

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Biologie



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Biochimie
Domaine : Sciences de la nature et de la vie
Filière : Sciences Biologiques
Spécialité : Biochimie
Thème

Etude et synthèse de membrane cellulosique dopée pour la dépollution de l'eau

Présenté Par :

- 1) Melle BOUNOUARA FATIMA ZAHRA
- 2) Melle HESSAINE ILHAM
- 3) Melle SAHRAOUI MAYSSA

Devant le jury composé de :

Dr Mme BENTABET	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr M. BENNABI	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Mme BOUCHENAK KHELLADI	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Mme BENHABIB	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements à ALLAH qui nous a donné la force et la volonté de mener à bien ce mémoire.

Nos remerciements vont également à Dr. N. BOUCHENAK-KHELLADI et à Dr. O. BENHABIB respectivement enseignants-chercheurs à l'Université Belhadj Bouchaib de Ain Temouchent pour leur soutien tout au long de l'élaboration de ce mémoire et pour leurs précieux conseils.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux ingénieurs du laboratoire de l'Université d'Ain Temouchent pour nous avoir permis de réaliser nos expériences dans leurs locaux.

Nous tenons à remercier chaleureusement Dr. F. DERGAL du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyse Physico-Chimique (C.R.A.P.C), Laboratoire de Catalyse et Synthèse en Chimie Organique (L.C.S.C.O) Université de Tlemcen ainsi que Dr. A. CHIALI, enseignant-chercheur à l'Ecole supérieure en sciences appliquées de Tlemcen et chercheur associé à l'URMER, Université de Tlemcen pour l'accueil remarquable réservé lors de notre visite au laboratoire de recherche à l'Université de Tlemcen. Nous remercions aussi, Mr. M. BELLAOUI, pour les caractérisations MEB à l'Université de Tlemcen

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à Dr.N. BENTABET et à Dr. F. BENNABI respectivement enseignants-chercheurs à l'Université Belhadj Bouchaib de Ain Temouchent pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire de fin d'études.

Résumé

Les membranes cellulosiques, produites par des bactéries, constituent une solution écologique innovante pour la filtration de l'eau. Issues de la fermentation du vinaigre de cidre de pomme, ces membranes possèdent des propriétés uniques telles qu'une grande pureté, une haute porosité et une résistance mécanique notable. Elles éliminent efficacement les particules fines et les contaminants microbiens, les rendant prometteuses pour les systèmes de traitement de l'eau. La fabrication de ces membranes nécessite un milieu contenant du vinaigre de cidre de pomme, du sucre et du jus de pomme comme source de carbone et d'oxygène. Après l'agitation des solutions, les bactéries sont séparées et identifiées comme étant de type *komagataeibacter xylinus*. L'étude évalue également le pouvoir de filtration des membranes renforcées par des particules d'oxyde de zinc, connues pour leurs propriétés antimicrobiennes et leur capacité à améliorer la durabilité des membranes. L'efficacité de ces membranes composites pour la purification de l'eau est analysée en mesurant la capacité de rétention des particules, le flux de perméation et la résistance au biofouling. Des techniques comme le spectromètre Raman et le microscope électronique à balayage sont utilisées pour examiner la composition et les propriétés morphologiques des membranes. L'analyse des pics Raman confirme les liaisons chimiques caractéristiques de la cellulose. Les tests d'absorbance des solutions de bleu de méthylène, avant et après filtration avec des membranes saturées en oxyde de zinc, montrent une capacité de filtration élevée. Ces études confirment le potentiel d'utilisation des membranes cellulosiques pour des applications avancées de purification de l'eau.

Liste des figures

Figure	Titre	pages
Figure 01	Les spectres des différentes membranes de filtration synthétiques	08
Figure 02	La molécule de cellulose native	11
Figure 03	Les différents milieux de culture pour la fabrication de la cellulose bactérienne	18
Figure 04	Modèle de structure de l'oxyde de zinc (a) de la blende de zinc (b) de la wurtzite (c) du sel gemme	21
Figure 05	Les trois solutions de vinaigre de pomme après l'agitation	29
Figure 06	Observation des colonies présentes dans les différentes solutions de vinaigres de pommes	29
Figure 07	Observation des colonies présentes dans le vinaigre de pomme sans sucre	30
Figure 08	L'apparition de la membrane cellulosique dans la solution 3	30
Figure 09	L'apparition de la deuxième génération	31
Figure 10	Images MEB à des grossissements différents (x3.0k, x8.0k, et x4.0k) des membranes cellulosiques issues de mères de vinaigre de pomme.	32
Figure 11	Spectre Raman des membranes cellulosiques issues de la mère de vinaigre de pomme	33
Figure 12	L'absorbance de la solution de bleu de méthylène avant et après filtration	34
Figure 13	La congruence morphologique entre les colonies obtenues et les <i>K xylinus</i>	38
Figure 14	Le mécanisme de la biosynthèse de la cellulose bactérienne chez les <i>komagataeibacter</i>	41
Figure 15	Les liaisons hydrogènes entre les groupes hydroxyles au sein d'un biofilm	42

Liste des figures en annexe

figure	titre	pages
Figure A1	Microscopie à balayage électronique (MEB)	53
Figure A2	Spectroscopie Raman.	54
Figure A3	Préparation de la solution de bleu de méthylène avec différentes concentrations.	
Figure A4	Lavage de la membrane biocellulosique dopée ZnO avant début du test avec de l'O.D.I	
Figure A5	Montage (placement) de la membrane biocellulosique dopée ZnO, sous vide.	

Liste des tableaux

tableaux	titres	pages
Tableau 01	Les différentes formes de pollution résultant d'une source ponctuelle	04
Tableau 02	La différence entre les membranes de filtration synthétiques	08
Tableau 03	Les souches bactériennes productrices de la cellulose bactérienne	13
Tableau 04	Les différentes propriétés d'oxyde de zinc	21
Tableau 05	Les mesures pour la préparation des trois solutions	24
Tableau 06	Caractéristiques de fonctionnement de la spectroscopie Raman	33
Tableau 07	Caractéristiques des différentes sous unités du complexe cellulose bactérienne synthèse	39

Table des abréviations

%	pourcentage	A	Absorbance
CB	Cellulose bactérienne	h	Heure
ZnO	Oxyde de zinc	GN	Gélose nutritive
ZnO-NP	Nanoparticuled'oxyde de zinc	PGM	Phosphoglucomutase
CO₂	Dioxyde de carbone	G-1-P	Glucose-1-phosphate
CP	Cellulose végétale	UTP	Uridine triphosphate
L'ACV	Vinaigre d'acide de cidre	UDPG	Uridine-5'-phosphate- α -D-glucose
K.xylinus	Komagataeibacter xylinus	CBs	Cellulose bactérienne synthèse
Cel+	Souche productrice	c-di-GMP	Acide diguanylique cyclique
Cel-	Souche non productrice	3D	Tridimensionnel
UV	Ultra violet		
Mg	Milligramme		
g	gramme		
S1, S2, S3	Solution 1, solution 2, solution 3		
S3'	Solution à partir de laquelle la membrane est fabriquée		

SOMMAIRE

Introduction	1
Synthèse bibliographique	3
I. La pollution d'eau	3
1. Généralités sur la pollution d'eau :	3
2. Les différentes techniques de dépollution de l'eau :	5
II. Filtration membranaire :	7
1. Traitement par membrane synthétique :	7
2. Traitement par membranes non synthétique :	10
5. Applications et utilisations des biomembranes cellulosiques :	17
6. Méthode de Production de la cellulose bactérienne dans laboratoire :	18
III. Le dopage par l'oxyde de zinc :	20
1 Généralité sur l'oxyde de zinc :	20
2 Structure cristallographique d'oxyde de zinc :	20
3. Effet de l'oxyde de zinc sur la membrane de cellulose :	22
IV. Etude du pouvoir de filtration des membranes cellulosiques :	23
Matériels et méthodes	24
1 Préparation des solutions pour obtenir la membrane cellulosique bactérienne : .	24
2 L'activité microbienne :	25
3 Observation de la membrane par microscopie à balayage électronique (MEB) :	25
4. Observation par spectroscopie Raman :	26
5. Montage expérimental :	27
5.1 Préparation de la Solution Colorée :	27
5.2 Installation du Dispositif de Filtration :	27
5.3. Procédure de Filtration :	27
5.4. Analyse de l'Efficacité de la Filtration :	27
Résultat	28

1. Résultats de l'activité microbienne :	28
2. L'apparition de la membrane cellulosique :	29
3. Résultat de l'analyse de la membrane cellulosique par microscopie électronique à balayage :	31
4. Résultat de l'analyse par spectroscopie Raman de la membrane cellulosique : ..	32
5. Les courbes d'absorbance de bleu de méthylène :	33
Discussion	34
1. Le rôle de la température dans la fabrication de cellulose bactérienne :	34
2. Le rôle d'oxygène dans la fabrication de la membrane cellulosique :	35
3. L'identification des souches bactériennes présentes dans les solutions de vinaigre :	36
3.1 L'identification des colonies selon des critères morphologiques des colonies :	36
4. La régulation de la production de la cellulose bactérienne par des bactéries	
<i>Komagataeibacter</i> :	37
5. Caractérisation des échantillons de membranes cellulosique neutre par MEB :	41
6. Interprétation de spectre RAMAN de la membrane cellulosique :	43
Conclusion générale	46
Référence bibliographique	47
Annexe	53

Introduction

L'eau occupe une place cruciale dans notre vie quotidienne ainsi que dans les domaines du développement social et économique. La croissance démographique mondiale et d'autres facteurs entraînent une consommation d'eau toujours plus importante. Par conséquent, le pourcentage d'eau polluée ne cesse d'augmenter (<https://www.nrdc.org>).

Ces facteurs provoquent une pénurie d'eau, rendant essentielles les stations d'épuration équipées pour traiter l'eau via divers processus afin d'éliminer les polluants. Le type et la taille des polluants déterminent le traitement nécessaire (captage, dégrillage, tamisage, etc.). Parmi ces polluants, les micropolluants représentent un obstacle particulièrement dangereux et difficile à éliminer en raison de leur petite taille et de leur potentiel pathogène (<https://infoterre.brgm.fr>).

La technologie des membranes est l'une des solutions les plus prometteuses pour éliminer ces micropolluants. Les membranes de cellulose bactérienne (CB) sont une alternative inoffensive et efficace aux membranes synthétiques souvent utilisées. Découverte par Adrian J. Brown en 1886, la CB est produite par plusieurs espèces de bactéries. Composée de fibres fines et disposée en rubans tridimensionnels, elle offre une géométrie poreuse et une haute résistance mécanique. Elle possède une cristallinité supérieure à celle de la cellulose végétale (80-90%) et une capacité d'absorption de l'eau remarquable, en plus d'une biocompatibilité accrue. Ces qualités en font un matériau attractif pour les domaines médical, pharmaceutique et biotechnologique (**Mansoori, 2020**).

Cependant, la CB seule ne suffit pas comme membrane de filtration, car elle est susceptible de se fissurer et de se rompre. Il est donc nécessaire de la combiner avec d'autres matériaux pour améliorer ses propriétés. Grâce à ses nombreux groupes hydroxyles, la CB peut être associée à des matériaux tels que l'oxyde de zinc (ZnO), qui s'est avéré être un excellent matériau de support (**Farooq, 2020 & Wasim, 2021**).

L'oxyde de zinc (ZnO) est un matériau inorganique polyvalent, grâce à ses caractéristiques physiques et chimiques uniques. Il offre une grande stabilité chimique, un large spectre d'absorption des radiations, un coefficient de couplage électrochimique élevé et une stabilité élevée. Le ZnO est largement utilisé dans divers produits commerciaux et additifs, notamment en raison de leurs capacités antibactériennes (**Farooq, 2020 & Wasim, 2021**).

Introduction

La polymérisation et la cristallinité unique confèrent des propriétés physico-chimiques intéressantes aux membranes de CB dans l'absorption de certains types des micropolluants.

Les membranes cellulosiques font toujours partie des sujets de recherche scientifique qui soulèvent la question dans le domaine de la biotechnologie, alors leurs capacités à éliminer les micropolluants est-elle efficace ? et l'ajout de certains matériaux comme ZnO, l'aide-t-il à augmenter leurs idéalités ?

Synthèse bibliographique

I. La pollution d'eau

1. Généralités sur la pollution d'eau :

Au début du siècle dernier, l'eau potable était pu consommer, mais au fil du temps, et plus particulièrement après la dernière guerre mondiale le développement économique et la distribution d'eau potable dans toute les domiciles et aussi le doublement en besoin d'eau ont conduit à une augmentation de la quantité d'eau polluée, équivalente à 150 litres par jours. Notamment, la pollution d'eau est le résultat d'une détérioration des propriétés physique, chimique biologique et bactériologique de l'eau en raison des substances nocives qui sont souvent des produits chimiques ou des micro-organismes qui se déposent dans les plans d'eau, ces substances dégradent la qualité de l'eau (<https://www.nrdc.org>).

Ce problème répandu de pollution de l'eau constitue une menace pour notre santé. Le taux de mortalité dû à une eau insalubre est plus élevé que tous les autres crimes violents réunis. De plus, nos sources d'eau douce diminuent : seulement 1 % de l'eau mondiale nous est accessible

La pollution de l'eau peut être globalement classée en trois types principaux:

- La pollution bactériologie
- La pollution chimique
- La pollution par les déchets aquatiques

Les sources des pollutions de l'eau :

Il existe plusieurs sources de pollution de l'eau, elles peuvent être regroupées en deux catégories :

- **Sources ponctuelles:** la pollution ponctuelle est causée par une zone limitée, petite par rapport aux eaux souterraines ou à d'autres zones liées à l'eau (<https://www.nrdc.org>).

Synthèse bibliographique

Tableau I. Les différentes formes de pollution résultant d'une source ponctuelle (<https://www.nrdc.org>).

	Source ponctuelle	
	Pollution industrielle	La pollution liée aux transports maritime:
Pollution domestique		
C'est associé aux émissions d'eaux usées. Celle-ci peut provenir de l'eau polluée provenant des usages quotidiens de l'eau (toilettes, cuisine et douches) ou de composés chimiques présents dans les produits ménagers qui sont nocifs pour l'environnement	L'industrie produit différentes pollutions selon le secteur dans lequel elle est impliquée. Les produits chimiques rejetés peuvent être des hydrocarbures ou des PCB, produits par les industries ou rejetés par les plans d'eau.	Pollution chimique des masses d'eau causée par le transport maritime par Déversements d'hydrocarbures

- **Sources diffuses :** provient d'une variété de lieux non spécifiés notamment l'agriculture, Elle provient de l'utilisation de pesticides et d'engrais sur les terres agricoles, ce qui entraîne une contamination chimique qui pénètre dans le sol et atteint les eaux souterraines (<https://www.nrdc.org>).

L'eau polluée résultant des utilisations humaines est connue sous le nom d'eaux usées et elle divise en deux catégories l'eau grise comme l'eau prévenant de la vaisselle et l'autre type connue sous le nom d'eau noir qui contient divers polluants comme les matières fécales par exemple, il est plus pollué que l'autre type car les polluants qu'il contient sont difficile à éliminer. La pollution d'eau a plusieurs effets négatifs sur l'environnement, au point qu'il

Synthèse bibliographique

considérée comme une menace pour l'environnement. Elle peut provoquer ce que l'on appelle l'eutrophisation, qui met en danger les organismes aquatiques et entraîne leur mort, elle a un impact direct sur le sol et nuit ainsi à la croissance des plantes et des cultures agricoles et aussi sur la santé humaine elle constitue l'une des principales causes de la propagation des maladies telles que le choléra et d'autres, les statistiques ont confirmé que de nombreux décès sont dus à l'empoisonnement de l'eau potable (<https://www.nrdc.org>).

En raison des effets néfastes potentiels de la pollution de l'eau sur la santé humaine et l'environnement, le traitement de l'eau est crucial pour garantir la santé publique et préserver l'environnement. Le traitement de l'eau permet d'éliminer ces contaminants et de rendre l'eau potable et contribuant à la protection des espaces animales et végétales, il existe de nombreuses techniques de traitement d'eau, et chaque technique que nous utilisons après avoir étudié et reconnu le type de pollution que nous avons doit être adaptée et nous donner un bon résultat avec le moins d'inconvénients possible (<https://infoterre.brgm.fr>).

