

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 الإخوة منتوري قسنطينة I  
Frères Mentouri Constantine I University  
Université Frères Mentouri Constantine I

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département : Microbiologie

كلية علوم الطبيعة والحياة  
قسم : الميكروبيولوجيا

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie  
Filière : Sciences Biologiques  
Spécialité : Mycologie et Biotechnologie Fongique

N° d'ordre :  
N° de série :

Intitulé :

---

**Des études bibliographiques sur la production des cellulases  
d'*Aspergillus niger* par l'utilisation des sous produits agroalimentaires**

---

Présenté par : BOULESNANE Abir  
BOUZEKIOU Somia

Le 20/06/2023

Jury d'évaluation :

**Présidente :** LABBANI Fatima-Zohra Kenza (MCA – ENS Assia DJEBAR, Constantine).

**Encadreur :** BOUCHERIT Zeyneb (MAA- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Examinatrice :** LEGHLIMI Hind (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Année universitaire  
2022 - 2023**

## Remerciements

*Nous tenons à remercier en premier lieu DIEU, Le tout puissant de nous avoir donné courage, santé et patience pour achever ce travail.*

*Nous remercions vivement et chaleureusement,  
M<sup>me</sup> BOUCHREIT ZEYNEB, maître assistante A à UFM  
Constantine1, pour avoir encadré et dirigé ce mémoire avec une  
grande rigueur scientifique aussi pour ses encouragements, ses  
conseils, sa confiance, sa patience, elle a constamment porté un  
regard critique ouvert et constructif sur ce travail.*

*Nous tenons aussi à présenter nos vifs remerciements et notre  
respect au jury pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de  
juger ce mémoire :*

*M<sup>me</sup> LABBANI F.Z.K maître de Conférences A, ENS, Assia  
Djebar Constantine en tant que présidente du jury.*

*M<sup>me</sup> LEGHLIMI H maître de Conférences A à UFM Constantine1  
en tant qu'examinatrice.*

*Nos profonds remerciements vont également à toutes les  
personnes qui nous ont aidés et soutenu de près ou de loin dans  
la réalisation de ce travail.*



## Dédicace

*Au nom de dieu je dédie ce modeste travail*

*A celle qui m'a donnée la vie, mon paradis sur terre, le symbole de tendresse,  
ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin, à ma mère « Malika ».*

*A mon père « Abed », mon soutien dans la vie Qui m'a encouragé depuis mes  
premiers pas jusqu'à ce que j'obtienne mon diplôme.*

*Que dieu les gardes et les protège.*

*A mes belles sœurs Choubaila, Imane, Nour el-houda, Chaïma, Halla , à qui je  
souhaite tout du bonheur et du succès Dans leur vie.*

*A toute la famille Boulesnane ET Djaou.*

*A*

*A mon binôme Somia, on a passé des bons moments ensemble.*

*A tous mes professeurs que j'ai rencontrés dans mon parcours universitaire.*

*A toutes les personnes qui de près et de loin m'ont apportée leur aide A tous,  
du fond de mon cœur je vous dédie ce travail.*



*ABIR.*



## Dédicace

*Merci à Dieu, à qui je dois tout, d'avoir guidé mes pas et de m'avoir donné la volonté pour réaliser ce travail.*

*Je dédie ce mémoire à celle qui m'a donné la vie ; qui s'est sacrifiée pour ma réussite et mon bonheur, à ma chère mère merci maman **FATIMA**.*

*A Mon père **Youcef** symbole de tendresse, qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager ; m'aider et me protéger Je t'aime papa.*

*A mes belles sœurs **Houda, Kenza et Meriem** je leur souhaite bonheur et répondre à leurs exigences.*

*A mes chères frères **Ammar et Djamel** à qui je souhaite beaucoup de réussite.*

*A mes petits princes de mes sœurs **Wiame, Iyed, Ibrahim, Anes, Assil et Adem**.*

*A ma belle tante **Nassira**.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidée encouragé, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieurs, mon binôme **Abir** et mes amis ; **Soundous, Amina, Manel, Rawya et Abir**.*

*A tous mes amis et collègues de la promotion.*



SOMIA

# *Tables des matières*

**Résumé**

**Liste des abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction.....1**

**Synthèse bibliographique**

**Chapitre 01 : Cellulases**

1. Cellulases.....3

1.1. Généralités .....3

1.2. Définition .....3

1.3. Nomenclature .....3

1.4. Structure de cellulases .....4

1.5. Mode d'action de cellulase .....4

1.6. Applications des cellulases .....5

1.6.1. Industrie de la pâte et du papier .....5

1.6.2. Industrie des textiles .....6

1.6.3. Industrie du bioéthanol .....6

1.6.4. Industrie alimentaire .....6

1.6.5. Industrie de l'alimentation animale .....6

1.6.6. Industries agricoles .....7

1.6.7. Industries des détergents.....7

1.6.8. Extraction de l'huile d'olive .....7

1.6.9. Sciences pharmaceutiques et médicales .....7

1.7. Origines de cellulases .....8

1.7.1. Origine animale .....8

1.7.2. Origine végétale.....8

1.7.3. Origine microbienne .....	8
----------------------------------	---

## **Chapitre 02 : Moisissures cellulolytiques**

2. Les moisissures cellulolytiques .....	10
2.1. Généralités sur les moisissures.....	10
2.1.1. Conditions de croissance .....	10
2.1.2. Classification des moisissures.....	11
2.2. Souches productrices de cellulases.....	11
2.2.1. Le genre <i>Trichoderma</i> .....	12
2.2.2. Le genre <i>Penicillium</i> .....	13
2.2.3. Le genre <i>Phanerochaete</i> .....	13
2.2.4. Le genre <i>Aspergillus</i> .....	14
2.3. Méthodes de culture des moisissures cellulolytiques .....	15
2.3.1. Fermentation en milieu solide.....	15
2.3.2. Fermentation en milieu liquide .....	16

## **Chapitre 03 : Biomasse ligninocellulosique**

3. La biomasse ligninocellulosique.....	17
3.1. Généralités .....	17
3.2. Composition et structure .....	18
3.2.1. La cellulose .....	19
3.2.2. L'hémicellulose.....	20
3.2.3. La lignine .....	20
3.3. Les interactions entre polymères .....	21
3.4. Impacts des déchets lignocellulosiques .....	22
3.5. Valorisation de la biomasse lignocellulosique .....	22
3.6. Prétraitement de la biomasse lignocellulosique .....	23
3.6.1. Prétraitement physique .....	24
3.6.2. Prétraitement chimique.....	24

3.6.3. Prétraitement physico-chimique.....	25
3.6.4. Prétraitement biologique.....	25
3.7. Exemples de biomasses ligninocellulosique .....	27
3.7.1. Son de blé .....	27
3.7.2. Pailles de blé.....	27
3.7.3. Pailles de riz .....	28
3.7.4. Balles de riz.....	28
3.7.5. Rafles de maïs.....	29
3.7.6. Bagasse de canne à sucre .....	30
3.7.7. Herbe à carotte.....	30
3.7.8. Déchets de banane (Pseudo-tronc de bananier).....	31
3.7.9. Thé vert .....	32
3.7.10. Jacquier.....	32

## **Synthèse de résultats**

### **Chapitre 01 : Description des protocoles**

1. Microorganismes .....	34
2. Préparation des substrats .....	35
3. Préparation des milieux de culture et la fermentation en milieu solide (FMS) .....	35
4. Extraction des cellulases bruts .....	36
5. Dosage des activités enzymatiques cellulasiqes.....	37

### **Chapitre 02 : Analyse des résultats**

1. Description .....	39
2. Discussion .....	40

## **Conclusion et perspectives ..... 43**

## **Références bibliographiques**

# *Résumés*



## Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est la synthèse bibliographique des études portant sur l'effet de différents déchets agroalimentaires sur la production des cellulases en milieu solide par la souche fongique *Aspergillus niger*. Divers sous-produits agroalimentaires sont étudiés dans ce mémoire, les déchets de thé vert, les pseudo-troncs de bananier, les déchets de jacquier, le son de blé, la bagasse de canne à sucre, la paille de blé, la paille de riz, les balles de riz, les tiges de canne à sucre, l'herbe de carottes et les rafles de maïs (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil et Jacob, 2022). Les activités cellulases sont dosées à l'aide de carboxyméthylcellulose (CMC) et (DNS) pour l'endoglucanase, le papier filtre pour l'activité papier filtre, et le p-nitrophényl  $\beta$ -D glucopyranoside pour le dosage de  $\beta$ -Glucosidase. Un maximum de production est observé, pour les activités endoglucanase ( $65.85 \pm 2.18$  UI/g), APF ( $4.50$  UPF/g) et  $\beta$ -Glucosidase ( $1016.52 \pm 3.58$  UI/g) lorsque la souche *A. niger* 28A est cultivée sur les déchets de thé vert comme substrat (Saldaña et al., 2022). De plus, les trois activités étudiées (endoglucanase  $26.33 \pm 2.38$  UI/g, APF  $2.11 \pm 0.14$  UPF/g et  $\beta$ -Glucosidase  $34.3 \pm 1.28$  UI/g) sont maximales lorsque *A. niger* NFCCI 4113 a utilisé le son de blé comme substrat de fermentation ; suivi par l'herbe de carottes ( $25.6 \pm 2.11$  UI/g,  $1.94 \pm 0.13$  UPF/g,  $32.57 \pm 0.71$  UI/g) et la paille de riz ( $16.6 \pm 1.93$  UI/g,  $1.74 \pm 0.12$  UPF/g,  $28.33 \pm 0.86$  UI/g) (Kumar et al., 2018). Alors que la souche *A. niger* NFCCI 4113 a présenté les trois plus faibles activités d'endoglucanase ( $12.63 \pm 1.42$  UI/g), d'APF ( $1.43 \pm 0.08$  UPF/g) et de  $\beta$ -Glucosidase ( $27.47 \pm 0.91$  UI/g) sur les balles de riz comme substrat de fermentation solide. D'autres déchets ont aussi donné deux mauvaises activités sur trois comme les rafles de maïs (endoglucanase  $11.1 \pm 1.47$  UI/g, APF  $1.25 \pm 0.12$  UPF/g), la Bagasse de canne à sucre (endoglucanase  $12.47 \pm 0.85$  UI/g et  $\beta$ -Glucosidase  $25.5 \pm 0.82$  UI/g) et les tiges de canne à sucre (APF  $1.24 \pm 0.13$  UPF/g et  $\beta$ -Glucosidase  $24.6 \pm 0.8$  UI/g) (Kumar et al., 2018). De plus *A. niger* cultivée sur les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier a montré de mauvaises activités d'endoglucanase ( $4.1$  UI/g pour chacune) (Dinil et Jacob, 2022). En vis de cette étude, les sous-produits agroalimentaires peuvent être valorisés pour la production des cellulases à l'échelle industrielle.

**Mots clés** : Cellulase, *Aspergillus niger*, fermentation en milieu solide, déchets lignocellulosiques.

## Abstract

The main objective of this work is the studies review on the effect of various agri-food wastes on cellulase production in solid media by the fungal strain *Aspergillus niger*. Various agri-food by-products are studied, green tea waste, banana pseudostems, jackfruit waste, wheat bran, sugarcane bagasse, wheat straw, rice straw, rice husks, sugarcane stalks, carrot grass and corn cobs (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil and Jacob, 2022). Cellulase activities are assayed using carboxymethylcellulose (CMC) and (DNS) for endoglucanase, filter paper for filter paper activity, and p-nitrophenyl  $\beta$ -D glucopyranoside for  $\beta$ -Glucosidase assay. Maximum production is observed, for endoglucanase ( $65.85 \pm 2.18$  IU/g), FPA ( $4.50$  UFP/g) and  $\beta$ -Glucosidase ( $1016.52 \pm 3.58$  IU/g) activities when the *A. niger* 28A strain is grown on green tea waste as substrate (Saldaña et al., 2022). Furthermore, the three activities studied (endoglucanase  $26.33 \pm 2.38$  IU/g, FPA  $2.11 \pm 0.14$  UFP/g and  $\beta$ -Glucosidase  $34.3 \pm 1.28$  IU/g) are maximal when *A. niger* NFCCI 4113 used wheat bran as fermentation substrate ; followed by carrot grass ( $25.6 \pm 2.11$  IU/g,  $1.94 \pm 0.13$  UFP/g,  $32.57 \pm 0.71$  IU/g) and rice straw ( $16.6 \pm 1.93$  IU/g,  $1.74 \pm 0.12$  UFP/g,  $28.33 \pm 0.86$  IU/g) (Kumar et al., 2018). Whereas the *A. niger* NFCCI 4113 strain showed the three lowest activities of endoglucanase ( $12.63 \pm 1.42$  IU/g), FPA ( $1.43 \pm 0.08$  UFP/g) and  $\beta$ -Glucosidase ( $27.47 \pm 0.91$  IU/g) on rice husks as solid fermentation substrate. Other wastes also gave two poor activities out of three, such as corn cobs (endoglucanase  $11.1 \pm 1.47$  IU/g, FPA  $1.25 \pm 0.12$  UFP/g), sugarcane bagasse (endoglucanase  $12.47 \pm 0.85$  IU/g and  $\beta$ -Glucosidase  $25.5 \pm 0.82$  IU/g) and sugarcane stalks (FPA  $1.24 \pm 0.13$  UFP/g and  $\beta$ -Glucosidase  $24.6 \pm 0.8$  IU/g) (Kumar et al., 2018). In addition, *A. niger* grown on banana pseudostems and jackfruit waste showed poor endoglucanase activities ( $4.1$  IU/g for each) (Dinil and Jacob, 2022).

In view of this study, agri-food by-products can be valorized for the production of cellulases on an industrial scale.

**Key words** : Cellulase, *Aspergillus niger*, solid-state fermentation, lignocellulosic waste.

## ملخص

إن الهدف الأساسي من هذه المذكرة هو الدراسة النظرية لتأثير مختلف بقايا الأطعمة الغذائية الزراعية على إنتاج السليلاز وفق التخمير الصلب بواسطة السلالة الفطرية *Aspergillus niger*. العديد من هذه النفايات تمت دراستها في هذه المذكرة منها: نفايات الشاي الأخضر، سيقان الموز الكاذبة، نفايات الكاكايا، نخالة القمح، نفل قصب السكر، قش القمح، قش الارز، قشور الارز، سيقان قصب السكر، عشب الجزر و اكواز الذرة تم اختيارها لفحص تأثيرها على إنتاج السليلاز (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil et Jacob, 2022). يتم تقييم أنشطة السليلاز باستخدام carboxyméthylcellulose (CMC) و endoglucanase (DNS) للترشيح لنشاط APF، p-nitrophényl β-D glucopyranoside لقياس β-Glucosidase. لوحظ أن الحد الأقصى β-Glucosidase (1016.52±3.58 UI/g)، APF (4.50 UPF/g) و endoglucanase (65.85±2.18 UI/g) عند استخدام السلالة الفطرية *A.niger* 28A نفايات الشاي الأخضر كركيزة (Saldaña et al., 2022). بينما عند استعمال *A.niger* NFCCI 4113 لنخالة القمح كركيزة للتخمير الصلب فكانت النتائج قصوى عشب الجزر (25.6±2.11 UI/g، 1.94±0.13 UPF/g، 32.57±0.71 UI/g) و قش الارز (16.6±1.93 UI/g، 1.74±0.12 UPF/g، 28.33±0.86 UI/g) (Kumar et al., 2018). بالإضافة إلى وجود أدنى ثلاث نشاطات إنزيمية في هذه السلالة المزروعة على قشور الأرز كركيزة للتخمير الصلب (endoglucanase (12.63±1.42 UI/g)، APF (1.43±0.08 UPF/g)، β-Glucosidase (27.47±0.91 UI/g). أما باقي النفايات فتم تسجيل نشاطين سيئين من بين ثلاثة أنشطة (endoglucanase 11.1±1.47 UI/g، APF 1.25±0.12 UPF/g) بالنسبة لأكواز الذرة، نفل قصب السكر (β-Glucosidase 25.5±0.82 UI/g، endoglucanase 12.47±0.85 UI/g) و سيقان قصب السكر (β-Glucosidase 24.6±0.8 UI/g، APF 1.24±0.13 UPF/g) (Kumar et al., 2018). وقد أظهرت السلالة الفطرية *A.niger* المزروعة على سيقان الموز الكاذبة ونفايات الكاكايا نشاط سيئ للـ endoglucanase (4.1 UI/g) لكل منهما (Dinil et Jacob, 2022).

في ضوء هذه الدراسة، يمكن تمييز المنتجات الثانوية للأغذية الزراعية لإنتاج السليلولاز على نطاق صناعي.

**الكلمات المفتاحية:** السليلاز، *Aspergillus niger*، التخمير الصلب، مخلفات اللجنوسليلولوز.

## *Liste des abréviations*

**AFEX** : Expansion des fibres d'ammoniaque.

**APF** : Activité papier filtre.

**BG** :  $\beta$ -Glucosidase.

**C/N** : Rapport carbone sur azote.

**CBH** : Cellobiohydrolase.

**CBM** : Domaine de liaison au substrat.

**CMC** : Carboxyméthyl cellulose.

**Da** : Unité de masse (Dalton).

**DNS** : Acide 3,5-dinitrosalicylique.

**DP**: Degré de polymérisation.

**EC**: Enzyme commission.

**EG** : Endoglucanases.

**FML** : Fermentation en milieu liquide.

**FMS** : Fermentation en milieu solide.

**ha** : Hectare.

**LCC** : Complexe lignine carbohydrate.

**M** : Molarité.

**mM** : Milli Molarité.

**nm** : Nanomètre.

**PDA** : *Potato- Dextrose- Agar*.

**PNPG** : P-nitrophényl  $\beta$ -D glucopyranoside.

**Psi** : Unité de pression.

**p/v** : Rapport poids sur volume.

**rpm** : Rotation par minute.

**sp** : Espèce.

**spp** : Plusieurs espèces d'un genre.

**UI** : Unité internationale.

**UPF** : Unité papier filtre.

**$\mu$**  : Micro.

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Structure chimique de cellulase .....	4
<b>Figure 2</b> : Schéma général de la dégradation de la cellulose .....	5
<b>Figure 3</b> : Structure de l'hyphe chez les moisissures : mycélium non septé et mycélium septé .....	10
<b>Figure 4</b> : Les grands groupes des Eumycètes .....	11
<b>Figure 5</b> : Aspect microscopique de <i>Trichoderma</i> .....	12
<b>Figure 6</b> : Aspect microscopique de <i>Penicillium</i> .....	13
<b>Figure 7</b> : Image représentant l'action caractéristique des pourritures blanches sur le bois ....	14
<b>Figure 8</b> : Tête aspergillaire bisériée (droite) et unisériée (gauche).....	15
<b>Figure 9</b> : Structure de la biomasse lignocellulosique au niveau du paroi cellulaire végétale	17
<b>Figure 10</b> : Composition de la biomasse lignocellulosique .....	18
<b>Figure 11</b> : Structure moléculaire de la cellulose .....	19
<b>Figure 12</b> : Structure chimique de l'hémicellulose .....	20
<b>Figure 13</b> : Les trois alcools phénylpropénoïques de la lignine.....	21
<b>Figure 14</b> : L'effet de prétraitement sur la biomasse lignocellulosique. (a) la biomasse lignocellulosique avant le prétraitement, (b) la biomasse lignocellulosique après le prétraitement .....	24
<b>Figure 15</b> : Les différentes couches de son de blé .....	27
<b>Figure 16</b> : La paille de blé .....	28
<b>Figure 17</b> : Paille de riz.....	28
<b>Figure 18</b> : Balles de riz.....	29
<b>Figure 19</b> : Rafles de maïs .....	29
<b>Figure 20</b> : Bagasse de canne à sucre .....	30
<b>Figure 21</b> : Herbes de carottes ( <i>Parthenium hysterophorus</i> ).....	31
<b>Figure 22</b> : Structure de bananier .....	31
<b>Figure 23</b> : Le théier ( <i>Camellia sinensis</i> ) .....	32
<b>Figure 24</b> : L'arbre de jacquier. ....	33
<b>Figure 25</b> : Le fruit de jacquier .....	33

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1</b> : Les microorganismes producteurs de cellulases. ....	9
<b>Tableau 2</b> : Noms commerciaux et fournisseur des cellulases d' <i>Aspergillus niger</i> . ....	15
<b>Tableau 3</b> : Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de diverses biomasses lignocellulosiques. ....	18
<b>Tableau 4</b> : Avantages et inconvénients des techniques de prétraitement de la biomasse lignocellulosique. ....	26
<b>Tableau 5</b> : Les activités cellulases produites par les différentes souches d' <i>Aspergillus niger</i> sur les déchets lignino-cellulosiques. ....	39

# *Introduction*

Ces dernières années, les cellulases ont suscité beaucoup d'attention en raison de leur grand potentiel biotechnologique et industriel (Korish, 2003). Ces enzymes, divisées en trois classes : endoglucanase ; exoglucanase et  $\beta$ -glucosidase, peuvent hydrolyser la cellulose en unités de sucre plus petites, telles que le cellobiose et le glucose (Jasani et *al.*, 2016 ; Wonoputri et *al.*, 2018).

