

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biochimie et Microbiologie



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention de diplôme de Master

Filière : Science alimentaire

Spécialité : Biochimie de la nutrition

Thème

Recherche bibliographique sur les données
récentes d'utilisation des enzymes en agro-
alimentaire

Travail réalisé par :

M^{lle} KANA Djouher

M^{lle} LOUNICI Ghania

Soutenu le 02 octobre 2023

Devant le jury :

Présidente : M^{me} ZENNIA S. MCA Université Mouloud Mammeri

Examinatrice : M^{me} SENANI N. MCA Université Mouloud Mammeri

Promoteur : Mr BARIZ K. MCA Université Mouloud Mammeri

Année universitaire 2022/2023




Remerciements

Nous tenons tout d'abord et avant tout à remercier "ALLAH" de tout puissant qui nous a données durant toutes ces années le courage, la volonté, la patience et la foi en nous pour arriver à ce jour.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur monsieur **BARIZ.K** pour avoir encadré notre mémoire.

Nos remerciements les plus sincères aux membres du jury qui nous ont fait honneur de juger mon travail plus précisément pour *Mme ZENNIA.S* présidente du Jury et pour *Mme SENANI.N*, examinatrice.



Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents ma mère et mon père pour leur amour, leur encouragement et leur soutien tout au long de mes études, que Allah les bénisse.

A mon frère *Younes* ainsi que sa merveilleuse femme *Marwa*

A mon frère *M'henni*

A mes chères sœurs *Meriem* et *Safia*.

A ma famille, mes proches qui m'ont toujours encouragé

A mes amis, qui m'ont accompagné tout au long de ces années et à tous ceux que j'aime

À ma binôme *Ghania* et tous ceux qui me sont chers.

Djouher



Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à mes chers parents qui est sacrifié leur vie pour notre réussite, j'espère qu'un jour je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi, que dieu leur prête bonheur et longue vie.

À ma très belle chers sœur « *Djamila* », qui m'a beaucoup encouragée à aller de l'avant, je te dis aujourd'hui grand merci sœurette.

À mes très chers frères « *Ghiles et Youcef* »

À tous les membres de ma famille

À mes très chers amis

je dédie ce travail à tous ceux qui participé à ma réussite

Enfin, je remercie mon binôme qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

Ghania

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale..... 01

Chapitre I Généralités sur les enzymes

1. Historique des enzymes..... 03

2. Définition..... 03

3. Origine des enzymes..... 03

4. Nomenclature et classification des enzymes..... 04

5. Propriétés des enzymes 05

6. Spécificité de l'activité enzymatique..... 06

7. Marché mondial des enzymes..... 07

8. Importance des enzymes 08

9. Immobilisation des enzymes 08

10. Contrôle de l'activité enzymatique dans les aliment 09

11. Amélioration des enzymes 10

12. Les enzymes exogènes et endogènes 10

Chapitre II Application des enzymes dans l'industrie agro-alimentaire

1. Les protéases 13

 1.1. Définition..... 13

 1.2. Classification des protéases 13

 1.3. Origine des protéases 15

 1.4. Mode d'action 17

 1.5. Production de protéase 18

 1.6. Application des protéases dans l'industrie agro-alimentaire 19

 1.6.1. Dans l'industrie laitière 19

 1.6.2. Dans la boulangerie 19

 1.6.3. Dans l'industrie de la bière..... 19

 1.6.4. Dans la fabrication de produits d soja..... 20

 1.6.5. Dans la synthèse de l'aspartame 20

 1.6.6. Caractéristiques et application d'une nouvelle protéase EK4-1 adaptée au froid et tolérante au sel produite par une bactérie arctique *Mesonia algues* K4-1 20

2. Les pectinases.....	22
2.1. Définition.....	22
2.2. Origine des pectinases	22
2.3. Structure des pectinases.....	23
2.4. Classification des pectinases	23
2.5. Mode d'action	24
2.6. Application des pectinases en l'industrie agro-alimentaire	24
2.6.1. Dans la transformation des fruits et légumes	24
2.6.2. Dans la vinification.....	25
2.6.3. Dans la fermentation du café et du thé.....	25
2.6.4. Dans l'extraction d'huile	26
3. Les cellulases	26
3.1. Définition.....	26
3.2. Origine des cellulases	27
3.3. Structure des cellulases	28
3.4. Classification des cellulases	29
3.5. Caractéristique des enzymes cellulolytiques.....	30
3.6. Mode d'action	31
3.7. Production de cellulase	32
3.8. Application des cellulases en l'industrie agro-alimentaire	33
3.8.1. Dans l'industrie du vin.....	33
3.8.2. Dans l'extraction d'huile d'olive	34
3.8.3. Dans l'extraction de caroténoïdes	34
3.8.4. Dans l'industrie des jus de fruits	34
4. Alpha-amylase	35
4.1. Définition.....	35
4.2. Origine des α -amylases	35
4.3. Classification des α -amylases	37
4.4. Caractéristiques et structure	38
4.5. Mode d'action	39
4.6. Production de α -amylases	39
4.7. Application des alpha-amylases dans l'industrie agro-alimentaire.....	41

4.7.1. Dans la panification.....	41
4.7.2. Dans la liquéfaction de l'amidon et saccharification	42
4.7.3. Dans la valorisation des déchets agro-alimentaire	42
5. Les lipases.....	43
5.1. Définition.....	43
5.2. Origine des lipases	43
5.3. Structure des lipases.....	44
5.4. Caractéristique des lipases	45
5.5. Mode d'action	45
5.6. Production des lipases	45
5.7. Amélioration de la production de la lipase	46
5.8. Application des lipases dans l'industrie agro-alimentaire.....	46
5.8.1. Dans l'industrie laitière	47
5.8.2. Dans l'industrie des graisses et des huiles	49
5.8.3. Dans la transformation du thé	49
5.8.4. Dans l'industrie de la viande et du poisson.....	50
5.8.5. Lipase utilisée comme biocapteur dans l'industrie alimentaire.....	51
5.8.6. Dans la transformation des œufs.....	52
6. Les Xylanases.....	52
6.1. Définition.....	52
6.2. Origine des Xylanases	53
6.3. Structure des Xylanases.....	53
6.4. Classification des Xylanases	53
6.5. Caractéristiques des Xylanases	55
6.6. Production des Xylanases	55
6.7. Stabilité de la Xylanases	56
6.8. Application des Xylanases dans l'industrie agro-alimentaire.....	57
6.8.1. Dans la boulangerie	57
6.8.2. Dans la Clarification des jus de fruits	58
7. Glucose-oxydase	58
7.1. Définition.....	58

7.2. Origine de glucose-oxydase	58
7.3. Structure de glucose-oxydase	59
7.4. Caractéristiques et production de la glucose oxydase.....	60
I7.5. Mode d'action.....	60
II.7.6. Application de la glucose oxydase dans l'industrie agro-alimentaire	62
Conclusion générale	66
Références bibliographiques	
Résumé	

Liste des figures

Figure 01 : Schéma du mécanisme d'action d'une enzyme	07
Figure 02 : Diagramme représentant la répartition d'enzymes selon la source	08
Figure 03 : Enzyme protéolytique	13
Figure 04 : Structure tridimensionnelle d'une enzyme de pectinase	23
Figure 05 : Mode de dégradation de la pectine par différentes pectinases. (A) Polygalacturonase (B) pectine estérase (C) pectine lyase	24
Figure 06 : (A) : Illustration représentant les différents domaines dans la structure 3D des cellulases	39
Figure 07 : Hydrolyse de la cellulose par les trois types de cellulases : l'endoglucanase, la Cellobiohydrolase et la β -glucosidase	32
Figure 08 : Structure tridimensionnelle d'une enzyme alpha-amylase	39
Figure 09 : Structure de lipase microbienne	44
Figure 10 : Structure tridimensionnelle d'une enzyme de xylanase	53
Figure 11 : La structure de la glucose oxydase du penicillium amagasakiense	59
Figure 12 : Représentation du mécanisme d'action de la glucose oxydase dans l'oxydation du glucose en d -glucono- δ -lactone	62

Liste des tableaux

Tableau I : Sources des principales enzymes	04
Tableau II : principales classes d'enzymes dans le système CE	05
Tableau III : Stabilité au pH de certaines enzymes	10
Tableau IV : Quelques espèces de levures productrices de la protéase.....	18
Tableau V : Certaines bactéries cellulolytiques et leurs sources	29
Tableau VI : Caractéristiques des enzymes cellulolytiques	32
Tableau VII : Sources animales de la production de l' α -amylase.....	37
Tableau VIII : Sources de l' α -amylase chez les plantes	38
Tableau IX : Production de xylanase par des souches bactériennes.....	57

Liste des abréviations

ADAMs: A Disintegrin and métalloprotéines.

AGPI : Acides Gras Polyinsaturés.

ALC : Acide Linoléique Conjugué.

AW : Activité d'eau.

CAGR : Taux de Croissance Annuel Composé.

EC : Enzyme Commission.

FML : Fermentation Submergée (Liquide).

FMS(SSF) : Fermentation à l'état solide.

Ox-Red : Oxydation-Réduction.

PH : Potentiel d'Hydrogène.

PI : Point Isoélectrique.

UIBMB : l'Union Internationale de Biochimie et de Biologie Moléculaire.

VIH-1 : Virus de l'Immunodéficience Humaine.

Introduction générale

Les enzymes sont définies comme des molécules organiques d'origine protéique, conçu pour catalyser des réactions biochimiques. Ils sont essentiellement constitués de deux parties : la partie protéines est appelée apoenzyme et la partie non protéique est appelée cofacteur (peut-être un ion métallique) ou coenzyme (molécule organique). Le procédé de catalyse résulte la spécificité des enzymes qui considérée comme principale caractéristique (MOTTA et *al.*,2023).

Les enzymes jouent un rôle important dans l'industrie alimentaire, tant dans les produits traditionnels que dans les nouveaux produits (Binod et *al.*, 2019). Elles peuvent améliorer ou modifier les aliments et des composantes alimentaires. Leur utilisation dans les aliments traditionnels est un processus ancien. Cependant, à mesure que la biotechnologie s'est développée au fil des années, elles jouent un rôle important dans la transformation et la production des aliments, permettant des avantages dans de nombreux processus industriels, notamment la modification de la composition, du goût et de l'odeur des aliments (Collados et *al.*, 2020). L'industries alimentaire utilise principalement trois sources : les micro-organismes, de plantes ou de tissus animaux (Ray et *al.*, 2016 ; Ahmad et *al.*, 2018), les enzymes sont utilisées dans les produits laitiers, la boulangerie, et des boissons telles que des jus de fruits, du vin et de la bière (Guerrand,2018 ; Taheri-Kavrani et *al.*, 2021).

L'intérêt de l'industrie agroalimentaire pour les enzymes vient de la recherche constante d'aliments à longue durée de conservation, en plus à la recherche de réduction des déchets et à améliorer la qualité des produits, transformer les matières premières en produit principal ou agir comme additifs pour modifier les propriétés souhaitées telles que la saveur, la texture etc... (Singh et *al.* 2016 Sanromán et Dave, 2017 ; Yushkova et *al.*, 2019 ; Bilal et Iqbal, 2020).

Ainsi, des recherches ont été menées pour explorer les enzymes qui contribuent à la qualité et à la stabilité des aliments. De plus, plusieurs études ont exploré l'inactivation des enzymes qui peuvent accélérer des processus indésirables tels que la dégradation des aliments. Ces derniers peuvent être affectées par des facteurs tels que le pH, l'activité de l'eau et la température (MOTTA et *al.*,2023).

Objectif de travail

Dans ce travail, nous allons parler sur les enzymes et leur application en industrie agro-alimentaire.

Chapitre I

Généralités sur les enzymes

I. Généralités sur les enzymes

1. Historique des enzymes

Les enzymes font partie de la vie quotidienne de nombreuses civilisations. Le terme "enzyme" a été utilisé pour la première fois par le physiologiste allemand Wilhelm Kühne en 1878 pour décrire la capacité de la levure à produire de l'alcool à partir de sucre. Bien que la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle aient vu de grands progrès dans l'extraction, la caractérisation et l'utilisation commerciales de nombreuses enzymes, (Robinson, 2015).

2. Définition des enzymes

Les enzymes également appelées biocatalyseurs, sont une classe de Protéines à haute spécificité et d'efficacité catalytique dans les cellules vivantes (Tan et *al.*, 2019).