2. Les différentes techniques de dépollution de l'eau :

En raison de la grande pollution et leurs différentes sources, les spécialistes de domaine ont conçu une station de la dépollution d'eau qui réalise l'élimination des particules polluantes grâce au passage par plusieurs techniques chaque technique a sa propre propriété de séparation (chimique, physico-chimique, physique, biologique).

Un traitement physique basé sur l'implication de la force de gravité Soit par la sédimentation de tous qui est lourde Ou bien par la flottation de tous qui est légère les particules flottées et sédimentées sont éliminées par certaines barrières physiques (<https://infoterre.brgm.fr>).

Un traitement physico-chimique basé sur l'utilisation des réactifs chimiques qui permis le changement de l'état en suspension de certains polluants et devient en amas (<https://infoterre.brgm.fr>).

Un traitement chimique c'est un traitement de désinfection.

Synthèse bibliographique

Un **traitement biologique** basé sur l'utilisation de certains micro-organismes-t-elle que les bactéries aérobies et anaérobies afin de décomposer les polluants pour répondre à ses besoins nutritionnels (transformation des polluants en CO₂) (<https://infoterre.brgm.fr>).

Ces traitements se déroulent dans les différentes étapes de la dépollution de l'eau

1. **Captage** : avant de commencé les étapes de traitement il faut réaliser le prélèvement de l'eau polluées à partir de sa source.
2. **Dégrillage** : c'est une technique physique basée sur l'utilisation d'une grille comme une barrière physique pour l'élimination des polluants flottés.
3. **Tamissage** : c'est une technique physique l'élimination des polluants qui non pas été éliminés lors de dégrillage, cette étape se fait par des tamis aux mailles.
4. La Coagulation, floculation, décantation : des techniques physico-chimiques
 - **Coagulation** : l'ajoute d'un coagulant sur l'eau pour assure l'assemblage des particules en suspension sous forme des amas solides (coagulant modifier les charges des particules en suspension) (<https://infoterre.brgm.fr>).
 - **Floculation** : la formation des flocs à partir de la condensation des micro-flocs ce phénomène et réaliser par l'agitation.
 - **Décantation** : la sédimentation des flocs les plus dense que l'eau.
5. **Filtration** : permis les techniques physique, utilisé lors d'un filtrage mécanique de certaines particules indésirables dans l'eau (des huiles, particules en suspension, micro-organismes...) cette séparation se fait par une membrane (<https://infoterre.brgm.fr>).
La porosité à son tour joue un rôle important dans la détermination de la perméabilité des membranes, à l'aide de ces critères on peut classer les membranes de la filtration en plusieurs classes (microfiltration, ultrafiltration, nano filtration, osmose inverse) (<https://infoterre.brgm.fr>).
6. **Désinfection ozonation** : l'utilisation des techniques chimiques (ultraviolet) a pour but de l'identification des différents micro-organismes pathogènes.
7. **Traitement spécifique** : l'élimination des micro-organismes et l'amélioration des qualités organoleptiques de l'eau.

Synthèse bibliographique

8. **Chloration** : permis les traitements chimiques, assurer la préservation de l'eau avec une bonne qualité par l'ajout de chlore.
9. **Stockage** : une fois l'eau devient potable, elle est stockée dans des réservoirs puis acheminées vers les habitations.

Le traitement approprié des eaux polluées est choisi selon le type des polluants présents, de leurs concentrations, et de leurs tailles. En cas de la présence des micropolluants tels que les bactéries et les virus, etc., c'est-à-dire que nous parlons de la situation où l'eau est exposée à une contamination microbologique qui est la première responsable de la transmission de plusieurs maladies chez l'être humain comme le choléra, la diarrhée, poliomyélite, fièvre, typhoïde, les scientifiques ont choisi s'appuyer sur la nanotechnologie afin de créer des membranes qui aident à absorber et à éliminer toutes les causes de la contamination microbienne à l'échelle nanométrique et à garantir la salubrité de l'eau potable.

II. Filtration membranaire :

La technique de filtration par membrane : est une méthode de purification de l'eau qui utilise des membranes spéciales et qui réalise la séparation entre deux milieux et agit pour éliminer les matières indésirables, de sorte que plus le type de matériaux à éliminer diffère, plus que le type de membrane utilisée varie ça veut dire la gamme d'utilisation détermine le type de membrane utilisée. Dans notre étude ces membranes fonctionnent comme un filtre pour éliminer les déchets et les produits chimiques de l'eau. Pour une eau propre. Généralement les membranes différentes les unes des autres selon plusieurs critères morphologiques (la structure des membranes, la taille des pores, texture des membranes...) et des propriétés physicochimiques (capacité d'adsorption, les propriétés d'usage comme la sélectivité et la perméabilité), ces deux facteurs sont importants pour la classification entre les types des membranes (Algieri, 2022).

La purification membranaire est une technique populaire dans le domaine du traitement de l'eau. Le traitement de l'eau sur la membrane est divisé en deux catégories principales:

1. Traitement par membrane synthétique :

La technologie des membranes permis les procédés physiques de purification d'eau qui relie entre la purification membranaire et la technologie à l'échelle nanométrique ou bien

Synthèse bibliographique

la nanotechnologie comme nous savons l'eau regorge de petits polluants qui peuvent provoquer des maladies nocives pour la santé humaine et qui doivent être éliminés lors de processus de potabilisation ou bien dans la réutilisation d'eau. La technologie membranaire est la solution la plus appropriée pour se débarrasser de ces matières indésirables, cette technologie combine

Entre les diverses techniques de séparations par membranes dans ces procédés le principe est constant, de sorte que l'eau contaminée passe à travers la membrane. La porosité membranaire à son tour joue un rôle important dans la détermination de la perméabilité des membranes et donc dans la rétention des polluants, à l'aide de ses critères on peut classer les membranes de filtration en plusieurs classes (microfiltration, ultrafiltration, nano filtration, osmose inverse) (<https://medium.com>).

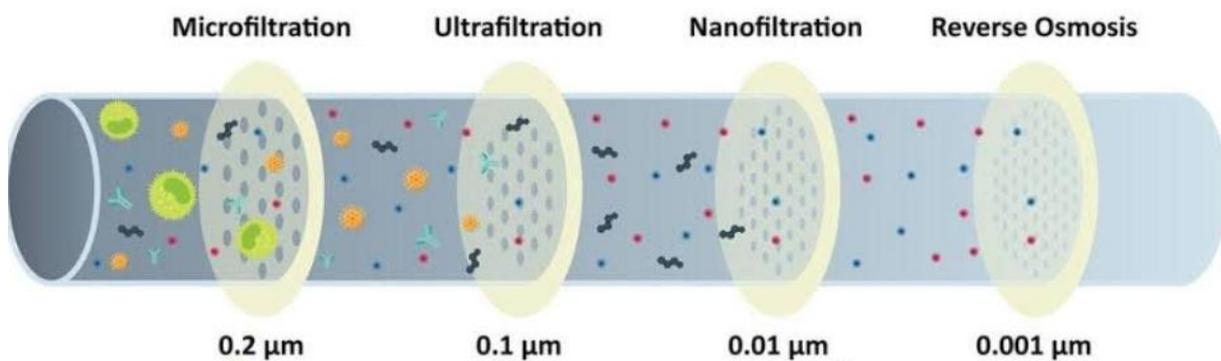


Figure 1 : représente le spectre des différentes membranes de filtration synthétiques (<https://medium.com>).

Dans le cas de la purification d'eau, la membrane est une barrière physique synthétique qui est structurée de manière poreuse avec des pores qui varient d'une membrane à l'autre.

Tableau II. La différence entre les membranes de filtration synthétiques (<https://medium.com>).

Les types des membranes	microfiltration	ultrafiltration	nano filtration	Osmose inverse
La taille des pores	0.1 micromètre	0.01micromètre	0.001micromètre	0.0001micromètre
Les particules à séparer	Les bactéries Colloïdes Globules rouge	Virus Les macromolécules organiques	Composés organique Sels dissoutes	Petits minéraux H2O

Synthèse bibliographique

Les recherches accrues que la fabrication des membranes se fait soit par :

1.1 Des polymères organiques : sont des macromolécules constituées de plusieurs monomères ou bien une répétitions d'un motif ces derniers sont liées les uns entre les autre par des liaisons covalentes. Généralement sont d'origine naturel (des végétaux, des micro-organismes, des animaux) permis les polymères organiques utilisées lors de

La fabrication des membranes de purification on a la cellulose, la chitine. Pour la fabrication des tissus membranaires efficace pour le traitement des eaux usées, les spécialistes de domaines découvert le potentiel important de ces polymères après leurs modifications à l'échelle industriel (polymères organique synthétique) dans l'ajustassions de la structure poreuse a but de l'efficacité de la séparation en terme de la sélectivité (**koon, 2013**).

La membrane partage à la fois une structure poreuse qui garantit le blocage de certains impuretés et à la fois une surface sélective (une couche de revêtement qui caractérisé par leur sélectivité) qui assure l'adsorption des polluants difficiles à séparer par les membranes de filtration seulement ,ces deux caractéristiques de sélectivité et de la perméabilité représentent un risque de l'accumulation des polluants dans la surfaces entraine un encrassement des pores et donc même l'eau qui doit travers la membranes ne passe pas et reste inclus avec le retentât(réduction de flux).En fait ce phénomène aboutir à la diminution de la quantité et de la qualité de perméat (**Mansoori, 2020**).

1.2 Des matériaux inorganiques : Les membranes inorganiques sont composées de matériaux inorganiques, tels que le carbone, le métal fritté, l'oxyde métallique, tel que l'alumine, le dioxyde de titane et le dioxyde de zirconium (<https://www.siva-unit.com>).

Elles permettent également la séparation de substances et/ou particules, à leur capacité à éliminer un large éventail de contaminants et qu'ils sont plus résistants aux températures élevées, ce qui les rend aptes à être utilisés dans des conditions difficiles telles que les environnements corrosifs et les températures élevées (<https://www.siva-unit.com>).

Cependant, ils présentent des inconvénients tels que leur coût plus élevé, le manque de biodégradables, leur rigidité et leur fragilité.

Synthèse bibliographique

Malgré l'efficacité de la technologie des membranes mais elle comporte plusieurs risques, d'autant plus qu'elle est nocive pour la santé humaine ces raisons ont poussé les chercheurs à rechercher une solution plus adaptée en termes d'idéalité de filtration et en termes de sécurité humaine, jusqu'à ce qu'il aboutissent à une étude qui tourne autour de la fabrication d'une membrane 100% naturelle ce qui ne laisse pas et ne laissera aucun résidu nocif dans l'eau après avoir filtrer l'eau (<https://www.siva-unit.com>).

Les systèmes de filtration membranaire sont développés pour être efficaces, durables et techniquement rentables afin de prévenir les effets toxiques des polluants. Étant donné que les membranes polymères synthétiques actuellement utilisées ne sont pas biodégradables, l'utilisation de matériaux polymères biodégradables devrait être envisagée pour éviter la contamination secondaire, ce qui signifie l'utilisation de membranes en biopolymères naturels.

2. Traitement par membranes non synthétique :

Afin de filtrer l'eau de tout ce qui est de taille nanométrique, nous avons renoncé à tout ce qui touche aux membranes artificielles et nous sommes tournés vers un autre type de membrane.

Fabriquées de manière traditionnelle, Il s'agit d'une membrane naturelle, sa production est donc libre de l'intervention du côté industriel.

La membrane cellulosique a été choisie comme un candidat important pour les traitements des eaux usées c'est parce qu'elle aide à séparer de l'eau tous les composants de taille nanométrique plus précisément, il s'agit d'une structure de haute qualité constituée de nombreuses unités de cellulose ramifiée entre eux de manière qui conduit à la présence des pores avec des tailles précises l'aident dans ce processus de purification. Cette membrane est constituée d'un polymère de carbone actif (cellulose) qui proviennent relativement d'organismes Vivant, ces membranes sont généralement biodégradables et biocompatibles, renouvelable, ce qui signifie qu'elles ne présentent aucun risque pour la santé humaine et l'environnement (**Mansoori, 2020**).

Synthèse bibliographique

2.1 Cellulose native :

Notamment, la cellulose c'est un biopolymère naturel et un composant organique, le plus abondants sur notre planète, il s'agit d'un polysaccharide composé de molécule de glucose liées entre elles par une liaisons glycosidiques pour former une chaine, elle présente de nombreux avantages qui nous servent dans notre étude comme leur adsorption efficace et leur caractère Biodégradable avec leur structure qui contient des groupes fonctionnels hydroxyles(OH) qui donne l'intégrité a la chaine cellulosique(Moniri, 2017).

La première découverte de cellulose a été en 1938 par le chimiste Anselme Payen, Nous pouvons extraire de cellulose native à partir de plusieurs sources comme les ressources végétale (cellulose végétale)ou bien les agro déchets c'est parce que la cellulose considéré comme un composant principale de la paroi cellulaire de certaine plante (peau de banane, la balle de riz, la balle de maïs, la balle de grain de café, la balle d'orge...) ou bien a partir des ressources bactérienne (cellulose bactérienne), il faut aussi noter que l'on peut obtenir de la cellulose d'un d'origine animal. Les deux homologues de cellulose ils ont la même formule brute($C_6H_{10}O_5$) dont le motif monomère est le cellobiose avec une formule chimique de ($C_{12}H_{22}O_{11}$) aussi il existe des liaisons faibles de type hydrogène s'établissent entre les groupes hydroxyles qui conduit à la création d'une fibre de la cellulose (Moniri, 2017).

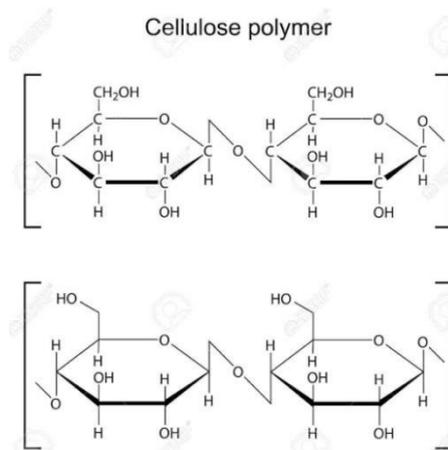


Figure 2 : la molécule de la cellulose (<https://fr.123.com>).

Synthèse bibliographique

Malgré que la quantité de cellulose d'origine végétale produite naturellement est estimée entre 100 et 150 milliards de tonnes dans le monde et que cette quantité est suffisante pour fabriquer des produits bioraffinerie non nocives pour l'environnement et utilisées comme alternative aux produits pétro-raffineries, la cellulose d'origine bactérienne (CB) connue sous le nom nanocellulose bactérienne ou bien la cellulose microbienne est considérée comme une alternative 100 fois meilleure que la cellulose végétale en terme de l'efficacité, et c'est la point de vue des deux scientifique yang et al qui expliquent la différence entre le CB et le CP qui confirme la validité de leur point e vue. Premièrement, ils concluent que la cellulose végétale n'est pas pure 100% car on la trouve liée à l'hémicellulose aussi avec lignine et la pectine et d'autres impuretés dans les parois des végétaux et pour l'obtention de CP pure elle est traitée par des traitements qui utilises des produits chimiques nocives (traitement alcalin et acide) contrairement aux CB qui sont très pures n'ont pas liées avec d'autre polysaccharide comme lignine et l'hémicellulose de plus le CB possède une nanostructure unique ayant des caractéristiques et des propriétés très excellente, ils ont également mentionnés la grand capacité de rétention d'eau et de la polymérisation et de la résistance mécanique a la traction chez les CB de sorte que le degré de ces deux derniers dans la cellulose végétale est faible par rapport au CB (Moniri, 2017).

2.2 Cellulose bactérienne :

En fait, la cellulose bactérienne c'est une biopolymère linéaire hautement cristallin de glucose qui constitue un centre d'attention plus que le CP, BC est constitué de micro fibrilles ne contenant pas de lignine et d'hémicellulose. Ces micro fibrilles sont disposées sous la forme d'un ruban tridimensionnel, ce qui lui confère une géométrie mécanique supérieure à celle de la cellulose végétale. Les micro fibrilles ce sont les composants les plus abondant de cellulose bactérienne et les plus important parce qu'ils donnent des propriétés a ce dernier et faites-en comme un filtre capable de filtrer et d'absorbe les micro-organismes de l'eau (Augimeri, 2015).