Depuis plus de 30 ans les cellulases sont disponibles dans le commerce en tant que troisième enzyme industrielle sur le marché mondial (Kuhad et *al.*, 2011 ; Wonoputri et *al.*, 2018). Ces enzymes ont un large éventail d'applications incluant l'alimentation humaine et animale, les textiles, les carburants, l'industrie du papier, la gestion des déchets, l'industrie médicale/pharmaceutique et le traitement de la pollution (Moussa et Tharwat, 2007).

Les cellulases sont extraites de trois sources principales : les plantes, les animaux et les micro-organismes (Abdullah et *al.*, 2018). Les champignons sont parmi les majeurs producteurs de cellulase (Korish, 2003). Le genre *Aspergillus* est largement étudiées pour son potentiel de dégradation de la cellulose, de l'hémicellulose et d'autres polysaccharides, et ainsi il est appliqué avec succès à la conversion de lignocellulose (Mhuantong et *al.*, 2021). En effet, les souches d'*Aspergillus* ont été rapportées aussi comme les meilleurs producteurs de  $\beta$ -glucosidase, en raison de leur rendement important, leur large gamme d'applications et de leur sécurité élevée. Les enzymes secrétées par la souche *Aspergillus niger* attirent de plus en plus l'attention, et devenu l'une des souches les plus courantes dans les applications industrielles (Sales et *al.*, 2011 ; Liu, 2021).

Les cellulases fongiques sont traditionnellement produites par la fermentation submergée (Reddy et *al.*, 2015) mais les coûts élevés des substrats utilisés et les faibles rendements enzymatiques sont les principaux problèmes de la production (Darabzadeh et *al.*, 2018). Pour cela la fermentation en milieu solide (FMS) est un procédé alternatif pour la production industrielle d'enzymes dans lequel les résidus lignocellulosiques sont utilisés comme source de carbone et inducteur enzymatique (Salomão et *al.*, 2018).

La production mondiale annuelle en matières végétales sèches sous forme de déchets lignocellulosiques est estimée à environ 100 milliards de tonnes. Ces déchets sont générés par la foresterie, l'agriculture et les industries agro-alimentaires (Dey et *al.*, 2018 ; Abdullah et *al.*, 2018). Ces résidus lignocellulosiques fournissent une source de nutriments abondante, renouvelable, bon marché et facilement disponible pour la production de cellulases par des micro-organismes (Salomão et *al.*, 2018) comme le son de blé, la bagasse de canne à sucre,



la paille de blé, la paille de riz, les déchets de papier, le marc de fruits, les rafles de maïs, le son de soja, les cultures ligneuses, ainsi que les résidus forestiers (El-Nahrawy et *al.*, 2017 ; Salomão et *al.*, 2018).

De ce fait l'objectif principal de notre étude est la sélection des meilleurs substrats pour la production de cellulases par la souche fongique *Aspergillus niger*. Pour cela, Dans ce mémoire nous avons étudié les cellulases, leurs structures, leurs modes d'action, leurs origines, leurs diverses applications, leurs moisissures productrices et leurs méthodes de culture. Ensuite nous avons reposées sur l'étude de la biomasse lignocellulosique, ses composants majeurs (la cellulose, l'hémicellulose et la lignine), les interactions entre elles, la valorisation, les impacts et les différentes méthodes de prétraitement de déchets lignocellulosiques. En fin, nous avons étudié quelques articles scientifiques portant sur la production des cellulases par *Aspergillus niger* en fermentation solide sur déchets agroalimentaires.

# *Synthèse bibliographique*

# *Chapitre 01 : Cellulases*

## 1. Cellulases

### 1.1. Généralités

Les diverses réactions biochimiques qui composent la vie reposent sur des molécules biologiques appelés enzymes, qui sont en fait des protéines catalytiquement actives. Elles se distinguent des catalyseurs chimiques traditionnels sur plusieurs points importants :

- Vitesse de réaction généralement plus rapide
- Les conditions de réaction sont plus douces en termes de température et de pH.
- La spécificité du substrat et la fiabilité de la réaction sont très élevées.
- Capacité régulatrice (Paës, 2005).

La tendance récente à remplacer les produits chimiques dangereux par des approches de chimie verte dans le secteur industriel a augmenté la demande d'enzymes (Ejaz *et al.*, 2021).

### 1.2. Définition

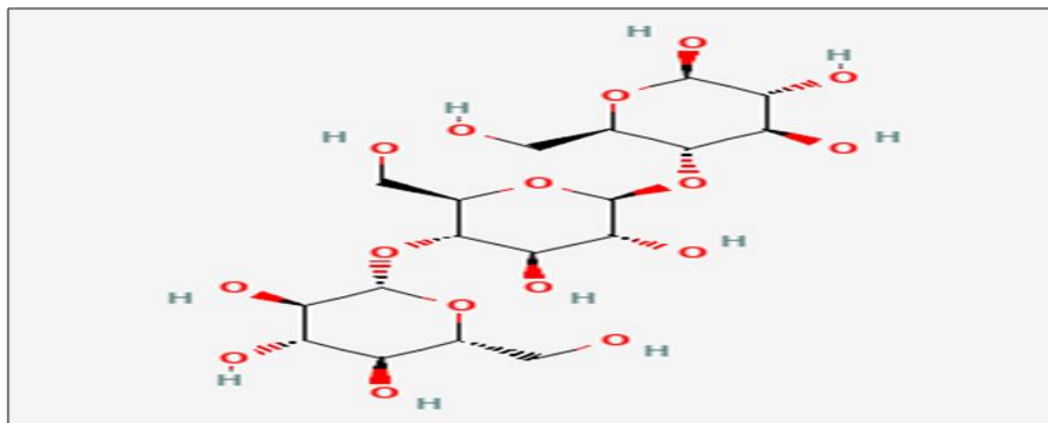
Il y'a aucune enzyme unique capable de dégrader complètement la cellulose brute jusqu'à ses composants finaux, le cellobiose et le glucose. En fait, la définition la plus simple de cellulase consiste en un complexe poly-enzymatique qui attaque la cellulose et la convertit en sucres simples capables de traverser la paroi cellulaire (Roussos, 1987). C'est le complexe multi-enzymatique le plus étudié, comprenant des endo-glucanases (EG), des cellobiohydrolases (CBH) et  $\beta$ -glucosidases (BG) (Singhania *et al.*, 2010), qui décompose la cellulose en monomères de glucose (Ahmed et Bibi, 2018). Elles sont présentes dans 13 des 82 familles de glycoside hydrolases identifiées par analyse de séquence (Singhania *et al.*, 2010).

### 1.3. Nomenclature

- **Nom codifié** : EC. 3.2.1.X
- **Nom systématique** : 1,4 -(1,3 ; 1,4) -beta-D -Glucan4-glucanohydrolase
- **Nom recommandé** : Cellulase.
- **Autres noms** : Endoglucanase, Endo-1,4- $\beta$ -Glucanase, Cellulase carboxyméthylque,  $\beta$ -1,4-endoglucanhydrolase, Celludextrinase, Avicelase, ect. (Schamburg et Salzman, 1991).

#### 1.4. Structure de cellulases

Dans la structure de cellulase, il existe des modules catalytiques et non catalytiques. Les modules catalytiques des cellulases ont été classés en plusieurs familles en fonction de leurs séquences d'acides aminés et de leurs structures cristallines. Les modules non catalytiques de liaison aux hydrates de carbone (CBM) et/ou d'autres modules fonctionnellement connus ou inconnus peuvent être placés à l'extrémité N-terminale ou C-terminale du module catalytique (Figure 1) (Jayasekara et Ratnayake, 2019).



**Figure 1 :** Structure chimique de cellulose (National Center for Biotechnology Information, 2023).

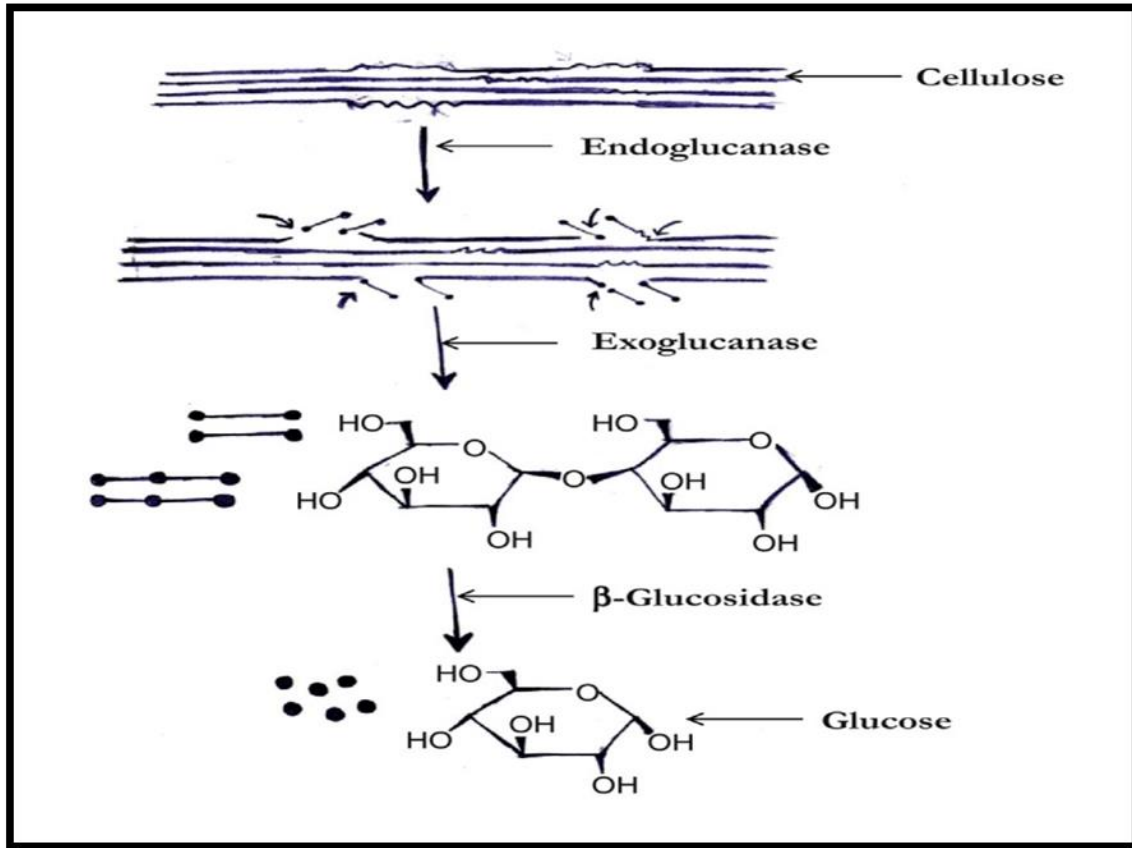
Les cellulases bactériennes et fongiques sont généralement composées de deux ou plusieurs domaines fonctionnels et structuraux liés par des liaisons peptidiques. Chez les organismes aérobies, le domaine de liaison à la cellulose est associé au domaine catalytique, alors que dans les organismes anaérobies, le domaine dockerine se lie au domaine catalytique (Ejaz *et al.*, 2021).

#### 1.5. Mode d'action de cellulase

Dans la nature, l'hydrolyse complète de la cellulose se produit principalement par une combinaison de trois principaux types de cellulases : l'endoglucanase (EC 3.2.1.4), l'exoglucanase, ou la cellobiohydrolase (CBH) (EC3.2.1.91), et la  $\beta$ -glucosidase (BG) (EC 3.2.1.21) (Figure 2) (Rodrigues et Odaneth, 2021).

- L'exoglucanase (CBH) agit sur les extrémités de la chaîne cellulosique et libère du  $\beta$ -cellobiose comme produit final (Kuhad *et al.*, 2011). C'est la seule enzyme qui peut dégrader la cellulose cristalline et la transformer jusqu'à 80 % en glucose (Roussos, 1987).

- L'endoglucanase (EG) attaque aléatoirement les liaisons O-glycosidiques internes pour générer des chaînes de glucane de longueur variable (Kuhad *et al.*, 2011).
- La  $\beta$ -glucosidase agit de manière spécifique sur les disaccharides du  $\beta$ -cellobiose et produisent du glucose (Kuhad *et al.*, 2011).



**Figure 2** : Schéma général de la dégradation de la cellulose (Chakraborty *et al.*, 2016).

## 1.6. Applications des cellulases

Pendant des décennies, les cellulases ont jouées un rôle important en tant que biocatalyseurs (Jayasekara et Ratnayake, 2019). Elles sont de plus en plus utilisées dans de nombreuses applications industrielles (Zhang et Zhang, 2013).

### 1.6.1. Industrie de la pâte et du papier

L'utilisation potentielle des cellulases dans l'industrie du papier et de la pâte à papier a été signalée pour la première fois il y a plus de trois décennies, en 1986. la mise en pâte biomécanique en utilisant des cellulases a permis de réaliser d'importantes économies d'énergie (20 à 40 %) dans le processus de raffinage et d'améliorer la résistance des feuilles à la main (Kuhad *et al.*, 2011). Les cellulases sont utilisées aussi dans les procédés de blanchiment pour augmenter la capacité des cellulases à résister aux produits chimiques de

blanchiment et l'amélioration de la capacité de déshydratation des fibres de cellulose (Rodrigues et Odaneth, 2021).

### **1.6.2. Industrie des textiles**

Les cellulases sont les enzymes les plus largement utilisés dans le traitement humide des textiles, en particulier dans la finition dans le but d'améliorer le touché et l'apparence des textiles (Kuhad *et al.*, 2011). Les cellulases sont utilisées dans le polissage et le blanchiment de fibre. De plus, l'utilisation de cette enzyme réduit les dommages aux tissus (Rodrigues et Odaneth, 2021).

### **1.6.3. Industrie du bioéthanol**

Des technologies sont disponibles pour toutes les étapes de la bioconversion des matériaux lignocellulosiques en éthanol et autres produits chimiques (Kuhad *et al.*, 2011). Les cellulases hydrolysent la biomasse en sucres simples, pentoses ou hexoses, qui sont fermentés pour produire du bioéthanol (Ejaz, 2021). Pour réduire les coûts enzymatiques dans la production de carburant éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, deux aspects sont largement discutés : l'optimisation de la production de cellulase et le développement d'un système catalytique à base de cellulase plus efficace (Kuhad et al., 2011).

### **1.6.4. Industrie alimentaire**

Il est nécessaire de produire des aliments avec une meilleure texture, saveur, couleur et de les rendre plus faciles à emballer et à consommer (Ejaz *et al.*, 2021). La biotechnologie alimentaire aujourd'hui considère les cellulases comme une ressource très précieuse en raison de leur applicabilité croissante dans de nombreux procédés (Jayasekara et Ratnayake, 2019), l'extraction et la clarification des jus de fruits et de légumes à partir de leur pulpe (Rodrigues et Odaneth, 2021).

### **1.6.5. Industrie de l'alimentation animale**

Les animaux sont une importante source de nourriture dans le monde, C'est pourquoi la nutrition animale est si importante (Rodrigues et Odaneth, 2021). Dans la production d'aliments pour animaux, les cellulases sont utilisées pour améliorer la digestibilité des aliments à base de céréales et pour augmenter les valeurs nutritives afin d'améliorer la qualité des fourrages. Ceci peut être utilisé comme un effet positif sur les processus gastro-intestinaux naturels des ruminants (Jayasekara et Ratnayake, 2019), et d'augmenter le rendement de la viande et des autres produits dérivés des animaux (Rodrigues et Odaneth, 2021).

### **1.6.6. Industries agricoles**

Les cellulases sont utilisées pour lutter contre les maladies qui affectent les cultures, pour améliorer les taux de croissance des plantes et pour aider à produire des protoplastes végétaux (Rodrigues et Odaneth, 2021). Elles sont également utilisées pour l'amélioration de la qualité de sol (Sharada *et al.*, 2014). Aussi certaines cellulases fongiques ont la capacité de dégrader la paroi cellulaire des agents pathogènes des végétaux (Jayasekara et Ratnayake, 2019).

### **1.6.7. Industries des détergents**

Les cellulases sont également utilisées l'un des secteurs les plus importants de l'économie mondiale, l'industrie des détergents (Ahmed et Bibi, 2018). Les cellulases alcalines sont les additifs les plus appropriés aux détergents conventionnels. Cela est dû à sa capacité à éliminer les particules de terre et de saleté dans les espaces inter fibrillaires du tissu (Jayasekara et Ratnayake, 2019).

### **1.6.8. Extraction de l'huile d'olive**

L'huile d'olive a de nombreux bienfaits pour la santé ; l'application de cellulase permet de réduire ses pertes, de diminuer la tendance au rancissement, d'augmenter les composants antioxydants, d'améliorer la qualité et le rendement de l'extraction. Les préparations enzymatiques commerciales, Olivex (xylanase, cellulase et pectinase d'*Aspergillus aculeatus*) a été le premier mélange enzymatique utilisé dans l'extraction de l'huile d'olive (Ejaz *et al.*, 2021).

### **1.6.9. Sciences pharmaceutiques et médicales**

Les humains ne sont pas des producteurs de cellulase, mais des recherches médicales et sanitaires récentes montrent les avantages de la consommation d'un mélange d'enzymes contenant de la cellulase (Jayasekara et Ratnayake, 2019). De nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine et de nouvelles applications sont découvertes, comme le traitement des déficiences enzymatiques. Les enzymes sont également utilisées comme agents anti-tumoraux ou antimicrobiens, pour traiter les tissus sanguins et les hernies discales. L'action des cellulases est d'aider à la digestion, c'est-à-dire que la cellulase digère les fibres. Il aide à surmonter les problèmes digestifs comme la malabsorption (Sharada *et al.*, 2014). Une autre application directe possible de la cellulase en médecine consiste à perturber les parois cellulaires des organismes pathogènes (Jayasekara et Ratnayake, 2019).



## 1.7. Origines de cellulases

Dans la nature, les cellulases sont largement répandues. Elles sont retrouvées chez une gamme très variée d'organismes : bactéries, champignons, plantes,... (Xu *et al.*, 2000). De ce fait, les cellulases peuvent être d'origines diverses : animale, végétale et microbienne. Les enzymes microbiennes sont plus stables que les enzymes animales et végétales (Ejaz *et al.*, 2021).

### 1.7.1. Origine animale

Malgré que plusieurs espèces animales sont incapables de produire de cellulases endogènes, la plupart des omnivores et herbivores utilisent la cellulose comme une source de nourriture. De ce fait, elles vivent en symbiose avec des microorganismes cellulolytiques dans leur tube digestif (Smant *et al.*, 1998). Des cellulases sont isolées du jus digestif d'escargots comestibles *Helix pomatia*, de la moule verte et d'un mollusque marin, *Littorina brevicula* (Xu *et al.*, 2000), aussi la moisissure visqueuse *Dictyostelium discoideum* produit des enzymes cellulolytiques, dont la principale fonction est la maturation des spores (Béguin et Aubert, 1994).

### 1.7.2. Origine végétale

La cellulose a été signalée comme étant le principal constituant des parois cellulaires des jeunes avocats (*Persea americana Mill*) (Riccio *et al.*, 1999). Elle produit également des enzymes cellulolytiques, dont la principale fonction de ces enzymes est la maturation des fruits (Béguin et Aubert, 1994).

Le potentiel aromatique est naturellement libéré lors de la maturation des fruits par des  $\beta$ -glycosidases endogènes. Comme ces enzymes ne peuvent pas libérer tous les terpénols liés, de nombreuses tentatives ont été faites pour utiliser des  $\beta$ -glucosidases exogènes, principalement issues de plantes (raisin, amande douce) (Riccio *et al.*, 1999).

### 1.7.3. Origine microbienne

Les micro-organismes cellulolytiques existent dans des groupes taxonomiques très diversifié, donc ils sont les responsables principales de la dégradation de cellulose dans la biosphère (Béguin et Aubert, 1994. Tchunden, 1990). La flore cellulolytique se trouve dans une variété d'écosystèmes, y compris les composts, les fumiers, les litières, les boues d'estuaires, le fond des lacs et le tractus digestif des animaux, Ces microorganismes peuvent être regroupés en Eucaryotes ou Procaryotes, Mésophiles ou thermophiles selon leur

température de croissance, et enfin Suivant leur comportement vis-à-vis de l'oxygène (Tchunden, 1990). Certains de ces microorganismes sont récapitulés dans le (tableau 1).