Après des millions d'années d'évolution, ces macro- molécules sont capables de réaliser des tâches biochimiques très spécifiques. Certaines enzymes sont conçues par la nature pour fabriquer des composés chimiques, tandis que d'autres ont un rôle dans la modification ou la décomposition de ces composés (Charnock et McCleary, 2005).

Elles sont très spécifiques à la fois dans leurs réactions catalytiques et dans leur sélection de réactifs appelés substrats, ces molécules présentes toutes les propriétés d'une protéine, ses dénaturants peuvent entraîner une perte totale de l'activité catalytique (Bhatia, 2018).

3. Origine des enzymes

Les enzymes sont présentes dans tous les organismes vivants, y compris les bactéries, les champignons, les animaux, les plantes et les humains. (Nigam, 2013).

Les premières enzymes microbiennes ont été découvertes au XXe siècle, et depuis lors, des techniques pour leur isolement, leur caractérisation, leur production dans différents types de bioréacteurs et leur application dans la bioindustrie ont toutes été développées. Les caractéristiques spécifiques de ces enzymes représentent leur activité dans des conditions de culture défavorables, notamment celles liées à la température et au pH (Nigam, 2013).

Tableau I : Sources des principales enzymes (Subin, 2016).

Enzymes	Sources	Applications
Amylases Pectinases Protéases "papaïne, bromélaïne"	Végétales	Céréales, pomme de terre, kiwi, papaye, pomme, ananas La fabrication du pain, le brassage de la bière et la production de jus de fruits. L'attendrissement de la viande et l'hydrolyse des protéines animales, laitières et végétales.
Protéases "chymosine, trypsine, pepsine, lysozyme" Lipases	Animales	Caillettes de veau Pancréas bovin et porcine Caillette bovine Blanc d'œuf de poule L'œsophage de chèvre et d'agneau, de caillettes de veau et de pancréas de porc Rehausser le goût dans l'industrie fromagère. Empêcher la détérioration des aliments
Cellulases Pectinases Pullulanases	Microorganismes : champignons bactéries, levures	<i>Aspergillus niger</i> <i>Penicillium fréquentans</i> <i>Bacillus acidopollulyticus</i> Fermentation des produits laitiers. Fermentation des vins. La transformation du sucre en alcool qui se produit dans le vin.

4.Nomenclature et classification des enzymes

La classification des enzymes suit la nomenclature CE (Enzyme Commission). Les enzymes sont classées selon la réaction catalytique, ont été divisées en six catégories : Oxydoréductases, transférases, hydrolases, lyases, isomérase et ligase. En Août 2018, une septième classe d'enzymes comprenant des translocases a été inclus dans le classement général du CE. Les enzymes jouent un rôle essentiel dans plusieurs processus, notamment le métabolisme, l'expression des gènes, la division cellulaire et les réactions importantes du système immunitaire. Ils sont employés par l'industrie des biotechnologies et la médecine diagnostique (Vandenberghé et *al.*,2020).

La classification des séquences d'enzymes et structures a été soutenue par des modèles évolutifs et biophysiques, ce qui a permis la connaissance de séquence et similitude structurelle. Le numéro d'EC, est composé de quatre (4) chiffres :

- Premier nombre indique la classe de l'enzyme ;
- Deuxième nombre donne la sous-classe ;
- Troisième numéro indique la sous-sous-classe ;
- Quatrième numéro est le numéro de série de l'enzyme dans sa sous-sous-classe ;

Tableau II : principales classes d'enzymes dans le système CE (Singh et *al.*,2016 ; Vandenberghe et *al.* ;2020).

Classe	Exemple d'enzyme	Type de réactions
Oxydoréductases	Oxydases, oxygénases, Peroxydases	Oxydation /réduction
Transférases	Transaminases, méthyltransférases	Transfert des groupes d'atomes d'une molécule à une autre
Hydrolases	Protéases, amylases, lipases, phosphatases	Clivage hydrolytique des liaisons
Lyases	Hydratases, déshydratases, décarboxylases	Clivage non hydrolytique par réaction d'élimination ou d'addition
Isomérases	Epimérases, racémases	Transfert de groupe d'une position à une autre dans une molécule
Ligases	Synthétases, ligases, Carboxylase	Jonction de deux molécules
Translocases	Transporteur de type ABC	Translocation d'ions ou de molécules à travers les membranes cellulaires

5. Propriétés des enzymes

Les enzymes sont des catalyseurs aux propriétés exceptionnelles (haute activité, sélectivité et spécificité) qui permettent de réaliser les processus chimiques les plus complexes dans les conditions expérimentales et environnementales les plus favorables. (Simpson et *al.*, 2012).

A ce jour, les propriétés des enzymes présentes sur le marché ont limité leur utilisation dans certains procédés industriels. En fait, les enzymes ne sont actives que dans une très petite

plage de température ou de pH. Elles sont inactivées par une température élevée, la présence de solvants ou des concentrations de sel inappropriées. De plus, les réactions chimiques industrielles impliquent souvent des substrats distincts des substrats naturels qui sont transformés par des enzymes dans les cellules vivantes. L'enjeu aujourd'hui est donc de découvrir des enzymes répondant très précisément aux contraintes technico-économiques des procédés biocatalytiques industriels modernes : enzymes plus stables (résistance aux solvants, au température), plus actives (gain de temps, rendement), plus sélectives (chiralité, pureté et élimination des sous-produits), où catalysant des réactions que les enzymes actuelles ne peuvent pas réaliser (Lefèvre et *al.*, 2002).

I.6. Spécificité de l'activité enzymatique

La réaction enzymatique se déroule schématiquement en deux étapes : La première étape permet l'immobilisation du substrats (S, la molécule à convertir) sur l'enzyme, et la deuxième étape catalyse la conversion du substrat en composé P (le produit de la réaction) (Cano et *al.*, 2007).

Le groupe d'acides aminés impliqués dans la liaison au substrat et la catalyse est appelé le « site actif de l'enzyme » est n'occupe qu'environ 5% de la surface de l'enzyme. Étant donné que de nombreuses réactions sont réversibles, les produits de réaction peuvent être des substrats pour d'autres sens de réaction (Cano et *al.*, 2007).

Deux principaux types de spécificité sont distingués : la spécificité de réaction et la spécificité de substrat.

- **La spécificité de substrat :** correspond au fait qu'une enzyme fixe et convertit certains substrats plutôt que d'autres.
- **La spécificité de réaction :** correspond au fait que les enzymes catalysent certaines réactions chimiques et pas d'autres.

Ainsi, les enzymes peuvent ouvrir des voies métaboliques en dirigeant le métabolisme des substrats le long des cascades de réaction, compromettant d'autres réactions métaboliques pour les mêmes substrats. Notez que la spécificité de la réaction n'est pas aussi étroite que la spécificité du substrat (Cano et *al.*, 2007).

Cette double action de fixation du substrat est de catalyse a permis l'introduction du concept de spécificité enzymatique, qui a conduit à la classification actuelle des enzymes (Cano et *al.*, 2007).

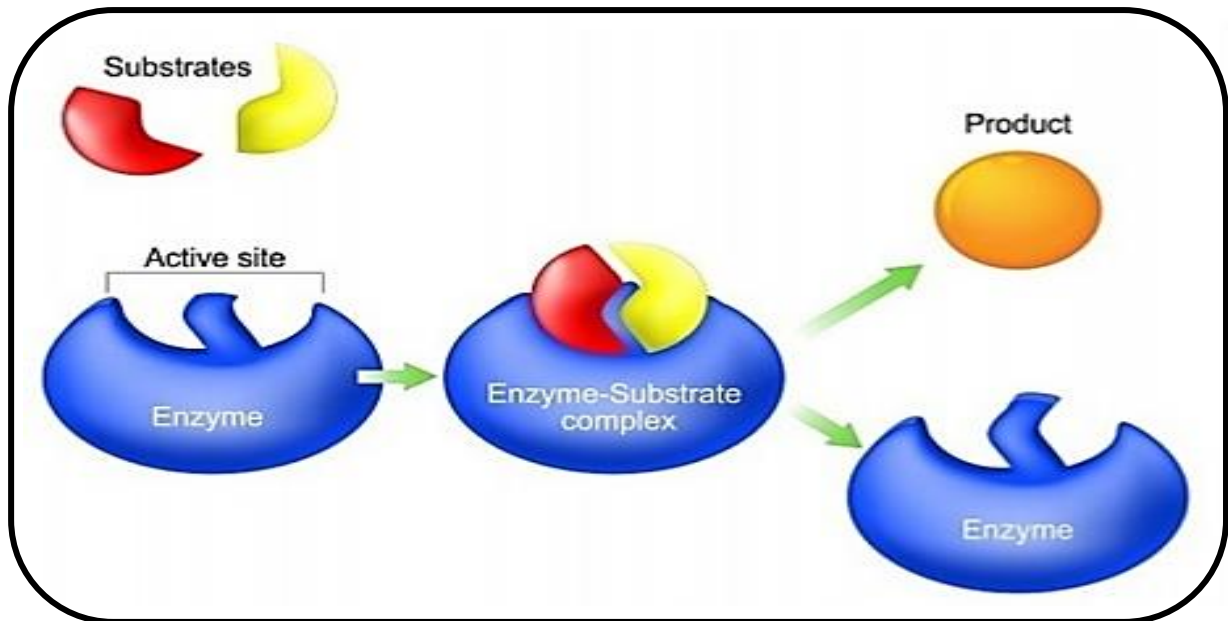


Figure 01 : Schéma du mécanisme d'action d'une enzyme (Smith et Pharm., 2019).

I.7. Marché mondial des enzymes

Un récent rapport de Research and Markets sur les enzymes industrielles a révélé que le marché mondial des enzymes industrielles était évalué à 10,0 milliards USD en 2019 et devrait atteindre 14,7 milliards de USD d'ici 2025. Le marché des enzymes est divisé en segments (micro-organismes, plantes et animaux). Il a été estimé que le segment des microorganismes représenterait la plus grande part du marché des enzymes car ils sont la principale source en raison des propriétés biochimiques (nature active et stable et leur capacité à dégrader divers substrats complexes comme sources d'énergie plus utiles) (Market Analysis Report, 2020).

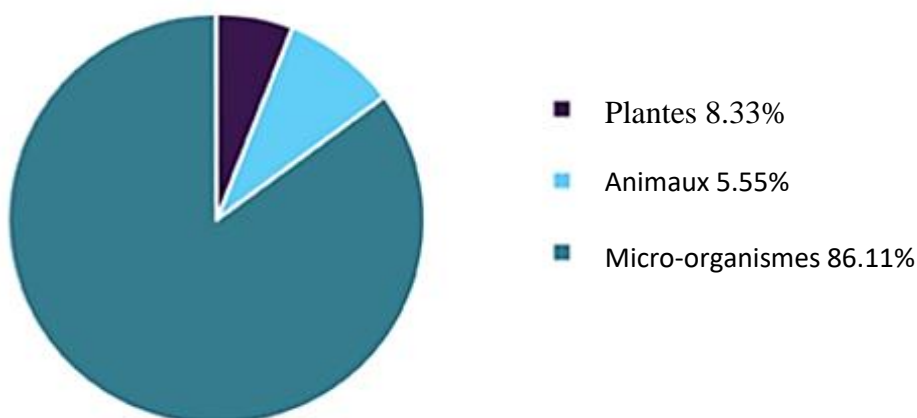


Figure 02 : Diagramme représentant la répartition d'enzymes selon la source (Market Analysis Report, 2020).

8.Importance des enzymes

Les enzymes sont des molécules très importantes pour des écosystèmes et des organismes entiers sur tous les êtres sensibles. Aucune opération cellulaire ne peut se faire sans eux ; ils sont utilisés dans de nombreuses industries, notamment la boulangerie (amylase de *Penicillium xpansum*), fabrication de fromage (lipase de *Penicillium camemberti*) (El-Gendi et al.2022), ils sont également très utiles pour la santé humaine (enzymes digestives comme l'amylase et les protéases de *Penicillium*. (Glover-Bondeau, 2020), et préparer la nourriture pour animal (cellulase *Penicillium simplissium*) (Mukesh et al., 2018). Pour les plantes, ils pour la transformation des fruits et légumes (par exemple *Aspergillus sp*) (Simon et al., 2005).