La CB se trouve dans plusieurs micro-organismes comme les algues et les champignons et les bactéries et chez les espèces sous-marines. C'est un polymère polysaccharidique naturel,

Synthèse bibliographique

Les études ont confirmé la possibilité de fabriquer de la cellulose par des bactéries et non photosynthétique, notamment par certaines genres de bactérie a gram négatif comme *Komagataeibacter xylinus*, *Agrobacterium*, *Rhizobium*, *asaia*, *Chromobacterium*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Salmonelle*, *Pseudomonas*, *dickeya* (Augimeri, 2015)

Tableau III. Les souches bactériennes productrices de la cellulose bactériennes (Augimeri, 2015).

Class	Order	Family	Genus	Host
α- proteobacteri a	Rhizobiales	Rhizobiaceae	Agrobacterium	plant
			Rhizobium	plant
		Acetobacteriaceae	Komagataeibacte r	plant
β- proteobacteri a	Neisseriales	Chromobacteriaceae	Chromobacteriu m	animal
			Asaia	animal
γ- proteobacteri a	Enterobacteriales	Enterobacteriaceae	Enterobacter	Plant/anima l
			Escherichia	Plant/anima l
			Salmonelle	Plant/anima l
			Dickeya	plant
Vibrionalesd	Pseudomonadale s	Pseudomonadaceae	Pseudomonas	Plant/anima l
		Vibrionaceae	Aliivibrio	animal

Synthèse bibliographique

Au cours des 15 dernières années, les *komagataeibacter-xylinus* (anciennement *Glucanacetobacter-xylinus*) sont des alfa-proteobacteria de la famille des bactéries acétiques considérés comme des micro-organismes modèles pour la fabrication de CB en raison de la production d'un taux élevée et acceptable de la CB par ce genre de bactérie. Sont des bactéries acétiques capables d'oxyder et de transformer le sucre, les alcools de sucre, les alcools et les aldéhydes en acide acétique (Augimeri and Varley, 2015).

Les bactéries de genre *Komagataeibacter-xylinus* sont des bactéries aérobies à gram négatif en forme de bâtonnet et sont considérés comme des micro-organismes probiotiques c'est-à-dire qu'ils peuvent être consommés par l'être humain car ils contiennent de nombreux bienfaits bénéfiques pour la santé humaine, parmi les avantages de cette bactérie que l'on peut citer le fait qu'elle utilisée pour perdre du poids chez les patients obèses et qu'elle est

Également considérée comme un traitement pour le diabète, la capacité thérapeutique de ces bactéries est liée à leur processus de métabolisme car elles absorbent le glucose ou bien le sucre et certains matières organiques comme une source de carbone et puis le transforment en cellulose en présence d'oxygène. Des études ont prouvé la présence des bactéries *K. xylinus* dans le vinaigre de pomme traditionnel ainsi que dans le thé de kombucha et ces eux qui confèrent au vinaigre ou bien au thé de kombucha l'effet thérapeutique contre le diabète et l'obésité, de nombreuses questions se posent autour de la CB et de sa capacité à séparer les micropolluants de l'eau dans le domaine de l'épuration d'eau (Augimeri and Varley, 2015).

2.3 La source pour les bactéries productrices de cellulose bactérienne :

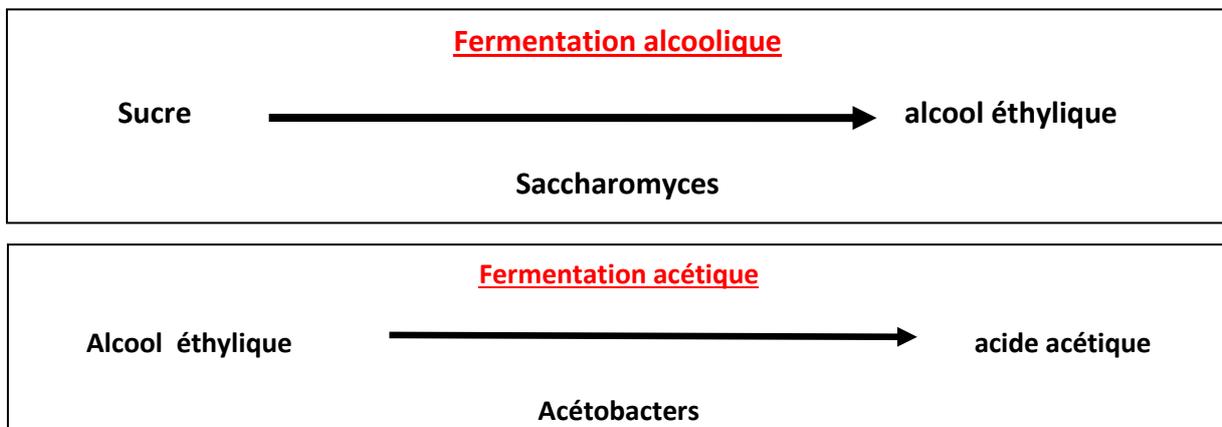
Actuellement, le vinaigre de cidre de pomme est devenu très demandé sur le marché en raison de la gamme d'avantage qu'il offre aux consommateurs. L'ACV se caractérisé par nombreuses activités biologiques (antibactériens et antioxydants et aussi un antifongiques) qui aident à traiter certains maladies comme les mycoses des ongles, il est également considéré comme un désinfectant idéal contre les infections microbiennes et aussi contre le SARS-COV-2, il a la capacité de réduire la possibilité de contracter certains maladies chroniques du corps humain résultant de l'oxydation et le stress oxydatif et certaines personnes l'utilisent comme un agent antidiabétique, pour la fabrication de vinaigre de pomme naturellement les agriculteurs

Synthèse bibliographique

cueillent des pommes et les font fermenter naturellement sans intervention artificielles la fermentation naturel des pommes déroule en 2 étape une fermentation alcoolique et acétique (El Abdali, 2023).

La pomme: c'est des fruits produits par les pommiers de genres de *malus pumila* de la famille des rosacées contient un pourcentage très élevé du sucre naturel talque le fructose et le saccharose par rapport à les autres fruits et aussi contient certains micro-organismes comme les bactéries et les levures, ces deux derniers sont responsables de la fermentation totale de pomme, puisque les levures (*Saccharomyces*) réalisent le processus de la fermentation alcoolique dans les conditions anaérobies par la transformation de sucre naturels en alcool éthylique (El Abdali, 2023).

Ce processus est relié au 2ème processus de la fermentation acétique qui se réaliser par des bactéries de type acétobacters ou bien les bactéries acétiques cette réaction déroule dans les conditions aérobie, le produit résulte l'acide acétique c'est un vinaigre de pomme naturel



Comme nous l'avons mentionné précédemment, la deuxième étape de la fermentation est réalisée par les *k.xylinus*, qui sont lui-même la source dont le vinaigre tire sa capacité à traiter certaines maladies. Après le processus de fermentation complète des pommes, la source de carbone nécessaire pour le métabolisme des bactéries a été épuisé, et donc il reste en état de repos, et c'est à partir de là que commence le thème de notre recherche, qui se base sur le rôle des bactéries du genre *Komagataeibacter xylinus*(*Glucanacetobacter xylinus*) présentes

Synthèse bibliographique

dans le vinaigre de pomme traditionnel dans la fabrication de la membrane cellulosique lorsqu'elles obtiennent une source de carbone (Du, 2018).

2.4 Le biofilm de cellulose bactérienne :

Le rapport concernant la première fabrication de CB a été publié en 1886 par Adrian Johen Brown en découvre des microorganismes capables de fabriquer un tapis gélatineux extracellulaire lorsqu'ils ont incubé dans des milieux de culture qui contient les nutriments et les conditions appropriés notamment une source de carbone et de l'oxygène. En plus de la présence de bactéries qui produisent de la cellulose, il existe également des bactéries qui ont la capacité de la fabriquer en tant que un composant exopolysaccharidique de la matrice extracellulaire des biofilms, la cellulose dans les biofilms bactériens présente sous la forme d'un hydrogel complexée en réseau très structurée dans lequel les fibres de la cellulose de taille nanométrique et les bactéries qui l'ont produire sont trouvés entre lacée à l'intérieure de ce réseau, leur production se réaliser dans les interfaces eau-air (Augimeri, 2015).

Les bactéries producteurs de la CB au sein d'un biofilm la fabriquent dans plusieurs butes premièrement comme un facteur essentiel pour l'augmentation de la capacité d'adhérence sur des hôtes (végétale, animal, fongique), selon les conditions les bactéries qui fabriquent de la CB ont soit un effet pathogène ou bien un effet symbiotique sur la hôte, et deuxièmement dans le but de la protection des bactéries contre les conditions externe comme les rayons UV, la cellulose bactérienne souvent aide à adhérer et attacher à des surfaces biotiques ou abiotiques. Les *k.xylinus* et les *Escherichia coli* sont considérés comme des bactéries modèles pour la fabrication des agrégats de CB mais les *k.xylinus* produisent de CB avec des caractéristiques morphologiques idéal en termes de la cristallinité par rapport à des autres genres (Augimeri, 2015).

Il existe plusieurs applications de la CB diffères à partir d'un domaine à un autre comme par exemple dans les applications de la cicatrisation des plaies et aussi dans la régénération cutanée, la CB considérée comme un candidat essentiel pour la fabrication des matériaux biomédical, y compris les vaisseaux sanguins artificiels et des échafaudages tissulaires et aussi des substituts cutanés (Wang, 2019).

Synthèse bibliographique

Outre le domaine biomédical, les propriétés physico-chimiques idéales de la CB notamment sa résistance mécanique élevée, capacité élevée d'absorption d'eau, une structure cristalline très pure, une grande biocompatibilité rendent leur utilisation nécessaire dans plusieurs domaines comme par exemples l'industrielle de papier, médecine, textile, pharmaceutique, l'industrie des compléments, filtration membranaire, l'industrie agroalimentaire, les produits cosmétiques. Le séchage d'une mousse de la CB crée une membrane de cellulose bactérienne naturelle avec une structure idéale pour le traitement d'eau contre les micro-contaminants, l'un des paramètres qui rendent cette membrane efficace pour filtrer l'eau est qu'elle est composée de cellulose, qui est considérée comme une matière première pour la fabrication de charbon actif (matière carbonée), de sorte que les polymères qui sont considérés comme des matières premières pour ce dernier ont une grande capacité d'absorption (**Moniri, 2017**).

5. Applications et utilisations des biomembranes cellulosiques :

Les membranes de cellulose issues des mères de vinaigre ont une gamme d'applications importantes en biologie, médecine et microbiologie. Voici quelques-unes des principales utilisations :

- ✓ **Biologie et Recherche Microbienne** : Ces membranes sont utilisées comme modèles pour l'étude des biofilms et des interactions bactériennes. La structure poreuse permet une étude détaillée des mécanismes de colonisation et de formation des biofilms (**Ali, 2023 & Murshid, 2023**).
- ✓ **Médecine et Santé** : En raison de leur biocompatibilité et de leurs propriétés de rétention d'eau, ces membranes sont utilisées comme pansements bioactifs pour favoriser la cicatrisation des plaies. Elles peuvent également être utilisées dans les dispositifs de délivrance contrôlée de médicaments, où la libération progressive des médicaments est essentielle pour un traitement efficace (**Jiang, 2023 & Hussaini, 2024**).
- ✓ **Microbiologie Appliquée** : Les membranes de cellulose servent de matrices pour la culture cellulaire et les biocapteurs. Elles sont également employées dans les systèmes de filtration pour la purification de l'eau et la séparation des biomolécules, grâce à leur capacité à retenir les particules et les contaminants (**Polat, 2024 & Aherne, 2024**).

Synthèse bibliographique

Depuis 2020, les recherches sur les membranes de cellulose issues des mères de vinaigre ont conduit à plusieurs innovations :

- ✓ **Dispositifs de Délivrance de Médicaments** : Des études ont montré que ces membranes peuvent être utilisées pour la libération contrôlée de médicaments, offrant des avantages en termes de dosage précis et de réduction des effets secondaires (**Fahimirad, 2023**).
- ✓ **Filtration Biologique** : Les membranes ont été appliquées dans des filtres biologiques pour la purification de l'eau, montrant une efficacité élevée dans l'élimination des contaminants et des bactéries pathogènes (**Vinoth, 2023**).
- ✓ **Applications Biomédicales** : Les progrès dans la modification de la surface des membranes ont amélioré leur compatibilité avec les tissus humains, ouvrant la voie à de nouvelles applications dans la médecine régénérative et les implants bioactifs (**Trombino, 2023**).

6. Méthode de Production de la cellulose bactérienne dans laboratoire :

Malgré les avantages et les caractéristiques de la cellulose bactérienne, sa production est très limitée en raison de l'incapacité de fournir des équipements et des milieux de fermentation en laboratoire, et ses utilisations sont donc également limitées. Les chercheurs ont donc travaillé pendant plusieurs années pour améliorer les conditions de production du BC, notamment du milieu de culture, après avoir fourni du matériel de fermentation. Ils ont trouvé deux façons ou stratégies pour le produire à l'aide de micro-organismes, et chaque stratégie comporte une méthode de travail. :

- **Culture statique** : Il s'agit de la production de BC blanc en suspension entre l'air et le liquide, mais sur une longue période, car ceci est considéré comme un facteur négatif, mais il peut être traité avec la stratégie de culture agitée (**Potočnik, 2023**).
- **Culture agitée** : qui est la production de cellulose bactérienne sous forme de globules anormaux, dans lesquels les bactéries sont incubées sous agitation. Mais même si la

Synthèse bibliographique

production en Colombie-Britannique est en la culture s'agite rapidement sur l'autre milieu, mais cela peut provoquer l'apparition de mutations dans les opérons cellulosiques, dont la production BC n'est pas terminée (**Potočnik, 2023**).



Figure 3 : les différents milieux de culture pour la fabrication de la cellulose bactérienne (**Potočnik, 2023**).

Le choix d'une de ces techniques est dû à l'application de cellulose bactérienne car les propriétés et caractéristiques morphologiques, physiques et mécaniques sont différents d'un milieu à un autre. Par exemple, la résistance mécanique à culture statique être supérieur à culture agitée et la production de CB en culture agitée est plus faible que dans l'autre milieu (**Potočnik, 2023**).

Le Choix du produit BC à utiliser c'est généralement en fonction de sa forme et de son mode de fermentation, car la cellulose bactérienne issue de culture agitée est utilisée dans l'industrie agroalimentaire comme épaississant, et le CB issu de culture statique est utilisé dans le domaine de la pharmacie, de la médecine, de l'emballage, cosmétiques et emballages (**Potočnik, 2023**).

Malgré l'importance de la cellulose bactérienne dans de nombreux domaines, elle n'est pas utilisée à grande échelle dans le monde et cela est dû à plusieurs raisons, notamment au fait que le processus de fabrication de la CB est un processus naturel effectué par des bactéries constitue un obstacle majeur car il n'est pas possible de contrôler la vitesse de croissance des bactéries et leurs taux de productivités. En plus de sa il ya une possibilité de la transformation spontanée des souches bactériennes productrices de CB (Cel+) en souches non productrices de la CB (Cel-) (**Manan, 2022**).

Synthèse bibliographique

La membrane de cellulose bactérienne, malgré ses avantages, ne suffit pas à elle seule pour être utilisée comme membrane de filtration pour le traitement de la pollution de l'eau, car elle est fragile et plus susceptible de se fissurer et de se déchirer. Parmi les facteurs qui peuvent entraîner la fissuration de ces membranes figure les rayons UV, et elle est également affectée par les conditions de température et de pH, de sorte que, dans de nombreuses applications, ces membranes ont besoin d'un support supplémentaire pour améliorer leurs qualités et renforcer leurs propriétés (**Farooq, 2020 & wassim, 2021**).