**Tableau 1** : Les microorganismes producteurs du cellulases (Imran *et al.*, 2016).

Groupes	Genres	Espèces
Bactéries	<i>Bacillus</i> <i>Acidothermus</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Clostridium</i>	<i>Bacillus sp</i> <i>A. Cellulyticus</i> <i>P. Cellulosa</i> <i>C. thermocellum</i> <i>C. acetobutylium</i>
Champignons	<i>Fusarium</i> <i>Aspergillus</i>  <i>Humicola</i> <i>Humicola</i> <i>Trichoderma</i>  <i>Sclerotium</i> <i>Acremonium</i> <i>Fusarium</i> <i>Sporotrichum</i> <i>Penicillium</i>	<i>F. solani</i> <i>A. Niger</i> <i>A. fumigatus</i> <i>A. acculeatus</i> <i>A. nidulans</i> <i>H. grisea</i> <i>H. insolens</i> <i>T. reesai</i> <i>T. koningii</i> <i>T. viride</i> <i>T. harjianum</i> <i>T. branchiatum</i> <i>S. rolfsii</i> <i>A. cellulyticus</i> <i>F. solani</i> <i>S. cellulophilum</i> <i>P.fumiculosum</i>
Actinomycètes	<i>Streptomyces</i>  <i>Cellulomonas</i>  <i>Thermonospora</i>	<i>S. lividans</i> <i>S. drozdowiejii</i> <i>C. uda</i> <i>C. fimi</i> <i>C. bioajotea</i> <i>T. curvata</i>

*Chapitre 02 :*

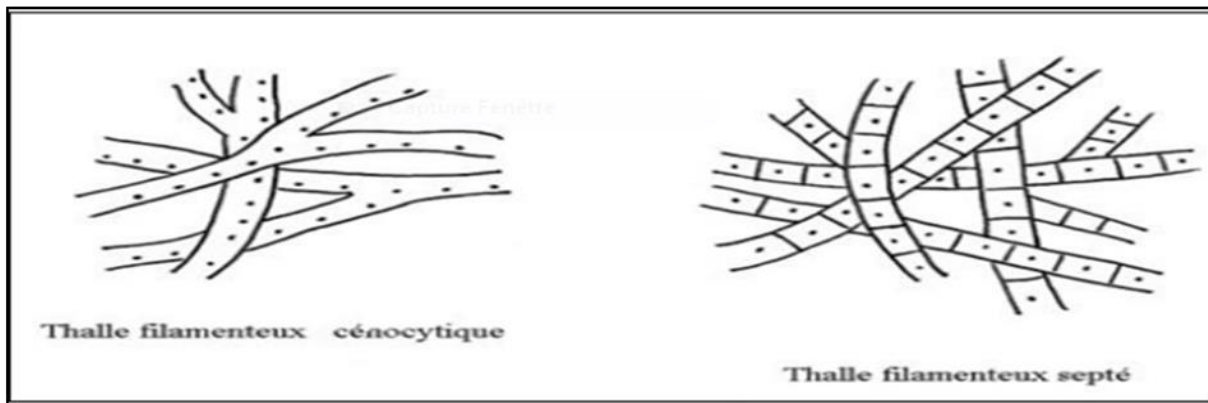
*Moisissures cellulolytiques*

## 2. Les moisissures cellulolytiques

### 2.1. Généralités sur les moisissures

Le terme «moisissure» est utilisé dans le langage courant pour désigner des champignons microscopiques. Ce sont des microorganismes eucaryotes, dont les cellules s'étendent en filaments d'environ 2 à 12  $\mu\text{m}$  de diamètre, et peuvent être septés (cloisonnés) ou coenocytiques (non cloisonnés) (Figure 3) (Carlotti, 2014). Elles sont utiles dans certaines industries comme la fromagerie ou l'industrie pharmaceutique, mais elles peuvent être aussi nocives en produisant des métabolites secondaires, ainsi que des mycotoxines qui peuvent présenter des risques pour la santé humaine et animale (Boudih, 2011).

Les champignons sont des saprophytes (rarement des parasites), c'est-à-dire qu'ils vivent aux dépens de matières organiques en décomposition au détriment d'y planter du mycélium, qui émet alors des filaments avec des spores, les unités de transmission. Ces spores proviennent du mécanisme de reproduction sexuée ou asexuée (Gauthier, 2016).



**Figure 3 :** Structure de l'hyphes chez les moisissures : mycélium non septé et mycélium septé (Botton *et al.*, 1990).

#### 2.1.1. Conditions de croissance

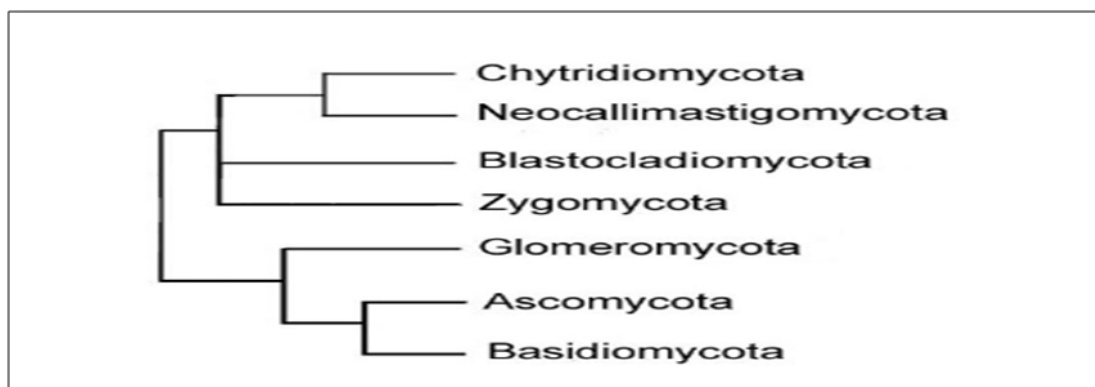
Les moisissures nécessitent la présence de nutriments essentiels carbone, azote et ions minéraux dans le milieu pour assurer leur croissance. Leur digestion doit être initiée dans le milieu externe par des enzymes sécrétées (de manière extracellulaire) ou liée à la paroi, car seules des molécules relativement petites sont capables de traverser la paroi et d'atteindre le cytoplasme (Davet, 1996). La plupart des champignons filamenteux prospèrent dans l'intervalle de pH de 4,5 à 8,0 (Botton *et al.*, 1999). Cependant, les variations de pH peuvent affecter la croissance fongique, et la plupart des champignons peuvent ajuster le pH du milieu

à leur convenance (Boiron, 1996). En terme de température, la majorité des moisissures sont mésophiles (température de croissance optimale entre 15 et 30 °C), d'autres se développent à basse température sont des psychrophiles avec un optimum entre 0 et 17 °C, certaines espèces sont thermophiles ou thermotolérantes qui peuvent se croître à des températures élevées (un optimum de 35 - 40 °C ou 15- 40 °C respectivement) (Boudih, 2011). En général, les moisissures nécessitent une activité d'eau plus faible que les autres microorganismes (Davet, 1996). En ce qui concerne les niveaux d'oxygène, la plupart sont aérobies et certains peuvent même supporter une anaérobiose très stricte (Bourgeois, 1989 ; Botton *et al.*, 1999). De plus les moisissures n'ont pas besoin de lumière ni pour leur croissance, ni pour la germination des spores (Botton *et al.*, 1999).

### 2.1.2. Classification des moisissures

Historiquement, tous les champignons ont été classés en cinq ordres sur la base d'une analyse morphologique. Quatre de ces ordres ont été définis selon le mode de reproduction sexuée : Chytridiomycètes, Zygomycètes, Basidiomycètes et Ascomycètes (Figure 4) (Méheust, 2012).

Alors que, certaines moisissures qui sont trouvées couramment ou exclusivement au stade de reproduction asexuée, dit anamorphe. Ces organismes sont regroupés selon leur mode de production de spores asexuées ou conidies, au cinquième ordre, deutéromycètes ou *Fungi imperfecti* (Boudih, 2011).



**Figure 4** : Les grands groupes des Eumycètes (Boudih, 2011).

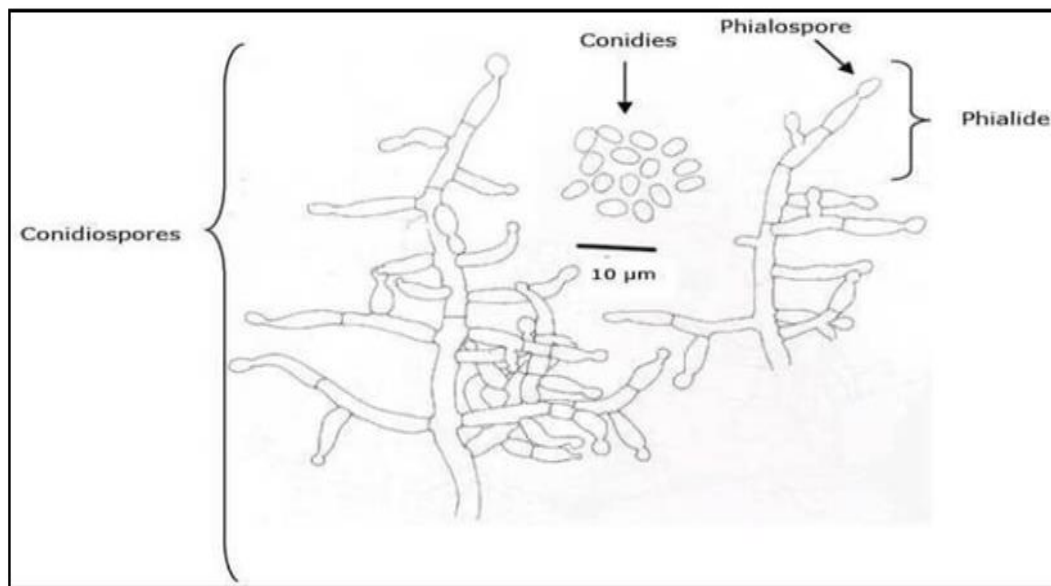
### 2.2. Souches productrices de cellulases

Les microorganismes (bactéries, champignons, actinomycètes) sont présents en grand nombre dans la nature. Ils participent à la dégradation de la matière organique végétale dans le sol, dans les sédiments marins ou dans le tube digestif des ruminants (Bauchop, 1979).

Les champignons filamenteux jouent un rôle très important sur le marché de la cellulase. Les genres *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Penicillium* et *Phanerochaete* ont été reconnus comme les meilleurs producteurs de cellulases et les enzymes brutes produites par ces micro-organismes sont commercialisées (Dashtban *et al.*, 2009). Ces moisissures sont les dégradeurs les plus connus et les plus efficaces des polysaccharides des parois cellulaires végétales, en produisant des mélanges d'enzymes hydrolytiques extra cellulaires (Hasper *et al.*, 2002). Le système de dégradation de la cellulose par ces moisissures est complexe et constitué de : endoglucanases, cellobiohydrolase et  $\beta$ -glucosidases (Beguin, 1990).

### 2.2.1. Le genre *Trichoderma*

*Trichoderma* est un genre de moisissure mésophile, prospère dans les sols chauds des régions tropicales. La structure des conidiophores et la morphologie des conidies permettent de l'identifier (Figure 5) (Leghlimi, 2013). Appartenant à la vaste catégorie de champignons imparfaits, le genre *Trichoderma* est connu pour produire des quantités importantes d'exo-enzymes qui ont la capacité de décomposer complètement la cellulose en glucose (Makut et Godiya, 2010). L'espèce *Trichoderma reesei* est probablement le mutant le plus étudiés pour la production de cellulases. La cellulases de *T. reesei* à l'avantage d'avoir trois classes d'enzymes, bien qu'elles ont souvent un déficit en  $\beta$ -glucosidase. En plus de la cellulase, ils produisent des hémicellulases lors de l'hydrolyse dans les plantes. Des cellulases de *T. reesei* sont commercialisées par la firme NOVO ENZYME (Ogier *et al.*, 1999).



**Figure 5** : Aspect microscopique de *Trichoderma* (Botton *et al.*, 1990).

### 2.2.2. Le genre *Penicillium*

*Penicillium* est un genre de champignons des Ascomycota, décrit pour la première fois par Link en 1809. Le nom *Penicillium* vient du mot latin signifiant pinceau, reflétant la forme des conidies du champignons *Penicillium* (Figure 6) (Ropars *et al.*, 2020). Il est connu comme producteur industriel d'antibiotique  $\beta$ -lactame en particulier la pénicilline (Guzmán-Chávez *et al.*, 2018). *Penicillium waksmanii* et *Penicillium chrysogenum* se sont d'importants producteurs de cellulases et d'hémicellulases (Caillaud *et al.*, 2006 ; Gupta et Rodriguez-Couto, 2018). *Penicillium chrysogenum* produit, en plus, un mélange complexes tels que la cellulase, la ligninase et l'hémicellulase, permettant ainsi une dégradation efficace de la lignocellulose (Vaishnav *et al.*, 2018). D'autres espèces peuvent aussi produire les cellulases tels que : *Penicillium brasilium*, *Penicillium occitarris*, *Penicillium decumban* (Vaishnav *et al.*, 2018).

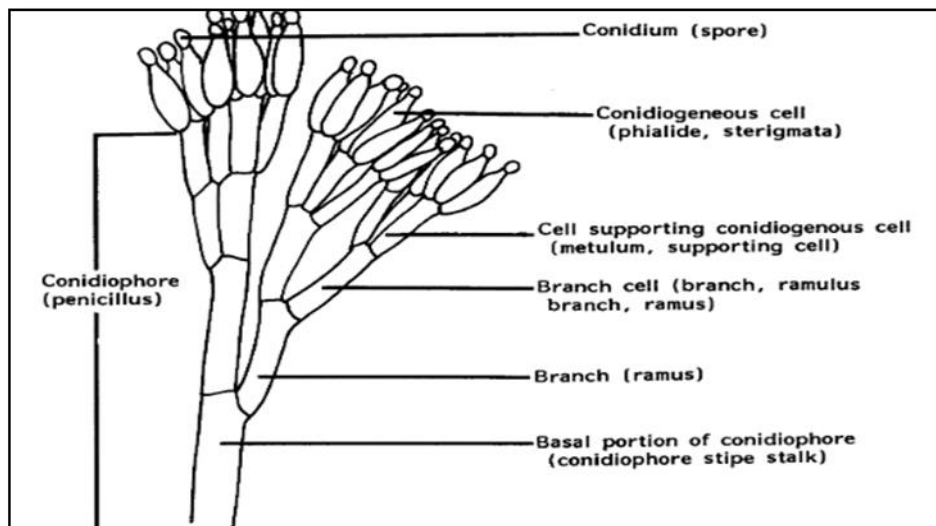


Figure 6 : Aspect microscopique de *Penicillium* (Peberdy, 1987).

### 2.2.3. Le genre *Phanerochaete*

*Phanerochaete* a été circonscrit par le mycologue finlandais Petter Karsten en 1989. Le genre *Phanerochaete* (Polyporales, Basidiomycota) a traditionnellement été délimité sur la base de la morphologie grossière du corps fructifère et la structure hyphal des cystidies et des spores. Cependant, plusieurs études récentes basées sur des données moléculaires indiquent que ce genre est polyphylétique (Wu *et al.*, 2010). *Phanerochaete*, est un genre très répandu qui provoque la pourriture blanche ou fibreuse (Figure 7), fait partie des champignons les plus efficaces pour dégrader les différents constituants du bois : cellulose, hémicelluloses et lignine. L'étude de l'action enzymatique de la pourriture fibreuse sur la cellulose a été

effectuée sur *Phanerochaete chrysosporium* trouvés de façon ubiquitaire dans les forêts subtropicales et tempérées. Cette espèce a fait aussi l'objet de nombreuses études pour sa capacités de production d'enzymes actives dans la dégradation de la cellulose et de la lignine (Enoki et *al.*, 1988) .



**Figure 7 :** Image représentant l'action caractéristique des pourritures blanches sur le bois (Valette, 2017).

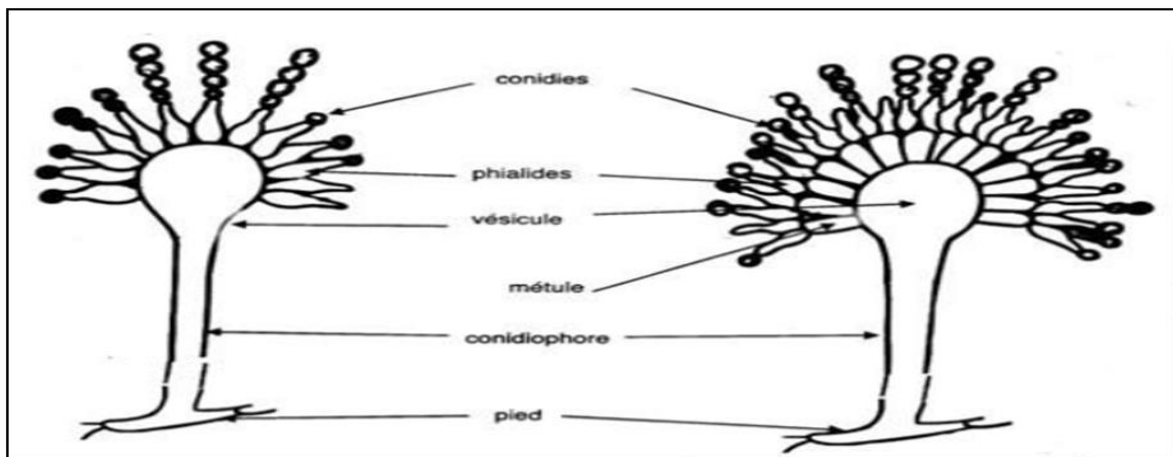
#### 2.2.4. Le genre *Aspergillus*

Les champignons du genre *Aspergillus* ont été décrits pour la première fois en 1729 par le biologiste italien Pietro Micheli (Figure 8) (Amaresan et *al.*, 2020), de nombreuses espèces d'*Aspergillus*, principalement des souches noires d'*Aspergillus*, sont utilisées en biotechnologie et dans l'industrie alimentaires en raison de leur capacité à sécréter de grandes quantités d'enzymes et d'acides organiques (Gupta, 2016). Les espèces d'*Aspergillus* (*Aspergillus oryzae*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus aculeatus*, *Aspergillus niger* et *Aspergillus wentii*) sont capables de produire de petites quantités de cellulase (Leghlimi, 2013). D'autres espèces d'*Aspergillus* comme *Aspergillus terreus* et, *Aspergillus fumigatus*, sont capables de se développer sur la cellulose microcristalline en produisant de grandes quantités de  $\beta$ -glucosidases (Riccio et *al.*, 1999). Les cellulases des espèces d'*Aspergillus* sont généralement riches en endo- $\beta$ -glucanase et en  $\beta$ -glucosidase, mais pauvres en exo- $\beta$ -glucosidases, de ce fait elles ont une action limitée sur la cellulose microcristalline (Riccio et *al.*, 1999). À l'échelle mondiale, il y a deux grands fabricants connus pour la production des cellulases : "Genencor" et "Novozyme" ainsi que Amano Enzyme Inc. du Japon et MAP de l'Inde (tableau 2) (Singhania et *al.*, 2010).



**Tableau 2 :** Noms commerciaux et fournisseur des cellulases d'*Aspergillus niger* (Singhania et *al.*, 2010).

Nom commercial	Fournisseur
Biocellulase A	Quest Intl.
Cellulase AP30K	Amano Enzyme
Cellubrix (celluclast)	Novozymes
Novozymes 188	Novozymes



**Figure 8 :** Tête aspergillaire bisériée (droite) et unisériée (gauche)  
(Guillaume et Alcindor, 2006).

### 2.3. Méthodes de culture des moisissures cellulolytiques

La biotransformation de substrats complexes en composés simples par divers microorganismes tels que des bactéries et des champignons est connue sous le nom de techniques de fermentation. La fermentation est divisée en deux catégories : la fermentation en milieu solide (FMS) et la fermentation submergée / Liquide (FML). Ces techniques sont différenciées en fonction des différents paramètres utilisés, tels que les microorganismes, les substrats et paramètres environnementaux utilisés pendant la fermentation (Mulaudzi, 2020).