9.Immobilisation des enzymes

C'est le processus technologique d'immobilisation d'une enzyme sur ou dans un support solide pour produire un système enzymatique immobilisé hétérogène. Les formes immobilisées des enzymes imitent les schémas naturels des cellules vivantes, la plupart des enzymes étant liées aux structures cellulaires du cytosquelette, des membranes et des organites (Homaei et al., 2013).

- **Supports d'immobilisation**

La biocatalyse d'enzymes immobilisées fait l'objet de recherches depuis des décennies car elle répond aux exigences du développement durable. Cette approche fournit également une base théorique pour diverses applications d'enzymes immobilisées (Liu et al., 2020). Par conséquent, le criblage d'inhibiteurs d'enzymes constitue une direction de développement prometteuse dans les applications récentes des enzymes immobilisées. Dans ce processus, le soutien à l'immobilisation des enzymes joue un rôle clé. Les supports les plus couramment utilisés sont donc les nanofibres et les polymères (Liu et al., 2020).

Le principal motif de l'immobilisation des enzymes a toujours été d'augmenter leurs performances. Ceci peut être réalisé en augmentant l'activité, la stéréosélectivité ou la stabilité, l'enzyme sous une forme physique appropriée permettant de la récupérer en fin de biotransformation et de la réutiliser. Cela conduit à une réduction du coût du produit final en réduisant la contribution au coût du biocatalyseur (Federsel et al., 2011).

Une enzyme immobilisée permet une fermentation moindre ou une séparation plus facile du produit ou une qualité de produit supérieure avec moins d'étapes de traitement. Récemment, l'immobilisation enzymatique a été examinée par plusieurs auteurs et constitue un bon point de départ pour évaluer les développements récents (Federsel et *al.*, 2011).

De manière générale, deux thèmes principaux peuvent être identifiés. La première consiste à développer de nouveaux supports, et cela peut inclure des supports solides qui n'ont pas été utilisés pour l'immobilisation des enzymes ou des supports existants qui ont été appliqués d'une autre manière, le deuxième sujet concerne l'intégration de l'immobilisation d'enzymes avec des technologies biocatalytiques avancées en développement rapide (Federsel et *al.*, 2011). Cela inclut l'ingénierie des protéines, la biocatalyse en flux et les réactions en plusieurs étapes dans lesquelles les processus de biotransformation séquentiels imitent la biosynthèse (Federsel et *al.*, 2011).

10. Contrôle de l'activité enzymatique dans les aliments

L'effet des enzymes dans les aliments n'est pas toujours souhaitable. Par exemple, la poursuite de l'activité enzymatique dans les aliments après leur utilisation pour obtenir la conversion souhaitée peut compromettre la qualité des aliments (Simpson et *al.*, 2012).

La présence naturelle de certaines enzymes dans les matières agricoles peut provoquer des changements indésirables dans les aliments (par exemple perte de couleur, taches brunes et rancissement) et l'action de certaines enzymes (par exemple histidine décarboxylases) a des effets négatifs sur la qualité des aliments, les histidine décarboxylases peuvent produire des substances toxiques dans les composés alimentaires (amines biogènes) et d'autres enzymes (par exemple la thiaminase et l'acide ascorbique oxydase) peuvent agir pour détruire des composants alimentaires importants (par exemple les vitamines B1 et C). Par conséquent, il est nécessaire de contrôler l'activité enzymatique des aliments pour éviter les éventuels effets indésirables qu'ils provoquent dans ces produits (Simpson et *al.*, 2012).

Plusieurs facteurs sont connus pour influencer la fonction et le comportement des enzymes dans les aliments. Ces facteurs comprennent la température, le pH selon le tableau 06, l'activité de l'eau (A_w) et les produits chimiques (inhibiteurs, agents chélatants et agents réducteurs) et sont utilisés par les technologues et les fabricants alimentaires pour développer ou améliorer les procédures de surveillance de l'activité enzymatique alimentaire (Simpson et *al.*, 2012).

Tableau III : Stabilité au pH de certaines enzymes (Simpson et al., 2012).

Enzyme	pH Stabilité Optimum
Pepsine	1.5
Amylase de malt	4.5-5.0
Lipase gastrique	4.0-5.0
Lipase pancréatique	8.0
Maltase	6.5
Catalase	7.0
Trypsine	8.0
Invertase	4.5

11. Amélioration des enzymes

- L'utilisation d'enzymes dans l'industrie nécessite plusieurs améliorations pour permettre l'obtention d'enzymes spécifiques à haute activité et haute enantiosélectivité pour des substrats complexes afin de réduire les coûts et les délais de production (Sreiner et Schwab, 2012). Cette amélioration se fait à l'aide de deux techniques :
- Une approche combinatoire de la conception rationnelle des biocatalyseurs existants et de la recherche des fonctions souhaitées dans des bibliothèques générées aléatoirement (Adrio et Demain, 2014).
- Une approche hybride appelée « conception semi-rationnelle » a été développée qui combine les deux approches précédentes. D'autres problèmes pouvant survenir incluent de manque de stabilité à long terme, rendant difficile la récupération et la réutilisation de l'enzyme. Ces contraintes peuvent généralement être surmontées en immobilisant l'enzyme sur un support (Porter et al., 2016).

12. Les enzymes exogènes et endogènes

Les enzymes utilisées dans les aliments sont divisées en deux catégories : les enzymes exogènes et les enzymes endogènes (Gomes et al., 2018).

Les enzymes exogènes sont celles qui sont intentionnellement ajoutées à un aliment ou à une matière première pour provoquer un changement souhaité. Dans ce contexte, la compréhension des facteurs affectant l'activité enzymatique est cruciale pour atteindre une

plus grande efficacité et un moindre coût (Damodaran et Parkine, 2017 ; Lajolo et Mercadante, 2017).

Selon Ordonez et *al.* (2005) et Fernandes (2016) ont suggéré qu'il existe plusieurs raisons à l'incorporation d'enzymes exogènes dans les aliments. Le premier fait référence à la possibilité d'analyser des propriétés uniques des aliments, en remplaçant les techniques de purification extrêmement complexes par la possibilité de détecter de très petites quantités de composants, par exemple en utilisant des biocapteurs pour la détection de plusieurs analytes. De plus, grâce à la recherche avancée en nanotechnologie, les biocapteurs à base de nanozyme, peuvent être utilisés pour détecter les contaminants biologiques, tels que les agents pathogènes et les biotoxines, qui peuvent compromettre la qualité et la sécurité alimentaire. L'aflatoxine B1 (AFB1), un métabolite secondaire des espèces d'*Aspergillus*, contamine couramment les cultures céréalières, en particulier le riz, les noix et le maïs, et est responsable de multiples épidémies l'aflatoxicose fœtale dans le monde. (Wang et Gunasekaran, 2020 ; Alvarado-Ramirez et *al.*, 2021).

La deuxième raison est le rôle des enzymes en tant qu'indicateurs. Un exemple très courant dans l'industrie alimentaire est l'utilisation de la catalase pour déterminer la qualité du lait (Kaushal et *al.*, 2018).

La raison finale et la plus importante pour l'utilisation d'enzymes exogènes est que le produit final fonctionnera comme prévu et présentera des caractéristiques suffisantes, car les enzymes agissent pour améliorer les attributs sensoriels et d'autres facteurs tels que la digestibilité, la viscosité et la tendreté. À titre d'exemple très courant dans l'industrie de la viande, l'incorporation d'enzymes exogènes protéolytiques dans les produits carnés dans des conditions contrôlées peut réduire la dureté et améliorer la qualité de la sensation en bouche des produits carnés (Madhusankha et Thilakarathna, 2021).

D'autre part, les enzymes endogènes sont naturellement présentes dans les aliments (cellules/tissus) et peuvent avoir des effets à la fois souhaités et indésirables. Les enzymes de ce type peuvent être utilisées pour modifier les propriétés des produits végétaux post-récolte et modifier le tissu animal, la couleur, l'arôme, la texture et la valeur nutritionnelle d'une gamme de produits alimentaires. Cependant, les enzymes endogènes peuvent entraîner une dégradation nutritionnelle et sensorielle des aliments (Ordonez et *al.*, 2005 ; Okafor et *al.*, 2019).

Chapitre II
Application des enzymes dans l'industrie
agro-alimentaire

II. Application des enzymes dans l'industrie agro-alimentaire

1. Protéases

1.1. Définition

Les enzymes protéolytiques (protéases ou protéinases) appartiennent à la classe des enzymes hydrolytiques. En fait, ces enzymes catalysent la protéolyse à des sites très spécifiques en clivant la liaison peptidique qui relie deux acides aminés dans la chaîne peptidique et sont produites à la fois de manière extracellulaire et intracellulaire (Kumar et *al.*, 2008).

Les enzymes protéolytiques sont présentes dans tous les organismes vivants et contribuent à la croissance et à la différenciation cellulaire. Les micro-organismes se sont révélés être une source efficace et peu coûteuse de protéases, fournissant un approvisionnement continu en produits souhaités. Les protéases sont largement utilisées dans divers domaines industriels (Sharma et *al.*, 2019).

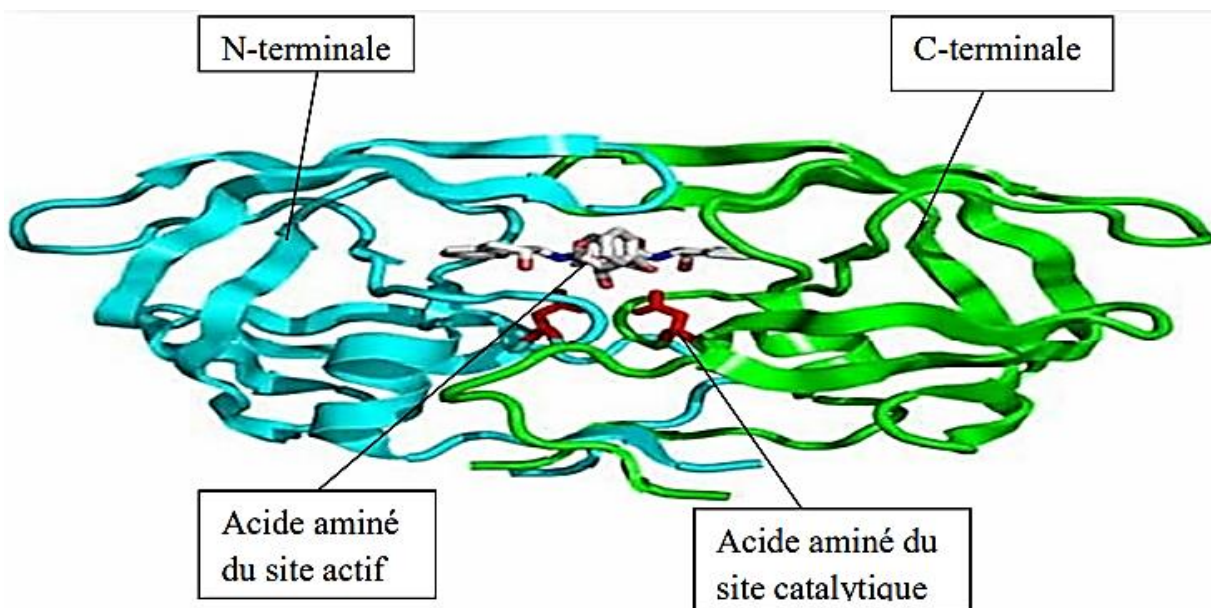


Figure 03 : Enzyme protéolytique (Holliday et *al.*, 2012).

1.2. Classification des protéases

Les protéases sont classées en protéases acides, neutres et alcalines selon la plage de pH à la quelle leur activité est optimale (Kumar et *al.*, 2008).

Ils sont également divisés en deux groupes selon le site d'action :

- **Les exopeptidases** : agissent uniquement sur les liaisons peptidiques présentes aux extrémités des chaînes peptidiques. Ces exopeptidases sont classées en aminopeptidases et carboxypeptidases, respectivement, selon la nature de leurs extrémités N- ou C-terminales (Kumar et *al.*, 2008).
- **Les endopeptidases** : elles sont caractérisées par des actions spécifiques au sein de la chaîne peptidique. La plupart des enzymes utilisées industriellement sont des endopeptidases (Kumar et *al.*, 2008).