Les membranes cellulosiques de tous types sont facilement modifiables en raison de la présence de nombreux groupes hydroxyles qui peuvent être combinés avec d'autres matériaux afin d'améliorer leurs performances et de les adapter à différentes applications (**Farooq, 2020 & wassim, 2021**). Parmi les additifs susceptibles d'améliorer les propriétés d'une membrane de cellulose bactérienne figure l'oxyde métallique, à savoir l'oxyde de zinc, qui s'est avéré être un excellent

Matériau de support pour les membranes en raison de sa capacité et de ses propriétés efficaces (**Farooq, 2020 & wassim, 2021**).

III. Le dopage par l'oxyde de zinc :

1 Généralités sur l'oxyde de zinc :

L'oxyde de zinc est un composé chimique du zinc et l'oxygène, inorganique, insoluble dans l'eau. Il est considéré comme une substance binaire du type (II, IV) dérivé du zinc, ses propriétés en ont fait une source d'intérêt pour les chercheurs et pour son utilisation dans diverses applications, telles que les produits cosmétiques et médicaux, et même dans des applications en biologie.

2 Structure cristallographique d'oxyde de zinc :

Le zinc et l'oxygène appartenant respectivement au deuxième et au sixième groupe du tableau périodique, le ZNO est un semi-conducteur II-VI reconnu dans le domaine de la science des matériaux. Le semi-conducteur ZNO possède de nombreuses propriétés exceptionnelles

Synthèse bibliographique

et bénéfiques, telles qu'une bonne transparence, des agents antimicrobiens, une grande mobilité des électrons, une large bande interdite, une grande stabilité thermique et mécanique à température ambiante et une forte luminescence à température ambiante. Sa large bande interdite, soit 3,37 eV, se situe à la frontière entre les semi-conducteurs ioniques et covalents (Zhou, 2023). La structure cristalline de ZNO est de type wurtzite (B4), avec une cellule unitaire hexagonale et deux paramètres de réseau $a = 0,325 \text{ nm}$ et $c = 0,521 \text{ nm}$. Avec sa structure hexagonale wurtzite, chaque anion est entouré de quatre cations aux coins du tétraèdre, ce qui montre la coordination tétraédrique et donc la liaison covalente sp^3 . La forme tétraédrique du ZNO donne lieu à une structure non centrosymétrique (Zhou, 2023).



Figure 4 : modèle de structure cristalline de l'oxyde de zinc (a) de la blende de zinc (b) de la wurtzite (c) du sel gemme (Zhou, 2023).

Tableau IV. Les différentes propriétés d'oxyde de zinc (Zhou, 2023).

Propriétés chimiques :	Propriétés physiques :	Propriétés optiques :
Formule chimique : ZnO	Insoluble dans l'eau	Indice de réfraction : 2,004
Nom IUPAC : oxyde de zinc	Soluble dans les acides et les bases	Absorption UV : bloque les rayons UV-A et UV-B
Masse molaire : 81,38 g/mol	Semi-conducteur de type n	
Densité : 5,61 g/cm ³	Bon conducteur de la chaleur	
Point de fusion : 1 975 °C		
Point d'ébullition : 2 360 °C		
Aspect : poudre blanche inodore et insipide		

Synthèse bibliographique

L'oxyde de zinc est un matériau respectueux de l'environnement car il est peu toxique, à un faible impact sur l'environnement, est compatible avec les organismes vivants et est présent dans de nombreux types de biomasse, en plus d'autres avantages (Peu coûteux, facilement disponible, excellentes propriétés optiques, Capacité photocatalytique, oxydante et d'absorption des UV, et leur effet Antibactérien), ces caractéristiques le rendent adapté à de nombreuses applications (**Klink, 2021 & Vevers, 2024**).

En raison de ces propriétés et avantages, les chercheurs ont estimé qu'il s'agirait d'un bon complément aux membranes de filtration, afin de fabriquer une membrane de meilleure Qualité pour le traitement de la pollution de l'eau. Ainsi, si l'oxyde de zinc et la membrane de cellulosique s'hybrident devient un complexe avec des propriétés multiples.

Le composite hybride contenant une membrane de cellulose et de l'oxyde de zinc présente d'excellentes propriétés mécaniques qui conduit à l'améliore de la rugosité de la surface grâce a la formation des liaisons hydrogène entre les groupes hydroxyles présents dans la cellulose et le ZNO, ce qui permet une meilleure intégration dans la structure de la membrane et devient une barrière UV en plus de ses capacités antibactériennes, de sa stabilité chimique, de ses espèces réactives de l'oxygène, de ses capacités photocatalytiques, de sa stabilité chimique, de ses espèces réactives de l'oxygène et de ses capacités photocatalytiques (**Farooq, 2020 & Wasim, 2021**).

3. Effet de l'oxyde de zinc sur la membrane de cellulose :

Activité antimicrobienne accrue : les nanoparticules de ZnO hybride sur les fibres de CB ont une meilleure capacité d'absorption des micro-organismes. Lorsqu'ils sont incorporés dans des membranes de cellulose, ils peuvent renforcer la capacité de la membrane à lutter contre les bactéries et les champignons, le ZnO fonctionne comme des protecteurs microscopiques, ces protecteurs éliminent les micro-organismes nocifs lorsque l'eau traverse le filtre (**Klink, 2022 and Vevers, 2024**).

Propriétés photocatalytiques : Les nanoparticules de ZnO sont des photocatalyseurs, c'est-à-dire qu'elles peuvent réagir avec la lumière pour dégrader les polluants organiques.

Synthèse bibliographique

Cette propriété peut être bénéfique pour des applications telles que le traitement des eaux usées lorsque le ZnO est incorporé dans des membranes de cellulose (**Ferreira, 2021**).

Propriétés mécaniques: Des études suggèrent que le ZnO peut améliorer Résistance à la tension et la stabilité mécanique globale des membranes de cellulose.

IV. Etude du pouvoir de filtration des membranes cellulosiques :

Les membranes cellulosiques, produites par des bactéries, représentent une solution innovante et écologique pour la filtration de l'eau. Issues de la fermentation du vinaigre de cidre de

Pomme, ces membranes offrent des propriétés uniques telles qu'une grande pureté, une haute porosité, et une résistance mécanique significative. Leur capacité à éliminer efficacement les particules fines et les contaminants microbiens les positionne comme des candidates prometteuses pour les applications de filtration dans les systèmes de traitement de l'eau.

Cette étude se concentre sur l'évaluation du pouvoir de filtration des membranes cellulosiques renforcées par des particules d'oxyde de zinc (ZnO). Elles sont connues pour leurs propriétés antimicrobiennes et leur capacité à améliorer la durabilité des membranes. L'objectif est de déterminer l'efficacité de ces membranes composites pour la purification de l'eau, en analysant des paramètres clés tels que la capacité de rétention des particules, le flux de perméation, et la résistance aux biofouling. Cette approche vise à développer des solutions de filtration plus efficaces et durables, répondant aux exigences croissantes en matière de qualité.

Matériels et méthodes

1 Préparation des solutions pour obtenir la membrane cellulosique bactérienne :

Dans notre étude, nous avons préparé une solution homogène de vinaigre de cidre de pomme naturel enrichi en sucre, en vue de cultiver des membranes de cellulose bactérienne (CB). Nous avons mesuré 60 ml de vinaigre de cidre de pomme à l'aide d'une éprouvette graduée et l'avons placé dans trois bocaux Becher stérilisés. Ensuite, nous avons pesé trois quantités différentes de sucre à l'aide d'une balance de précision et les avons ajoutées aux bocaux contenant le vinaigre. Le mélange a été soigneusement agité à l'aide d'une spatule jusqu'à dissolution complète du sucre, garantissant une solution homogène. Cette procédure a été effectuée dans une zone stérile pour éviter toute contamination. La solution obtenue servira de milieu de culture pour les bactéries productrices de cellulose, permettant ainsi de générer des membranes de CB. Ces membranes seront ensuite renforcées par l'ajout de particules d'oxyde de zinc (ZnO), visant à améliorer leur résistance mécanique et leurs capacités de filtration. Cette combinaison innovante promet de fournir des membranes efficaces pour la filtration de l'eau, intégrant les avantages de la CB et des ZnO pour une application pratique en traitement des eaux polluées (<https://ligayagarden.online>).

Tableau V. Les mesures pour la préparation des 3 solutions.

	La masse de sucre	Volume du vinaigre de pomme
Solution 1	3g	60 ml
Solution 2	9g	60 ml
Solution 3	15g	60 ml

Nous avons ensuite versé les solutions dans des erlenmeyers stériles et l'avons scellé avec un para film pour protéger les solutions et nous les avons mis dans l'agitateur horizontale pendant 24 heures.

Après on a versé les solutions dans des béchers stérilisés, et l'avons fermé avec une compresse et l'avons laissé pendant quatre semaines à la température ambiante de laboratoire (s1, s2, s3).

Matériels et méthodes

Après ces 4 semaines nous avons ajouté 5 ml du jus de pomme dans le troisième bêcher et le refermé une autre fois (s3').

Après deux semaines, nous avons séparé la solution de Becher 3 en deux solutions et on a gardé la première membrane formée dans sa solution S3, on a transvasé la deuxième membrane générée dans un nouveau bêcher qui contient 30 ml de jus de pomme naturel et refermés avec des compresses.

2 L'activité microbienne :

Dans les deux boites pétries qui sont coulées par le milieu de culture GN on a réalisé un ensemencement par stries des 2 solutions S2 et S3.

Dans la boite pétrie coulées par le milieu de culture CHROMagar on a réalisé un étalement par râteau de la solution de vinaigre de pomme naturel.

3 Observation de la membrane par microscopie à balayage électronique (MEB) :

L'imagerie par microscopie électronique à balayage (MEB) est un outil incontournable en microbiologie, offrant des résolutions nanométriques qui permettent une visualisation détaillée des structures microbiennes. Cette technique utilise un faisceau d'électrons pour balayer la surface d'un échantillon, produisant des images tridimensionnelles avec une profondeur de champ exceptionnelle et une grande clarté (Guo, 2022).

Depuis 2020, l'imagerie MEB a vu des applications révolutionnaires en microbiologie. Par exemple, elle a été cruciale dans l'étude des structures virales, notamment pour comprendre la morphologie du SARS-CoV-2, le virus responsable de la COVID-19. Les chercheurs ont utilisé le MEB pour observer les interactions virus-cellule, contribuant ainsi au développement de traitements et de vaccins (Wang, 2022).

En parallèle, le MEB a été utilisé pour explorer les biofilms microbiens, des communautés complexes de micro-organismes adhérant à des surfaces. Ces études ont des implications directes en médecine, car les biofilms sont souvent résistants aux traitements antibiotiques. Les avancées dans la visualisation des biofilms ont permis de développer des stratégies pour les contrôler, réduisant ainsi les infections nosocomiales (Zhao, 2023 & Li, 2023).

Matériels et méthodes

En biotechnologie, le MEB a aidé à améliorer la production de biomatériaux, comme les membranes de cellulose bactérienne utilisées dans des applications médicales et industrielles. En visualisant les microstructures, les scientifiques peuvent optimiser les conditions de culture pour améliorer les propriétés des biomatériaux (**Smith, 2024**).

Ainsi, l'imagerie MEB continue de transformer la microbiologie, fournissant des perspectives essentielles pour la recherche fondamentale et appliquée.

4. Observation par spectroscopie Raman :

La spectroscopie Raman est une technique de caractérisation puissante et non destructive qui permet d'identifier les structures moléculaires et de déterminer les interactions chimiques dans divers matériaux. Dans cette étude, nous avons utilisé la spectroscopie Raman pour analyser une membrane de cellulose obtenue à partir d'une mère de vinaigre de pommes. Cette approche offre une perspective unique sur la structure et les propriétés de la cellulose produite par des méthodes biologiques (**Anker, 2023 & Kneipp, 2022 & Le, 2022**).

Nous utilisons la spectroscopie Raman, une technique de spectroscopie moléculaire vibrationnelle basée sur la détection des photons diffusés après l'interaction de l'échantillon avec un faisceau de lumière monochromatique. La spectroscopie Raman a été utilisée dans de nombreux domaines tels que la détection de matériaux, la détection de bactéries et la détection de l'adultération dans le contrôle de la sécurité et de la qualité des aliments (**Smith, 2023 & Ding, 2022 & Vo-Ding, 2023**).

✓ Applications biologiques :

Pour les biologistes, la caractérisation Raman de la cellulose est essentielle pour comprendre les interactions biochimiques et les propriétés fonctionnelles des matériaux dérivés biologiquement. La cellulose produite biologiquement, comme celle de la mère de vinaigre de pommes, peut être utilisée dans diverses applications biomédicales, telles que les membranes de filtration, les supports pour la culture cellulaire, et les matrices pour la délivrance de médicaments. La capacité à caractériser précisément ces matériaux à l'échelle moléculaire aide à optimiser leur utilisation et à concevoir des produits innovants basés sur des sources renouvelables et durables (**Lin, 2020 & Camden, 2023 & Liu, 2023**).

Matériels et méthodes

5. Montage expérimental :

Pour évaluer l'efficacité des membranes cellulosiques dopées avec des particules de ZnO dans la filtration d'une solution colorée avec du bleu de méthylène, le montage expérimental détaillé est le suivant :

5.1 Préparation de la Solution Colorée :

- Dissoudre 0,01 g de bleu de méthylène dans 1 L d'eau distillée pour obtenir une solution colorée homogène avec une concentration de 10 mg/L.

5.2 Installation du Dispositif de Filtration :

- ✓ Utiliser un dispositif de filtration sous vide. Placer la membrane cellulosique dopée avec des particules de ZnO (de tailles standard de 47 mm de diamètre et 0,2 μm de porosité) dans le support de filtration.
- ✓ Fixer solidement la membrane dans le dispositif pour éviter les fuites.

5.3 Procédure de Filtration :

- ✓ Verser 100 ml de la solution de bleu de méthylène préparée dans l'entonnoir au-dessus de la membrane
- ✓ Appliquer un vide à -0,5 bar pour faciliter le passage de la solution à travers la membrane.
- ✓ Recueillir le filtrat dans un récipient propre et stérile.

5.4 Analyse de l'Efficacité de la Filtration :

- ✓ Mesurer l'absorbance du filtrat à 664 nm (la longueur d'onde spécifique du bleu de méthylène) à l'aide d'un spectrophotomètre.
- ✓ Comparer l'absorbance du filtrat avec celle de la solution initiale pour déterminer le pourcentage de rétention du colorant par la membrane.

En suivant ce protocole, on peut évaluer précisément l'efficacité des membranes dopées avec des particules de ZnO dans la filtration des solutions colorées, en quantifiant la capacité de la membrane à retenir les particules de colorant.

Résultat

Après l'agitation pendant 24h on a observé dans les bêche des boules d'aire à la surface de solutions. Et on a aussi observé un changement de couleurs de solutions a où il était initialement de couleur claire et est devenu trouble ces observations preuve qu'il la croissance s'est produite et les bactéries faire leur métabolisme.

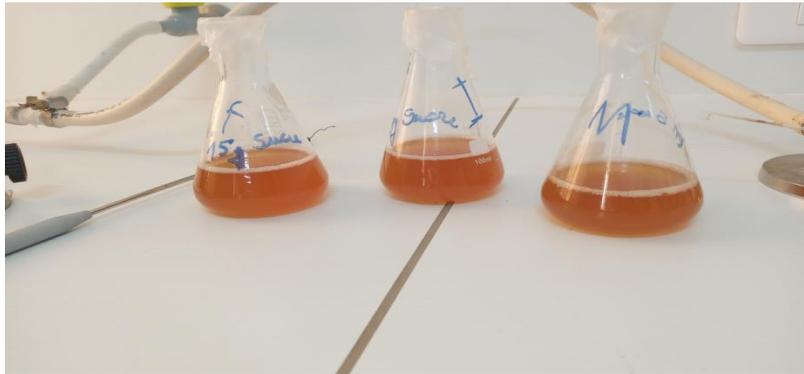


Figure 5 : les trois solutions de vinaigre de pomme après l'agitation (original 2024).

1. Résultats de l'activité microbienne :

Le milieu de culture GN: on a observé l'apparition des colonies blanches avec une forme ronde.