#### 2.3.1. Fermentation en milieu solide

La fermentation solide (fermentation de substrats solide, fermentation humide, culture solide, etc. Et en anglais : solid-state fermentation ou SSF (Assamoi et *al.*, 2009) est généralement définie comme une croissance microbienne sur des particules solides humides en l'absence d'eau libre (Durand, 2003 ; Gervais et Molin, 2003) . De façon simplifiée, les microorganismes se développent dans un système à trois phases : une matrice solide, une

phase liquide qui lui liée et une phase gazeuse prise au piège dans les particules ou entre celle-ci. (Rahardjo et *al.*, 2006).

### **2.3.2. Fermentation en milieu liquide**

La fermentation liquide ou fermentation submergée (FML) est la méthode de culture la plus prisée parce qu'elle est la plus pratique dans l'industrie pour la production commerciale d'enzymes de cellulase (Barragán et *al.*, 2016). De plus, (Elisashvili et *al.*, 2008) ont rapporté que la production d'enzyme hydrolytiques est favorisée par FML par rapport aux processus de fermentation en milieu solide.

*Chapitre 03 :*

*Biomasse*

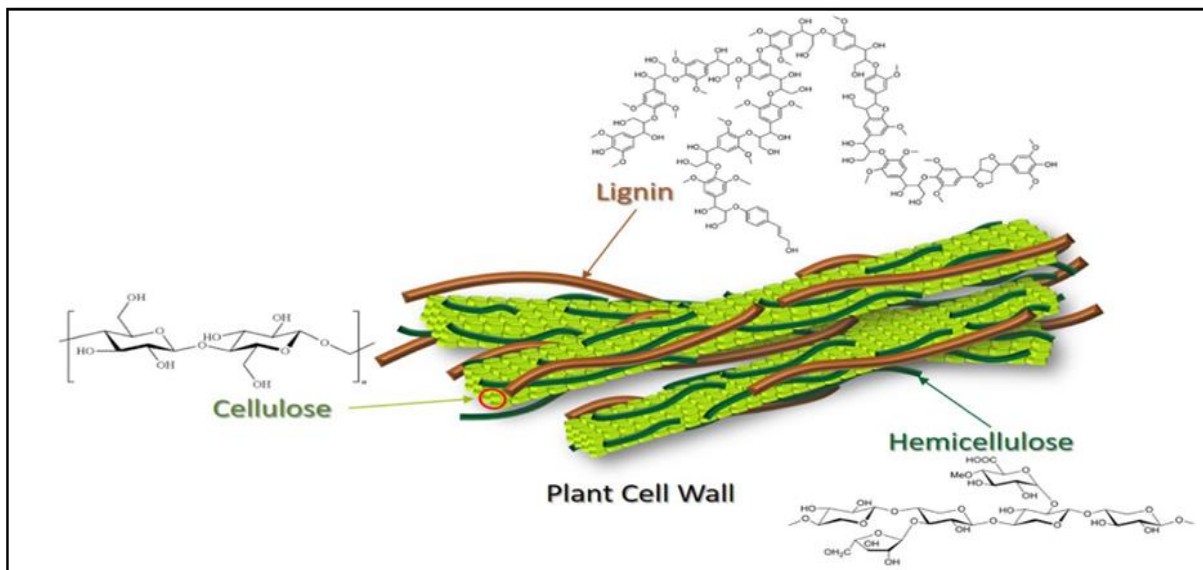
*ligninocellulosique*

### 3. La biomasse lignocellulosique

#### 3.1. Généralités

Les matériaux ligneux, représentant la biomasse végétale la plus abondante sur terre (Adewuyi, 2022), donnent aux plantes leur rigidité et leur structure et contiennent trois principaux polymères à base de carbone : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, appelées collectivement biomasse lignocellulosique (Figure 9) (Zoghلامي et Paës, 2019 ; Sanderson, 2011). Ils jouent un rôle structurel et protecteur pour les plantes et est donc récalcitrante et résistante à la dégradation. Convertir ou dégrader la biomasse lignocellulosique très complexe et hétérogène à l'échelle industrielle en glucides simples, composés phénoliques, composés aromatiques et autres substances est un défi majeur (Sweeney et Xu, 2012).

Généralement, la biomasse lignocellulosique est principalement composée de cellulose (38-50%), d'hémicellulose (23-32%) et de lignine (15-25%) avec une petite quantité d'extractibles, la cellulose et l'hémicellulose sont des polysaccharides en forme de chaîne, tandis que la lignine est un polymère de phénylpropane tridimensionnel hétérogène et réticulé qui est étroitement lié à la cellulose et à l'hémicellulose (Sun et *al.*, 2015).



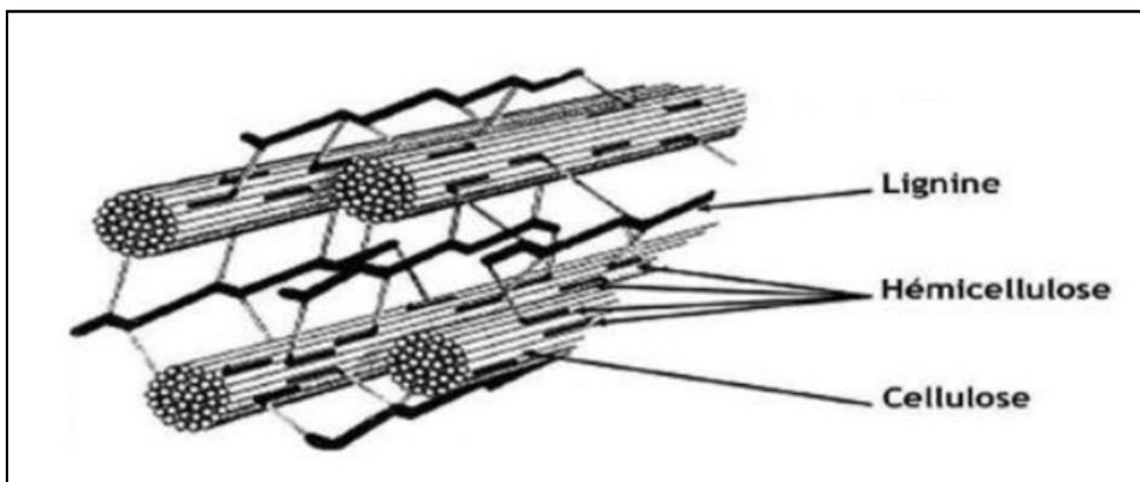
**Figure 9** : Structure de la biomasse lignocellulosique au niveau du paroi cellulaire végétale (Jensen et *al.*, 2017).

### 3.2. Composition et structure

La lignocellulose est composée de trois polymères : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, qui forment des structures liées par des liaisons covalentes et non covalentes, créant une structure rigide extrêmement difficile à décomposer (Figure 10). La cellulose est le polymère le plus courant dans la lignocellulose, suivie de l'hémicellulose et de la lignine, respectivement (Carr, 2012). Les proportions de cellulose, d'hémicellulose et de lignine issues de différentes biomasses lignocellulosiques sont représentées dans le (tableau 3).

**Tableau 3** : Teneurs en cellulose, hémicelluloses et lignine de diverses biomasses lignocellulosiques (Bilal et *al.*, 2020).

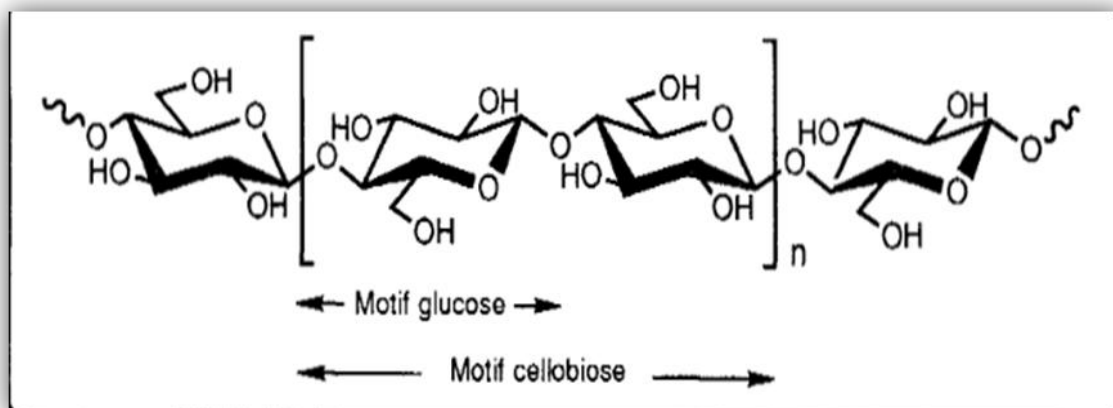
déchets lignocellulosiques	Composition en hydrates de carbone (% poids sec)		
	Lignine	Cellulose	Hémicellulose
Déchets de banane	14	13.2	14.8
Bagasse de canne à sucre	20	42	25
Pailles de riz	18	32.1	24
Pailles de maïs	8.2	42.6	21.3
Pailles de blé	16 – 21	29 – 35	26 – 32
Fibres de noix de coco	20 – 48	35 – 60	15 – 28
Son de blé	8.3 - 12.5	10.5 - 14.8	35.5 - 39.2



**Figure 10** : Composition de la biomasse lignocellulosique (Privas, 2013).

### 3.2.1. La cellulose

La cellulose, le substrat de la cellulase, est le polysaccharide le plus abondant sur terre. C'est la substance principale de la matière végétale (Jayasekara et Ratnayake, 2019), et représente 45 % de la matière sèche du bois (Paës, 2005). Anselme Payne a été le premier à découvrir et à isoler cet étonnant composé des plantes vertes. C'est arrivé il y a plus de deux siècles (Jayasekara et Ratnayake, 2019). La rigidité et la stabilité des plantes résultent de l'agrégation des chaînes de cellulose qui forment spontanément des microfibrilles de cellulose dans les parois cellulaires des plantes (Nargotra *et al.*, 2023). Au niveau moléculaire, la cellulose est un polymère de glucose linéaire constitué d'unités d'anhydro-glucose liées entre elles par des liaisons  $\beta$ -1-4glycosidiques (Figure 11). Le nombre d'unités de glucose dans les molécules de cellulose varie et le degré de polymérisation varie de 250 à plus de 10 000, selon la source et la méthode de traitement (Sukumaran *et al.*, 2005). La cellulose de la formule chimique  $(C_5H_{10}O_5)_n$ , est un polymère d'unités dimères de cellobiose en  $\beta$ 1-4-polyacétal (4-O- $\beta$ -D-glucopyranosyl-D-glucose) (LIU, 2015), le "n" représente le degré de polymérisation (DP), qui symbolise le nombre de sous-unités de glucose interconnectées, et ce nombre varie de centaines à milliers (Jayasekara et Ratnayake, 2019). Le degré de polymérisation (DP) de la cellulose varie de 700 à 15000 unités de glucose selon l'origine des plantes, aboutissant à des molécules de très hauts poids moléculaires, pouvant atteindre des valeurs de 500000 (LIU, 2015), dont les longues chaînes forment des fibrilles dites élémentaires, maintenues ensemble par des liaisons hydrogène et des interactions de Van der Waals (Paës, 2005).



**Figure 11** : Structure moléculaire de la cellulose (Thiebaud, 1995).

### 3.2.2. L'hémicellulose

Les hémicelluloses sont des groupes de biopolymères hétérogènes, représentant 20 à 35 % du poids de la biomasse (Zoghلامي et Paës, 2019). Ils sont des hétéro-polysaccharides ramifiés à faible degré de polymérisation et sont composés de diverses unités monosaccharidiques telles que le glucose, le mannose, le galactose, l'arabinose et la xylose (Figure 12) (Periyasamy, 2018). En général, le degré de polymérisation des hémicelluloses est d'environ 200 unités, bien inférieur à celui de la cellulose (Sun et *al.*, 2015 ; Zoghلامي et Paës, 2019). Le xylane est le principal composant de l'hémicellulose des parois cellulaires secondaires, composé principalement de D-xylose (près de 90%) lié par des résidus  $\beta$ -1,4-glycosidiques (Michelin et *al.*, 2014). La différence la plus importante entre la cellulose et l'hémicellulose est que cette dernière est composée de courtes chaînes latérales de divers sucres, tandis que la cellulose est composée d'oligomères facilement hydrolysables (Carr, 2012).

Le rôle majeur des hémicelluloses a été proposé comme agent de liaison entre la cellulose et la lignine, ils agissent comme une barrière physique qui limite l'accès des enzymes (Michelin et *al.*, 2014 ; Zoghلامي et Paës, 2019).

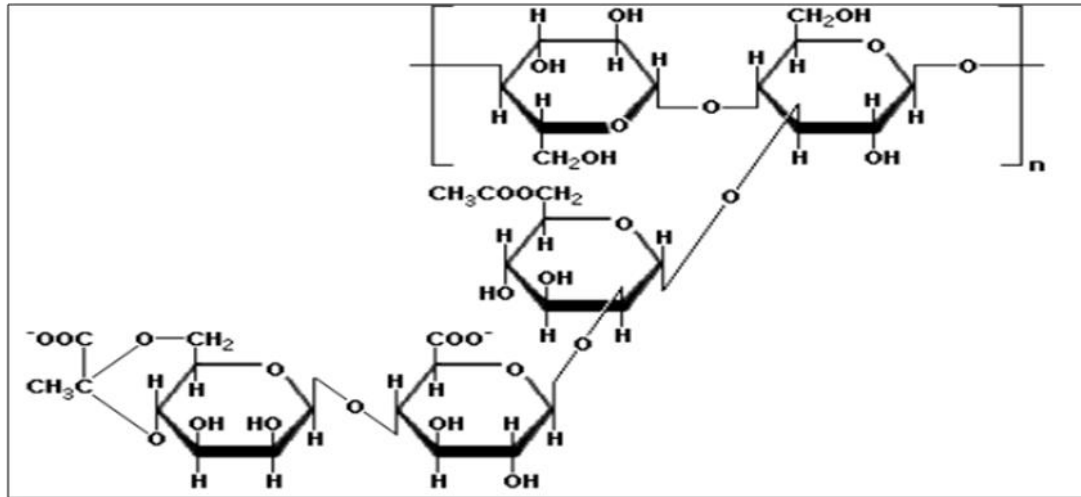


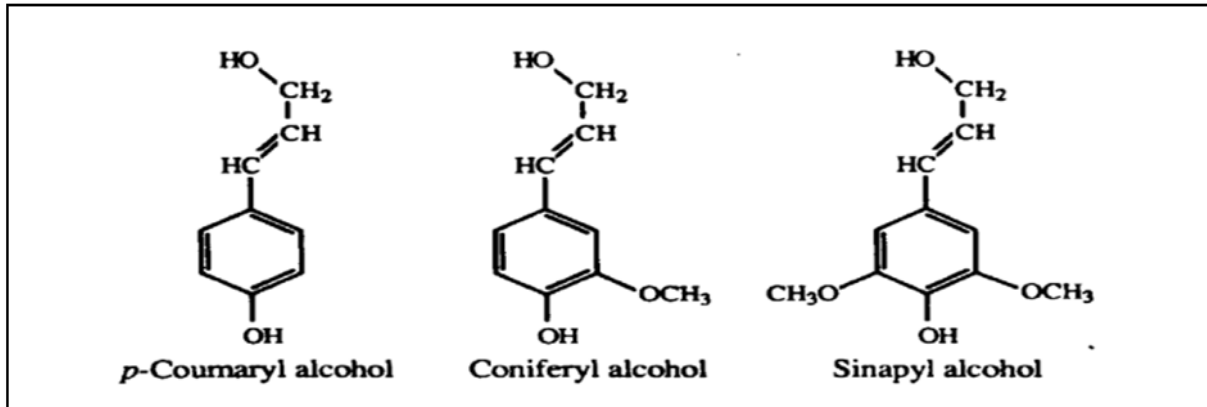
Figure 12 : Structure chimique de l'hémicellulose (Kulkarni et *al.*, 2012).

### 3.2.3. La lignine

La lignine est le deuxième polymère le plus abondant dans la biomasse lignocellulosique après la cellulose, représentant 15-40% de poids sec, principalement se trouvant dans le xylème des plantes (Carr, 2012 ; Zoghلامي et Paës, 2019). Il s'agit d'un biopolymère aromatique hydrophobe réticulé complexe avec un poids moléculaire de 10 000 Da, composé

de trois composants phénoliques principaux, l'alcool *p*-coumarylique, coniférylique et sinapylique (Figure 13) (Michelin et *al.*, 2014).

Chez les plantes, les principales fonctions de la lignine sont de fournir un support structural aux parois cellulaires en raison de sa rigidité, de former des barrières physiques imperméables, de prévenir les attaques microbiennes ou le stress oxydatif et d'améliorer la conduction de la sève à travers les cellules lignifiées (Carr, 2012 ; Periyasamy, 2018).



**Figure 13** : Les trois alcools phénylpropénoïques de la lignine (Carr, 2012).

### 3.3. Les interactions entre polymères

La cellulose (cristalline et amorphe), l'hémicellulose ramifiée et le réseau de lignine interagissent étroitement pour former les parois cellulaires macroscopiques des plantes. Lors de la formation des parois cellulaires végétales, la lignocellulose n'est pas un simple mélange physique de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces composants sont fortement entrelacés et liés par des liaisons non covalentes et des réticulations covalentes. Des liaisons covalentes entre l'hémicelluloses et la lignine et l'absence de liaisons covalentes entre l'hémicelluloses et la cellulose ont été démontrées, alors que les liaisons covalentes entre la lignine et la cellulose restent incertaines. Généralement, les principales liaisons du bois entre les groupes hydroxyles des polysaccharides et l' $\alpha$ -carbanol des sous-unités phénylpropane de la lignine sont les liaisons ester et éther (Sun et *al.*, 2015). La cellulose et l'hémicelluloses sont intimement liées par des liaisons hydrogène, La lignine est liée de manière covalente à l'hémicelluloses pour former des complexes lignine-carbohydate (LCC) (Zoghلامي et Paës, 2019).



### **3.4. Impacts des déchets lignocellulosiques**

La production massive de déchets agricoles entraîne une grave pollution de l'environnement. À certaines périodes, les propriétés des déchets changent et provoquent des effets nocifs et toxiques pour l'homme. Les zones rurales génèrent environ 2 tonnes de déchets agricoles chaque jour, De plus, les fermes laitières et l'industrie sucrière génèrent en moyenne 20 millions de tonnes de déchets (Iqbal et *al.*, 2020).

Lorsque ces déchets biodégradables ne sont pas manipulés correctement, ils peuvent devenir une source de pollution qui impacte négativement l'environnement (Popoola, 2022). Importante quantité de microflore se développent autour des déchets, ce qui augmente le risque de maladies infectieuses chez l'homme, les animaux et les végétaux (Popoola, 2022). L'incinération des déchets agricoles jetés sans discernement provoque une pollution de l'air en libérant des gaz toxiques, de la fumée et de la poussière. De plus, il provoque la contamination des sols et entraîne des menaces pour la vie des micro-organismes terrestres et aquatiques (Nair et *al.*, 2022). Aussi, l'augmentation des déchets agricoles entraîne directement de graves problèmes environnementaux, notamment l'émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O), de polluants atmosphériques (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> et composés organiques volatils) et la pollution des eaux souterraines (El-Ramady et *al.*, 2020 ; Reichembach et *al.*, 2020).

### **3.5. Valorisation de la biomasse lignocellulosique**

L'intérêt mondial croissant conduit à la protection de l'environnement des déchets solides générés par divers activités et transformations humaines, a attiré l'attention des industriels pour trouver des moyens techniques afin de réduire sinon valoriser ces déchets (Hazourli et *al.*, 2007). Les déchets lignocellulosiques sont la matière première la plus prometteuse en raison de leur grande disponibilité et de leur faible coût, la bioconversion de la biomasse lignocellulosique renouvelable en biocarburant et en produits à valeur ajoutée gagne globalement en importance à l'échelle mondiale (Michelin et *al.*, 2014).