Ce clivage correspond à une réaction chimique de type hydrolyse, permettant aux molécules d'eau de rompre les liaisons covalentes (Rogers et Overall, 2013). Cependant, le mécanisme d'action de ces enzymes a conduit à une nouvelle classification selon leurs sites catalytiques, aboutissant à cinq familles distinctes chez les mammifères (Badgajar, 2010 ; Seidah et Prat, 2012) : les métalloprotéases, les protéases à cystéine, les protéases à thréonine, les protéases aspartiques, et finalement les protéases à thréonine et de type serine.

⇒ **Métalloprotéases**

Caractérisé par la présence d'ions métalliques au niveau du site actif, cette famille se divise en deux sous-groupes selon le site catalytique : les MMP (métallo protéases matricielles) composées d'ions zinc sont impliquées dans la dégradation de la matrice extracellulaire et l'inflammation (Khokha et *al.*, 2013) ; les ADAMs (A Disintegrin and métalloprotéines) est impliquée dans les protéines transmembranaires et sécrétées et régule la migration et l'adhésion cellulaire (Edwards et *al.*, 2008).

⇒ **Protéases à cystéine**

Les cathepsines, les caspases et la papaïne jouent principalement un rôle dans l'apoptose et la dégradation lysosomale dans le cytoplasme. Leur activité dépend du pH (Verma et *al.*, 2016).

⇒ **Protéases à thréonine**

Il y a une thréonine au centre de sa triade catalytique. Ce résidu nucléophile est essentiel pour la première étape de la catalyse, car il attaque le substrat pour former un intermédiaire, qui passe ensuite à la deuxième étape de l'hydrolyse (Klein et *al.*, 2018).

⇒ Protéases aspartique

La rénine, les cathepsines D et E constituent la famille de protéases la moins abondante. L'activité de cette famille favorise un environnement acide, mais dans certains cas, comme l'aspartyl protéase du VIH-1 (virus de l'immunodéficience humaine), un environnement neutre est requis (Durand, 2019).

⇒ Protéases à sérine

Elle représente environ 1 % de toutes les protéines. Elle se divise en deux sous-familles principales : les trypsines chymotrypsine et les subtilisés (Seidah et Prat, 2012). Ces deux sous-familles utilisent la même triade catalytique [sérine (Ser), histidine (His) et résidu d'acide aspartique (Asp)], mais diffèrent par la configuration de la structure secondaire du module catalytique (Durand, 2019).

La sous-famille des subtilases tire son nom de son homologie de séquence avec la triade catalytique de la subtilisine bactérienne de *Bacillus subtilis* (Durand, 2019). Plus de 200 subtilases sont actuellement répertoriées et regroupées en six familles (subtilisines, thermitases, protéinase K, pyrolysines, peptidases antibiotiques et kexines) en fonction de leur homologie de séquence. Les proprotéines convertases sont des exemples de protéases à sérine appartenant à la sous-famille des subtilases (Durand, 2019).

1.3. Origine des protéases

La distribution généralisée des protéases dans les plantes, les animaux et les micro-organismes indique que ces enzymes sont essentielles à la survie des organismes, les protéases jouent des rôles physiologiques importants dans différents processus biologiques (Raimi et *al.*, 2010).

Le marché des enzymes industrielles a considérablement augmenté dans les années 1960, lors que la protéase alcaline a été commercialisée pour la première fois pour être utilisée dans les détergents (Dos Santos Aguilar et Sato, 2018).

• Protéases d'origine animale

La plupart des protéases animales sont synthétisées sous forme de précurseurs par le pancréas et peuvent être activées de manière auto catalytique dans des conditions définies (Lakba et Soucha., 2015). Les protéases d'origine animale sont utilisées dans l'industrie alimentaire (par exemple la présure) ou en médecine (par exemple la trypsine et la

chymotrypsine). Ces derniers sont synthétisés sous forme de précurseurs inactifs (Gençkal et Tari, 2004).

- **Protéases d'origine végétale**

Les enzymes protéolytiques végétales sont impliquées dans des processus physiologiques clés tels que la photo inhibition, la photo morphogenèse des graines et la sénescence (Dhillon et *al.*, 2017). La papaïne, la bromélaïne, les cardosines, les cynarases et la ficin représentent certaines des protéases dérivées de plantes (Bhunja et *al.*, 2014).

Les protéases d'origine végétale trouvent des applications dans les industries alimentaires et détergentes (Gaur et *al.*, 2010).

- **Protéases d'origine microbienne**

L'incapacité des protéases végétales et animales à répondre aux demandes de l'industrie a conduit à un intérêt accru pour les protéases microbiennes (Gaur et *al.*, 2010). Ces derniers sont issus de la fermentation de diverses bactéries, levures et champignons, et comme ces peptides sont sécrétés dans un bouillon liquide, ils représentent environ 40 % des ventes mondiales totales d'enzymes (Gimenes et *al.*, 2019).

De plus, les micro-organismes industriels sont attractifs pour plusieurs raisons, notamment des taux de croissance élevés entraînant des temps de fermentation courts, leur capacité à sécréter des protéines dans l'environnement extracellulaire (Dos Santos Aguilar et Sato, 2018).

- **Protéases des bactéries**

Les souches bactériennes les plus importantes pour la production de protéases sont les espèces de *Bacillus* (Ward et *al.*, 2009). Il s'agit essentiellement de subtilisine ou subtilase, une protéase produite par *Bacillus subtilis* et certains genres apparentés (Belmesikh, 2011). Il est très stable et résiste très bien à l'action des détergents. De plus, il est naturellement excrété dans l'environnement, ce qui facilite sa purification (Loudjani et Belmerabet, 2016).

Les bactéries du lait, en particulier *Pseudomonas fluorescens* et *Pseudomonas putida*, produisent des métalloprotéases, utilisées particulièrement pour la coagulation du lait et l'affinage des fromages, et des protéases extracellulaires produites par *Streptococcus lactis* (Loudjani et Belmerabet, 2016).

– Protéases des moisissures

Les enzymes fongiques représentent 40 % du marché mondial des enzymes industrielles. Ces dernières années, des tentatives ont été faites pour produire différents types de protéases par SMF en utilisant plusieurs types de substrats différents. Un grand nombre de souches fongiques ont été utilisées pour produire des protéases appartenant aux genres *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Mucor*, *Humicola*, *Thermoascus*, *Thermomold*, etc. (Lakba et Soucha, 2015).

– Protéases des levures

Différentes levures produisent des enzymes protéolytiques (tableau 04), principalement *Saccharomyces*, *Rhodotorula*, *Candida*, *Debaryomyces*. *Saccharomyces cerevisiae* produit trois types de protéases : les aspartyl protéases, les sérine protéases et les métalloprotéases. L'activité protéolytique de ces genres est particulièrement utile pour l'affinage des fromages (Loudjani et Belmerabet, 2016).

Tableau IV : Quelques espèces de levures productrices de la protéase.

Genre	Espèce	Protéase	Référence
<i>Saccharomyces</i>	<i>Cerevisiae</i>	P. intracellulaires	Léger, (2020)
	<i>Bayanus</i>	P. exocellulaires	Younes, (2012)
<i>Candida</i>	<i>Albicans</i>	P. exocellulaires	Kurtzman, (2011)
	<i>Buinensis</i>	Protéase	De Araújo Viana et al., (2010)
<i>Metschnikowia</i>	<i>Pulcherrima</i>	P. aspartique	Parapouli et al., 2010
<i>Aureobasidium</i>	<i>Pullulans</i>	Protéase	Chi et al., (2007)

1. 4. Mode d'action des protéases

Le mode d'action des protéases varie selon la nature du site actif, bien qu'elles partagent toutes le même principe de base. Le processus catalytique peut être résumé en trois étapes (Boureghid et Brachene, 2016).

- ✓ Dans les deux premières étapes, l'enzyme déforme la liaison peptidique et augmente la polarité du groupe carbonyle, ce qui favorise son attaque nucléophile, conduisant à la formation d'une liaison covalente transitoire entre le fragment carbonyle du substrat et l'enzyme et la libération d'un autre morceau (le premier produit) des protons sont générés à partir de protons donnés par des résidus d'enzymes. (Boureghid et Brachene, 2016).

- ✓ Dans la troisième étape, une nouvelle substitution nucléophile de l' OH^- de la molécule d'eau se produit et libère le deuxième produit de la réaction, dans lequel le site actif de l'enzyme est régénéré par des protons (à partir de H_2O) (Boureghid et Brachene, 2016).

1. 5. Production de protéase

Actuellement, les protéases microbiennes sont produites par fermentation à l'état solide (SMS) et fermentation submergée (SML) (Contesini et *al.*, 2018 ; Razzaq et *al.*, 2019 ; dos Santos Aguilar et Sato 2018).

En général, les protéases sont produites par fermentation submergée (MLF), qui représente près de 90 % de toute la production industrielle d'enzymes (Hölker et *al.*, 2004). Pour atteindre une production maximale d'enzymes, chaque souche microbienne a ses propres exigences nutritionnelles et physico-chimiques. Par conséquent, il n'y a pas de conditions culturelles et environnementales claires (Kasana et *al.*, 2011 ; Contrera Gimenes et *al.*, 2019). Il existe plusieurs micro-organismes producteurs d'enzymes protéolytiques, mais l'attention a été limitée à ceux qui ont des rendements significatifs et des caractéristiques appropriées, de sorte que les conditions optimales pour la croissance microbienne ne se traduisent pas nécessairement par de bons rendements (Kasana et *al.*, 2011).

La physiologie des milieux solides est la principale différence entre le FMS et le FML pour la production d'enzymes, c'est-à-dire que les enzymes du FMS qui ne sont pas sécrétées dans le milieu (enzymes intracellulaires) peuvent être sécrétées dans le FML (enzymes extracellulaires). Ainsi, les différences moléculaires dans l'expression des gènes biosynthétiques ont un impact direct sur la productivité des enzymes, conduisant à la production et à la sécrétion de différentes protéases (Barrios-González, 2012). Afin de trouver les conditions optimales pour la production d'enzymes protéolytiques, de

nombreuses sources de substrats ont été étudiées, de bons rendements sont obtenus lorsque les sources souhaitées d'hydrates de carbone, de protéines et de minéraux nécessaires à la croissance des micro-organismes et à la production de protéases sont présentes (Mukhtar et Haq., 2013). Par exemple, les déchets de tomates peuvent être utilisés comme source de carbone ou d'azote pour la production de protéases par *Aspergillus oryzae* (boukhalfa-lezzar, 2015).

1.6. Application des protéases dans l'industrie agro-alimentaire

Les protéases sont considérées comme l'un des groupes d'enzymes les plus importants dans l'industrie des enzymes et ont diverses applications dans différentes industries (Mamo et Assefa, 2018).

1.6.1. Dans l'industrie laitière

La principale application de la protéase acide est la production de fromage dans l'industrie laitière. Le rôle principal des protéases acides dans la production de fromage est d'hydrolyser des liaisons peptidiques spécifiques pour générer de la para caséine et des macro peptides, permettant ainsi la coagulation du lait (Mamo et Assefa, 2018).

1.6.2. Dans l'industrie de la boulangerie

La farine de blé est le composant principal du processus de boulangerie. Il contient une protéine insoluble appelée "gluten" qui régule les propriétés de la pâte. Des endo- et exoprotéases ont été utilisées pour améliorer le gluten de blé grâce à une protéolyse limitée. De plus, les protéases aspartiques fongiques sont également largement utilisées dans la production d'assaisonnements alimentaires et l'amélioration des aliments riches en protéines tels que le pain et les aliments apparentés (Mamo et Assefa, 2018).

1.6.3. Dans l'industrie de la bière

Lors du brassage de la bière, les protéines et les polyphénols extraits des tissus végétaux interagissent et créent un trouble. La formation de trouble est un problème majeur dans la production de bière car elle affecte la qualité du produit final. Celles-ci incluent l'hydrolyse des protéines indésirables lors des opérations de finition pour obtenir une bière de bonne qualité (Mamo et Assefa, 2018).

1.6.4. Dans la fabrication de produit à base de soja

Les protéases neutres et alcalines sont utilisées de puis long temps dans la préparation de sauce soja et d'autres produits à base de soja. La modification de la protéine de soja par la protéase contribue à améliorer ses propriétés fonctionnelles. Ainsi, le traitement de ces protéines par une protéase alcaline à pH 8 a permis le développement d'hydrolysats de protéines solubles aux propriétés nutritionnelles très intéressantes. Ces hydrolysats sont utilisés comme additifs protéiques dans les jus de fruits et les boissons à base de jus ainsi que dans les formulations d'aliments diététiques (Lakba et Soucha, 2015).