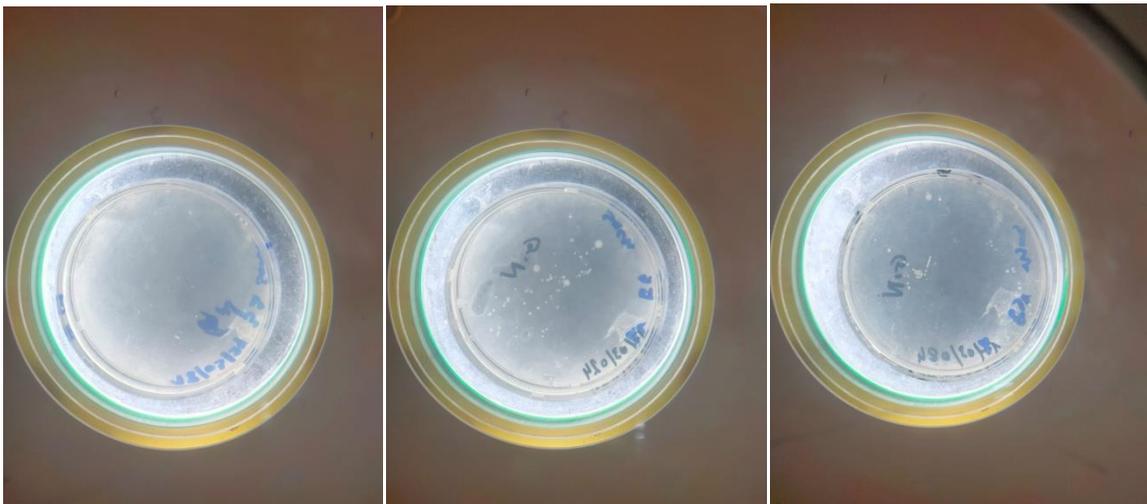


Figure 6 : observation des colonies présentes dans les différentes solutions de vinaigre de pommes dans un milieu de culture gélose nutritive (original 2024).

Résultat

Le milieu de culture CHROMAagar: on a observé des colonies bleues.

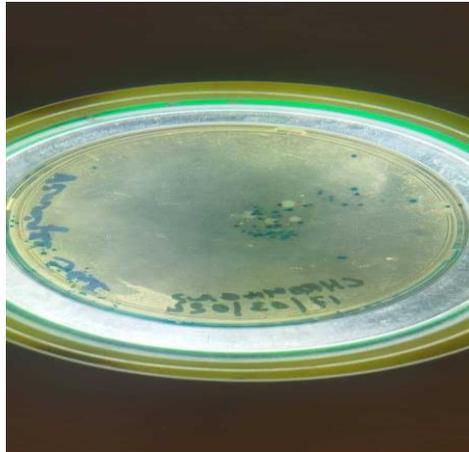


Figure 7 : observation des colonies présente dans le vinaigre de pomme sans sucre dans un milieu de culture CHROMAagar (**original 2024**).

Après 4 semaines, on a remarqué la présence d'un couche mince et fine transparente d'environ 1 à 2 mm d'épaisseur à la surface de la solution dans le bêcher 3.

2. L'apparition de la membrane cellulosique :



Figure 8 : l'apparition de la membrane cellulosique dans la solution 3 (**original 2024**).

Résultat

Concernent les autres bécher (1,2) aucune membrane n'a été observé à la surface de leurs solutions.

Après une semaine de l'ajout de jus de pomme on a observé une autre couche c'est la deuxième génération

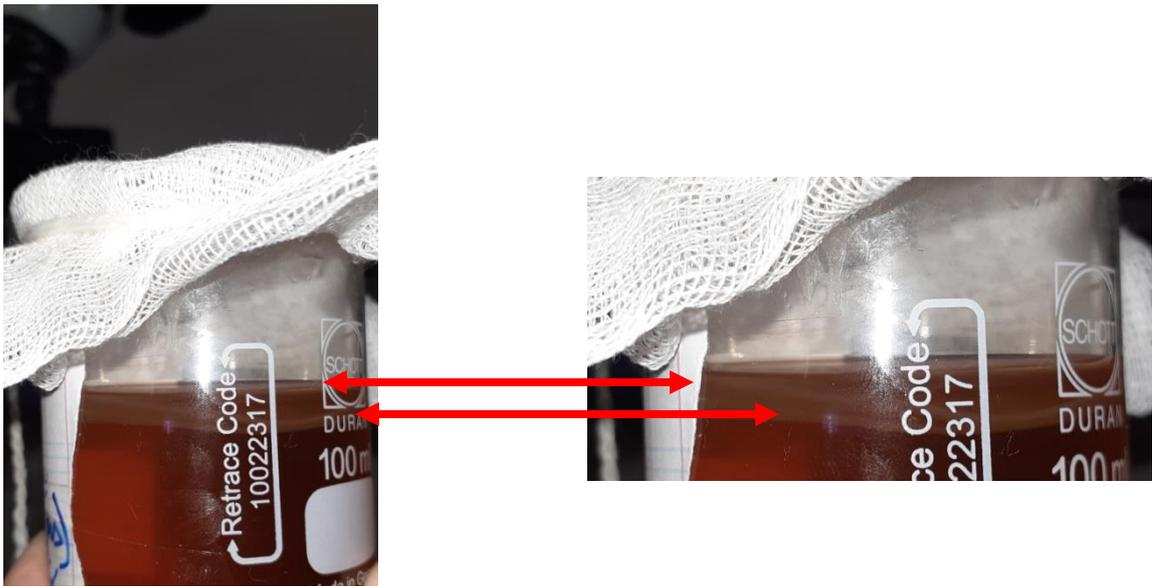


Figure 9 : l'apparition de la deuxième génération (original 2024).

Résultat

3. Résultat de l'analyse de la membrane cellulosique par microscopie électronique à balayage :

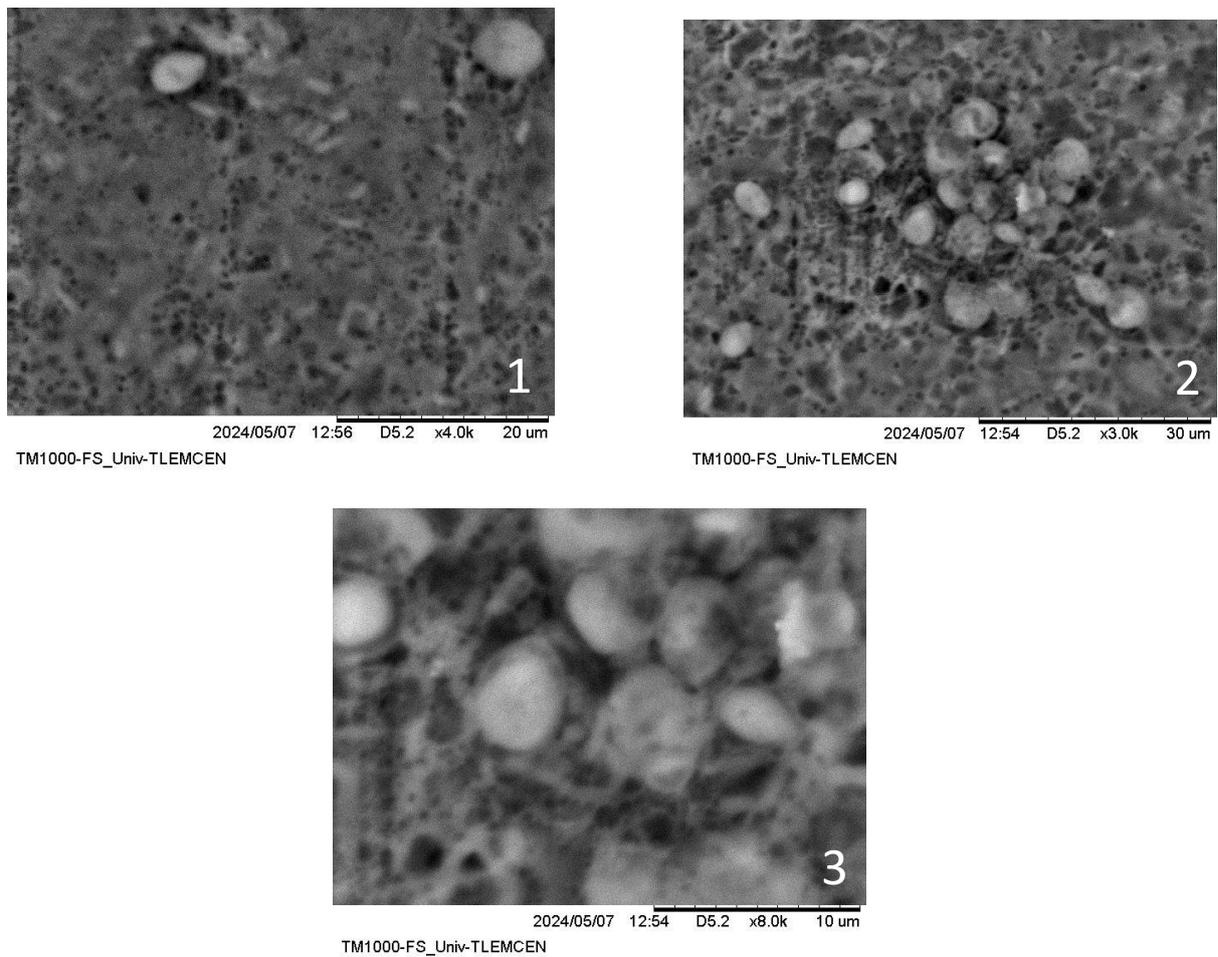


Figure 10 : Images MEB à des grossissements différents (x3.0k, x8.0k, et x4.0k) des membranes cellulosiques issues de mères de vinaigre de pomme

(MEB UNIV- TLEMCEN 2024).

Résultat

4. Résultat de l'analyse par spectroscopie Raman de la membrane cellulosique :

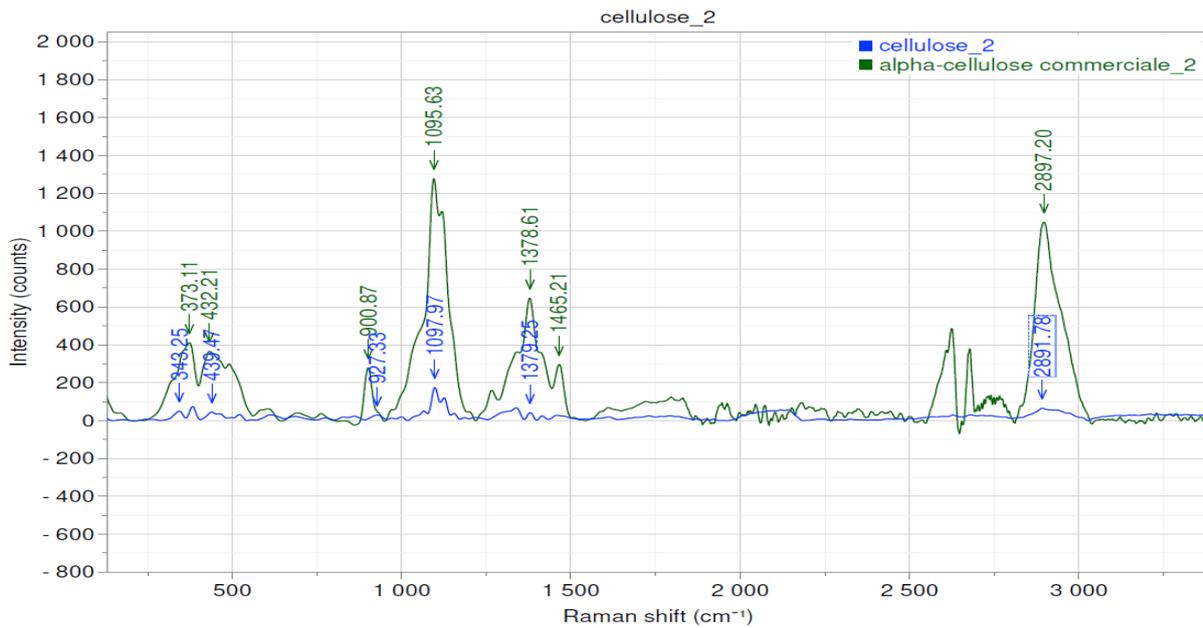


Figure 11 : Spectre Raman des membranes cellulosiques issues de mères de vinaigre de pomme (C.R.A.P.C TLEMCEN 2024).

Tableau VI : Caractéristiques de fonctionnement de la spectroscopie Raman (C.R.P.C TLEMCEN 2024).

Date	12.05.2024 08...	Acq. time (s)	10	Accumulations	10	Laser	633nm_Edge
Spectro (nm)		Hole	100.021	Slit		Grating	600 (750nm)
ND Filter	100%	Objective	x50_VIS_LWD	ICS correction	Off	Range (cm ⁻¹)	

Powered by
LabSpec 6

HORIBA
Scientific

Résultat

5. Les courbes d'absorbance de bleu de méthylène :

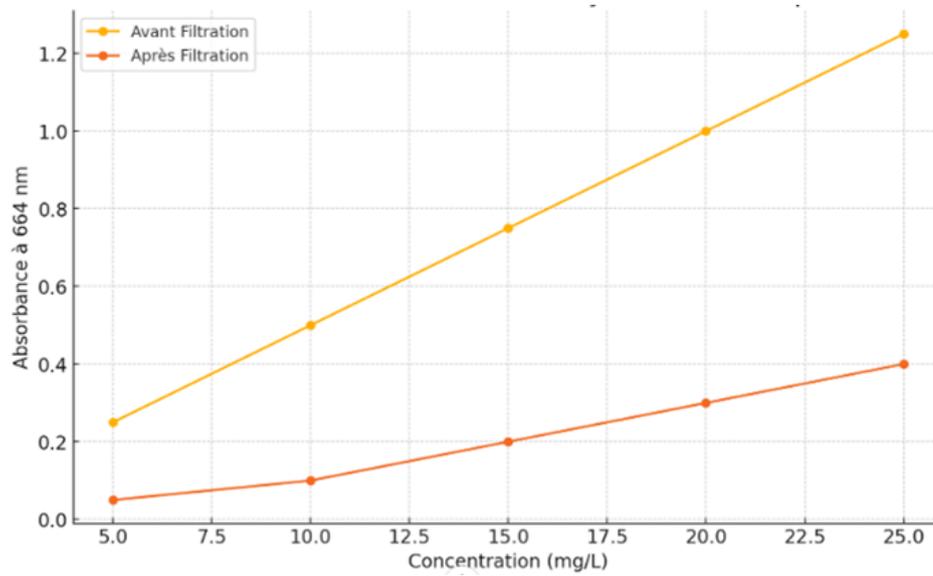


Figure 12 : Absorbance de la solution de bleu de méthylène avant et après filtration

(UNIV TLEMCEN 2024).

Discussion

1. Le rôle de la température dans la fabrication de cellulose bactérienne :

L'un des facteurs les plus importants qui contrôlent le travail des bactéries est la température du milieu, car les bactéries de type *K. xylinus* travaillent dans un milieu dont la température varie entre 25°C et 30°C, où la cellulose bactérienne est produite en bonne quantité, car cette température est considérée comme optimale pour ce type de bactéries, en raison des processus cellulaires effectués par les bactéries, notamment :

- ✓ **Activité enzymatique :** *K. xylinus* s'appuie sur des enzymes pour convertir la source de sucre fournie (généralement le glucose) en cellulose. Ces enzymes fonctionnent mieux dans une certaine plage de température. C'est à des températures proches de 25-30°C que ces enzymes sont les plus actives, ce qui permet une production efficace de cellulose (**Przygodzka, 2022**).
- ✓ **Perméabilité de la membrane :** La membrane de la cellule bactérienne joue un rôle crucial dans l'absorption des nutriments et la sécrétion du produit (ici la cellulose). À des températures modérées (25-30 °C), la membrane conserve une fluidité optimale, ce qui permet un transport efficace des nutriments et l'exportation de la cellulose (**Przygodzka, 2022**).
- ✓ **Taux métabolique :** *K. xylinus* présente un taux métabolique plus élevé entre 25 et 30°C. Cela se traduit par une activité cellulaire plus importante et un taux de croissance plus élevé. Cela se traduit par une activité cellulaire accrue et une production de cellulose potentiellement plus rapide (**Przygodzka, 2022**).
- ✓ **Viabilité cellulaire :** Bien que *K. xylinus* puisse survivre dans une plage de températures plus large, des températures trop élevées (supérieures à 30°C) peuvent stresser la bactérie, réduire la viabilité cellulaire et entraver la production de cellulose (**Przygodzka, 2022**).