De nouvelles applications industrielles de la biomasse lignocellulosique ont été décrites, notamment le bioraffinage pour produire de biocarburants et de produits biochimiques, de produits biomédicaux, cosmétiques et pharmaceutiques, de bioplastiques, de matériaux de carbone multifonctionnels et d'autres produits respectueux de l'environnement (Okolie et *al.*, 2020). Une variété d'acides organiques, y compris les acides citrique et lactique, peuvent être produits par fermentation d'hydrolysats riches en glucose obtenus à partir de la cellulose issue

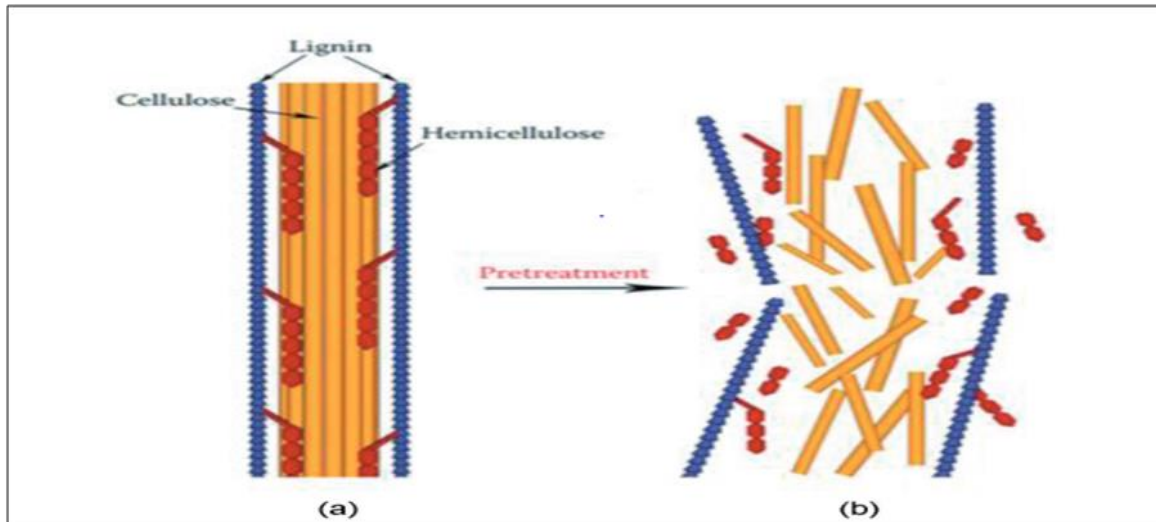
de déchets lignocellulosiques, aussi les composés aromatiques peuvent être produits à partir de la lignine (Howard et *al.*, 2003 ; Michelin et *al.*, 2014).

Récemment, la bioénergie dérivée de la biomasse lignocellulosique a été transformée pour générer du chaleur et produire l'électricité (La production d'énergie électrique à partir de tiges de bananes fraîches), de plus les carburants liquides issus de la biomasse lignocellulosique sont utilisés comme carburants pour l'aviation et le transport routier (Li et *al.*, 2016 ; Daramola et Ayeni, 2020).

Des polymères renforcés par la biomasse lignocellulosique nanostructurée (composée principalement de lignine et de cellulose) sont utilisés pour les applications orthopédiques, les matériaux de construction (le bambou est utilisé dans la construction en raison de sa résistance et de sa durabilité), les additifs de peinture, la décomposition catalytique des polluants organiques, le contrôle des pathogènes organiques d'origine hydrique, les lubrifiants ou les additifs de lubrification (Daramola et Ayeni, 2020)

### **3.6. Prétraitement de la biomasse lignocellulosique**

Comme les matières premières lignocellulosiques sont très résistantes aux enzymes, un processus de prétraitement approprié est nécessaire pour faciliter l'accès enzymatique aux polysaccharides végétaux (Sun et *al.*, 2015). Ceci est considéré comme l'une des étapes les plus coûteuses de la conversion de la cellulose en sucres fermentescibles. Le prétraitement est une étape nécessaire et importante pour dégrader la structure de la lignine et de l'hémicellulose, perturber la structure cristalline et augmenter la porosité de cellulose afin que les enzymes ou les acides puissent facilement accéder à la cellulose et l'hydrolyser (Figure14) (Periyasamy, 2018).



**Figure 14** : L'effet de prétraitement sur la biomasse lignocellulosique. (a) la biomasse lignocellulosique avant le prétraitement, (b) la biomasse lignocellulosique après le prétraitement (Edeh, 2020).

### 3.6.1. Prétraitement physique

La décomposition physique est concentrée sur trois techniques principales : le broyage mécanique, la pyrolyse et l'extrusion. Le broyage mécanique est un procédé qui réduit la taille du matériau lignocellulosique afin de minimiser la cristallinité du matériau. Au cours de la pyrolyse, les matériaux sont chauffés à des températures supérieures à 300°C, ce qui provoque une décomposition rapide de cellulose et une cristallinité réduite. L'extrusion est un nouveau processus dans lequel les matériaux lignocellulosiques sont chauffés, mélangés et cisailés, entraînant des modifications physiques et chimiques (Carr, 2012).

### 3.6.2. Prétraitement chimique

Le prétraitement chimique vise à éliminer l'hémicellulose et la lignine pour améliorer la biodégradabilité de cellulose (Adewuyi, 2022).

- **Acide** : Lors du prétraitement acide, la structure rigide de la matière lignocellulosique est convertie en sucres simples, qui peuvent être fermentés en biocarburants (Adewuyi, 2022). Différents acides minéraux dilués, tels que  $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $H_3PO_4$  et  $HNO_3$ , ont été utilisés pour le prétraitement de divers matériaux lignocellulosiques, en plus des acides organiques, tels que l'acide acétique, formique, propionique, fumarique, maléique et oxalique, sont également appliqués, afin de prétraiter les matériaux lignocellulosiques (Sun et *al.*, 2015).

- **Alcalin** : Le prétraitement alcalin est la méthode la plus utilisée pour éliminer la lignine et l'hémicellulose de la matière lignocellulosique et afin de disperser les matériaux lignocellulosiques en vrac dans les fibres lignocellulosiques (Sun et *al.*, 2015). L'hydroxyde de calcium, de sodium, de potassium et d'ammonium sont les solutions alcalines les plus utilisées (Adewuyi, 2022).

### 3.6.3. Prétraitement physico-chimique

L'une des méthodes physico-chimiques les plus couramment utilisées pour le prétraitement des matériaux lignocellulosiques est l'explosion à la vapeur (Sun et *al.*, 2015). La biomasse est traitée à haute pression et à une température élevée (160-260°C) pendant une courte durée (10 minutes), la pression est alors brusquement abaissée ce qui entraîne une dégradation rapide du structure de la biomasse (Periyasamy, 2018).

Un autre prétraitement physico-chimique est l'expansion de la fibre d'ammoniaque (AFEX) (Carr, 2012). Les matériaux lignocellulosiques sont exposés à de l'ammoniac liquide à une température entre 60 et 100°C et à haute pression (250-300 Psi) pendant une période de temps, puis la pression est relâchée soudainement, ce qui détruit la lignine et élimine l'hémicellulose, alors que la cellulose est décristallisée (Sun et *al.*, 2015 ; Periyasamy, 2018).

### 3.6.4. Prétraitement biologique

Par rapport aux procédés traditionnels tels que les prétraitements chimiques et physiques, le traitement biologique est considéré comme un procédé efficace, économe en énergie et respectueux de l'environnement (Periyasamy, 2018).

Le prétraitement biologique de la biomasse lignocellulosique utilise la capacité ligninolytique de certains micro-organismes (champignons, bactéries et actinomycètes) pour réduire le caractère récalcitrant, qui due principalement à la lignine de la matière première, et augmenter sa digestibilité par les enzymes hydrolytiques. La perturbation de la barrière de lignine modifie la structure de la lignocellulose et facilite l'accès à la cellulose et l'hémicellulose (Jayasekara et Ratnayake, 2019). Les Avantages et les inconvénients des techniques de prétraitement de la biomasse lignocellulosique sont récapitulées dans le (tableau 4).

**Tableau 4** : Avantages et inconvénients des techniques de prétraitement de la biomasse lignocellulosique (Alvira et *al.*, 2010).

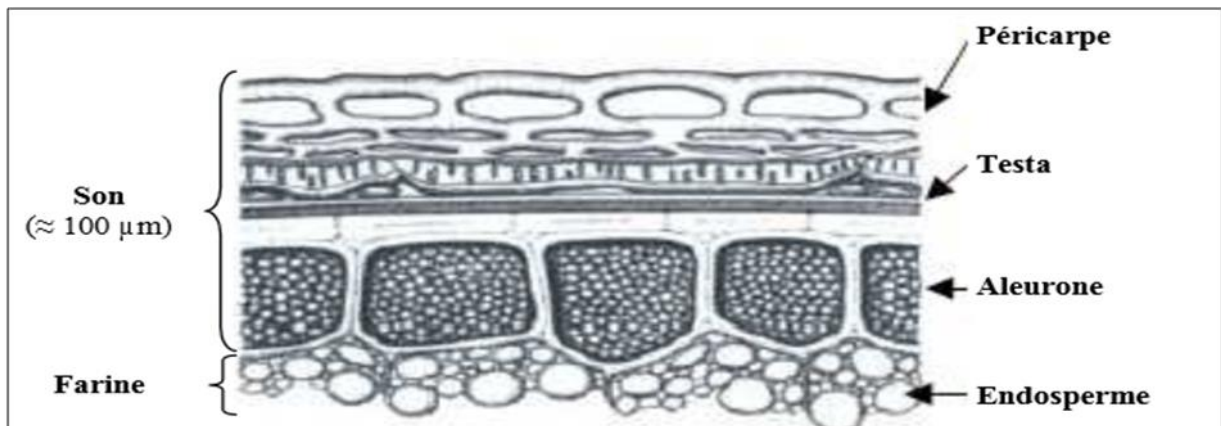
Méthode de prétraitement	Avantages	Inconvénients
Biologique	-Dégradation de la lignine et d'hémicellulose. -Faible coût énergétique.	-Faible taux d'hydrolyse.
Broyage	-Réduction de la cristallinité de la cellulose.	-Consommation d'énergie élevée.
Explosion de vapeur	-Provoque la transformation de la lignine et la solubilisation de l'hémicellulose. -Coût efficace. -Rendement supérieur de glucose et d'hémicellulose dans le processus en deux étapes.	-Génération de composés toxiques. -Dégradation partielle des hémicelluloses.
Expansion des fibres d'ammoniac (AFEX)	-Augmentation de la surface accessible. -Faible formation d'inhibiteurs.	-Pas efficace pour les matériaux à forte teneur en lignine. -Coût élevé de l'ammoniac.
Acide concentré	-Rendements élevés en glucose. -Températures ambiantes.	-Coût élevé de l'acide et nécessité de le récupérer. -Problèmes de corrosion du réacteur. -Formation d'inhibiteurs.
-Acide dilué	-Moins de corrosion que les acides concentrés. -Formation réduite d'inhibiteurs.	-Génération de produits de dégradation. -Faibles concentrations de sucre dans le flux de sortie.

### 3.7. Exemples de biomasses ligninocellulosique

Les résidus agricoles tels que la paille de céréales, les tiges de maïs, le coton, la bagasse et l'herbe sont produits en milliards de tonnes dans le monde et constituent une source abondante, moins chère et facilement disponible de biomasse ligninocellulosique (Sain et Panthapulakkal, 2006).

#### 3.7.1. Son de blé

Le blé, une plante herbacée, est la deuxième culture alimentaire humaine après le riz (Stevenson et *al.*, 2012). Parmi tous les sous-produits du blé, le son représente environ 25 % du poids du grain (Prüeckler et *al.*, 2014). Il est divisé en trois couches distinctes, le testa, l'aleurone et le péricarpe (Figure 15). Le son de blé est composé d'environ 53 % de fibres alimentaires (xylanes, lignine, cellulose, galactanes, fructanes), des vitamines, des minéraux et des composés bioactifs tels que les alkylrésorcinols, l'acide férulique, les flavonoïdes, les caroténoïdes, les lignanes et les stérols. En plus, le fer (Fe), le zinc (Zn), le manganèse (Mn), le magnésium (Mg) et le phosphore (P) sont les minéraux les plus importants trouvés dans le son de blé (Onipe et *al.*, 2015).



**Figure 15** : Les différentes couches de son de blé (Prevot, 2013).

#### 3.7.2. Pailles de blé

La paille de blé est un sous-produit de la récolte des grains de blé (Figure 16). Il s'agit d'une ressource de fibre renouvelable annuellement qui est disponible en grande quantité dans de nombreuses régions du monde (Sain et Panthapulakkal, 2006). Elle se compose d'environ 57 % d'entre-nœuds, 10 % de nœuds, 18 % de feuilles, 9 % de paille et 6 % de rachis (Andrade et *al.*, 2021). L'analyse chimique de la paille de blé a montré qu'elle était riche en glucides, en protéines, en minéraux (calcium et phosphore), en silice, en fibres détergentes acides, en composés bioactifs et en vitamines (Khan et Mubeen, 2012).



**Figure 16 :** La paille de blé (Anne et Cat, 2012).

### 3.7.3. Pailles de riz

La culture du riz produit des quantités énormes de paille allant de deux à neuf tonnes/ha (Figure 17). Elle contient une petite quantité de protéines, elle a donc un rapport C/N élevé (El-Dewany et *al.*, 2018). Par conséquent elle est plus résistante à la dégradation microbienne que la paille d'autres céréales riches en protéines telles que le blé et l'orge. La paille de riz est également l'une des sources d'énergie renouvelable les plus abondantes au monde (El-Dewany et *al.*, 2018).



**Figure 17 :** Paille de riz (Zingore et *al.*, 2014).

### 3.7.4. Balles de riz

Les balles de riz (ou enveloppe de riz) est un film protecteur dures des grains de riz qui est retiré du graine en tant que sous-produit pendant le processus de mouture (Figure 18). La composition chimique des balles de riz varie selon le type et l'échantillon de riz, l'année de récolte, le climat et les conditions géographiques. Elles sont généralement composées de

cellulose (28.6-43.3%), hémicellulose (22-29.7%), lignine (19.2-24.4%), cendre (17-20%) (Goodman, 2020).



**Figure 18** : Balles de riz (Halleux, 2013).

### 3.7.5. Rafles de maïs

Le maïs est l'une des plantes les plus cultivées au monde, il est couramment utilisé comme source d'alimentation humaine et animale. La transformation du maïs produit de grandes quantités de rafles de maïs en tant que déchets agricoles (Figure 19) (Berber-Villamar et *al.*, 2018). Les propriétés chimiques et physiques de l'épi de maïs en font une matière première appropriée pour une variété de processus de production d'énergie. Les épis de maïs contiennent 32,3 - 45,6 % de cellulose, 39,8 % d'hémicelluloses (composées principalement de pentosane) et 6,7 - 13,9 % de lignine (Zych, 2008).



**Figure 19** : Rafles de maïs (Douard, 2014).



### 3.7.6. Bagasse de canne à sucre

La canne à sucre (*Saccharum spp*) est une plante cultivée principalement pour la production de saccharose (Figure 20) (Mason et *al.*, 2020). Au cours de processus de transformation de la canne à sucre, elle génère en moyenne 12,5 % de paille et 14 % de bagasse (Andrade et *al.*, 2021). La bagasse de la canne à sucre est un déchet lignocellulosique obtenu à partir du chaume de canne à sucre, après le broyage du chaume et l'extraction du jus (Figure 20). Les différents composants de la canne à sucre sont : l'eau (65-75%), le sucres (11-18%), des fibres (8-14%), de solides solubles (12-23%), en plus de cellulose (41,8 %), hémicellulose sous forme de pentosane (28,0 %) et la lignine (21,8 %) (Savastano et *al.*, 2009 ; Haghdan et *al.*, 2016).



**Figure 20** : Bagasse de canne à sucre (Noncent et *al.*, 2016).

### 3.7.7. Herbe à carotte

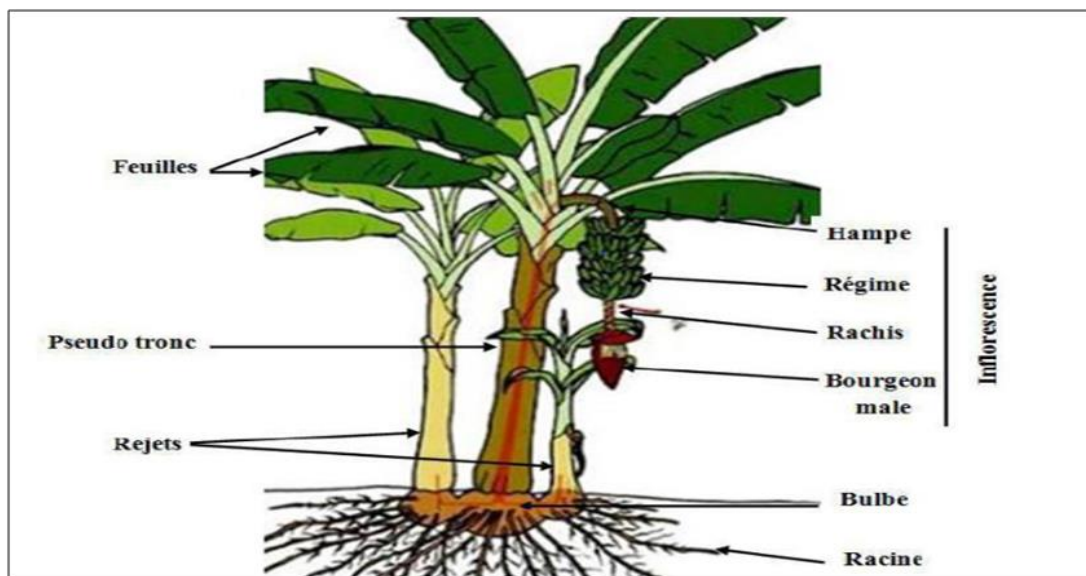
L'herbe à carotte (*Parthenium hysterophorus* L.) est un adventice des friches, des cultures et des forêts qui affecte environ 35 millions d'hectares en Inde, cette mauvaise herbe est abondante toute l'année, mais plus encore pendant la saison des précipitations, elle peut réduire le rendement des cultures, affecter la biodiversité et causer des problèmes de santé pour l'homme et les animaux (Jain et *al.*, 2008). Après la germination, les jeunes plantes présentent des rosettes basales de feuilles vertes brillantes, finement divisées d'environ 8 à 20 cm de long et 4 à 8 cm de large, dans les conditions défavorables, le stade de la rosette peut continuer à croître jusqu'à une longueur maximale de 2,5 m (Figure 21) (Bashar et *al.*, 2021). Ces mauvaises herbes contiennent des matières cellulosiques qui peuvent être utilisées pour produire du papier et du papier fait main, ainsi que dans d'autres applications telles que le contreplaqué et le compostage, *Parthenium hysterophorus* (herbe de carotte) fait référence à la biomasse lignocellulosique qui peut être utilisée pour produire de l'éthanol et de l'éthylène (Jain et *al.*, 2008 ; Hada et shukla, 2018).



**Figure 21 :** Herbes de carottes (*Parthenium hysterophorus*) (Aarzo et al., 2021).

### 3.7.8. Déchets de banane (Pseudo-tronc de bananier)

Le bananier est une plante originaire des forêts tropicales chaudes et humides d'Asie du Sud-Est, appartient au genre *Musa* de la famille des Musaceae (Ondh-Obame, 2022). Il constitue une riche ressource naturelle, presque toutes les parties de cette plante sont utilisables, tel que les fruits, la peau, les feuilles, la pseudo-tige, la tige et les fleurs (Figure 22) (Subagyo et Chafidz, 2018). Le pseudo-tronc de bananier fait partie matériaux lignocellulosiques et composé principalement de polysaccharides, avec de la cellulose (50 %) entrelacée avec des hémicelluloses (30 %), de la lignine (18 %), de la pectine (5 %), des matières solubles dans l'eau (3 %), des matières grasses (3 %) et des cendres (5 %) (Patel et Patel, 2022).



**Figure 22 :** Structure de bananier (Ondh-Obame, 2022).

### 3.7.9. Thé vert

Le théier est un petit arbre très branchu, avec une hauteur de 5 à 10 mètres et pouvant atteindre 15 mètres (Krieps, 1982). *Camellia sinensis* (thé vert) est une espèce de plante dont les feuilles et les bourgeons sont utilisés pour faire le thé chinois, elle appartient au genre *Camellia*, un genre de plantes à fleurs de la famille des Theaceae (Figure 23) (Namita et *al.*, 2012).

Les feuilles de thé fraîches contiennent typiquement 36 % de composés polyphénoliques, 25 % de glucides, 15 % de protéines, 6,5 % de lignines, 4 % d'acides aminés, 2 % de lipides, 1,5 % d'acides organiques, 0,5 % de chlorophylles et de caroténoïdes, 0,1 % de substances volatiles ainsi que des éléments minéraux environ 3 % (Mossion, 2007). La paroi cellulaire de thé est majoritairement composée des polysaccharides (celluloses, hémicelluloses, substances pectiques), des protéines constituées d'acides aminés comme la glycine, la lysine et la thréonine (Mossion, 2007).