1.6.5. Dans la synthèse de l'aspartame

Bien que les protéases soient des hydrolases, elles peuvent parfois aussi catalyser la réaction inverse. Une préparation de thermolysine de *Bacillus pyrolyticum* a été utilisée pour synthétiser de l'aspartame (un édulcorant faible en calories) à partir de l'acide L-aspartique et de l'ester méthylique de L-phénylalanine dans certaines conditions cinétiquement contrôlées. Il est produit industriellement par Toya Soda (Japon) (Leisola et al., 2001, Belmessikh, 2011, Zemmouri et Zemouri, 2017).

1.6.6. Caractéristiques et application d'une nouvelle protéase EK4-1 adaptée au froid et tolérante au sel produite par une bactérie arctique *Mesonia algues K4-1*

Jusqu'à présent, il existe 273 familles d'enzymes protéolytiques différentes dans la base de données MEROPS. La plupart de ces protéines sont d'origine microbienne (Rawlings et al., 2018). Les protéases microbiennes jouent non seulement un rôle important dans les processus métaboliques cellulaires, mais sont également une source importante de protéases industrielles.

Ils représentent environ les deux tiers de toutes les ventes d'enzymes dans le monde (Kasana et al., 2011) et sont très appréciés dans les industries des détergents, de la transformation des aliments, de la production d'aliments pour animaux, de la synthèse peptidique, de la transformation du cuir et de la biodégradation. Cependant, il existe encore certaines limitations pour l'application industrielle des protéases commerciales, telles qu'une faible activité enzymatique à basse température, faible tolérance au sel, faible résistance aux réactifs chimiques, site de clivage unique, prix élevé, etc. Par conséquent, trouver et développer de nouvelles protéases qui résistent à une ou plusieurs conditions extrêmes reste un défi (Wang et al., 2008).

Les protéases adaptées au froid sont une classe d'enzymes qui peuvent catalyser avec une grande efficacité à basse température (optimum inférieur à 40 °C) et restent généralement actives à 0 °C (Wang et *al.*, 2008). La plupart des protéases adaptées au froid sont produites par des microorganismes adaptés au froid, température de croissance optimale de ces microorganismes est d'environ 15°C, et ils peuvent survivre à 0°C et même à -20°C (Chakrabarty et *al.*, 2019). Ces micro-organismes vivent généralement dans les profondeurs marines et les pôles Arctique et Sud, ainsi que dans les réfrigérateurs, les entrepôts frigorifiques et autres environnements artificiels à basse température (Margesin et *al.*, 2019).

Les protéases extracellulaires produites par des micro-organismes adaptés au froid présentent également des propriétés typiques de tolérance au froid, telles qu'une activité catalytique plus élevée à basse température, une température catalytique optimale plus basse et une thermosensibilité plus élevée, leur permettant de s'adapter aux milieux de vie froids (Marx et *al.*, 2007).

Au cours des trois dernières décennies, une attention croissante a été accordée à l'utilisation de micro-organismes adaptés au froid et de leurs protéases adaptées au froid extracellulaires sécrétées. Hao et *al.* ont découvert qu'une protéase adaptée au froid purifiée à partir de *Pseudomonas aeruginosa* HY1215 présentait une stabilité précieuse contre les tensioactifs et les agents de blanchiment disponibles dans le commerce, qui peut être évaluée comme une enzyme détergente de lavage à froid (Hao et *al.*, 2015). He et *al.* ont montré que la bactérie des profondeurs marines *Pseudoaltermonas sp* SM9913 peut améliorer la saveur de la viande congelée mieux que les protéases mésophiles en fournissant une saveur supplémentaire et en libérant des acides aminés essentiels (Lui et *al.*, 2004).

La protéase adaptée au froid présentait des avantages incomparables par rapport à la protéase mésophile dans les industries alimentaires, cosmétiques, de traitement des déchets, pharmaceutiques et autres, et avait de bonnes perspectives d'application ; il est donc nécessaire d'explorer et de développer de nouvelles protéases adaptées au froid (Huan et *al.*, 2019).

L'algue *Mesonia* K4-1 est une bactérie modérément halophile et psychrophile isolée de l'océan Arctique. Pour s'adapter au milieu marin polaire particulier, l'algue *Mesonia* K4-1 synthétise un grand nombre d'exopolysaccharides et sécrète différentes familles d'exoprotéases adaptées au froid (Huan et *al.*, 2019). Le genre *Mesonia* a été créé par Nedashkovskaya et *al.* L'algue *Mesonia* est utilisée comme espèce modèle, qui appartient au

phylum Bacteroidetes Flavobacteriaceae. En juillet 2022, le genre *Mesonina* se compose actuellement de 10 espèces avec des noms publiés valides (Park et al., 2022). Dans cette étude, la principale protéase extracellulaire EK4-1 sécrétée par l'algue *Mesonina* K4-1 a été isolée et purifiée, et ses caractéristiques d'adaptation au froid et de tolérance au sel ont été analysées en fonction de la composition en acides aminés et des caractéristiques de structure tridimensionnelle.

2. Les pectinases

2.1. Définition

Les pectinases sont un groupe d'enzymes qui hydrolysent les substances pectiques par des réactions de dépolymérisation et de déacétylation (Gomes et al., 2016). Elles sont généralement classées en trois types selon leur mécanisme d'action : Les pectinestérases, les hydrolases et les lyases (Garg et al., 2016). Elles sont produites par de nombreux micro-organismes tels que les bactéries, les levures et certains actinomycètes. La production microbienne de ces enzymes est répandue, principalement dérivée de sources fongiques, principalement des espèces d'*Aspergillus* (Khatri et al., 2015).

La pectinase est l'une des enzymes industrielles les plus importantes. Ils peuvent être utilisés pour l'extraction de jus, le traitement des fibres, la fabrication de papier et de produits pharmaceutiques, l'alimentation humaine et animale et le traitement des eaux usées industrielles (Adedayo et al., 2021 ; Rehman et al., 2021).

2.2. Origine des pectinases

La pectinase joue un rôle très important dans divers processus biologiques à travers l'organisme vivant. La pectinase est largement distribuée dans la nature et produite par divers organismes vivants tels que les plantes, les micro-organismes, les insectes, les nématodes et les protozoaires. Les micro-organismes tels que *Aspergillus niger*, *Bacillus subtilis* et *Bacillus licheniformis* sont considérés comme la principale source de production d'importantes enzymes industrielles (En ligne Ur Rehman, H., 2023).

2.3. Structure des pectinases

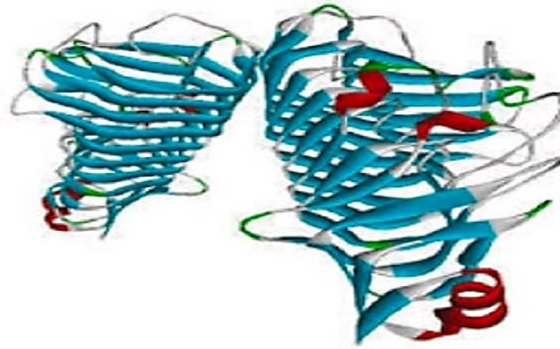


Figure 04 : Structure tridimensionnelle d'une pectinase (Chares et Muthiah., 2021).

2.4. Classification des pectinases

Sur la base du mécanisme de dégradation de la pectine, les pectinases sont classées en polygalacturonases, pectine lyase et pectinestérases. (En ligne, Ur Rehman.,2023).

- **Polygalacturonase**

La polygalacturonase catalyse l'hydrolyse des polymères de pectine en monomères d'acide D-galacturonique en ajoutant des molécules d'eau aux liaisons α -1,4-glycosidiques. La polygalacturonase est l'enzyme la plus étudiée parmi les diverses enzymes pectinolytiques, clivant des liaisons glycosidiques à l'extérieur et à l'intérieur de la chaîne polymère pour former respectivement l'exo-polygalacturonase et l'endo-polygalacturonase. (En ligne, Ur Rehman, H.,2023).

- **Pectine lyase**

La pectine lyase catalyse le clivage des liaisons α -1,4-glycosidiques pour produire des galacturonides contenant des acides galacturoniques insaturés. Les lyses de pectine sont classées en lyase d'exopeptine et en lyase endopeptine en fonction de leur catalyse séquentielle et aléatoire du clivage de la liaison α -1,4-glycosidique, respectivement. (En ligne, Ur Rehman.,2023).

- **Pectine estérase**

La pectine estérase également connue sous le nom de pectine méthyl hydrolase, catalyse la désestérification des molécules de pectine en acide pectique et en méthanol (En ligne, Ur Rehman.,2023).

2.5. Mode d'action

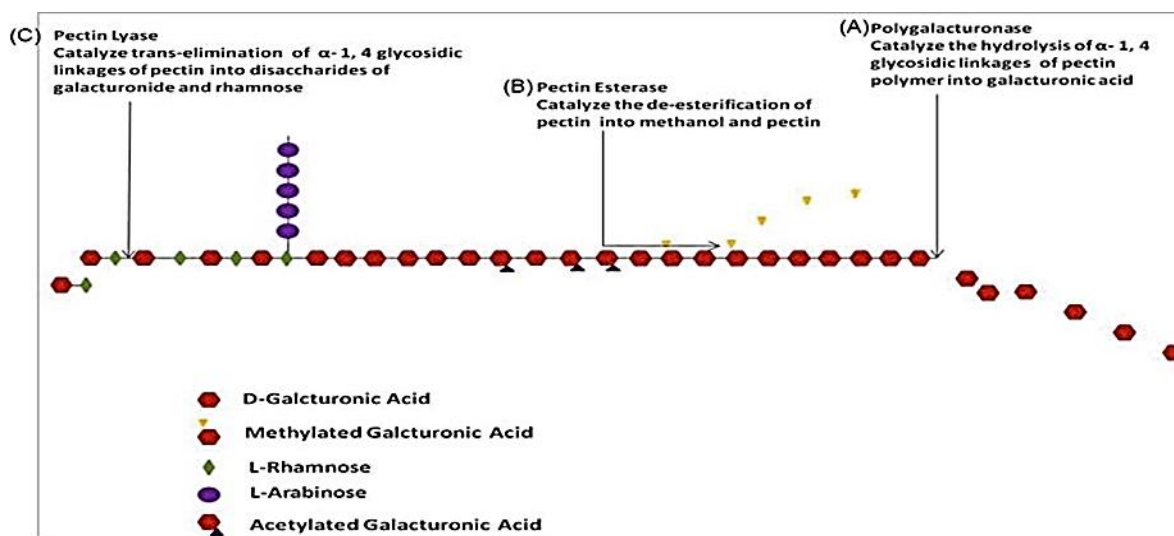


Figure 05 : Mode de dégradation de la pectine par différentes pectinases. (A) Polygalacturonase (B) pectine estérase (C) pectine lyase (Rehman H, Baloch AH, Nawaz MA., 2021).

2.6. Application des pectinases en industrie agroalimentaire

La pectinase est l'une des enzymes industrielles les plus importantes, qui peut être utilisée pour l'extraction de jus, le traitement des fibres, la nutrition humaine et animale ainsi que le traitement des eaux usées industrielles (Abedayo et *al.*, 2021 ; Rehman et *al.*, 2021).

2.6.1. Dans la transformation des fruits et légumes

Le traitement de la pulpe, l'extraction du jus et la clarté sont autant de facteurs dans l'utilisation des pectinases microbiennes dans l'industrie des fruits et légumes. La pectinase réduit la viscosité des légumes, la clarté du jus, la macération et raccourcit le temps de fermentation. (Anand et *al.*, 2020 ; Garg et *al.*, 2016 ; Saharan et *al.*, 2018).

Les pectinases sont largement utilisées dans l'industrie des jus de fruits et de légumes. Ces industries produisent commercialement une variété de jus tels que des jus clairs pétillants, des jus troubles et des produits unicellulaires pour l'hydrolyse sélective de polysaccharides en couches intermédiaires afin de maintenir l'intégrité des cellules végétales. (Rehman et *al.*, 2021). Les enzymes pectinolytiques sont l'une des enzymes émergentes et sont donc utilisées dans la plupart des industries fruitières pour la transformation des jus. Les polysaccharides pectiques contenus dans le jus rendent naturellement le jus trouble (Sharma et *al.*, 2017).

