux d'énergie des liaisons  $\sigma$ ,  $\pi$  et les doublets non liants présents dans la molécule. En plus, des transitions  $\pi-\pi^*$  du système conjugué de la curcumine qui donne des bandes d'absorption dans le visible [6].

### III.4.1. La déduction du gap optique

Pour l'estimation de l'énergie de gap optique l'équation de Tauc a été utilisée :

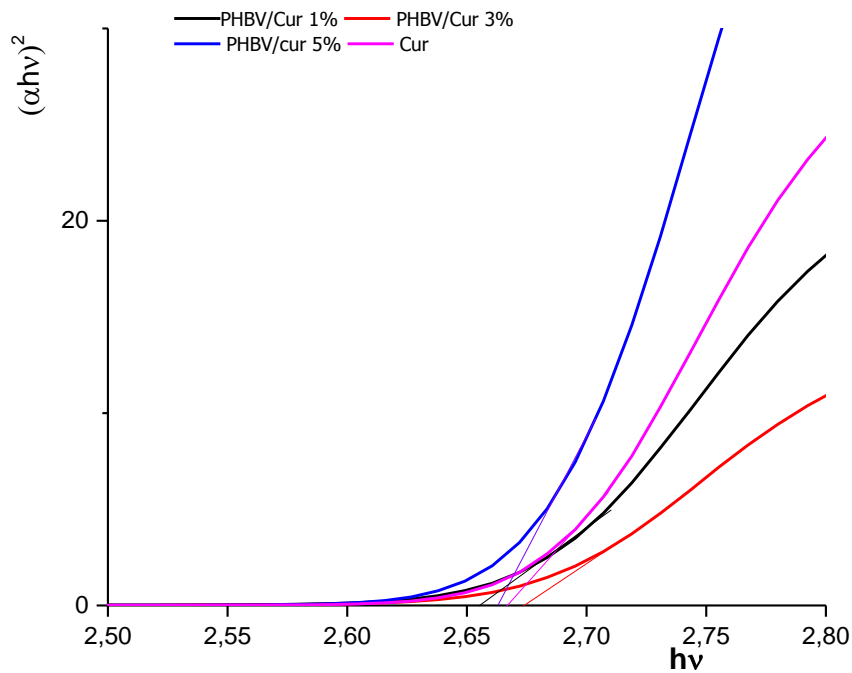
$$\alpha h\nu = k(h\nu - E_g)^2 \quad (\text{eq. III.1})$$

$\alpha$  : le coefficient d'absorption

$h$  : la constante de Planck

$K$  : une constante qui dépend du matériau

$\nu$ : fréquence de la lumière ( $\nu=c/\lambda$ ), ( $c$ : célérité de la lumière,  $\lambda$ : longueur d'onde)



**Figure III.5 : Energie de gap optique de la curcumine et des composites PHBV/Curcumine**

Echantillons	Energie de gap optique (eV)
PHBV/curcumine 1%	2,660
PHBV/curcumine 3%	2,675
PHBV/Curcumine 5%	2,665
Curcumine	2,670

**Tableau III.1 : Les valeurs estimées des énergies de gap**

### Discussion

La figure III.5 représente la variation de la fonction  $(\alpha h\nu)^2$  en fonction de l'énergie selon la loi de Tauc, par extrapolation linéaire de cette fonction sur l'axe des abscisses, les valeurs de l'énergie de gap de la curcumine et des composites sont estimés et portés sur le tableau. III.

D'après ces résultats, la curcumine possède une énergie de gap optique d'environ 2,67 eV et l'incorporation de cette molécule dans la matrice polymérique n'a presque pas d'effet sur la valeur du gap optique. Un résultat similaire est trouvé lors de l'incorporation du  $\text{TiO}_2$  dans une matrice à base de curcumine et de paracétamol [4].