En d'autres termes, la plage de 25 à 30 °C offre les conditions idéales pour que *K. xylinus* fonctionne efficacement. Les enzymes fonctionnent bien, la membrane cellulaire est fonctionnelle pour l'absorption des nutriments et l'exportation des produits, le taux métabolique est élevé et les bactéries restent saines pour la production de cellulose (**Przygodzka, 2022**).

Discussion

2. Le rôle d'oxygène dans la fabrication de la membrane cellulosique :

L'oxygène joue également un rôle important dans la production optimale de cellulose bactérienne chez les bactéries *K. xylinus* en raison est un type de bactérie acétique, a besoin d'oxygène (aérobie) pour plusieurs raisons liées à son métabolisme et à sa production de cellulose :

- ✓ **Production d'énergie** : *K. xylinus* est un organisme aérobie, ce qui signifie qu'il utilise l'oxygène dans son processus de respiration cellulaire pour générer de l'énergie (ATP) à travers le cycle de Krebs (cycle de l'acide citrique). Cette énergie est ensuite utilisée pour diverses fonctions cellulaires, notamment la synthèse de la cellulose (**Lahiri, 2021**).
- ✓ **Répartition du substrat** : *K. xylinus* fermente les sucres comme le glucose comme principale source de carbone. L'oxygène aide à décomposer efficacement ces sucres et à générer les précurseurs nécessaires à la synthèse de la cellulose (**Lahiri, 2021**).
- ✓ **Synthèse des éléments constitutifs** : Le glucose est un élément constitutif clé de la cellulose. Cependant, *K. xylinus* a besoin de certains intermédiaires dérivés de la dégradation complète des sucres (via la respiration aérobie) pour créer les unités sucre spécifiques utilisées dans la cellulose (**Lahiri, 2021**).

Bien que l'oxygène ne soit pas directement impliqué dans la polymérisation de la cellulose elle-même, il soutient indirectement l'ensemble de la voie métabolique menant à la production de cellulose chez *K. xylinus*.

Il est intéressant de noter que les recherches suggèrent que la production de cellulose chez *K. xylinus* se produit principalement à l'interface air-liquide dans les cultures, là où l'oxygène est le plus abondant. Cela met en évidence l'importance de l'oxygène pour un rendement optimal en cellulose (**Lahiri, 2021**).

Discussion

2. L'identification des souches bactériennes présentes dans les solutions de vinaigre :

La plupart des bactéries présentes dans la solution de vinaigre de pomme biologique doivent d'être bien nourries en nutriment et en gaz afin d'assurer leur croissance, le gaz utilisé pour

l'aération des micro-organismes est de l'oxygène et doit être présent dans la solution de vinaigre dans le but de l'amélioration de l'absorption de l'oxygène et pour que le gaz devient

Inclue dans la solution on a mis les 3 solutions précédemment préparées dans un agitateur horizontal. Les bulles d'air présentes dans la solution après cette étape symbolisent la présence d'une activité microbienne, cela confirme la présence du micro-organisme cet indicateur à lui seul ne suffit pas à confirmer la présence d'espèce de bactérie que l'on souhaite retrouver.

L'ensemencement par stries des solutions de vinaigre de pomme dans des milieux de culture de gélose nutritive (GN) dans le but de l'isolation des souches bactériennes présentes dans le vinaigre de pomme. La gélose nutritive est un milieu de culture non sélectif riche en peptone, vitamines, glucide, sels et de l'azote qui garantit la disponibilité des facteurs essentiels pour la croissance et la multiplication rapide des micro-organismes, la croissance conduit à la visualisation de la forme des micro-organismes à fin d'identifier les souches bactériennes présentes dans les 3 échantillons (<https://www.humeau.com>).

D'un autre côté l'étalement par râtelier de la solution mère sur une surface d'un milieu de culture CHROMagar aide la pénétration des compositions de la solution mère, le but de cette technique est de faciliter la quantification et la qualification des micro-organismes présents dans le vinaigre de pomme, le CHROMagar est considéré comme l'un des milieux de culture sélectif qui aide à la détection qualitative selon le changement de la coloration des colonies (<https://www.CHromagar.com>).

3.1 L'identification des colonies selon des critères morphologiques des colonies :

Les résultats obtenus confirment que les colonies présentes sont des colonies de *K.xylinus* cette information est confirmée par la caractérisation identique entre les colonies résultantes et la photo suivante qui montre la forme des colonies de *K.xylinus*.

Discussion

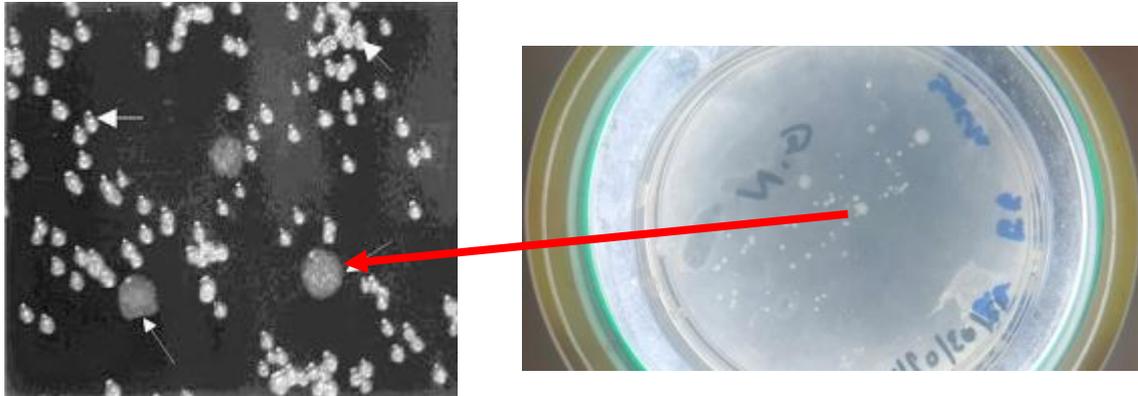


Figure 13 : la congruence morphologique entre les colonies obtenues et les colonies de *K. xylinus* (Cristina, 2016).

4. La régulation de la production de la cellulose bactérienne par des bactéries *Komagataeibacter* :

Après avoir un milieu ALI (milieu de culture favorable pour la fabrication de BC) qui caractérisé par des concentrations élevées d'oxygène et du nutriment nécessaire pour les bactéries productrices de cellulose bactérienne tandis que le type de système de la sécrétion du CB est varié donc d'une classe à une autre, citons le type de système le plus étudié par les scientifiques et les chercheurs est celui qui trouvé chez certains α et β protéobactéries Gram-négatives (Lee, 2014 and Liu, 2018).

Les *K. xylinus* de la classe des α -protéobactéries commencent leur propre processus de la création des chaînes β (1-4) glucane par la polymérisation des unités de glucoses, dans des propriétés idéales qui consiste à produire des fibrilles de cellulose bactérienne à partir des sources de carbone et de réaliser leurs croissances. Après avoir pénétré les molécules de glucose à travers la membrane externe et interne des bactéries *k. xylinus*, les glucoses qui sont dans le plasma des bactéries sont sous l'influence de la phosphorylation par des enzymes de type glycoquinase le résultat de cette réaction c'est une molécule clé pour la synthèse des substrats nécessaire à la production de BC c'est le glucose-6-phosphate, comme une 2ème réaction le G6P est isomérisé en glucose-1-phosphate (G1P) par le phosphoglucomutase

Discussion

(PGM), le G1P est interagit avec la molécule de l'UTP, conduisent ala formation de la molécule uridine-5'-phosphate- α -D-glucose (UDPG) sous l'influence de l'action UDP-glucose pyrophosphorylase (UGPase), cette dernière enzyme est considérée comme une très importante catalyseuse dans le processus de la biosynthèse de CB en grande quantité uniquement chez les bactéries productrices de la CB grâce a leur capacité de fabriquer le précurseur directe de la CB(UDPG), après cette réaction il aura une activation du complexe cellulose bactérienne synthèse (CBs) par l'activateur allostérique qui connue sous le nom de l'acide diguanylique cyclique(c-di-GMP)(Lee, 2014 and Liu, 2018).

Le complexe BCs c'est une protéinemembranaire intégrale qui situé sur les membranes bactériennes externe et interne qui réalise la fabrication et la sécrétion des chaines de glucanes. Le complexe BCs est constituée de quatre sous unité BCsA, BCsB, BCsC, BCsD.

TableauVII.caractéristique des différentes sous unité du complexe cellulose bactérienne synthèse (Lee, 2014 and Liu, 2018).

La sous unité	Leur caractéristique
BCsA	Proteine de la membrane interne Domaine transmembranaire TM Domaine N-terminal des domaines catalytique intracellulaire Domaine C-terminal qui contient un domaine PIIZ de liaison bis (3'-5') cyclique diguanylate(c-di-GMP)
BCsB	Proteine périplasmique Une hélice TM c-terminal Deux domaones de liaisonhydrate de carbone (CBD1, CBD2)
BCsC	Pore de la membrane extérieur
BCsD	Proteine périplasmique

Discussion

Pour que la sous unité BcsA qui contient le domaine catalytique devienne plus stable elle interagit avec l'hélice TM c-terminal de la sous unité auxiliaire BcsB cette interaction conduit à la régulation de la biosynthèse de la cellulose bactérienne par l'activation de la BCsA (déjà stabilisé par le complexe BcsB) en n'interagit avec le c-di-GMP, pour que le CB nouveau synthétisé devienne à l'extérieur de la cellule bactérienne il aura une formation des pore sécrétoire grâce à la BcsC et finalement, la sous unité BcsD est responsable de la cristallisation in vivo de la CB en nanofibrilles de cellulose(Le, 2014 and Liu, 2018).

Le noyau catalytique (BcsA et BcsB) est le responsable de la biosynthèse de la chaîne glucane à laquelle sont attachées des monomères de glucose activé uridine-5'-diphosphate- α -Dglucose(UDPG) qui sont ensuite transformé en chaînes linéaires de 1, 4 glucane sous l'influence d'une cellulose synthase A. Les sous unités BcsC et BcsD créent un canal dans l'espace périplasmique jusqu'à la membrane externe dans de le but de l'extrusion de la chaîne de glucane, de sorte que le point pour l'extrusion des chaînes vers l'espace environnementale est situé dans la membrane externe et connue sous le nom du complexe terminal (Kavitha, 2022).

Dans l'espace extracellulaire les chaînes de glucanes subissent deux types d'événement afin d'atteindre leurs structures finales. Tous d'abord comme une première étape les chaînes de glucanes linéaires commencent leurs premières événement d'assemblage entre eux formant des nanofibres, il existe un autre type d'événement qui favorise la combinaison des nanofibres afin de fabriquer des microfibrilles ces dernières sont regroupées pour formées des faisceaux de microfibrilles qui prendront plus tard la forme de ruban de la cellulose avec un épaisseur de 3 à 4 nm et une largeur de 70 jusqu'à 80 nm, pour la réalisation de cette réaction les liaisons hydrogènes et les forces de van der waals sont très nécessaires (Swingler, 2021 and Kavitha, 2022).

Discussion

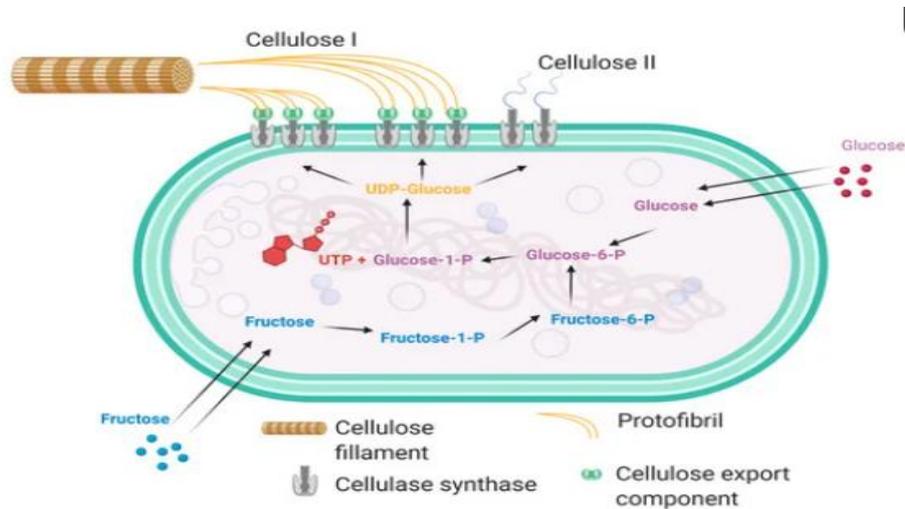


Figure 14 : le mécanisme de la biosynthèse de CB chez les *Komagataeibacter* (Swingler, 2021).

Le pourcentage élevé de liaisons hydrogènes dans le biofilm de CB conduit à la formation des cavités avec une charge ionique ou bien une structure maillée 3D, ce qui confère une capacité d'absorption et une incorporation de certains types de matériaux et cela aide la membrane de cellulose dans leur effet antimicrobien et dans leur capacité à empêcher les attaques microbiennes (Swingler, 2021).

Les propriétés physico-chimiques de la membrane cellulosique :

- La formation des liaisons de type β 1-4 entre les molécules de CB garantit la présence des groupes hydroxyles libres à la surface de la membrane.
- Alors qu'entre les liaisons hydroxyles libres des liaisons hydrogènes se forment, qui sont très abondantes grâce à la présence d'un grand nombre d'atome d'oxygène et des groupes hydroxyles. (Lahiri, 2021).
- De nombreuses études ont prouvé le rôle des forces de van der Waals dans l'empilement parallèles au sein de la CB. Ces forces sont considérées comme des facteurs nécessaires pour le développement de nanofibres cristallines et aussi pour le développement de la structure microfibrillaire (Lahiri, 2021).

Discussion

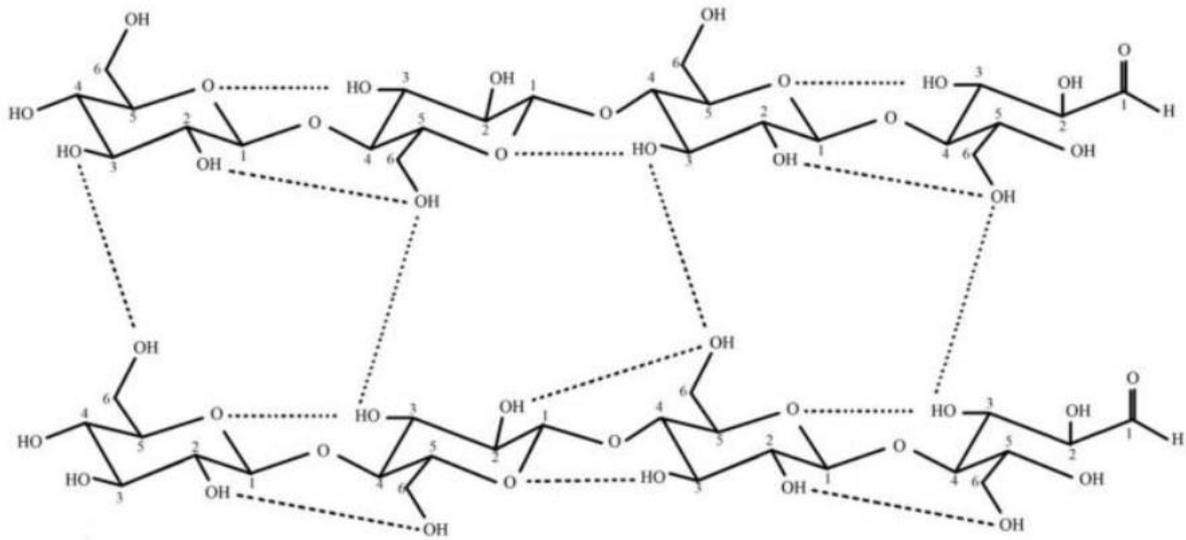


Figure 15 : les liaisons hydrogènes entre les groupes hydroxyles au sein de la cellulose bactérienne (Lahiri, 2021).