Tous les fruits contiennent naturellement des niveaux élevés de pectine. Cette concentration élevée en pectine entraîne la formation de colloïdes dans le jus, créant des problèmes lors du traitement des jus clairs. La turbidité du jus pose également un problème sur marché. Les méthodes traditionnelles de production de jus sont également peu attrayantes et énergivores pour cette raison, les pectinases jouent un rôle important dans la production, l'extraction et l'extraction des jus de fruits (Roy et *al.*, 2018).

Le traitement des purées de fruits et de légumes à l'aide de solutions enzymatiques a donné des pulpes avec une extraction élevée du jus et de bonnes propriétés de pressage. Les pectinases sont utilisées dans l'industrie des jus de fruit savant d'être clarifiées pour empêcher l'agrégation et réduire la viscosité des protéines de pectine. Le traitement initial des jus de fruits par ajout de pectinase a été largement étudié pour améliorer le flux de perméation en microfiltration, ultrafiltration et osmose inverse. (Roosdiana et *al.*, 2013).

La pectinase améliore la compressibilité de la pulpe tout en détruisant en même temps la structure de la gelée pour augmenter le rendement en jus. L'utilisation de pectinase dans la préparation de jus de fruits améliore la libération de composés phénoliques des peaux de fruits (Samanta.,2021).

2.6.2. Dans la vinification

Le rôle principal des enzymes pectinolytiques dans le processus de vinification est de faciliter l'extraction, de maximiser le rendement en jus, d'aider à la filtration et d'améliorer la saveur et la couleur (Garg et *al.*, 2016).

L'utilisation de la pectinase dans la vinification favorise la macération, augmente le rendement en jus, facilite la filtration et améliore la saveur et la couleur. Les fruits ont été macérés avec de la pectinase avant l'inoculation de la fermentation alcoolique. Cette technologie améliore la qualité du vin (Samanta, 2021).

L'ajout d'enzymes pectines lors du broyage des fruits pendant la vinification augmente la quantité de jus qui s'écoule librement et réduit le temps de pressage. Il améliore également la filtration et la clarté du jus et améliore la variété de couleur et la stabilité des vins rouges (Lavanya et *al.*, 2021).

2.6.3. Dans la fermentation du café et du thé

Dans le processus de fermentation du thé, la poudre de thé instantanée joue un rôle important dans la préparation du thé. Parce que ce thé instantané en poudre est fabriqué à

partir de feuilles, il contient une forte concentration de pectine (Hassan et S. Ali., 2016 ; Praveen et Suneetha., 2014).

Lors de l'infusion du thé avec cette poudre, la forte concentration de pectine fait mousser le thé. Les pectinases, telles que la polygalacturonase, sont utilisées dans le processus de fabrication du thé pour détruire les propriétés moussantes de la poudre de thé instantanée en détruisant la pectine, améliorant la qualité du thé et provoquant des changements de couleur, et sont très populaires sur le marché (Hassan et S. Ali., 2016 ; Praveen et Suneetha., 2014).

La pectinase est également utilisée dans la fermentation du café. Les grains de café ont une gaine qui entoure la structure interne. Ces coquilles dures sur le grain de café sont appelées mucilage. Le mucilage a également des propriétés collantes et gélatineuses, ce qui le rend impropre à la fabrication de boissons au café. Le café est fermenté à l'aide de micro-organismes dégradant la pectine pour éliminer la couche de mucus des grains et améliorer la fermentation et la mousse du thé (Sharma et *al.*, 2012).

La pectinase alcaline a été utilisée pour décomposer la pectine et éliminer le revêtement visqueux des grains de café pendant la fermentation (Bhardwaj et *al.*, 2017) empêchent le moussage des granules de thé instantané (Kohli et Gupta., 2015).

2.6.4. Dans l'extraction d'huile

Les pectinases et autres enzymes dégradant la paroi cellulaire ont été largement étudiées pour l'extraction d'huile de diverses sources telles que les graines de lin, l'olive et les dattes (Haile et *al.*, 2022)

Une autre caractéristique est le raffinage des fibres végétales pendant le processus de fabrication de l'amidon, comme le séchage du café, du cacao, du tabac, la mise en conserve des parties d'orange et l'extraction du sucre des dattes (Al-Maqtari et *al.*, 2019).

3. Cellulases

3.1. Définition

La cellulase est une enzyme clé qui convertit la cellulose en monosaccharides et constitue une famille d'enzymes qui hydrolysent les liaisons glycosidiques β -1,4-décellulosiques. L'action synergique de trois enzymes principales, à savoir. Les

endoglucanases (EC 3.2.1.4), les exoglucanases (EC 3.2.1.91) et les β -glucosidases (EC 3.2.1.21) sont nécessaires pour parvenir à la dégradation de la cellulose (Sajith *et al.*, 2016).

3.2. Origine des cellulases

Les cellulases sont largement distribuées dans les systèmes vivants, notamment les micro-organismes (gupta., 2016). Les cellulases sont produites naturellement par divers organismes, notamment des bactéries, des champignons, des actinomycètes, des protozoaires et certains insectes, mollusques et nématodes (Saini *et al.*, 2017).

- **Origine animale**

Malgré leur incapacité à créer des cellulases endogènes, de nombreuses espèces animales (omnivores et herbivores) utilisent la cellulose comme source d'énergie, mais cela est dû à la vie symbiotique des micro-organismes dans leur système digestif. En conséquence, seules quelques cellulases endogènes dans des organismes supérieurs ont été identifiées (Elhadi, 2019).

- **Origine végétale**

Les cellulases jouent un rôle clé dans la maturation des fruits, où elles aident à libérer les arômes. La majorité de ces enzymes végétales sont obtenues en les extrayant des fruits. Les exoglucanases sont absentes des préparations de cellulose d'origine végétale. La production d'enzymes végétales, en revanche, est limitée par la disponibilité des matières premières (Sebti et Deghdak, 2018).

- **Origine microbienne**

Les cellulases microbiennes sont principalement produites par les moisissures et les bactéries (Touijer, 2019). Elles sont capables de décomposer la cellulose et de libérer le CO₂ ainsi que des acides organiques comme l'acide formique, l'acide butyrique et l'acide acétique (Atek et Benouali, 2016).

Très peu de levures sont cellulolytiques. Néanmoins, Des souches appartenant aux genres : *Trichosporon*, *Cryptococcus*, *Candida*, *Debaryomyces*, *Kluyveromyces* ont été décrites comme des organismes producteurs de cellulases (Giese *et al.*, 2017).

Les cellulases produites par les levures sont actives dans une large gamme de pH et à haute température. De plus, elles présentent un degré raisonnable de stabilité au pH et à la

température. Ces propriétés les rendent adaptées aux processus biotechnologiques (Korish, 2003 ; Touijer, 2019).

Tableau V : Certaines bactéries cellulolytiques et leurs sources. (Himmel et al., 2010 et Obeng et al., 2017).

Bactérie			
Aérobies (cellulases libres, non complexées)		Anaérobies (cellulases complexées ou libres, non complexées)	
Espèces	Source	Espèces	Source
<i>B. thuringiensis</i>	Intestin de chenille	<i>Bacteroides cellulosolvens</i>	Eaux usées
<i>Cellulomonas Fimia</i>	Terre	<i>Clostridium cellulovorans</i>	Fermenteur à bois
<i>Cellvibrio japonicus</i>	Terre	<i>Clostridium josui</i>	Compost

3.3. Structure des cellulases

Les cellulases ont des structures et des propriétés physico-chimiques différentes selon leur origine. La plupart des cellulases microbiennes étudiées sont des protéines acides présentant des niveaux élevés de glycosylation. La plupart des cellulases microbiennes étudiées sont des glycoprotéines avec des niveaux élevés d'acides aminés acides, plutôt que des métalloprotéines (Bahouli et Zidalmal ; 2020).

Ils ont une structure modulaire avec deux domaines fonctionnels : un site catalytique et un site de liaison au substrat ou CBD (cellulose-binding domaine). Le CBD existe sous forme de domaine unique, double domaine ou triple domaine, et peut être situé au niveau du C-terminal (carboxyl-terminal) ou du N-terminal (amine-terminal) de la protéine. Le CBD est lié au domaine catalytique par un peptide riche en proline et thréonine appelé « Linker » (Lakhundi et al. ; 2015).

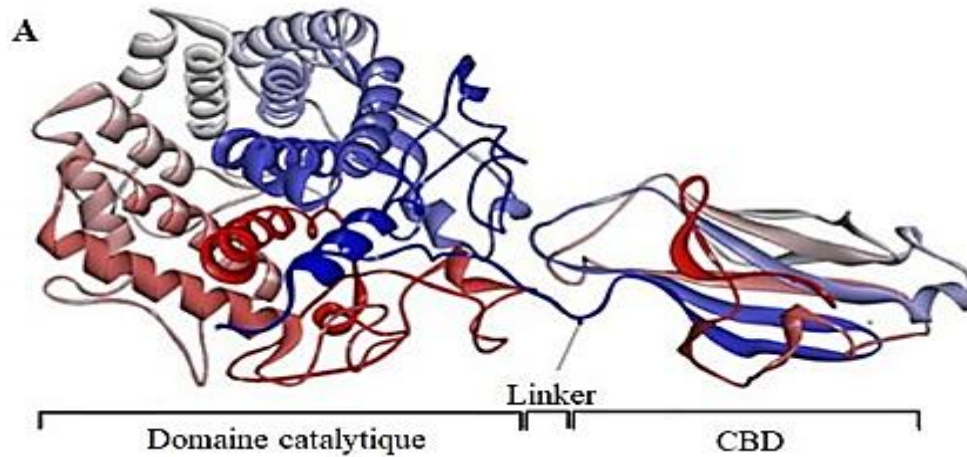


Figure 06 : (A) : Illustration représentant les différents domaines dans la structure 3D des cellulases (Pirich et *al.*, 2020).

3.4. Classification des cellulases

- **Endo- β (1 \rightarrow 4) glucanase (Endocellulase, EG) (EC 3.2.1.4)**

Endoglucanase (endo-bêta-1,4-D-glucanase, endo-bêta-1,4-D-glucan-4-glucanohydrolase) communément appelée CMCCase –hydrolyses, le Carboxyméthyl cellulose (CMC) ou cellulose qui gonfle de manière aléatoire. En conséquence, la longueur du polymère diminue, ce qui entraîne une diminution accrue de la concentration en sucre. Les endoglucanases hydrolysent de manière préférentielle et aléatoire les régions amorphes (internes) des fibrilles par clivage des liaisons β -glycosidiques. (Begum et *al.*, 2009 ; Sajith et *al.*, 2016).

- **Exo- β -(1 \rightarrow 4) glucanase (Cellobiohydrolase, CBH) (EC 3.2.1.91)**

Les exoglucanases (exo- β -1,4-D-glucanases, Cellobiohydrolase) dégradent la cellulose en éliminant les unités cellobiose des extrémités non réductrices des chaînes. Il est également actif sur les substrats cellulotiques gonflés et partiellement dégradés et les cellodextrines amorphes, mais n'hydrolyse pas les dérivés solubles de la cellulose tels que la Carboxyméthyl cellulose et l'hydroxyéthylcellulose. Certains systèmes de cellulase contiennent également de la glucohydrolase (exo-1,4-D-glucan-4-glucohydrolase) comme une composante mineure (Joshi et *al.*, 1999 et Sajith et *al.*, 2016).

- **β - (1→4) glucosidase ou Cellobiase (EC 3.2.1.21)**

Les β -glucosidases complètent le processus d'hydrolyse de la cellulose en clivant le cellobiose et en éliminant le glucose des extrémités non réductrices des oligosaccharides (par exemple, ayant un groupe hydroxyle libre en C-4). L'enzyme hydrolyse également les groupes alkyle et aryl β -glucoside (Kubicek et *al.*, 1993 et Sajith et *al.*, 2016).

- **Cellobiose phosphorylase ou cellobiase**

Orthophosphate -D-glucosyl transférase (EC 2.4.1.20) elle catalyse la phosphorylase réversible du cellobiose. Il a été découvert par Ayers dans les cellules de *Ruminococcus flavefaciens* :

Cellobiose + H₃PO₄ α -D-glucose-1-P + glucose (Sadhu et *al.*, 2013).