### III.5. Résultats de l'activité antibactérienne :

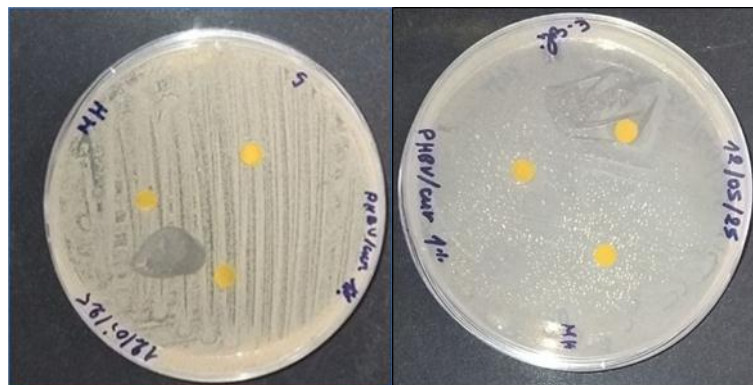
L'évaluation de l'activité antibactérienne a été réalisée en utilisant la méthode des disques sur différents échantillons : le film PHBV pur, le film composite PHBV / curcumine, PHBV / curcumine/  $\text{TiO}_2$ , la curcumine seule, ainsi que deux antibiotiques, l'amoxicilline-acide clavulanique (AMC) et la ciprofloxacine (CIP), pris comme témoins positifs. Les essais ont été menés contre deux souches bactériennes, *Escherichia coli* (Gram -) et *Staphylococcus aureus* (Gram +). Les diamètres des halos d'inhibition ont été mesurés en millimètres afin d'évaluer et de comparer l'efficacité des différents traitements.



S.aureus

E. coli

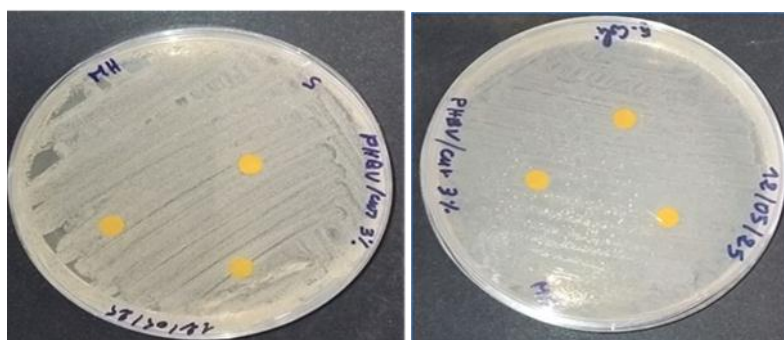
Figure III.6 : Diamètre d'inhibition du film PHBV pur.



S. aureus

E. coli

Figure III.7: Diamètre d'inhibition du film PHBV/Curcumin 1%



S. aureus

E. coli

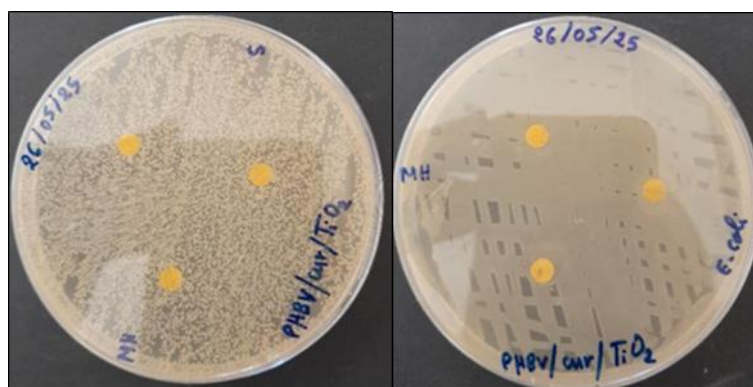
Figure III.8 : Diamètre d'inhibition du film PHBV/Curcumin 3%