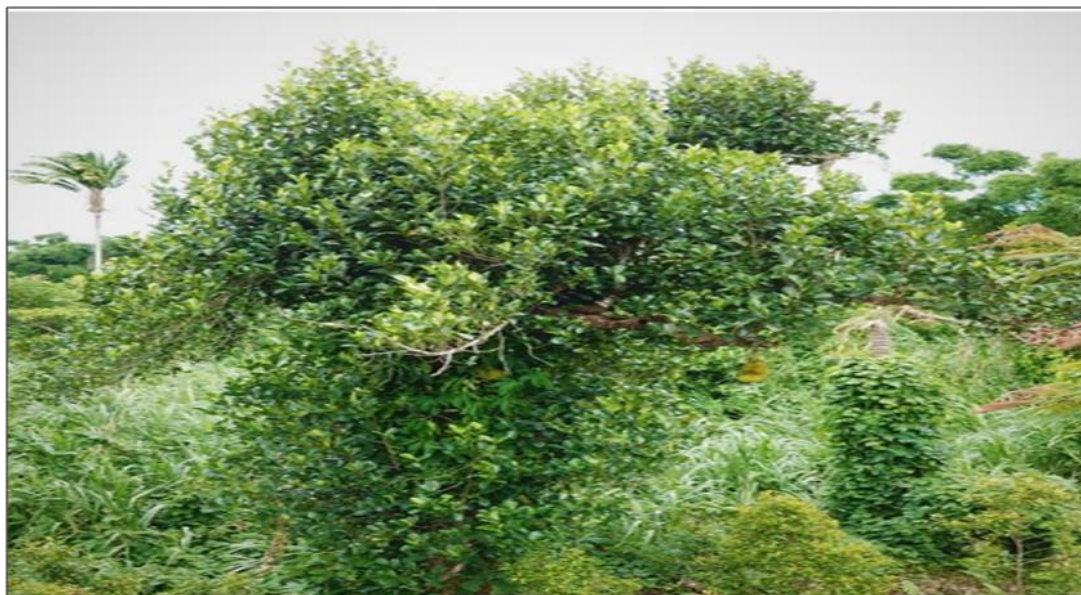


**Figure 23 :** Le théier (*Camellia sinensis*) (Krieps, 2009).

### 3.7.10. Jacquier

Le jacquier (*Artocarpus heterophyllus*), c'est une espèce qui appartient à la famille Moraceae, est un énorme fruit tropical comestible qui pousse sur les arbres, le pays d'origine de ce fruit est l'Inde et il est abondant dans les régions tropicales (Figure 24) (Sundarraj et Ranganathan, 2018 ; Pathak et *al.*, 2022). C'est un ancien fruit qui se consomme cru ou transformé en divers produits à valeur ajoutée, les graines de jacquier sont souvent jetées ou cuites à la vapeur et consommées comme collation ou utilisées dans la cuisine locale, la farine de graines est utilisée par certaines fabriques de biscuits dans une variété de produits de boulangerie (Figure 25) (Swami et Kalse, 2019).

Le fruit mûr est composé de pulpe (29 %), de pépins (12 %) et d'écorce (54 %) (Swami et Kalse, 2019). Les graines de jacquier séchées contiennent des glucides (76,1%), des protéines (17,8%) et des lipides (2,1%), ainsi de nombreux phytonutriments, isoflavones, lignine, saponines et autres nutriments importants (Pathak et *al.*, 2022).



**Figure 24 :** L'arbre de jacquier (Razafindrakotohary et Razafindrazaha, 2019).



**Figure 25 :** Le fruit de jacquier (Razafindrakotohary et Razafindrazaha, 2019).

# *Synthèse de résultats*

*Chapitre 01 :*  
*Description des protocoles*

Cette partie décrit les protocoles expérimentaux de production des cellulases, sur milieu solide (FMS) à partir de différentes souches de l'espèce *Aspergillus niger* : *A. niger* NFCCI 4113, *A. niger* 28A, *A. niger*. Les souches sont cultivées sur différents milieux à base de résidus agroalimentaires : son de blé, paille de blé, paille de riz, balles de riz, déchets de canne à sucre, rafles de maïs, herbe de carottes, thé vert, pseudo-tronc de bananier et fruit de jacquier (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil et Jacob, 2022).

Les méthodes utilisées pour la production des cellulase suivent les étapes ordinaires : isolement et culture de la souche, préparation du substrat de fermentation, conduite de la fermentation et en fin la mesure des activités cellulasiques.

## **1. Microorganismes**

Selon les études expérimentales, les micro-organismes utilisés sont : *Aspergillus niger* NFCCI 4113, *Aspergillus niger* 28A et *Aspergillus niger*.

### **1.1. *Aspergillus niger* NFCCI 4113**

La souche fongique, *Aspergillus niger* AB-6 est isolée localement à partir de certains échantillons de sol prélevés sur des sites de décomposition du bois dans le village de Shindola, Mahabaleshwar, Maharashtra, Inde. La sélection des souches productrices d'enzymes est réalisée par la méthode du rouge Congo ; Ensuite une sélection secondaire des souches basée sur leur activité endoglucanase est effectuée. L'identification moléculaire de la souche fongique AB-6 précédemment sélectionnée est réalisée sur la base du séquençage du gène de la bêta-tubuline. La souche fongique AB-6 est identifiée comme *Aspergillus niger* avec un numéro d'accession NFCCI 4113 (Kumar et al., 2018) .

### **1.2. *Aspergillus niger* 28A**

La souche fongique utilisée, *A. niger* 28A est d'origine des Ghats occidentaux de l'Inde. La réactivation des souches fongiques est effectuée sur un milieu d'agar dextrose de pomme de terre (*PDA*) et incubée pendant 5 jours à 30 C° tandis que la récupération des spores est réalisée avec du Tween 80 à 1% (Saldaña et al., 2022).

### **1.3. *Aspergillus niger***

*Aspergillus niger* est isolé à partir d'un oignon pourris collectée sur le marché local. Le champignon cultivé sur le (*PDA*) est inoculé sur un milieu gélosé à base de carboxyméthylcellulose et incubé à 27-30°C pendant 7 jours dans des conditions stériles pour

cribler les champignons producteurs de cellulase. Après l'incubation, du rouge Congo à 1% est utilisé pendant 1 heure afin de montrer les zones d'hydrolyse de CMC, puis il est lavé avec de NaCl à 1 % (Dinil et Jacob, 2022).

## **2. Préparation des substrats**

### **2.1. Déchets lignino-cellulosiques**

Les résidus de son de blé, paille de blé, paille de riz, balles de riz, les tiges de canne à sucre, les rafles de maïs, bagasse de canne à sucre, et l'herbe de carottes sont collectées de l'Inde localement. Tous les résidus sont lavés et séchés au four puis coupés en petits morceaux et broyés dans un broyeur Wiley et tamisés en particules de 250- 1400 µm en taille. Ensuite, les résidus agricoles sont conservés dans des récipients en plastique en conditions appropriées et utilisés comme substrat pour la production d'enzyme par la FMS (Kumar et *al.*, 2018).

### **2.2. Le thé vert**

Le thé a été obtenu sur un marché local à Saltillo, Coahuila, Mexique. Ses résidus sont récupérés lors de la préparation d'infusions à 80°C pendant 5 minutes à l'aide d'eau distillée, puis séchés dans un four à 60°C pendant 24 heures (Saldaña et *al.*, 2022).

### **2.3. Les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier**

Ces sous produits sont récupérés des champs agricoles au Kerala, ils sont coupés en petits morceaux et séchés pendant deux semaines sous le soleil. L'échantillon séché est rincé plusieurs fois avec l'eau distillée neutralisé avec l'acide chlorhydrique (HCl) 0.1M puis lavé avec de l'eau distillée, ensuite l'échantillon subi un deuxième séchage sous le soleil puis broyé en poudre pour l'utiliser dans le processus de fermentation (Dinil et Jacob, 2022).

## **3. Préparation des milieux de culture et la fermentation en milieu solide (FMS)**

### **3.1. Milieu de production par *Aspergillus niger* NFCCI 41123**

La fermentation en milieu solide (FMS) est réalisée dans des Erlenmeyers de 250 ml avec 5g de substrat solide. Le pH initial et le taux d'humidité de milieu sont ajustés à 5.0 et 75% respectivement. Le milieu est autoclavé à 121 C° pendant 30min afin d'éliminer toute forme de contamination microbienne. Ensuite, le milieu est inoculé avec quatre morceaux (6mm de diamètre) d'agar contenant une culture fongique en croissance active et incubé à 30 C° pendant 6 jours (Kumar et *al.*, 2018).



### **3.2. Milieu de production par *Aspergillus niger* 28A**

La fermentation est effectuée en trois exemplaires dans des Erlenmeyers de 250 ml, avec 3g de résidus de thé vert, un inoculum de  $1.10^6$  spores/g et une humidité de 60% ; ensuite les Erlenmeyers sont incubés pendant 96h à une température de 35°C (Saldaña et al., 2022).

### **3.3. Milieu de production par *Aspergillus niger***

La préparation de deux milieux différents B1 et J1 avec la composition suivante : 10g de pseudo-tronc de bananier, 15g d'eau distillée et 4g de peptone pour le B1 tandis que pour le J1, 10g de déchets de jacquier, 15g d'eau distillé, 4g de peptone sont mélangés. Ensuite, ils sont stérilisés dans un autoclave à 121°C, 15 psi pendant 15-20 minutes et refroidis à une température ambiante pour l'inoculation des moisissures.

L'inoculum pour les milieux de production est préparé dans un milieu Czapek-Dox stérile (Himedia). Environ 0,02 g de la biomasse formé dans le bouillon est prélevé et inoculé dans les différents milieux de production dans des Erlenmeyers de 250 ml et ensuite sont incubés à 30°C dans un incubateur humidifié pendant 96 heures (Dinil et Jacob, 2022).

## **4. Extraction des cellulases bruts**

### **4.1. Extraits produits par *Aspergillus niger* NFCCI 4113**

Pour l'extraction des enzymes, 50 ml d'eau distillée sont ajoutés au milieu fermenté et les Erlenmeyers sont agités (150 rpm) pendant 60 minutes à 30 °C. L'enzyme est séparée en pressant le milieu fermenté à travers deux tissus de mousseline superposés. Le filtrat est centrifugé à 8000 rpm pendant 15 minutes pour obtenir un surnageant clair. L'enzyme brute est conservée à 4°C pour l'utiliser ultérieurement (Kumar et al., 2018).

### **4.2. Extraits produits par *Aspergillus niger* 28A**

Pour obtenir l'extrait, 20mL de tampon citrate 0.05 M pH 4.8 est ajouté au milieu fermenté. Ensuite, les échantillons sont agités à 190 rpm pendant 10 minutes et filtrés à l'aide du papier filtre Whatman n°1. Ensuite, l'extrait est centrifugé à 10 000 rpm pendant 5 minutes. Le surnageant est récupéré et conservés à -4°C jusqu'à utilisation (Saldaña et al., 2022).

### **4.3. Extraits produits par *Aspergillus niger***

L'enzyme est extraite du substrat lignocellulosique en le mélangeant de manière homogène avec un tampon de citrate de sodium (pH=5) (1:10 % p/v). Ensuite agité 120 rpm à 30°C, puis filtré à l'aide d'un tissu en mousseline et centrifugé à 6000 rpm pendant 15 minutes dans une centrifugeuse réfrigérante (4°C) (Dinil et Jacob, 2022).

## **5. Dosage des activités enzymatiques cellulases**

### **5.1. Dosage des activités endoglucanase, activité papier filtre (APF) et $\beta$ -glucosidase selon Kumar et al., (2018)**

Les activités endoglucanase et (APF) sont mesurées par la méthode standard selon Ghose. Une solution à 1% de Carboxymethyl cellulose (CMC) de viscosité moyenne (Sigma Chemical Co., St. Louis, MO, USA) et du papier filtre Whatman n°1 de 50 mg (6\*1 cm) sont utilisés comme substrat afin de déterminer les activités enzymatiques de endoglucanase et (APF) respectivement. Une solution de 5 mM de p-nitrophényl  $\beta$ -D glucopyranoside est utilisée comme substrat pour le dosage de l'activité de la  $\beta$ -glucosidase. Toutes les activités sont testées à l'aide d'un tampon citrate de sodium 0,05 M de pH 5. Le sucre réducteur total est estimé par la méthode de (DNS). L'activité papier filtre est exprimée en UPF/g et les autres activités qui restent sont exprimées en UI/g.

### **5.2. Dosage des activités endocellulase, $\beta$ -glucosidase et l'activité papier filtre (APF) selon Saldaña et al., (2022)**

L'activité d'endocellulase est mesurée en utilisant la technique rapportée par Ghose (1987) adapté à une microplaque, dans laquelle 25  $\mu$ l de l'échantillon sont mélangés avec 25  $\mu$ l de carboxyméthylcellulose (CMC) à 2 % (tampon citrate 0.05 M pH 4.8), l'échantillon est placé dans un bain-marie à 50°C pendant 30 minutes. Ensuite, 150  $\mu$ l de DNS sont ajoutés et bouilli pendant 5min suivi d'un bain de glace. Après cela, 1mL d'eau distillée est ajouté, 200  $\mu$ l sont prélevés et l'absorbance a été lue à 540 nm. L'activité de  $\beta$ -glucosidase est évaluée en utilisant la technique rapportée par Berghem et pettersson (1974) adapté à une microplaque. 40  $\mu$ l de l'échantillon sont mélangés avec 40  $\mu$ L du 4-Nitrophényl- $\beta$ -D-glucopyranoside (PNPG) à 7.2 mM (tampon acétate de sodium 0.05 M pH 4.8). Ensuite, l'échantillon est placé dans un bain-marie pendant 10 minutes à 50°C, et 200  $\mu$ l de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> à 2% sont ajoutés. En fin 200  $\mu$ l sont prélevés et lus sur une microplaque à 410 nm. L'activité papier filtre est dosée en utilisant la technique décrite par Xiao et al. 20  $\mu$ l de l'échantillon

sont mélangés avec 40  $\mu\text{l}$  de tampon citrate 0.05 M pH 4.8. Des disques de papier filtre Whatman n°1 (5.5 mm) sont utilisés comme substrat, puis la réaction est incubée pendant 1h à 50°C. Après 120  $\mu\text{l}$  de DNS sont ajoutés et l'échantillon est bouilli pendant 5min suivi d'un refroidissement immédiat dans un bain de glace. Enfin, 36  $\mu\text{l}$  de l'échantillon sont mélangés avec 160  $\mu\text{l}$  d'eau distillée, et l'absorbance est mesurée à 540 nm.

### **5.3. Dosage de l'activité de cellulase selon Dinil et Jacob (2022).**

Pour la mesure de l'activité enzymatique de cellulases, 1% de CMC dans un tampon citrate 5mM, pH 5 est ajouté à l'extrait de cellulase, ensuite les niveaux de glucose libérés sont mesurés par la méthode du DNS (acide 3,5-dinitrosalicylique). Une unité d'activité enzymatique est exprimée comme la concentration d'enzyme qui libère 1 $\mu\text{g}$  de sucre réducteur du substrat par minute dans les conditions de l'essai.

*Chapitre 02 :*  
*Analyse des résultats*

## 1. Description

Cette partie expose l'ensemble des résultats obtenus à partir de l'étude bibliographique sur la production des cellulases par *Aspergillus niger* sur différents déchets agroalimentaires comme substrats de fermentation en milieu solide. Les résultats des différentes activités cellulasiques sont résumés dans le (tableau 5).

**Tableau 5 :** Les activités cellulasiques produites par les différentes souches d'*Aspergillus niger* sur les déchets lignino-cellulosiques (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil et Jacob, 2022).

		Activité d'endoglucanase (UI/g)	Activité papier filtre (UPF/g)	Activité de $\beta$ -Glucosidase (UI/g)
<i>A.niger</i> NFCCI 4113	Bagasse de canne à sucre	12.47±0.85	1.48±0.10	25.5±0.82
	Tiges de canne à sucre	13.97±2.06	1.24±0.13	24.6±0.8
	Rafles de maïs	11.1±1.47	1.25±0.12	29.17±1.27
	Paille de riz	16.6±1.93	1.74±0.12	28.33±0.86
	Balles de riz	12.63±1.42	1.43±0.08	27.47±0.91
	Son de blé	26.33±2.38	2.11±0.14	34.3±1.28
	Paille de blé	14.63±1.63	1.48±0.10	31.17±0.87
	Herbe de carottes	25.6±2.11	1.94±0.13	32.57±0.71
<i>A.niger</i> 28A	Déchets de thé vert	65.85±2.18	4.50	1016.52±3.58
<i>A.niger</i>	Pseudo-tronc de bananier	4.1	/	/
	Déchets de jacquier	4.1	/	/

Les déchets de thé vert, avec la souche *A. niger* 28A, ont montré des résultats importants des trois activités dosés, activité papier filtre (4.50 UPF/g),  $\beta$ -glucosidase (1016.52 $\pm$ 3.58 UI/g) et endoglucanase (65.85 $\pm$ 2.18 UI/g) (Saldaña et al., 2022). Tandis que la souche *A. niger* NFCCI 4113 a présenté des activités maximales d'endoglucanase (26.33 $\pm$ 2.38 UI/g),  $\beta$ -glucosidase (34.3 $\pm$ 1.28 UI/g), activité papier filtre (2.11 $\pm$ 0.14 UPF/g) sur le son de blé comme substrat de fermentation en milieu solide. Parmi les substrats qui ont aussi présenté des bonnes activités d'endoglucanase, d'APF et de  $\beta$ -glucosidase respectivement, l'herbe de carottes (25.6 $\pm$ 2.1 UI/g, 1.94 $\pm$ 0.13 UPF/g, 32.57 $\pm$ 0.71 UI/g) et la paille de riz (16.6 $\pm$ 1.93 UI/g, 1.74 $\pm$ 0.12 UPF/g, 28.33 $\pm$ 0.86 UI/g). La paille de blé de son coté, a présenté des activités d'endoglucanase, d'APF et de  $\beta$ -glucosidase moyennes (14.63 $\pm$ 1.63 UI/g, 1.48 $\pm$ 0.10 UPF/g, 31.17 $\pm$ 0.87 UI/g) (Kumar et al., 2018).

Certains déchets ont présenté une seule bonne activité sur les trois activités étudiés comme la bagasse de canne à sucre avec une activité papier filtre de 1.48 $\pm$ 0.10 UPF/g. Aussi, les tiges de canne à sucre ont présenté une activité d'endoglucanase de 13.97 $\pm$ 2.06 UI/g alors que les rafles de maïs leur seule bonne activité est la  $\beta$ -glucosidase (29.17 $\pm$ 1.27 UI/g) (Kumar et al., 2018).

Les balles de riz ont montré les trois plus faibles activités d'endoglucanase (12.63 $\pm$ 1.42 UI/g), d'APF (1.43 $\pm$ 0.08 UPF/g) et de  $\beta$ -Glucosidase (27.47 $\pm$ 0.91 UI/g), tandis que les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier ont présenté une activité faible d'endoglucanase seulement (4.1 UI/g) pour les deux déchets (Kumar et al., 2018 ; Dinil et Jacob, 2022).

## 2. Discussion

Les meilleures activités cellulasiques sont obtenues lors de l'utilisation de déchets de thé vert comme substrat de fermentation avec l'*Aspergillus niger* 28A (saldaña et al., 2022), ces résultats dépasse largement ceux obtenus par *A. tubingensis* NKBP-55 cultivée sur la farine de coprah avec une activité papier filtre (3.8 UPF/g) (Prajapati et al., 2018). *A. niger* produits le  $\beta$ -glucosidase (286.05 UI/g) avec les rafles de maïs comme substrat (Aliyah et al., 2017). En plus, Uchida et Santos, (2020) ont montré que lors de l'utilisation du FMS pendant 6 jours, *A. niger* IOC 3998 avec les fruits de la châtaigne produits 2,54 U/g et 0,053 U/g d'endoglucanase et d'APF, respectivement. Salihu et al., (2015) ont rapporté les activités les plus élevées d'endoglucanase (1,76 U/g), d'activité papier filtre (1,22 U/g) et de

$\beta$ -glucosidase (0,91 U/g) lorsque ils ont utilisé la paille de riz comme substrat de FMS pour la production de cellulase par *Aspergillus niger*.

*Aspergillus niger* NFCCI 4113 cultivée sur le son de blé présente des activités élevées d'endoglucanase, de  $\beta$ -glucosidase et l'activité papier filtre (Kumar et al., 2018). Ce qui concorde avec d'autres recherches qui ont montré que la production des cellulases par *A. niger* a atteint une activité maximale au 4<sup>ème</sup> jour sur le son de blé 24,4 UI/g pour l'endoglucanase et 10,6 UI/g pour l'APF ainsi que sur la coque d'arachide avec 13,7 UI/g pour l'endoglucanase et 8,8 UI/g pour l'APF, (Kanakaraju et al., 2020). Le son de blé est utilisé aussi pour la production d'autres enzymes par *Aspergillus niger*, Bedan et al., (2014) ont montré que la production d'amylase la plus élevée a été observée avec *A. niger* sur le son de blé. Ahmed et al., (2011) ont montré que la production maximale de protéase par *A. niger* (92 U/mL) a été obtenue avec le son de blé comme substrat après le 3<sup>ème</sup> jour d'incubation.