- **Cellodextrine Phosphorylase ou 1,4-B-D-Oligoglucan Ortho-phosphates Alfa – D-glucosyl transférase (EC 2.4.1.49)**

Il n'agit pas sur le cellobiose mais catalyse le clivage phosphorylytic réversible de cellodextrines allant de cellotriose à cellohexose : n (1,4 – β -D-glucosyl) + H₃PO₄ (1,4 – β -D-glucosyl) n-1 + α -D-glucose-1-P (Sadhu et *al.*, 2013).

- **Cellobiose Eimerase (EC 5.1.3.11)**

Il a été rapporté dans les cellules de *Ruminococcus albus*. Elle catalyse la réaction suivante :

Cellobiose 4-O- β -D-glucosylmannose (Sadhu et *al.*, 2013).

3.5. Caractéristiques des enzymes cellulolytiques

Des enzymes cellulolytiques sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau VI : Caractéristiques des enzymes cellulolytiques (Lee et *al.*, 2010 ; Raghuwanshi et *al.*, 2014)

Enzymes	Endo- β (1 \rightarrow 4) glucanase	Exo- β -(1 \rightarrow 4) glucanase Cellobiohydrolase, CBH)	(β - (1 \rightarrow 4) glucosidase ou Cellobiase
Code chiffré	(EC 3.2.1.4)	(EC 3.2.1.91)	(EC 3.2.1.21)
masse moléculaire	35 kDa -50 kDa	76kDa	98 kDa-124 kDa
Aspect	Poudre soluble dans l'eau jaune clair		
Humidité	10% ou moins		
Température optimale	40 °C-100 °C		
pH optimum	4 à 5 Ou proche à la neutralité		
Site de coupure	les liaisons internes de la chaîne cellulosique	agit sur les extrémités des chaînes de cellulose	hydrolyse la liaison β glucosidique du cellobiose
Produit final	cellodextrines, cellobiose, glucose.	Cellobiose	deux molécules de glucose

3.6. Mode d'action des cellulases

L'hydrolyse enzymatique de la cellulose est un processus complexe qui nécessite la participation de nombreuses enzymes (Lynd et *al.*, 2002). La dégradation enzymatique de la cellulose en D-glucose nécessite l'action synergique de trois types de cellulase : exo- β -(1,4) -D-glucanase, endo- β -(1,4) -D-glucanase et β -D-glucosidase. Chacune de ces enzymes ne peut pas hydrolyser efficacement les complexes de cellulose cristalline, mais leur combinaison avec d'autres cellulases peut augmenter considérablement le taux d'hydrolyse. (Badrana, 2017).

- Les endo- β -(1,4) -D-glucanases ou les endocellulases hydrolysent les zones amorphes de la chaîne de cellulose. Elles attaquent les liaisons β -(1,4) -D-glycosidiques en interne de la cellulose (endohydrolyse) (Badrana, 2017).

- Les cellobiohydrolases ou les exo- β -(1,4) -glucanases vont hydrolyser les zones cristallines. Elles libèrent du cellobiose à partir des extrémités non réductrices ou des extrémités réductrices du polymère de cellulose selon la spécificité de l'enzyme (Badrana, 2017).
- Les β -(1,4) -D-glucosidases ou les cellobiases hydrolysent le cellobiose en libérant des unités simples de β -D-glucose (Badrana, 2017).

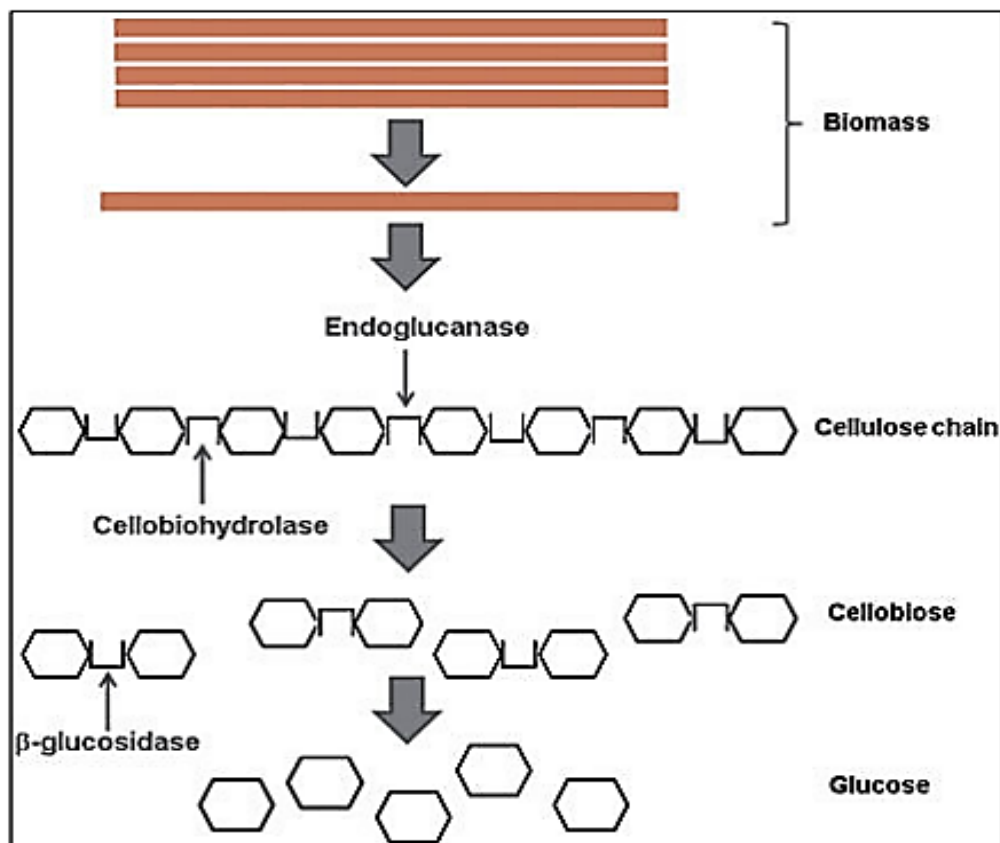


Figure 07 : Hydrolyse de la cellulose par les trois types de cellulases : l'endoglucanase, la Cellobiohydrolase et la β -glucosidase (Pulgar et Saadin, 2013).

3.7. Production de cellulase

Elle est produite par les différents microorganismes à savoir :

- **Production bactérienne**

La production de cellulase par fermentation solide a été faite par une souche bactérienne *Bacillus subtilis*, la culture est réalisée avec le son de riz comme substrat, de caséine et de chlorure de sodium, l'incubation de ce mélange a été faite pendant 36 h à 37 °C, sous une agitation de 150 tr / min, les caractéristiques de l'enzyme ont été étudiées et les résultats suivants ont été observés : sa température optimale était de 60 °C, son pH optimal

était de 7, la température stable était inférieure à $<50\text{ }^{\circ}\text{C}$, le pH stable était de 6,5 et l'activité enzymatique a été inhibée par Cd^{2+} , Fe^{2+} , Hg^{2+} , cependant, elle est activée par CO_2^{+} et Mn^{2+} (Yin et *al.*, 2010).

- **Production fongiques**

La production de la cellulase sous fermentation solide à partir de la souche *Rhizopus oryzae* UC2 a été réalisée sur les feuilles de palmier à huile comme substrat la taille de l'inoculum choisie a été de $2,0 \times 10^8$ spores / g, la température optimale est de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'humidité est de 40%, le pH initial de la fermentation est de 6, la température de la stabilité est de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et le pH optimale de la production est de 4,0 (Ezeilo et *al.*, 2019).

3.8. Application des cellulases en industrie agro-alimentaire

Les cellulases sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour l'extraction et la clarification de l'huile d'olive, des jus de fruits et de légumes, à des fins de production et de nectar de fruits. Les cellulases peuvent extraire les caroténoïdes utilisés comme colorants alimentaires. Les cellulases ont été utilisées pour modifier la composition nutritionnelle en ajoutant du *Trichoderma* cellulosique afin d'obtenir un fourrage de qualité, une meilleure digestibilité et une meilleure conversion alimentaire des céréales (Imran et *al.*, 2016).

3.8.1. Dans l'industrie du vin

Des études ont montré que l'application de cellulase peut produire un vin de haute qualité. Dans la nature, la plupart des sucres existent sous forme d'hémicellulose et de cellulose. Par conséquent, la biomasse cellulosique peut être utilisée pour la production d'alcool. Les biomatériaux cellulosiques peuvent être transformés en sucres fermentescibles par la cellulase, les sucres sont ensuite transformés en alcool par la levure. L'utilisation de la cellulase dans la vinification présente de nombreux avantages tels que la qualité et la stabilité du vin, la clarification, un meilleur développement de la couleur et une macération améliorée (Kumar et *al.*, 2019).

La cellulase peut également réduire la viscosité du moût. L'utilisation de β -glucosidase peut améliorer l'arôme du vin en hydrolysant les précurseurs de la glycation en glucose et en aglycones (Raveendran et *al.*, 2018).

En 2018, Xue et al ont isolé une endoglucanase résistante à l'éthanol d'*Aspergillus niger* provenant de fermenteurs de vin ; l'enzyme était stable à haute température et à pH acide.

3.8.2. Dans l'extraction d'huile d'olive

L'huile d'olive a de nombreux avantages pour la santé et est idéale pour un usage domestique. La cellulase est utilisée pour extraire l'huile des olives. Leur application peut réduire les déchets, réduire la tendance au rancissement, augmenter la teneur antioxydants, améliorer la qualité et améliorer le rendement d'extraction (Kumar et *al.*, 2015).

La préparation enzymatique commerciale Olivex (xylanase, cellulase et pectinase) d'*Aspergillus aculeatus* a été le premier mélange enzymatique utilisé pour l'extraction de l'huile d'olive (Sharada et *al.*, 2014).

3.8.3. Dans l'extraction de caroténoïdes

Les caroténoïdes sont les substances responsables de nombreuses couleurs végétales, du jaune au rouge. Le marché des caroténoïdes à usage commercial est en pleine croissance. Les caroténoïdes sont généralement extraits à l'aide d'une combinaison d'enzymes pectinolytiques et cellulolytiques.

Neagu et al ont utilisé la cellulase pour extraire les caroténoïdes de la tomate, qui ont le potentiel d'être utilisés comme colorants dans l'industrie alimentaire et des boissons. Cinar a extrait les pigments caroténoïdes des écorces de carotte, de patate douce et d'orange par hydrolyse enzymatique combinée avec de la pectinase et de la cellulase (Ejaz, et *al.*, 2021).

3.8.4. Dans l'industrie des jus de fruits

La sensibilisation à la santé publique a entraîné une demande accrue de jus de fruits. Cependant, la présence de polysaccharides celluloses entrave les méthodes traditionnelles d'extraction de jus (Raveendran et *al.*, 2018).

L'ajout d'enzymes cellulases pendant la transformation des fruits réduit la résistance de la paroi cellulaire et dissout les polysaccharides celluloses, ce qui entraîne une liquéfaction presque complète (Raveendran et *al.*, 2018).

Les enzymes cellulase réduisent la viscosité des purées et des nectars de fruits tels que les pêches, les poires, les papayes, les prunes, les mangues et les abricots, et peuvent également être utilisées pour extraire les flavonoïdes des graines et des fleurs (Raveendran et *al.*, 2018).

Les fibres des jus de fruits présentent un autre problème pour l'industrie car elles sont insolubles et plus denses. Ceux-ci peuvent obstruer la chaîne de fabrication et causer

d'énormes pertes à l'industrie (Kumar et *al.*, 2019). La fibre étant de nature cellulosique, l'ajout de cellulase élimine la fibre et facilite la filtration du jus.

Shariq et Sohail ont pu réduire la turbidité du jus d'orange et obtenir une réduction substantielle de l'acidité et de la viscosité en utilisant une préparation multi-enzyme faite de cellulase et de xylanase (Raveendran et *al.*, 2018).

La cellulase peut également être utilisée pour l'hydrolyse enzymatique du café torréfié. Elle consomme moins d'énergie et est moins chère que l'hydrolyse thermique du café (Baraldi et *al.*, 2016).