*S. aureus*

*E. Coli*

Figure III.9: Diamètre d'inhibition du film PHBV/Curcumine 5%



*S. aureus*

*E. Coli*

Figure III.10: Diamètre d'inhibition du film PHBV/Curcumine/TiO<sub>2</sub>



*S.aureus*

*E. coli*

Figure III.11 : Diamètre d'inhibition du Curcumine pure



*S.aureus*

*E. coli*

Figure III.12 : Diamètre d'inhibition des antibiotiques (AMC et CIP)

Les échantillons	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>
	Diamètre des zones d'inhibition en mm	
PHBV Pure	6	6
PHBV/curcumine 1%	6	6
PHBV/curcumine 3%	6	6
PHBV/curcumine 5%	6	6
PHBV/curcumine/TiO <sub>2</sub>	6	6
Curcumine pure	11.77	12.25
Antibiotique AMC	23.67	18.75
Antibiotique CIP	29.04	40.96

**Tableau III.2 : Diamètre des zones d'inhibition des échantillons sur les deux souches bactérienne.**

**Discussion :**

Les résultats montrent que ni le film PHBV seul, ni ceux contenant de la curcumine à 1%, 3 % ou 5 %, ni même le film enrichi en curcumine et TiO<sub>2</sub>, n'ont présenté d'effet antibactérien mesurable contre *Staphylococcus aureus* ou *Escherichia coli*. Cette absence d'activité peut être expliquée, d'une part, par la faible concentration de curcumine incorporée, qui pourrait être insuffisante pour exercer un effet inhibiteur, et d'autre part, par une libération limitée de la molécule active à partir de la matrice polymérique [10].

La curcumine pure, quant à elle, a montré une activité antibactérienne modérée avec des diamètres de zones d'inhibition de 11,77 mm contre *S. aureus* et 12,25 mm contre *E. coli*, ce qui confirme ses propriétés antimicrobiennes connues [11]. Cependant, son efficacité semble fortement réduite lorsqu'elle est encapsulée dans le PHBV, probablement en raison d'une diffusion limitée et d'une concentration trop faible pour atteindre le seuil d'efficacité.

En comparaison, les antibiotiques AMC et CIP ont généré des zones d'inhibition largement supérieures, confirmant leur haute efficacité. Le CIP, en particulier, a montré une forte activité contre *E. coli* (40,96 mm) et *S. aureus* (29,04 mm), illustrant son large spectre d'action.

En conclusion, bien que la curcumine soit une molécule naturellement active, sa concentration dans le film, combinée à la barrière physique que représente le polymère, ne permet pas une efficacité suffisante dans ce système. Une augmentation de la charge en curcumine ou l'utilisation de techniques favorisant sa libération contrôlée pourrait améliorer les performances antibactériennes des films à base de PHBV [10].

---

**Références**

- 1 Ponjavic, M., Malagurski, I., Lazic, J., Jeremic, S., Pavlovic, V., Prlainovic, N., & Nikodinovic-Runic, J. (2023). *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 1906.
2. Mobaraki, N., & Hemmateenejad, B. (2011). *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 109(2), 171–177.
3. Lu, R., Gan, W., Wu, B. H., Zhang, Z., Guo, Y., & Wang, H. F. (2005). *Journal of Physical Chemistry B*, 109(29), 14118–14129.
4. Bouazza, A., Bassaid, S., Daho, B., Messori, M., & Dehbi, A. (2021). Synthesis and characterization of a composite organic semiconductor (curcumin-paracetamol/TiO<sub>2</sub>). *Polymers and Polymer Composites*, 29(5), 417–426.
5. Xu, Y., Zou, L., Lu, H., & Chen, Z. (2015). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 87(1), 012047.
6. Baleh, H., Bassaid, S., Dehbi, A., Benaouda, A., Bouazza, A., Alsalmé, A., & Messori, M. (2024). Use of curcumin as a sensitizer with ZnO nanoparticles for the visible light photocatalytic degradation of methylene blue. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 137(5), 2827–2845.
7. Baleh, H., Dehbi, A., Bassaid, S., Kabir, L., Alsalmé, A., Colucci, G., & Messori, M. (2025). Characterization of poly(benzaldehyde-co-thiophene) and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) blend: Structural, thermal, and morphological properties. *Polymer Science, Series A*, 1–8.
8. Vergara-Porras, B., Gracida-Rodríguez, J. N., & Pérez-Guevara, F. (2011). *Journal of Polymers and the Environment*, 19, 834–840.
9. Chapi, S., & S, R. (2016). *Ionics*, 22, 803–814.
10. Nasri-Nasrabadi, B., Golestani-Fard, F., & Ebadzadeh, T. (2019). Development of antibacterial biodegradable PHBV nanocomposite films reinforced with curcumin-loaded chitosan nanoparticles. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 2513–2523.