5. Caractérisation des échantillons de membranes cellulosique neutre par MEB :

Les membranes cellulosiques issues des mères de vinaigres de cidre sont des structures complexes et biologiquement actives produites par des bactéries acétiques, principalement du genre (*Acetobacter*). Pendant la fermentation du vinaigre, ces bactéries synthétisent des fibres de cellulose qui se regroupent pour former une membrane dense et poreuse. La mère de vinaigre, flottant à la surface du liquide en fermentation, est riche en cellulose et autres composés biologiques. Cette cellulose bactérienne est particulièrement pure et possède des propriétés mécaniques et de rétention d'eau supérieures à celles de la cellulose végétale, en raison de sa structure nanofibrillaire et de son haut degré de polymérisation.

Les trois images fournies dans la **figure 10**, sont des micrographies électroniques à balayage (MEB) de membranes de cellulose obtenues à partir d'une mère de vinaigre. Chaque image montre la structure et les caractéristiques morphologiques de la membrane à différentes amplifications : x3.0k, x8.0k, et x4.0k. L'analyse détaillée de ces images permet de mieux comprendre la formation et les propriétés de ces membranes de cellulose.

La première image, prise à une amplification de x3.0k, présente une vue générale de la membrane de cellulose. On peut observer une structure poreuse avec des agrégats sphériques disséminés sur la surface. Ces agrégats sont probablement des colonies de bactéries acétiques, comme celles du genre (*Acetobacter*), qui sont responsables de la production de cellulose. La présence de ces bactéries est essentielle dans le processus de formation de la membrane.

La texture irrégulière et poreuse de la membrane est typique des matrices de cellulose bactérienne, qui se caractérisent par un réseau dense et entrelacé de fibres de cellulose. Cette structure permet une grande capacité de rétention d'eau et une bonne perméabilité, des propriétés qui sont exploitées dans diverses applications biologiques et médicales.

La deuxième image, à une amplification de x8.0k, offre une vue plus détaillée des agrégats bactériens et de la surface de la membrane. À ce niveau de zoom, il est possible de distinguer les contours plus nets des bactéries individuelles ou des petits amas de cellules. La taille des sphères visibles est cohérente avec celle des bactéries acétiques, qui mesurent typiquement quelques micromètres de diamètre.

Cette image montre également la complexité de la structure fibrillaire de la cellulose bactérienne. Les fibres de cellulose semblent s'entrelacer et former un réseau tridimensionnel dense, qui contribue à la robustesse mécanique et à la stabilité de la membrane. La structure fine et compacte de la membrane est cruciale pour ses propriétés fonctionnelles, telles que l'absorption et la filtration.

La troisième image, à une amplification de x4.0k, fournit une vue intermédiaire entre les deux précédentes. On peut y voir des détails supplémentaires sur la distribution des bactéries et la structure de la membrane. Les pores et les canaux sont clairement visibles, ce qui permet de mieux comprendre comment la membrane peut être utilisée pour des applications de filtration et de séparation.

Cette image met en évidence la diversité des tailles de pores et la distribution hétérogène des agrégats bactériens. Les pores plus grands peuvent permettre le passage de molécules de plus grande taille, tandis que les pores plus petits peuvent retenir des particules plus fines. Cette caractéristique est particulièrement utile dans les applications de filtration biologique et médicale, où la sélectivité et l'efficacité de la filtration sont cruciales.

Discussion

Ces caractéristiques structurales rendent la membrane de cellulose adaptée à diverses applications en biologie, médecine et microbiologie, notamment dans la culture cellulaire, les pansements bioactifs et la filtration biologique et la purification de l'eau.

6. Interprétation de spectre RAMAN de la membrane cellulosique :

Pour cette analyse, nous avons utilisé un laser de 633 nm avec une configuration spectroscopique spécifiée dans le document joint. La spectroscopie Raman a permis d'obtenir des spectres détaillés montrant les variations d'intensité en fonction du décalage Raman (en cm^{-1}). Les conditions expérimentales incluent un temps d'acquisition de 10 secondes et 10 accumulations pour assurer une bonne résolution des pics Raman.

Les principaux pics observés dans le spectre Raman de la membrane de cellulose (**figure 11**) sont situés à 373 cm^{-1} , 432 cm^{-1} , 900 cm^{-1} , 1095 cm^{-1} , 1378 cm^{-1} , 1465 cm^{-1} et 2897 cm^{-1} . Ces pics correspondent aux vibrations caractéristiques des liaisons chimiques présentes dans la cellulose.

- ✓ **Pic à 373 cm^{-1} et 432 cm^{-1}** : Ces pics peuvent être associés aux vibrations de torsion de l'anneau pyranose, un composant structurel de la cellulose. La comparaison avec l'alpha-cellulose montre une similarité, indiquant que la structure de base est conservée dans la cellulose de la membrane étudiée.
- ✓ **Pic à 900 cm^{-1}** : Ce pic est souvent attribué aux vibrations de déformation hors du plan des groupes CH_2 et OH . La présence de ce pic suggère une conformation typique des chaînes de cellulose.
- ✓ **Pic à 1095 cm^{-1}** : Ce pic correspond à la vibration de valence C-O-C dans les liaisons glycosidiques de la cellulose. Il est un marqueur clé pour l'identification de la cellulose dans des matrices complexes.
- ✓ **Pic à 1378 cm^{-1}** : Ce pic représente les vibrations de déformation en plan des groupes CH et OH . La comparaison avec l'alpha-cellulose montre une intensité similaire, indiquant une composition chimique semblable.
- ✓ **Pic à 1465 cm^{-1}** : Ce pic peut être attribué aux vibrations de déformation asymétrique du groupe CH_2 . La présence de ce pic dans les deux spectres (membrane de cellulose et alpha-cellulose) confirme la structure polymérique de la cellulose.

Discussion

- ✓ **Pic à 2897 cm⁻¹** : Ce pic est associé aux vibrations de valence des liaisons C-H. L'intensité de ce pic dans la membrane de cellulose est légèrement différente de celle de l'alpha-cellulose, suggérant des variations possibles dans l'organisation des chaînes de cellulose.

L'analyse comparative des spectres Raman de la membrane de cellulose obtenue à partir de la mère de vinaigre de pommes et de l'alpha-cellulose commerciale révèle des similitudes significatives dans les structures chimiques fondamentales. Cependant, les variations d'intensité observées pour certains pics peuvent indiquer des différences dans la microstructure ou l'organisation des chaînes de cellulose.

Ces différences peuvent être dues aux conditions de croissance biologique et aux procédés de purification utilisés. Par exemple, la production de cellulose par des bactéries acétiques dans la mère de vinaigre de pommes peut entraîner des modifications dans la cristallinité et la morphologie des fibres de cellulose. Ces facteurs influencent directement les propriétés

Mécaniques et la performance de la membrane de cellulose pour des applications spécifiques, telles que la filtration ou la création de matériaux composites.

7. Interprétation de l'absorbance de la solution de bleu de méthylène avant et après filtration :

Les résultats des mesures d'absorbance des solutions de bleu de méthylène avant et après filtration à différentes concentrations sont présentés sur la **figure 12**. Les concentrations testées étaient de 5, 10, 15, 20 et 25 mg/L. Les absorbances avant filtration étaient respectivement de 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 et 1,25 à 664 nm. Après filtration à travers les membranes cellulosiques dopées avec des particules de ZnO, les absorbances mesurées étaient considérablement réduites à 0,05, 0,10, 0,20, 0,30 et 0,40 respectivement.

Cette réduction significative des valeurs d'absorbance indique une élimination efficace du colorant bleu de méthylène par les membranes filtrantes. Par exemple, pour une concentration initiale de 10 mg/L, l'absorbance est réduite de 0,50 à 0,10, ce qui correspond à une diminution de 80 %.

Discussion

Cela démontre que les membranes cellulosiques dopées avec des particules de ZnO possèdent un haut pouvoir de filtration, capable de retenir une grande partie des molécules de colorant présentes dans la solution initiale. Ces résultats positifs confirment le potentiel de ces membranes pour des applications avancées dans la purification de l'eau.

Conclusion générale

Les images MEB de la membrane de cellulose obtenue à partir d'une mère de vinaigre offrent une caractérisation détaillée de sa structure et de sa composition. La micrographie révèle une structure poreuse complexe et irrégulière, typique des membranes de cellulose bactérienne, produite par des bactéries acétiques comme (*Acetobacter*).

Les agrégats sphériques observés sont probablement des colonies bactériennes, essentielles à la formation de la membrane. Les différentes amplifications montrent des détails importants sur la morphologie des fibres de cellulose et la distribution des pores, mettant en évidence la capacité de rétention d'eau et la robustesse mécanique de la membrane.

La spectroscopie Raman offre une méthode précieuse pour caractériser la structure chimique et les propriétés de la cellulose obtenue à partir de sources biologiques.

Les résultats de cette étude montrent que la cellulose de la mère de vinaigre de pommes possède des caractéristiques similaires à celles de l'alpha-cellulose commerciale, avec quelques variations qui peuvent être attribuées aux conditions de production biologique. Cette compréhension approfondie aide à explorer de nouvelles applications et à améliorer les matériaux existants dans le domaine de la biotechnologie et des sciences des matériaux.

Les résultats démontrent que les membranes cellulosiques dopées avec des particules de ZnO sont extrêmement efficaces pour filtrer les solutions de bleu de méthylène, réduisant les absorbances de manière significative à travers différentes concentrations.

La diminution des valeurs d'absorbance, jusqu'à 80 %, confirme la capacité de ces membranes à éliminer les colorants de l'eau. Ces membranes présentent un potentiel considérable pour des applications avancées de purification de l'eau, offrant une solution écologique et performante.

Ces conclusions soulignent l'importance de poursuivre les recherches sur les membranes dopées pour optimiser leur efficacité et leur durabilité dans divers contextes de traitement des eaux.

Référence bibliographique

1. NRDC: Natural Resources Defense Council. Water Pollution: Everything You Need to Know.<https://www.nrdc.org/>
2. BIOROCK : l'assainissement non collectif. Quelles Sont Les Différentes Méthodes De Traitements Des Eaux Usées.<https://biorock.fr/>
3. TPE-58 : Tpetrottinette-58.Websself Les Différentes Méthode De Dépollution De L'eau. [<https://tpe-58.websself.net/>]
4. CIEAU : Centre D'information Sur L'eau. Quels Traitements Sophistiqués Pour Rendre L'eau Potable <https://www.cieau.com/>
5. <https://infoterre.brgm.fr>.
6. Algieri, C., Pugliese, V., Coppola, G., Curcio, S., Calabro, V., & Chakraborty, S. (2022). Arsenic removal from groundwater by membrane technology: Advantages, disadvantages, and effect on human health. *Groundwater for Sustainable Development*, 19, 100815.
7. Mansoori, S., Davarnejad, R., Matsuura, T., & Ismail, A. F. (2020). Membranes based on non-synthetic (natural) polymers for wastewater treatment. *Polymer Testing*, 84, 106381 – 2020.
8. <https://medium.com>
9. Siva-unit: Advanced filtration-unit. Procédés De Filtration Membranaire.<https://www.siva-unit.com/>
10. <https://fr.123.com>.
11. Du, R., Zhao, F., Peng, Q., Zhou, Z., & Han, Y. (2018). Production and characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter xylinus* isolated from Chinese persimmon vinegar. *Carbohydrate Polymers*, 194, 200-207.
12. Moniri, M.; Boroumand Moghaddam, A.; Azizi, S.; Abdul Rahim, R.; Bin Ariff, A.; Zuhainis Saad, W.; Navaderi, M.; Mohamad, R. Production and Status of Bacterial Cellulose in Biomedical Engineering. *Nanomaterials* 2017, 7, 257.
13. Augimeri, R. V., Varley, A. J., Strap, J. L. (2015). Establishing a Role for Bacterial Cellulose in Environmental Interactions: Lessons Learned from Diverse Biofilm-Producing Proteobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1664-302X.

14. Potočník, V.; Gorgieva, S.; Trček, J. From Nature to Lab: Sustainable Bacterial Cellulose Production and Modification with Synthetic Biology. *Polymers* 2023, 15, 3466.
15. Murshid, S., Antonysamy, A., Dhakshinamoorthy, G., Jayaseelan, A., & Pugazhendhi, A. (2023). A review on biofilm-based reactors for wastewater treatment: Recent advancements in biofilm carriers, kinetics, reactors, economics, and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 892, 164796.
16. Jiang, Z., Fu, L., Wei, C., Fu, Q., & Pan, S. (2023). Antibacterial micro/nanomotors: advancing biofilm research to support medical applications. *Journal of Nanobiotechnology*, 21(1), 388.
17. Hussaini, I. M., Oyewole, O. A., Sulaiman, M. A., Dabban, A. I., Sulaiman, A. N., & Tarek, R. (2024). Microbial anti-biofilms: types and mechanism of action. *Research in Microbiology*, 175(3), 104111.
18. Polat, Tuba, et al. "New-generation biofilm effective antimicrobial peptides and a real-time anti-biofilm activity assay: CoMIC." *Applied Microbiology and Biotechnology* 108.1 (2024): 316.
19. Aherne, O., Mørch, M., Ortiz, R., Shannon, O., & Davies, J. R. (2024). A novel multiplex fluorescent-labeling method for the visualization of mixed-species biofilms in vitro. *Microbiology Spectrum*, e00253-24.
20. Fahimirad, S., & Zamanzade, Z. (2023). Osmotic drug deliverance systems: concepts, approaches, and applications. In *Advanced and Modern Approaches for Drug Delivery* (pp. 113-133). Academic Press.
21. Vinoth, R., Sangavi, P., Nakagawa, T., Jayaraman, M., & Mohan, A. V. (2023). All-in-one microfluidic device with an integrated porous filtration membrane for on-site detection of multiple salivary biomarkers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 379, 133214.
22. Trombino, S., Sole, R., Curcio, F., & Cassano, R. (2023). Polymeric based hydrogel membranes for biomedical applications. *Membranes*, 13(6), 576.
23. Wang, J., Tavakoli, J., & Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. *Carbohydrate Polymers*, 219, 63-76.
24. Singhanian, R. R., Patel, A.K., Tseng, Y.S., Kumar, V., Chen, C.W., Haldar, D., Saini, J.K., & Dong, C.D. (2022). Developments in bioprocess for bacterial cellulose production. *Bioresource Technology*, 344, 126343.