La production des cellulases par *A. niger* NFCCI 4113 avec le son de blé comme substrat a présenté des activités cellulolytiques élevée par rapport à celle qui sont obtenus avec la paille de blé (Kumar et al., 2018). Pandit et al., (2013), ont présenté des activités d'APF (167 UI/g) et d'endoglucanase (415 UI/g), qui sont produits par *A. flavus* cultivé sur la paille de blé. Ces activités sont très élevées par rapport à ce qui est produits par *A. niger* NFCCI 4113 sur le même substrat.

Concernant les déchets de riz, les activités de cellulases qui sont présentées par la paille de riz sont mieux que les activités qui sont montrées par les balles de riz (Kumar et al., 2018). Ismail et al., (2020), ont montré une activité optimale de cellulase (124.94 U/g) très élevée lors de l'utilisation aussi de paille de riz par *A. terreus* RS2. En plus, Reddy et al., (2015), ont présenté que l'activité papier filtre produite par *A. niger* avec le son de riz comme substrat de FMS est 29.81 U/g.

Les résultats qui sont observés pour les tiges et la bagasse de canne à sucre sont similaires. Moran-Aguilar et al., (2021), ont montré que la production maximale de cellulases par *A. niger* ITV-01 avec la bagasse de canne à sucre prétraitée en autoclave est  $5.48 \pm 0.67$  U/g.

Les bons résultats obtenus par *A. niger* NFCCI 4113 avec l'herbe de carottes sont confirmés par Bharti et al., (2018), *Talaromyces stipitatus* MTCC 1268 cultivé dans un milieu

solide à base d'herbe de carottes (*Parthenium hysterophorus*) a présenté une activité d'endoglucanase (30 UI/g) et d'APF (2.86 UI/g).

Les activités d'APF ( $10.303 \pm 0.353$  U/g), et d'endoglucanase ( $14.812 \pm 0.360$  U/g) obtenus par Chuwech et *al.*, (2016) lors de la culture de champignon de la pourriture blanche, *Pycnoporus coccineus* sur les rafles de maïs comme substrat sont largement supérieur à celles qui sont obtenus par *A. niger* NFCCI 4113 sur le même substrat.

Dinil et Jacob, (2022) ont montré que l'activité d'endoglucanase produits par *A. niger* dont les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier sont les substrats de fermentation est relativement faible comparant à d'autres souches. *A. fumigatus* LMLPS 13-4 cultivées en milieu solide sur les pseudo-troncs de banane comme substrat a donné une activité totale de la cellulase (APF)  $41,33 \pm 5.0$  (UPF/g) (Legodi et *al.*, 2023). Mrudula et *al.*, (2011) ont montré que l'utilisation des déchets de coco comme substrat pour la production de cellulases par *A. niger*, un maximum de 9 U/g a été observé comme activité de cellulase.



*Conclusion et perspectives*

Le présent travail a pour fin l'étude bibliographique sur la production des cellulases par la souche fongique *Aspergillus niger* par FMS à bases de différents sous-produits agroalimentaires (les son de blé, la paille de blé, la paille de riz, les balles de riz, la bagasse de canne à sucre, les tiges de canne à sucre, l'herbe de carottes, les rafles de maïs, les déchets de thé vert, les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier). Le choix du type de déchet se fait en raison de leur richesse en lignocellulose (cellulose, hémicellulose et lignine), qui va être utilisé dans le processus de production des cellulases fongiques.

En effet, le maximum de production pour les trois activités d'endoglucanase ( $65.85 \pm 2.18$  UI/g), d'activité papier filtre ( $4.50$  UPF/g) et de  $\beta$ -Glucosidase ( $1016.52 \pm 3.58$  UI/g) est obtenus sur les déchets de thé vert. En plus, d'autres substrats ont présenté de bons résultats en terme des trois enzymes respectivement sont le son de blé ( $26.33 \pm 2.38$  UI/g,  $2.11 \pm 0.14$  UPF/g,  $34.3 \pm 1.28$  UI/g), suivi par l'herbe de carottes ( $25.6 \pm 2.11$  UI/g,  $1.94 \pm 0.13$  UPF/g,  $32.57 \pm 0.71$  UI/g) et la paille de riz ( $16.6 \pm 1.93$  UI/g,  $1.74 \pm 0.12$  UPF/g,  $28.33 \pm 0.86$  UI/g).

Tandis que, les sous-produits qui ont présenté les plus mauvaises productions cellulasiques sont : les balles de riz pour les trois activités (endoglucanase  $12.63 \pm 1.42$  UI/g, APF  $1.43 \pm 0.08$  UPF/g,  $\beta$ -Glucosidase  $27.47 \pm 0.91$  UI/g), les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier (endoglucanase  $4.1$  UI/g, pour chaque déchets) et les rafles de maïs pour l'endoglucanase ( $11.1 \pm 1.47$  UI/g) et l'APF ( $1.25 \pm 0.12$  UPF/g).

D'après ces résultats, on peut considérer les déchets de thé vert, le son de blé, l'herbe de carottes et la paille de riz comme des sous-produits agroalimentaires d'importance industrielle, que l'on peut utiliser pour produire de la cellulase par *A. niger*

Ces résultats exigent d'autres études et ouvrent de nouvelles perspectives :

- Optimisation de milieu de production : pH, température, humidité, inoculum, nature de l'agent humidifiant, temps d'incubation pour un meilleur rendement de production.
- Réalisation d'une mixture de différents déchets comme substrat de FMS afin d'augmenter les quantités de cellulase produite.
- Purification et caractérisation de la cellulase produite (poids moléculaire, pH optimum, température optimale), pour l'utiliser ultérieurement dans divers secteurs.

*Références  
bibliographiques*

---

-A-

- Aarzo, Naqvi, S., Agarwal, N. B., Singh, M. P., & Samim, M. (2021). Bio-engineered palladium nanoparticles: model for risk assessment study of automotive particulate pollution on macrophage cell lines. *RSC advances*, 11(3), 1850-1861.
- Abdullah, A., Hamid, H., Christwardana, M., & Hadiyanto, H. (2018). Optimization of cellulase production by *Aspergillus niger* ITBCC L74 with bagasse as substrate using response surface methodology. *HAYATI journal of biosciences*, 25(3), 115-115.
- Adewuyi, A. (2022). Underutilized Lignocellulosic Waste as Sources of Feedstock for Biofuel Production in Developing Countries. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 10). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.741570>
- Ahmed, A., & Bibi, A. (2018). Fungal cellulase; production and applications: minireview. *Int. J. Health Life Sci*, 4(1), 19-36.
- Ahmed, I., Zia, M. A., Iftikhar, T., & Nasir Iqbal, H. M. (2011). Characterization and detergent compatibility of purified protease produced from *Aspergillus niger* by utilizing agro wastes. *BioResources*, 6(4).
- Aliyah, A., Alamsyah, G., Ramadhani, R., & Hermansyah, H. (2017). Production of  $\alpha$ -amylase and  $\beta$ -glucosidase from *Aspergillus niger* by solid state fermentation method on biomass waste substrates from rice husk, bagasse and corn cob. *Energy Procedia*, 136, 418-423.
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource technology*, 101(13), 4851-4861.
- Amaresan, N., Kumar, M. S., Annapurna, K., Kumar, K., & Sankaranaryanan, A. (Eds.). (2020). *Beneficial microbes in agro-ecology: bacteria and fungi*. Academic Press.
- Andrade, M. C., Gorgulho Silva, C. D. O., de Souza Moreira, L. R., & Ferreira Filho, E. X. (2021). Crop residues: applications of lignocellulosic biomass in the context of a biorefinery. *Frontiers in Energy*, 1-22.
- Anne. & Cat. (2012). <https://www.techniquesdelevage.fr/article-quelles-sont-les-differences-entre-un-foin-et-une-paille-110355181.html> [En ligne], (**page consulté le 23 Mai 2023**).

- Assamoi, A. A., Destain, J., & Thonart, P. (2009). Aspects microbiologiques de la production par fermentation solide des endo- $\beta$ -1, 4-xylanases de moisissures: le cas de *Penicillium canescens*. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(2).

-B-

- Barragán, L. P., Figueroa, J. J. B., Durán, L. R., González, C. A., & Hennigs, C. (2016). Fermentative production methods. In *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products* (pp. 189-217). Elsevier.
- Bashar, H. K., Juraimi, A. S., Ahmad-Hamdani, M. S., Uddin, M. K., Asib, N., Anwar, M. P., & Rahaman, F. (2021). A Mystic Weed, *Parthenium hysterophorus*: Threats, Potentials and Management. *Agronomy*, 11(8), 1514.
- Bauchop, T. (1979). Rumen anaerobic fungi of cattle and sheep. *Applied and Environmental Microbiology*, 38(1), 148-158.
- Bedan, D. S., Aziz, G. M., & Al-Sa'ady, A. J. (2014). Optimum conditions for  $\alpha$ -amylase production by *Aspergillus niger* mutant isolate using solid state fermentation. *Current Research in Microbiology and Biotechnology*, 2(4), 450-456.
- Beguin, P. (1990). Molecular biology of cellulose degradation. *Annual review of microbiology*, 44(1), 219-248.
- Béguin, P., & Aubert, J. P. (1994). The biological degradation of cellulose. *FEMS Microbiology Reviews*, 13(1). [https://doi.org/10.1016/0168-6445\(94\)90099-X](https://doi.org/10.1016/0168-6445(94)90099-X)
- Berber-Villamar, N. K., Netzahuatl-Muñoz, A. R., Morales-Barrera, L., Chávez-Camarillo, G. M., Flores-Ortiz, C. M., & Cristiani-Urbina, E. (2018). Corncob as an effective, eco-friendly, and economic biosorbent for removing the azo dye Direct Yellow 27 from aqueous solutions. *PLoS One*, 13(4), e0196428.
- Bharti, A. K., Kumar, A., Kumar, A., & Dutt, D. (2018). Exploitation of *Parthenium hysterophorus* biomass as low-cost substrate for cellulase and xylanase production under solid-state fermentation using *Talaromyces stipitatus* MTCC 12687. *Journal of radiation research and applied sciences*, 11(4), 271-280.
- Bilal, M., Wang, Z., Cui, J., Ferreira, L. F. R., Bharagava, R. N., & Iqbal, H. M. (2020). Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers—A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems. *Science of the total environment*, 722, 137903.
- Boiron, P (1996). Organisation et biologie des champignons. Edition Nathan. P : 13-19-69-79. Bourgeois C.M., Mescle J.F., Zucca J. (1989). Microbiologie alimentaire.

Aspect microbiologique de la sécurité et de la qualité des aliments. Lavoisier. Paris. P : 216-244.

- Botton B., Breton A., Fevre M., Gauthier S., Guy P., Larpent J.P., Reymond P., Sanglier J-J., Vayssier Y. & Veau P. (1999). Moisissures utiles et nuisibles. Importance industrielle. Masson. Paris. P: 12-426.
- Botton B., Bretton A., Fever M., Gauthier S., Guy Ph., Larpent J.P., Reymond P., Sanglier J-J., Vayssier Y & Veau P. (1990). Moisissures utiles et nuisibles, importance industrielle, (edn) Masson, Paris.
- Boudih, S. (2011). Identification des moisissures et de leurs métabolites secondaires colonisant des supports papiers : évaluation de la toxicité sur des cellules épithéliales respiratoires in vitro. Sciences agricoles. Université Paris-Est, 2011.

-C-

- Caillaud, D., Bex, V., Boissier, M., Fabre, C., Meunier, O., Mouilleseaux, A., ... & Roquebert, M. F. (2006). Contaminations fongiques en milieux intérieurs. *Diagnostic, Effets sur la santé respiratoire, conduite à tenir. Groupe de travail «Moisissures dans l'habitat»[Internet]. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.*
- Carlotti, A. (2014). Identification des moisissures. La Vague #42. (pp 10-12).
- Carr, D. (2012). Assessment of alternative uses for lignocellulosic waste products. *Nui Maynooth, 1(1).*
- Chakraborty, S., Gupta, R., Jain, K. K., Gautam, S., & Kuhad, R. C. (2016). Cellulases: application in wine and brewery industry. In *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* (pp. 193-200). Elsevier.
- Chuwech, M., Rakariyatham, N., Chandet, N., & Tinoi, J. (2016). Utilization of pretreated corn cobs for cellulase production by *Pycnoporus coccineus*. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology, 21(2)*, 310-318.

-D-

- Darabzadeh, N., Hamidi-Esfahani, Z., & Hejazi, P. (2018). Improvement of cellulase production and its characteristics by inducing mutation on *Trichoderma reesei* 2414 under solid state fermentation on rice by-products. *Applied Food Biotechnology, 5(1)*, 11-18.

- Daramola, M. O., & Ayeni, A. O. (Eds.). (2020). *Valorization of Biomass to Value-Added Commodities: Current Trends, Challenges, and Future Prospects*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.
- Dashtban, M., Schraft, H., & Qin, W. (2009). Fungal bioconversion of lignocellulosic residues; opportunities & perspectives. *International journal of biological sciences*, 5(6), 578.
- Davet P. (1996). Vie microbienne du sol et production végétale. INRA. Paris. P : 52-57.
- Dey, P., Singh, J., Scaria, J., & Anand, A. P. (2018). Improved production of cellulase by *Trichoderma reesei* (MTCC 164) from coconut mesocarp-based lignocellulosic wastes under response surface-optimized condition. *3 Biotech*, 8, 1-13.
- Dinil, A., & Jacob, A. (2022). Valorization of Agro-industrial Discards in Fermentation for the Production of Cellulase Enzyme. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 16(1), 347-355.
- Douard, F. (2014). Cinq chaudières Vyncke à rafles de maïs chez Monsanto. Article paru dans le Bioénergie international n°30 de mars-avril 2014.
- Durand, A. (2003). Bioreactor designs for solid state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2-3), 113-125.

-E-

- Edeh, I. (2020). Bioethanol production: An overview. *Bioethanol Technologies, F. Inambao.(Ed.), Pietermaritzburg, Sudáfrica: Universidad de KwaZulu-Natal*, 1-22.
- Ejaz, U., Sohail, M., & Ghanemi, A. (2021). Cellulases: From bioactivity to a variety of industrial applications. In *Biomimetics* (Vol. 6, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/biomimetics6030044>
- El-Dewany, C., Awad, F., & Zaghoul, A. M. (2018). Utilization of Rice Straw as a Low-Cost Natural By-Product in Agriculture. In *Int. J. of Environmental Pollution & Environmental Modelling* (Vol. 1, Issue 4).
- Elisashvili, V., Penninckx, M., Kachlishvili, E., Tsiklauri, N., Metreveli, E., Kharziani, T., & Kvesitadze, G. (2008). *Lentinus edodes* and *Pleurotus* species lignocellulolytic enzymes activity in submerged and solid-state fermentation of lignocellulosic wastes of different composition. *Bioresource technology*, 99(3), 457-462.
- El-Nahrawy, S., Metwally, M., El-Kodoos, A., Rizk, Y., Belal, E. S. B., Shabana, S. A., & El-Refai, I. M. (2017). Optimization of culture conditions for production of

cellulase by *Aspergillus tubingensis* KY615746 using rice straw waste. *Environment, Biodiversity and Soil Security*, 1(2017), 177-189.

- El-Ramady, H., El-Henawy, A., Amer, M., Omara, A. E. D., Elsakhawy, T., Elbasiouny, H., ... & El-Mahrouk, M. (2020). Agricultural waste and its nano-management: Mini review. *Egyptian Journal of Soil Science*, 60(4), 349-364.
- Enoki, A., Tanaka, H., & Fuse, G. (1988). Degradation of Lignin-Related Compounds, pure cellulose, and wood components by white-rot and brown-rot fungi.

-G-

- Gauthier, A. (2016). Les mycotoxines dans l'alimentation et leur incidence sur la santé. *Sciences pharmaceutiques. dumas-01315198*.
- Gervais, P., & Molin, P. (2003). The role of water in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, 13(2-3), 85-101.
- Goodman, B. A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143-162.
- Guillaume, V., & Alcindor, L. G. (2006). Mycologie. Fiches pratiques. Editions de Boeck, collection biologie médicale pratique, Bruxelles.
- Gupta, V. G., & Rodriguez-Couto, S. (Eds.). (2018). *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Penicillium system properties and applications*. Elsevier.
- Gupta, V. K. (Ed.). (2016). *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering: Aspergillus system properties and applications*. Elsevier.
- Guzmán-Chávez, F., Zwahlen, R. D., Bovenberg, R. A., & Driessen, A. J. (2018). Engineering of the filamentous fungus *Penicillium chrysogenum* as cell factory for natural products. *Frontiers in microbiology*, 9, 2768.

-H-

- Hada, S., & Shukla, A. (2018). Extraction And Isolation Of Carrot Grass For Protection Of Environment. *Global Journal Of Engineering Science And Researches*. (pp 365-367).
- Haghdan, S., Renneckar, S., & Smith, G. D. (2016). Sources of Lignin. In *Lignin in Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35565-0.00001-1>
- Halleux, E. (2013). Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar, Travail de fin d'études réalisé en vue de



l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des Constructions. *Université de Liège. 111p.*

- Hasper, A. A., Dekkers, E., van Mil, M., van de Vondervoort, P. J., & de Graaff, L. H. (2002). EglC, a new endoglucanase from *Aspergillus niger* with major activity towards xyloglucan. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(4), 1556-1560.
- Hazourli, S., Ziati, M., Hazourli, A., & Cherifi, M. (2007). Valorisation d'un résidu naturel ligno-cellulosique en charbon actif-exemple des noyaux de dattes. *Revue des énergies renouvelables, ICRESO*, 7, 187-192.
- Howard, R. L., Abotsi, E. L. J. R., Van Rensburg, E. J., & Howard, S. (2003). Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of biotechnology*, 2(12), 602-619.  
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/cellulase>.

-I-

- Imran, M., Anwar, Z., Irshad, M., Asad, M. J., & Ashfaq, H. (2016). Cellulase production from species of fungi and bacteria from agricultural wastes and its utilization in industry: a review. *Advances in Enzyme Research*, 4(2), 44-55.
- Iqbal, N., Agrawal, A., Dubey, S., & Kumar, J. (2020). Role of decomposers in agricultural waste management. In *Biotechnological Applications of Biomass*. IntechOpen.
- Ismail, S. A., & Hassan, A. A. (2020). Optimizing the production of rice straw hydrolytic cellulase under solid-state fermentation using *Aspergillus terreus* RS2. *Egyptian pharmaceutical journal*, 19(1), 7.

-J-

- Jain, R. K., Sharma, A. K., Kumar, A., & Kumar, S. (2008). Pulping and physical strength properties of bodha and carrot grass as raw material for handmade paper making. *Indian Journal of Weed Science*, 40(1&2), 88-91.
- Jasani, H., Umretiya, N., Dharajiya, D., Kapuria, M., Shah, S., & Patel, J. (2016). Isolation, optimization and production of cellulase by *Aspergillus niger* from agricultural waste. *Journal of pure and applied microbiology*, 10(2), 1159-1167.
- Javed, M. M., Zahoor, S., Shafaat, S., Mehmooda, I., Gul, A., Rasheed, H., ... & Haq, I. (2012). Wheat bran as a brown gold: Nutritious value and its biotechnological applications. *African Journal of Microbiology Research*, 6(4), 724-733.

- Jayasekara, S., & Ratnayake, R. (2019). Microbial Cellulases: An Overview and Applications. In *Cellulose*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84531>
- Jensen, C. U., Rodriguez Guerrero, J. K., Karatzos, S., Olofsson, G., & Iversen, S. B. (2017). Fundamentals of Hydrofaction<sup>TM</sup>: Renewable crude oil from woody biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 7(4). <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0248-8>

-K-

- Kanakaraju, Y., Uma, A., & Palety, K. (2020). Aspergillus Niger based production of cellulase-A study on submerged and solid state fermentation. *Int J Sci Res*, 64(3), 60-65.
- Khan, T. S., & Mubeen, U. (2012). Wheat straw: A pragmatic overview. *Curr. Res. J. Biol. Sci*, 4(6), 673-675.
- Korish, M. (2003). *Production, Purification, Properties and Application of the Cellulases from a Wild type Strain of a Yeast isolate* (Doctoral dissertation).
- Kriepps, M., & Luxembourg, A. (2009). *Le the: origine, actualité et potentialités* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Faculté de pharmacie de l'Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- Kuhad, R. C., Gupta, R., & Singh, A. (2011). Microbial cellulases and their industrial applications. In *Enzyme Research* (Vol. 2011, Issue 1). <https://doi.org/10.4061/2011/280696>
- Kulkarni, V., Butte, K., & Rathod, S. (2012). Natural Polymers – A Comprehensive Review. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 3(4).
- Kumar, B. A., Amit, K., Alok, K., & Dharm, D. (2018). Wheat bran fermentation for the production of cellulase and xylanase by Aspergillus niger NFCCI 4113. *Res J Biotechnol*, 13, 5.