11. Tyagi, P., Singh, M., Kumari, H., Kumari, A., & Mukhopadhyay, K. (2015). Bactericidal activity of curcumin I is associated with damaging of bacterial membrane. PLoS One, 10(3), e0121313.

*Conclusion*  
*générale*

## Conclusion générale

Vue les problèmes environnementaux que rencontre notre planète et la difficulté d'éliminer les déchets domestiques surtout le plastique, l'industrie de l'emballage alimentaire s'intéresse de plus en plus aux matériaux biodégradables

Dans les dernières décennies, l'emballage alimentaire servait uniquement à protéger l'aliment mais de nos jours la recherche s'oriente vers la fabrication d'un emballage qui non seulement contient l'aliment mais en plus il le protège contre les microorganismes, ce qui peut allonger sa durée de vie. Depuis, plusieurs emballages alimentaires qui rassemblent à la fois les propriétés biodégradables et les propriétés biologiques des matériaux qui les constituent sont mis sur marché.

Notre étude est porté sur la préparation de films bionanocomposites à base d'un polymère biodégradable : le PHBV et de de la curcumine.

Tout d'abords les films sont préparés en solution en solubilisant le copolymère dans le chloroforme et des proportions massiques de curcumine de 1%,3 et 5% sont ajoutés.

Ensuite, les films bionanocomposites ainsi que la curcumine et le PHBV pures sont caractérisés par différentes techniques d'analyses à citer : L'IRTF, La DRX, Le MEB et la spectroscopie UV/visibles.

La spectroscopie IRTF, a révélé les bandes caractéristiques du groupement fonctionnel contenu dans la structure chimique du PHBV et de la curcumines. L'incorporation de la curcumine dans les composites n'as pas eu d'impact sur la structure du copolymère pour un taux de 1%, cependant, un changement dans le spectre est observé lorsque le taux de curcumine s'élève à 3 et 5% cela peut être dû à une interaction entre la curcumine et le polymère.

La DRX a confirmé les structures cristallines des deux matériaux déjà connues dans la littérature. Par contre dans les diffractogrammes des composites, on ne trouve que les pics caractéristique de la conformation hélicoïdale lamellaire de la forme  $\alpha$  du PHBV, et on ne

trouve pas ceux de la curcumine, cela est causé par le faible taux de cette dernière dans les composites.

Les images MEB ont révélés une bonne dispersion de la charge dans la matrice polymérique.

La spectroscopie UV/visibles a révélé les propriétés électroniques des matériaux étudiés.

La loi de Tauc a été utilisée afin d'estimer les valeurs de l'énergie de gap optiques et les résultats ont montré que les matériaux ont un caractère semi-conducteur.

L'étude de l'activité antibactérienne des films de PHBV, des composites et d'une solution de curcumine dans le DMSO sur deux souche bactériennes a révélé l'activité antibactérienne du pigment jaune envers les microorganismes, cependant les films n'ont donné aucun effet sur les souches.

#### **Perspectives :**

Compléter ce travail, en augmentant la concentration de la curcumine dans les films bionanocomposites ou utiliser un système tertiaire en renforçant notre système par des métaux (Ag, Or...) ou des oxydes métalliques afin d'améliorer l'activité antimicrobienne de nos films.