25. Lavasani, P. S., Motevaseli, E., Sanikhani, N. S., & Modarressi, M. H. (2019). Komagataeibacter xylinus as a novel probiotic candidate with high glucose conversion rate properties. *Heliyon*, 5(4), e01571.
26. El Abdali, Y.; Saghrouchni, H.; Kara, M.; Mssillou, I.; Allali, A.; Jordan, Y.A.B.; Kafkas, N.E.; El-Assri, E.-M.; Nafidi, H.-A.; Bourhia, M.; et al. Exploring the Bioactive Compounds in Some Apple Vinegar Samples and Their Biological Activities. *Plants* 2023, 12, 3850.
27. Potočník, V.; Gorgieva, S.; Trček, J. From Nature to Lab: Sustainable Bacterial Cellulose Production and Modification with Synthetic Biology. *Polymers* 2023, 15, 3466.
28. Koon, Y. L., Gizem, B., Athanasios, M., Alexander, B. (2013) more than meets the eye in bacterial cellulose : biosynthesis, bioprocessing, and application in advanced fiber composites, 14, 10-32.
29. Moniri, M.; Boroumand Moghaddam, A.; Azizi, S.; Abdul Rahim, R.; Bin Ariff, A.; Zuhainis Saad, W.; Navaderi, M.; Mohamad, R. Production and Status of Bacterial Cellulose in Biomedical Engineering. *Nanomaterials* 2017, 7, 257.
30. Manan, S., Ullah, M.W., Ul-Islam, M., Shi, Z., Gauthier, M., yang, G. (2022). Bacterial cellulose: Molecular regulation of biosynthesis, supramolecular assembly, and tailored structural and functional properties. *Progress in Materials Science*, 129, 100972.
31. Zhou, X.-Q.; Hayat, Z.; Zhang, D.-D.; Li, M.-Y.; Hu, S.; Wu, Q.; Cao, Y.-F.; Yuan, Y. Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Modification, and Applications in Food and Agriculture. *Processes* 2023, 11, 1193.
32. Aquaportail : Aquariophilie et Biologie. Oxyde de zinc. <https://www.aquaportail.com/>
33. Farooq, A., Patoary, M.K., Zhang, M., Mussana, H., Li, M., Naeem, M. A., Mushtaq, M., Farooq, A., & Liu, L. (2020). Cellulose from sources to nanocellulose and an overview of synthesis and properties of nanocellulose/zinc oxide nanocomposite materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1050-1073.
34. Wasim, M., Shi, F., Liu, J., Farooq, A., Khan, S. U., Salam, A., Hassan, T., Zhao, X. (2021). An overview of Zn/ZnO modified cellulosic nanocomposites and their potential applications. *Journal of Polymer Research* 28(9).
35. <https://ligayagarden.online>.
36. Klink, M. J., Laloo, N., Leudjo Taka, A., Pakade, V. E., Monapathi, M. E., & Modise, J. S. (2022). Synthesis, Characterization and Antimicrobial Activity of Zinc Oxide

- Particules against. Selected Waterborne Bacterial and Yeast Pathogens. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(11), 3532.
37. Vevers, R.; Kulkarni, A.; Seifert, A.; Pöschel, K.; Schlenstedt, K.; Meier-Haack, J.; Mezule, L. Photocatalytic Zinc Oxide Particules in Antibacterial Ultrafiltration Membranes for Biofouling Control. *Molecules* 2024, 29, 1274. <https://doi.org/10.3390/molecules29061274>.
38. Ferreira, S. H., Morais, M., Nunes, D., Oliveira, M. J., Rovisco, A., Pimentel, A., Águas, H., Fortunato, E., & Martins, R. (2021). High UV and Sunlight Photocatalytic Performance of Porous ZnO Nanostructures Synthesized by a Facile and Fast Microwave Hydrothermal Method. *Materials* (Basel, Switzerland), 14(9), 2385. <https://doi.org/10.3390/ma14092385>.
39. Lin, C., Chen, D., Hua, Z., Wang, J., Cao, S., & Ma, X. (2021). Cellulose Paper Modified by a Zinc Oxide Nanosheet Using a ZnCl₂-Urea Eutectic Solvent for Novel Applications. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 11(5), 1111. <https://doi.org/10.3390/nano11051111>.
40. Guo, J., Chen, Y., Yin, Y., & Han, X. (2022). Hydrogels for exosome delivery in biomedical applications. *Gels*, 8(6), 328. <https://doi.org/10.3390/gels8060328>.
41. Wang, Y., Chen, L., & Qian, Y. (2022). Advances in the application of electron microscopy in microbiology. *Journal of Advanced Microscopy*, 14(3), 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.jam.2022.03.002>.
42. Zhao, L., Xu, H., & Zhang, S. (2023). Visualization of SARS-CoV-2 interactions using scanning electron microscopy. *Virology Journal*, 20(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s12985-023-01829-9>.
43. Smith, J. A., & Williams, D. R. (2024). The role of electron microscopy in advancing microbial biotechnology. *Biotechnology Advances*, 44(4), 210-223.
44. Li, F., & Zhang, M. (2023). Scanning electron microscopy in the study of microbial biofilms and their medical implications. *Microbial Biotechnology*, 16(2), 112-126. <https://doi.org/10.1111/mbt.12957>.
45. Anker, J. N., Hall, W. P., Lyandres, O., Shah, N. C., Zhao, J., & Van Duyne, R. P. (2023). Biosensing with plasmonic nanosensors. *Nature Materials*, 7(6), 442-453. <https://doi.org/10.1038/nmat2162>.
46. Kneipp, K., Wang, Y., Kneipp, H., Perelman, L. T., Itzkan, I., Dasari, R. R., & Feld, M. S. (2022). Single molecule detection using surface-enhanced Raman scattering (SERS).

- Physical Review Letters, 78(9), 1667-1670.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.1667>.
47. Le Ru, E. C., & Etchegoin, P. G. (2022). Principles of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy: and related plasmonic effects. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095198-0.00001-1>.
48. Vo-Dinh, T., & Dingari, N. C. (2024). Advances in biophotonics for biomedical applications. Biomedical Optics Express, 5(8), 2774-2791. <https://doi.org/10.1364/BOE.5.002774>.
49. Schlücker, S. (2022). Surface-Enhanced Raman Spectroscopy: Concepts and Chemical Applications. Angewandte Chemie International Edition, 55(3), 1118-1134. <https://doi.org/10.1002/anie.201504748>.
50. Smith, E., & Dent, G. (2023). Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470845767>.
51. Ding, S. Y., & You, E. M. (2022). Recent advances in SERS-based biosensors for biomedical applications. Biosensors and Bioelectronics, 26(12), 1203-1215. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.08.043>.
52. Vo-Dinh, T. (2023). SERS-based detection of chemical and biological agents. Journal of Raman Spectroscopy, 34(5), 409-416. <https://doi.org/10.1002/jrs.1021> [23] Lin, C. A. J., Lee, C. H., Hsieh, J. T., & Wang, H. C. (2022). Bioconjugated gold nanorods for molecular imaging using Raman spectroscopy. Advanced Functional Materials, 20(2), 338-345. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901453>.
53. Lin, C. A. J., Lee, C. H., Hsieh, J. T., & Wang, H. C. (2022). Bioconjugated gold nanorods for molecular imaging using Raman spectroscopy. Advanced Functional Materials, 20(2), 338-345. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901453>.
54. Camden, J. P., Dieringer, J. A., Zhao, J., Van Duyne, R. P. (2023). Controlled Plasmonic Nanostructures for Surface-Enhanced Spectroscopy and Sensing. Accounts of Chemical Research, 41(12), 1653-1661. <https://doi.org/10.1021/ar800256p>.
55. Liu, Y., Yu, Q., Yang, L., & Cui, Y. (2023). Materials and biomedical applications of implantable electronic devices. Advanced Materials Technologies, 8(4), 2200853.
56. Przygodzka, K.; Charęza, M.; Banaszek, A.; Zielińska, B.; Ekiert, E.; Drozd, R. Bacterial Cellulose Production by Komagataibacter xylinus with the Use of Enzyme-Degraded Oligo- and Polysaccharides as the Substrates. Appl. Sci. 2022, 12, 12673.
57. Lahiri, D., Nag, M., Dutta, B., Dey, A., Sarkar, T., Pati, S., Edinur, H. A., Abdul Kari, Z., Mohd Noor, N. H., & Ray, R. R. (2021). Bacterial Cellulose: Production,

- Characterization, and Application as Antimicrobial Agent. *International journal of molecular sciences*, 22(23), 12984.
58. Augimeri, R. V., Varley, A. J., Strap, J. L. (2015). Establishing a Role for Bacterial Cellulose in Environmental Interactions: Lessons Learned from Diverse Biofilm-Producing Proteobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6,1664-302X.
 59. Liu, M., Liu, L., Jia, S. et al. Complete genome analysis of *Gluconacetobacter xylinus* CGMCC 2955 for elucidating bacterial cellulose biosynthesis and metabolic regulation. *Sci Rep* 8, 6266 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24559-w>.
 60. Lee KY, Buldum G, Mantalaris A, Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites. *Macromol Biosci*. 2014 Jan;14(1):10-32. doi: 10.1002/mabi.201300298. Epub 2013 Jul 30. PMID: 23897676.
 61. Kavitha, A., Salvatore, L.C., Marcello, B., Stefano, C., Maria, G. better under stress : improving bacterial cellulose production by *komagataeibacter xylinus* K2G30 (UMCC 2756) using adaptive laboratory evolution. *Frotiers in microbiology*, 2022, 13, 1664-302X.
 62. Przygodzka, K.; Chareza, M.; Banaszek, A.; Zielińska, B.; Ekiert, E.; Drozd, R. Bacterial Cellulose Production by *Komagateibacter xylinus* with the Use of Enzyme-Degraded Oligo- and Polysaccharides as the Substrates. *Appl. Sci*. 2022, 12, 12673. <https://doi.org/10.3390/app122412673>.
 63. Swingler, S.; Gupta, A.; Gibson, H.; Kowalczyk, M.; Heaselgrave, W.; Radecka, I. Recent Advances and Applications of Bacterial Cellulose in Biomedicine. *Polymers* 2021, 13, 412. <https://doi.org/10.3390/polym13030412> .
 64. Cristina, C., Ana, B., Angeles, B., Carlos, N. enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose. (2016), 23(1).

Annexe

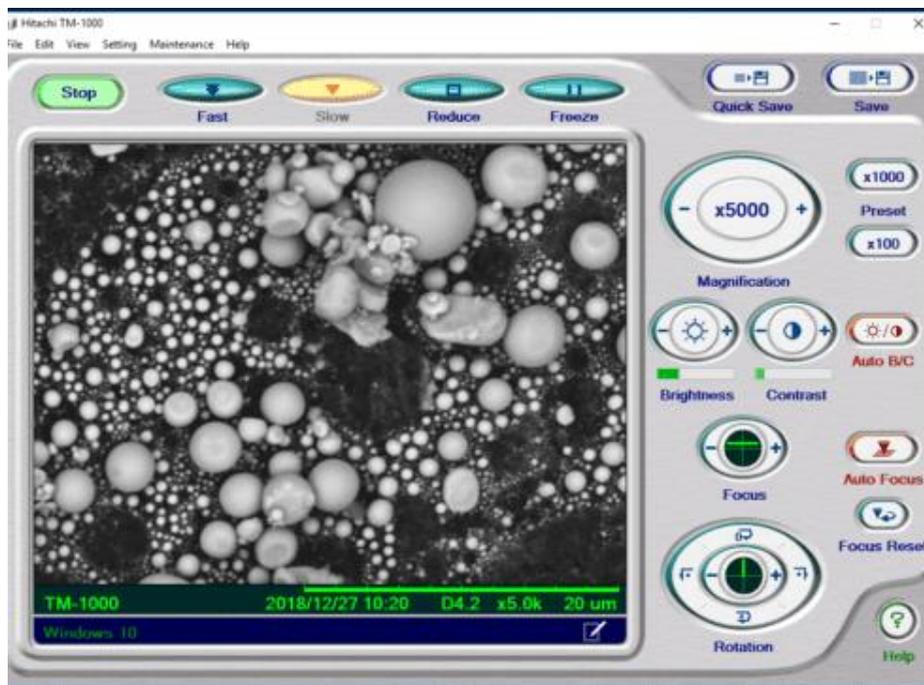
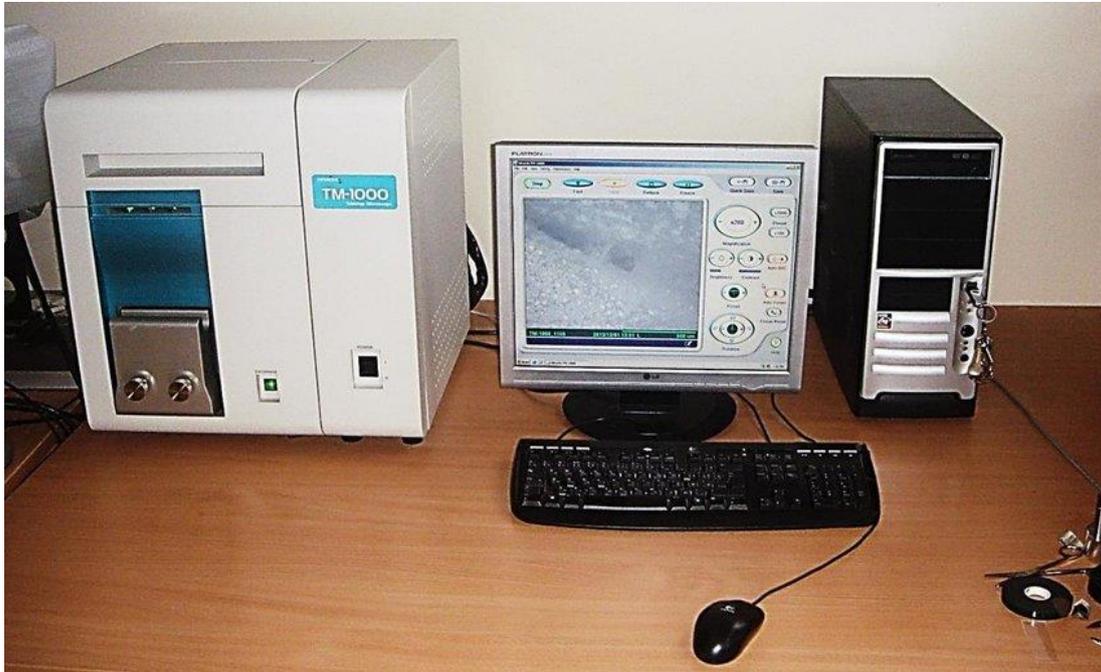


Figure A1: Microscopie à balayage électronique (MEB) (original 2024).

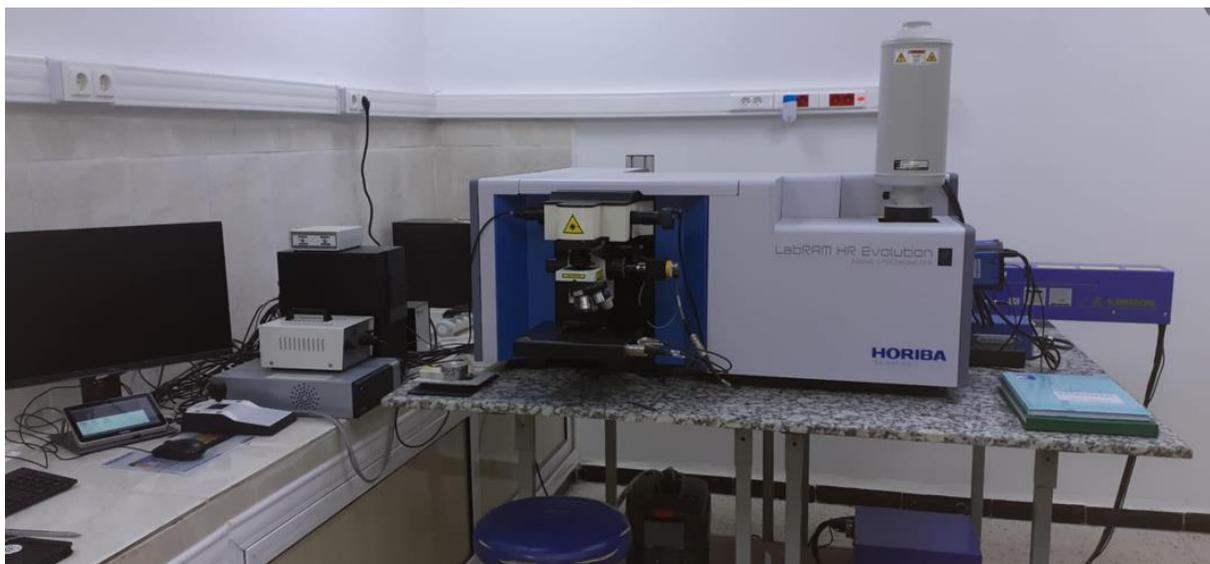


Figure A2: Spectroscopie Raman. (original 2024).

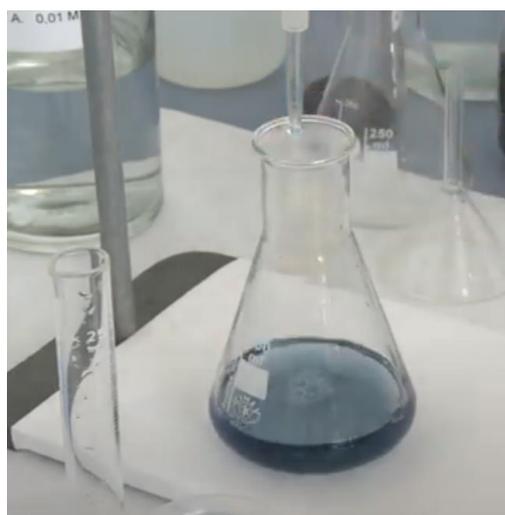


Figure A3: Préparation de la solution de bleu de méthylène avec différentes concentrations.
(original 2024).



Figure A4: Lavage de la membrane biocellulosique dopée ZnO avant début du test avec de l'O.D.I.. (original 2024).



Figure A5: Montage (placement) de la membrane biocellulosique dopée ZnO, sous vide.
(original 2024).