-L-

- Leghlimi, H. (2013). *Cellulases de souches fongiques issues du sol d'un milieu extrême (sol proche de sources thermales). Sélection des souches et étude des caractéristiques des enzymes* (Doctoral dissertation, Reims).
- Legodi, L. M., La Grange, D. C., & van Rensburg, E. L. J. (2023). Production of the Cellulase Enzyme System by Locally Isolated Trichoderma and Aspergillus Species

Cultivated on Banana Pseudostem during Solid-State Fermentation. *Fermentation*, 9(5), 412.

- Li, C., Liu, G., Nges, I. A., Deng, L., Nistor, M., & Liu, J. (2016). Fresh banana pseudo-stems as a tropical lignocellulosic feedstock for methane production. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 1-9.
- Liu, M. (2021). Application of *Aspergillus Niger* in the resourcable utilization of straw. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 859, No. 1, p. 012092). IOP Publishing.
- Liu, X. (2015). *Valorisation énergétique de la biomasse lignocellulosique par digestion anaérobie: prétraitement fongique aérobie* (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).

-M-

- Makut M. D., Godiya E. M. (2010). A survey of cellulolytic mesophilic fungi in the soil environment of Keffi Metropolis, Nasarawa State, Nigeria. *African Journal of Microbiology Research*, 4(21), 2191-2195.
- Mason, P. J., Furtado, A., Marquardt, A., Hodgson-Kratky, K., Hoang, N. V., Botha, F. C., ... & Henry, R. J. (2020). Variation in sugarcane biomass composition and enzymatic saccharification of leaves, internodes and roots. *Biotechnology for biofuels*, 13(1), 1-19.
- Méheust, D. (2012). *Exposition aux moisissures en environnement intérieur: méthodes de mesure et impacts sur la santé* (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).
- Mhuantong, W., Charoensri, S., Poonsrisawat, A., Pootakham, W., Tangphatsornruang, S., Siamphan, C., ... & Chantasingh, D. (2021). High quality *Aspergillus aculeatus* genomes and transcriptomes: a platform for cellulase activity optimization toward industrial applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 607176.
- Michelin, M., Ruiz, H. A., Silva, D. P., Ruzene, D. S., Teixeira, J. A., & Polizeli, M. L. T. M. (2014). Cellulose from lignocellulosic Waste. In *Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_52)
- Moran-Aguilar, M. G., Costa-Trigo, I., Calderón-Santoyo, M., Domínguez, J. M., & Aguilar-Uscanga, M. G. (2021). Production of cellulases and xylanases in solid-state fermentation by different strains of *Aspergillus niger* using sugarcane bagasse and brewery spent grain. *Biochemical Engineering Journal*, 172, 108060.

- Mossion, A. (2007). *Étude de la composition minérale et organique des liqueurs de thé et de leurs caractéristiques organoleptiques: influence des paramètres physico-chimiques de l'eau* (Doctoral dissertation).
- Moussa, T. A., & Tharwat, N. A. (2007). Optimization of cellulase and  $\beta$ -glucosidase induction by sugarbeet pathogen *Sclerotium rolfsii*. *African Journal of Biotechnology*, 6(8). pp.1048-1054.
- Mrudula, S., & Murugammal, R. (2011). Production of cellulase by *Aspergillus niger* under submerged and solid state fermentation using coir waste as a substrate. *Brazilian Journal of Microbiology*, 42, 1119-1127.
- Mulaudzi, M. L. (2020). Establishing a microbial co-culture for production of cellulase using banana (*musa paradisiaca*) pseudostem (Doctoral dissertation).

-N-

- Nair, P. Kuriakose, I. Das, B. (2022). Effective Bioconversion of Lignocellulosic Waste to Biodegradable Products for a Cleaner Earth. *Open Access Journal of Microbiology & Biotechnology*, 7(3). <https://doi.org/10.23880/oajmb-16000230>
- Namita, P., Mukesh, R., & Vijay, K. J. (2012). *Camellia sinensis* (green tea): a review. *Global journal of pharmacology*, 6(2), 52-59.
- Nargotra, P., Sharma, V., Lee, Y. C., Tsai, Y. H., Liu, Y. C., Shieh, C. J., Tsai, M. L., Dong, C. di, & Kuo, C. H. (2023). Microbial Lignocellulolytic Enzymes for the Effective Valorization of Lignocellulosic Biomass: A Review. In *Catalysts* (Vol. 13, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/catal13010083>
- National Center for Biotechnology Information (2023). PubChem Compound Summary for CID 440950, Cellulase. Page consultée le 04/05/2023.
- Noncent, D. Joseph, O & Emmanuel, E. (2016). Utilisation de la bagasse de canne à sucre dans la dépollution des effluents urbains. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34912.28160>.

-O-

- Ogier JC, Ballerini D, Leygue JP, Rigal L et Pourquoié J. (1999). Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Oil et Gas Science and Technology*, 54(1), 67-94.

- Okolie, J. A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2020). Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 2145-2169.
- Ondh-Obame, Jean. (2022). Spécialité : Phytopathologie et Protection des Végétaux Présentée par La maladie du Bunchy top du bananier dans la zone agroécologique du Grand Libreville (Gabon) : prévalence, facteurs favorisants et perspectives de lutte.
- Onipe, O. O., Jideani, A. I., & Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(12), 2509-2518.

-P-

- Paës, G. (2005). *Etude structure/fonction d'hémicellulases thermostables: la xylanase GH-11 et l'arabinofuranosidase GH-51 de Thermobacillus xylanilyticus* (Doctoral dissertation, Reims).
- Pandit, S., Lawrence, K., Singh, A., Singh, S., & Lawrence, R. (2013). Cellulase production by *Aspergillus flavus* and saccharification of wheat straw. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(6), 1965-1971.
- Patel, B. Y., & Patel, H. K. (2022). Retting of banana pseudostem fibre using *Bacillus* strains to get excellent mechanical properties as biomaterial in textile & fiber industry. *Heliyon*, 8(9), e10652.
- Pathak, N., Singh, S., Singh, P., Singh, P. K., Singh, R., Bala, S., ... & Tripathi, M. (2022). Valorization of jackfruit waste into value added products and their potential applications. *Frontiers in Nutrition*, 9.
- Peberdy, JF (éd.). (1987). *Penicillium et acremonium* (Vol. 1). Springer Science et médias d'affaires.
- Periyasamy, K. (2018). *Bioethanol production from lignocellulosic biomass using immobilized cellulolytic enzymes* (Doctoral dissertation, Anna University (Chennai, Inde)).
- Popoola, B. M. (2022). Biodegradable Waste. In *Recycling Strategy and Challenges Associated with Waste Management Towards Sustaining the World*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107910>

- Prajapati, B. P., Suryawanshi, R. K., Agrawal, S., Ghosh, M., & Kango, N. (2018). Characterization of cellulase from *Aspergillus tubingensis* NKBP-55 for generation of fermentable sugars from agricultural residues. *Bioresource technology*, 250, 733-740.
- Prevot, V. (2013). *Comparaison de la production de complexes enzymatiques par fermentation en milieu solide et par fermentation en milieu liquide* (Doctoral dissertation, Reims).
- Privas, E. (2013). *Matériaux ligno-cellulosiques «Élaboration et Caractérisation laboration»* (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat en Science et génie des matériaux, L'École Nationale Supérieure des Mines, Paris. France).
- Prueckler, M., Siebenhandl-Ehn, S., Apprich, S., Hoeltinger, S., Haas, C., Schmid, E., & Kneifel, W. (2014). Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization. *LWT-Food Science and Technology*, 56(2), 211-221.

-R-

- Rahardjo, Y. S., Tramper, J., & Rinzema, A. (2006). Modeling conversion and transport phenomena in solid-state fermentation: a review and perspectives. *Biotechnology Advances*, 24(2), 161-179.
- Razafindrakotohary, T. Razafindrazaha, OK. (2019). Contribution à la valorisation du fruit du Jacquier : Cas de la pectine, de la confiture, de la gelée et des chips. Institut Supérieur Polytechnique de Madagascar.
- Reddy, G. P. K., Narasimha, G., Kumar, K. D., Ramanjaneyulu, G., Ramya, A., Kumari, B. S., & Reddy, B. R. (2015). Cellulase production by *Aspergillus niger* on different natural lignocellulosic substrates. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(4), 835-845.
- Reichembach, L. H., & de Oliveira Petkowicz, C. L. (2020). Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties. *Carbohydrate polymers*, 245, 116473.
- Riccio, P., Rossano, R., Vinella, M., Domizio, P., Zito, F., Sansevrino, F., ... & Rosi, I. (1999). Extraction and immobilization in one step of two  $\beta$ -glucosidases released from a yeast strain of *Debaryomyces hansenii*. *Enzyme and Microbial Technology*, 24(3-4), 123-129.

- Rodrigues, V. J., & Odaneth, A. A. (2021). Industrial application of cellulases. In *Current Status and Future Scope of Microbial Cellulases*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821882-2.00007-7>
- Ropars, J., Caron, T., Lo, Y. C., Bennetot, B., & Giraud, T. (2020). La domestication des champignons *Penicillium* du fromage. *Comptes Rendus. Biologies*, 343(2), 155-176.
- Roussos, S. (1987). *Croissance de Trichoderma harzianum par fermentation en milieu solide: Physiologie, sporulation et production de cellulases* (No. 582.24 ROU). Paris: ORSTOM.

-S-

- Sain, M., & Panthapulakkal, S. (2006). Bioprocess preparation of wheat straw fibers and their characterization. *Industrial crops and products*, 23(1), 1-8.
- Saldaña, S. A., Ponce, A. S. P., Esquivel, J. C. C., Herrera, R. R., Leza, H. A. R., Valdés, J. A. A., ... & González, C. N. A. (2022). Revalorization of green tea residues through the production of cellulases by solid-state fermentation using an *Aspergillus niger* strain.
- Sales, M. R., de Moura, R. B., da Silva, M. F., de MacEdo, G. R., & Figueiredo Porto, A. L. (2011). Cellulase and xylanase production by *Aspergillus* species. *Annals of Microbiology*, 61(4). 917-924.
- Salihu, A., Abbas, O., Sallau, A. B., & Alam, M. Z. (2015). Agricultural residues for cellulolytic enzyme production by *Aspergillus niger*: effects of pretreatment. *3 Biotech*, 5, 1101-1106.
- Salomão, G. S. B., Agnezi, J. C., Paulino, L. B., Hencker, L. B., de Lira, T. S., Tardioli, P. W., & Pinotti, L. M. (2018). Production of cellulases by solid state fermentation using natural and pretreated sugarcane bagasse with different fungi. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 1-6.
- Sanderson, K. (2011). Lignocellulose: A chewy problem. *Nature*, 474(7352 SUPPL.). <https://doi.org/10.1038/474S012a>
- Savastano Jr, H., Santos, S. F. D., & Agopyan, V. (2009). Sustainability of vegetable fibres in construction. In *Sustainability of construction materials* (pp. 55-81). Woodhead Publishing.
- Schomburg, D., & Salzmann, M. (1991). Enzyme handbook. In *Enzyme Handbook* (pp. 1-1175): Springer.

- Sharada, R., Venkateswarlu, G., Venkateswar, S., & Anandrao, M. (2014). Applications of Cellulases – Review. *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 4(2).
- Singhania, R. R., Sukumaran, R. K., Patel, A. K., Larroche, C., & Pandey, A. (2010). Advancement and comparative profiles in the production technologies using solid-state and submerged fermentation for microbial cellulases. *Enzyme and Microbial Technology*, 46(7), 541-549.
- Smant G, Stokkermans JPWG, Yan Y, De Boer JM, Baum TJ, Wang X, Hussey RS, Gommers FJ, Henrissat B, Davis EL, Helder J, Schots A et Bakker J. (1998). Endogenous celluloses in animals: isolation of  $\beta$ -1,4 endoglucanase genes from two species of plant-parasitic cyst nematodes. *Biochemistry*. 95 (9), 4906-4911.
- Stevenson, L. E. O., Phillips, F., O'sullivan, K., & Walton, J. (2012). Wheat bran: its composition and benefits to health, a European perspective. *International journal of food sciences and nutrition*, 63(8), 1001-1013.
- Subagyo, A., & Chafidz, A. (2018). Banana pseudo-stem fiber: Preparation, characteristics, and applications. *Banana nutrition-function and processing kinetics*, 1-19.
- Sukumaran, R. K., Singhania, R. R., & Pandey, A. (2005). Microbial cellulases - Production, applications and challenges. In *Journal of Scientific and Industrial Research* (Vol. 64, Issue 11).
- Sun, S., Sun, S., Cao, X., & Sun, R. (2015). The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. In *Bioresource Technology* (Vol. 199). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061>
- Sundarraaj, A. A., & Ranganathan, T. V. (2018). Extraction and functional properties of cellulose from jackfruit (*Artocarpus integer*) Waste. *Int J Pharm Sci Res* 2018c, 6(2320), 414-424.
- Swami, S. B., & Kalse, S. B. (2019). Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) : Biodiversity, Nutritional Contents, and Health. In *Bioactive Molecules in Food* (pp. 2237-2259). Springer, Cham.
- Sweeney, M. D., & Xu, F. (2012). Biomass converting enzymes as industrial biocatalysts for fuels and chemicals: recent developments. *Catalysts*, 2(2), 244-263.



- Tchunden, J. (1990). *Cellulolyse Anaérobie Mésophile: étude de l'amélioration de la production de cellulases par Cl. cellulolyticum ATCC 35319* (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- Thiebaud-Roux, S. (1995). *Valorisation chimique de composés lignocellulosiques: obtention de nouveaux matériaux* (Doctoral dissertation).

-U-

- Uchida, O. H., & dos Santos, E. S. (2020). Production of cellulases by *Aspergillus niger* IOC 3998 by means of solid-state fermentation (SSF) using as substrate the chestnut seed (*Terminalia catappa* Linn.). *J. Waste Resour. Reprocess.*, 1(1), 1-10.

-V-

- Vaishnav, Neha & Singh, Anusuiya & Adsul, Mukund & Dixit, Pooja & Sandhu, Simranjeet & Mathur, Anshu & Puri, Suresh & Singhanian, Reeta. (2018). *Penicillium : The next emerging champion for cellulase production*. *Bioresource Technology Reports*. 2.10.1016/j.biteb.2018.04.003.
- Valette, N. (2017). *Caractérisation fonctionnelle de petites protéines sécrétées chez les champignons lignolytiques* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

-W-

- Wonoputri, V., Subiantoro, S., Kresnowati, M. T. A. P., & Purwadi, R. (2018). Solid state fermentation parameters effect on cellulase production from empty fruit bunch. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 13(3), 553-559.
- Wu, S. H., Nilsson, H. R., Chen, C. T., Yu, S. Y., & Hallenberg, N. (2010). The white-rotting genus *Phanerochaete* is polyphyletic and distributed throughout the phleboid clade of the Polyporales (Basidiomycota). *Fungal Diversity*, 42, 107-118.

-X-

- Xu, B., Hellman, U., Ersson, B., & Janson, J. C. (2000). Purification, characterization and amino-acid sequence analysis of a thermostable, low molecular mass endo- $\beta$ -1,4-glucanase from blue mussel, *Mytilus edulis*. *European Journal of Biochemistry*, 267(16). <https://doi.org/10.1046/j.1432-1327.2000.01533.x>

-Z-

- Zhang, X.-Z., & Zhang, Y.-H. P. (2013). Cellulases: Characteristics, Sources, Production, and Applications. In *Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Polymers*. <https://doi.org/10.1002/9781118642047.ch8>
- Zingore, S., Wairegi, L., & Ndiaye, M. K. (2014). Guide pour la gestion des systèmes de culture de riz. *Consortium Africain pour la Santé des Sols, Nairobi*.
- Zoghalmi, A., & Paës, G. (2019). Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 7). <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00874>
- Zych, D. (2008). The viability of corn cobs as a bioenergy feedstock. *A report of the West Central Research and Outreach Center, University of Minnesota, 1*, 1-25.

## Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Sciences Biologiques.

Spécialité : Mycologie et Biotechnologie Fongique.

### Titre

**Des études bibliographiques sur la production des cellulases d'*Aspergillus niger* par l'utilisation des sous produits agroalimentaires**

### Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est la synthèse bibliographique des études portant sur l'effet de différents déchets agroalimentaires sur la production des cellulases en milieu solide par la souche fongique *Aspergillus niger*. Divers sous-produits agroalimentaires sont étudiés dans ce mémoire, les déchets de thé vert, les pseudo-troncs de bananier, les déchets de jacquier, le son de blé, la bagasse de canne à sucre, la paille de blé, la paille de riz, les balles de riz, les tiges de canne à sucre, l'herbe de carottes et les rafles de maïs (Kumar et al., 2018 ; Saldaña et al., 2022 ; Dinil et Jacob, 2022). Les activités cellulases sont dosées à l'aide de carboxyméthylcellulose (CMC) et (DNS) pour l'endoglucanase, le papier filtre pour l'activité papier filtre, et le p-nitrophényl  $\beta$ -D glucopyranoside pour le dosage de  $\beta$ -Glucosidase. Un maximum de production est observé, pour les activités endoglucanase ( $65.85 \pm 2.18$  UI/g), APF ( $4.50$  UPF/g) et  $\beta$ -Glucosidase ( $1016.52 \pm 3.58$  UI/g) lorsque la souche *A. niger* 28A est cultivée sur les déchets de thé vert comme substrat (Saldaña et al., 2022). De plus, les trois activités étudiées (endoglucanase  $26.33 \pm 2.38$  UI/g, APF  $2.11 \pm 0.14$  UPF/g et  $\beta$ -Glucosidase  $34.3 \pm 1.28$  UI/g) sont maximales lorsque *A. niger* NFCCI 4113 a utilisé le son de blé comme substrat de fermentation ; suivi par l'herbe de carottes ( $25.6 \pm 2.11$  UI/g,  $1.94 \pm 0.13$  UPF/g,  $32.57 \pm 0.71$  UI/g) et la paille de riz ( $16.6 \pm 1.93$  UI/g,  $1.74 \pm 0.12$  UPF/g,  $28.33 \pm 0.86$  UI/g) (Kumar et al., 2018). Alors que la souche *A. niger* NFCCI 4113 a présenté les trois plus faibles activités d'endoglucanase ( $12.63 \pm 1.42$  UI/g), d'APF ( $1.43 \pm 0.08$  UPF/g) et de  $\beta$ -Glucosidase ( $27.47 \pm 0.91$  UI/g) sur les balles de riz comme substrat de fermentation solide. D'autres déchets ont aussi donné deux mauvaises activités sur trois comme les rafles de maïs (endoglucanase  $11.1 \pm 1.47$  UI/g, APF  $1.25 \pm 0.12$  UPF/g), la Bagasse de canne à sucre (endoglucanase  $12.47 \pm 0.85$  UI/g et  $\beta$ -Glucosidase  $25.5 \pm 0.82$  UI/g) et les tiges de canne à sucre (APF  $1.24 \pm 0.13$  UPF/g et  $\beta$ -Glucosidase  $24.6 \pm 0.8$  UI/g) (Kumar et al., 2018). De plus *A. niger* cultivée sur les pseudo-troncs de bananier et les déchets de jacquier a montré de mauvaises activités d'endoglucanase ( $4.1$  UI/g pour chacune) (Dinil et Jacob, 2022). En vis de cette étude, les sous-produits agroalimentaires peuvent être valorisés pour la production des cellulases à l'échelle industrielle.

**Mots clés** : Cellulase, *Aspergillus niger*, fermentation en milieu solide, déchets lignocellulosiques.

### Membre du jury :

**Présidente** : LABBANI Fatima-Zohra Kenza (MCA – ENS Assia DJEBAR, Constantine)

**Encadreur** : BOUCHERIT Zeyneb (MAA- Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Examinatrice** : LEGHLIMI Hind (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Présentée par :**

**BOULESNANE Abir.**

**BOUZEKIOU Somia.**

Année universitaire  
2022-2023