Etudier d'autres propriétés comme la traction mécaniques, les propriétés barrières, la biodégradabilité.

## **Résumé**

Ce travail s'intéresse à la mise au point de biocomposites élaborés à partir du poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV) auquel est ajoutée de la curcumine. Pour une éventuelle application de ces matériaux dans l'emballage alimentaire, des films nanocomposites contenant 1 %, 3 % et 5 % de curcumine (en masse), ont été préparés en utilisant la méthode de coulage en solution avec du chloroforme comme solvant. Les films ont été caractérisés par spectroscopie IRTF, DRX, MEB et spectroscopie UV-visible.

La spectroscopie IRTF est utilisée afin de démontrer les groupements fonctionnels présents dans les matériaux préparés. La diffraction des rayons X (DRX) a confirmé la structure cristalline des matériaux. L'analyse par MEB a montré une bonne dispersion de la charge dans la matrice polymérique.

Enfin, les essais de l'activité antibactérienne menés sur *Escherichia coli* et *Staphylococcus aureus* en utilisant les films sous formes de disques n'ont pas montré d'effet significatif sur ces bactéries. Cependant les deux bactéries de gram positif et de gram négatif s'avèrent sensibles à solution de la curcumine dans le DMSO.

## **Mots-clés :**

Biocomposite, poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate) (PHBV), curcumine, emballage alimentaire, films

## **Abstract**

This work focuses on the development of biocomposites made from poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) to which curcumin is added. For potential application of these materials in food packaging, nanocomposite films containing 1%, 3%, and 5% curcumin (by mass) were prepared using the solution casting method with chloroform as a solvent. The films were characterized by FTIR, XRD, SEM, and UV-visible spectroscopy.

FT-IR spectroscopy was used to disassemble the functional groups present in the prepared materials. X-ray diffraction (XRD) confirmed the crystalline structure of the materials. SEM analysis showed good filler dispersion in the polymer matrix. Finally, antibacterial activity tests conducted on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* using disc-shaped films did

not show any significant effect on these bacteria. However, both Gram-positive and Gram-negative bacteria were found to be sensitive to the solution of curcumin in DMSO.

**Key words:**

Biocomposite, poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV), curcumin, food packaging, films.

**ملخص**

يركز هذا العمل على تطوير المركبات الحيوية المصنوعة من بولي (3-هيدروكسي بوتيرات-كو-3-هيدروكسي فاليرات) (PHBV) الذي يضاف إليه الكركمين. للتطبيق المحتمل لهذه المواد في تغليف المواد الغذائية، تم تحضير أغشية مركبة نانوية تحتوي على 1%، 3%، و5% كركمين (بالكتلة) باستخدام طريقة صب المحلول مع الكلوروفورم كمذيب .

FTIR وXRD وSEM والأشعة فوق البنفسجية المرئية تميزت الأفلام بالتحليل الطيفي

تم استخدام التحليل الطيفي FT-IR لتفكيك المجموعات الوظيفية الموجودة في المواد المحضرة. أكد حيود الأشعة السينية (XRD) التركيب البلوري للمواد. أظهر تحليل SEM تشتتاً جيداً للحشو في مصفوفة البوليمر. وأخيراً، فإن اختبارات النشاط المضاد للبكتيريا التي أجريت على الإشريكية القولونية والمكورات العنقودية الذهبية باستخدام أفلام على شكل قرص لم تظهر أي تأثير كبير على هذه البكتيريا. ومع ذلك، وجد أن البكتيريا إيجابية الجرام وسلبية الجرام حساسة لمحلول الكركمين في ثنائي ميثيل سلفوكسيد.

**الكلمات المفتاحية:** مركب حيوي، بولي (3-هيدروكسي بوتيرات-كو-3-هيدروكسي فاليرات)

(PHBV)، الكركمين، تغليف المواد الغذائية، الأفلام.