L'ajout d'enzymes cellulases est également connu pour ajouter de la saveur et avoir des avantages pour la santé tels qu'un risque réduit de certains types de cancer, de diabète, de maladies cardiaques et aide également à maintenir un poids corporel sain (Dhingra et *al.*, 2012). Cependant, trop de fibres dans l'alimentation peuvent avoir des effets néfastes sur la santé. Par conséquent, les fibres doivent être consommées avec modération.

4. Alpha-amylase

4.1. Définition

C'est une enzyme amylolytique importante impliquée dans l'hydrolyse de l'amidon, le glucide le plus abondant dans la nature (Zhang et *al.*, 2017).

L' α -amylase (EC 3.2.1.1) est une endo-1,4- α -D-glucane glucohydrolase. On les trouve chez les animaux, les plantes et les micro-organismes et catalysent l'hydrolyse des liaisons glycosidiques α -1,4 des polysaccharides, tels que l'amidon, le glycogène et certains oligosaccharides (Prajapati et *al.*, 2015).

L' α -amylase, l'une des enzymes industrielles les plus importantes, a de nombreuses applications industrielles. Ces enzymes représentent environ 30 % de la production mondiale d'enzymes (Fincan et *al.*, 2021).

Il s'agit d'une enzyme, généralement inductible, généralement produite en présence d'amidon ou de son produit d'hydrolyse (Prajapati et *al.*, 2015).

4.2. Origine d' α -amylase

Elle est largement présente dans la nature, provient des plantes, d'animaux, des champignons, des bactéries et des archées (Kerényiová & Janeček, 2020).

- **D'origine animale**

Chez les animaux, l' α -amylase se trouve dans la salive et le pancréas des mammifères (Nouadri, 2011), mais n'est pas largement utilisée dans l'industrie en raison de son approvisionnement limité et des coûts élevés liés à l'environnement et aux espèces animales (Khairuddin et *al.*, 2016).

Tableau VII : Sources animales de la production de l' α -amylase.

Sources	Références
<i>Bacterocerra aleae</i>	Delkash-roudsari et <i>al.</i> , 2014
<i>Lutzomyia longipalpis</i>	Vale et <i>al.</i> , 2012
<i>Sparus aurata</i>	Ma et <i>al.</i> , 2004
<i>Salmo salar</i>	Froystadez et <i>al.</i> , 2006
<i>Scorpiones</i>	Louati et <i>al.</i> , 2010
<i>Sus scrofa domesticus</i>	Tecles et <i>al.</i> , 2011

- **D'origine végétale**

L' α -amylase joue un rôle important dans le métabolisme glucidique chez les plantes. Elles sont impliquées dans l'hydrolyse de l'amidon en sucres réducteurs (glucose, maltose), l'énergie nécessaire à la germination peut être directement absorbée (Laiche, 2019).

Les enzymes végétales sont généralement obtenues par extraction à partir des céréales, elles sont souvent formées lors de la germination des graines et nécessite une activité enzymatique très importante pour la dégradation des réserves et le développement embryonnaire (Laiche, 2019).

Tableau VIII : Sources de l' α -amylase chez les plantes.

Sources	Références
<i>Oryza sativa</i>	Dengqun., 2010
<i>Carthamus tinctorius</i>	Ben el elarabi et <i>al.</i> , 2009
<i>Hylocereus polyrhizus</i>	Amid et <i>al.</i> , 2014
<i>Pachyrhizus erosus</i>	Noman et <i>al.</i> 2006
<i>Triticum aestivum</i>	Singh et <i>al.</i> , 2014
<i>Malus pumila</i>	Kanwal et <i>al.</i> , 2004

- **D'origine microbienne**

Les α -amylases microbiennes sont les plus largement utilisées dans diverses industries car ce ne sont pas des matières premières coûteuses et bon marché qui ne dépendent pas des limitations géographiques et saisonnières. Elles sont facilement transformées pour produire des enzymes extracellulaires, évitant ainsi des étapes telles que l'extraction (Lim et Oslan, 2021 et Paula et López, 2018).

Les amylases bactériennes les plus couramment utilisées sont *Bacillus sp.*, telles que *Bacillus licheniformis* (Vaseekaram, 2010 et Bano et *al.*, 2011) et *Bacillus Staphylothermus* (Li et *al.*, 2010). Parmi les moisissures, *Aspergillus sp.*, comme *Aspergillus phoneonicis* (Bennasi, 2013) et *Aspergillus tubingensis* (Viktor et *al.*, 2013), sont les plus utilisées pour produire cette enzyme. *Penicilium sp* (Saleem et Mohsen, 2014) et *Cylindro cephalum* (Sunitha et *al.*, 2012) se sont également révélés être de bons producteurs d' α -amylase.

4.3. Classification des α -amylases

Selon Dakhmouche-Djekrif, (2016) & Zhang et *al.*, (2017) et l'Union internationale de biochimie et de biologie moléculaire (UIBMB), les amylases sont classées en trois groupes selon leur mécanisme d'action.

- **Les endoamylases** : Elles hydrolysent les liaisons α -1,4 dans l'amidon et libèrent des oligosaccharides et des dextrans, on a principalement l' α -amylase (EC 3.2.1.1) dans cette classe.

- **Les exoamylases** : Elles renferment la β -amylase (EC 3.2.1.3), l' α -glucosidase (EC 3.2.1.20) et la glucomylase (EC 3.2.1.3). Et en résumé leur mécanisme d'action par la libération des sucres simples à poids moléculaires faibles comme le glucose...etc.
- **Les enzymes débranchantes** : α -1,6 de l'amylopectine. Parmi ces enzymes on a la pullulanase (EC 3.2.1.41), et l'isoamylase (EC 3.2.1.68).

Ainsi, les résidus de glucose terminaux et les liaisons α (1-6) ne peuvent pas être clivés par l' α -amylase. Le substrat de l'action de l' α -amylase est l'amidon, un polysaccharide composé de deux polymères, l'amylose et l'amylopectine.

4.4. Caractéristiques et structure

La plupart des α -amylases sont des métalloenzymes calciques. Ces ions sont nécessaires à l'activité enzymatique et au maintien de la stabilité de la structure des acides aminés des enzymes qui varient d'une souche à l'autre (Janíčková et Janeček, 2020).

Les α -amylases fongiques sont des glycoprotéines qui conservent une structure à trois domaines composée des domaines A, B et C (Rane et *al.*, 2020).

- **Domaine A** : le plus long et le plus conservé, il contient un site catalytique contenant deux molécules d'aspartate (ASP) et une molécule de glutamate (GLU) (Dakhmouche-Djekrif, 2016a ; Nielsen et *al.*, 2004 ; Rane et *al.*, 2020 ; Roth et *al.*, 2019).
- **Domaine B** : a une structure et une topologie irrégulières en raison de différences de longueur et d'acides aminés, qui peuvent régir les changements de fonction et de stabilité. Bien que le domaine B varie en fonction de la spécificité de l'enzyme. Il possède une courte séquence conservée à l'extrémité C-terminale et participe à la liaison aux ions de calcium Ca^{2+} qui sont structuraux, et cette association avec le domaine B facilite son interaction avec le domaine A (Dakhmouche-Djekrif, 2016a ; Nielsen et *al.*, 2004 ; Rane et *al.*, 2020 ; Roth et *al.*, 2019).
- **Domaine C** : se compose de feuillets β formant un motif clé (β -sandwich). Les deux domaines B et C sont situés du côté inverse de $(\beta/\alpha)_8$ (Dakhmouche-Djekrif, 2016a ; Nielsen et *al.*, 2004 ; Rane et *al.*, 2020 ; Roth et *al.*, 2019).



Figure 08 : Structure tridimensionnelle d'une alpha-amylase (Atek et Benouali, 2016).

4.5. Mode d'action

Le mécanisme d'action de l' α -amylase nécessite l'implication de trois fonctions du site actif impliquant l'attaquant nucléophile, le stabilisateur de charge positive de l'atome attaqué et le donneur de protons pour le groupe déplacé (Park et *al.*, 1997 & Toumi, 2018).

Cela signifie que la rupture des liaisons osidiques implique une série d'échanges d'électrons et de protons entre certains radicaux de l'enzyme et le substrat. Ce mécanisme est une propriété enzymatique dépendant des conditions expérimentales telles que la température, le pH, la taille et la structure du substrat (Park et *al.*, 1997 & Toumi, 2018).

4.6. Production de l' α -amylase

Les enzymes d'origine microbienne sont imprenables dans l'industrie en raison de leur faible coût, de leur rendement exceptionnel, de leur grande stabilité, de leur sécurité environnementale et de leur disponibilité. L' α -amylase fait partie des enzymes essentielles et importantes pour la biotechnologie (Priyadarshini et *al.*, 2020).

De nombreuses études ont rapporté l'identification, la caractérisation et l'application d'amylases d'origines différentes (végétale, animale et microbienne). En termes de faible rendement, l' α -amylase végétale et animale est assez limitée pour les industries de transformation de l'amidon (Wang et *al.*, 2020).

Ces dernières années, le nouveau potentiel d'utilisation des micro-organismes comme source d'enzymes biotechnologiques d'intérêt industriel a stimulé un regain d'intérêt pour l'exploration de l'activité des enzymes extracellulaires. Les levures les plus étudiées sont celles d'importance biologique, alors qu'à ce jour seules quelques levures d'origine

environnementale ont été étudiées pour leur valeur biotechnologique dans la production d'enzymes. Bien que des études récentes aient mis en évidence le potentiel d'environnements uniques et difficiles en tant que source naturelle de biodiversité pour l'isolement et la sélection de micro-organismes bénéfiques (Buzzini & Martini, 2002).

La production d'enzymes microbiennes comprend à la fois la fermentation submergée (FML) et la fermentation à l'état solide (FMS) (Melnichuk et *al.*, 2020).

La fermentation à l'état solide (FMS) présente un grand potentiel pour la production d'enzymes, non seulement pour le laboratoire mais également pour la production commerciale (Kannan & Kanagaraj, 2019). Elle présente également les avantages suivants par rapport à la fermentation liquide (FML) : les milieux solides sont plus similaires à l'habitat naturel des champignons, moins coûteux car le substrat est généralement constitué de déchets agricoles ou industriels, faible génération d'eaux usées, rendement en produit plus élevé et teneur en oxygène fermée, apport nettement plus élevé (Melnichuk et *al.*, 2020).

Cependant, la FMS n'est pas largement utilisée comme procédé industriel en raison du manque de conditions appropriées à la croissance fongique ainsi qu'à la production et à la récupération de biomolécules. Par conséquent, les connaissances doivent être développées dans cette direction, notamment en élargissant l'expérience (Melnichuk et *al.*, 2020).

Parmi les substrats utilisés, les déchets agricoles tels que le son de blé, les peaux de pommes de terre séchées, les déchets de fruits secs, les tourteaux d'huile de pongamia (Kalia et *al.*, 2021).

La croissance de la production d'enzymes de l'organisme est fortement influencée par la composition du milieu et l'optimisation de la composition du milieu peut donc conduire à un rendement enzymatique amélioré (Prajapati et *al.*, 2015). Par exemple :

Dakhmouche-Djekrif (2016) a étudié la production d' α -amylase par FML à partir de la levure *Clavispora lusitaniae*. L'environnement de production à base de lactosérum a été amélioré grâce aux plans statistiques de Plackett et Burmann et aux plans de Box et Wilson. Les conditions optimales de production sont : agitation à 136,56 tr/min, température 54,14°C, concentration en amidon 2,66 g/l, levure en grande quantité 0,365 g/l, solution saline 8,75 ml/l et solution d'oligoéléments 4,3 ml/l. L'activité α -amylase obtenue dans des conditions optimales était de $13456,36 \pm 300$ UI.

Laiche (2019) a également étudié la possibilité de production d' α -amylase à partir de deux espèces de levures, *Candida glabrata* et *Schwanniomyces occidentalis*, cultivés sur différents types de lactosérum comme milieu de base. L'optimisation des conditions de production des enzymes a montré que le lactosérum de chèvre semblait être le substrat le plus adapté au processus de production, avec un pH optimal de 4 à 5 et une croissance maximale à 40°C. La concentration du substrat affecte l'activité enzymatique (meilleur rendement à 3,4 et 5%), ainsi l'extrait de levure améliore le rendement en biomasse et l'activité enzymatique tandis que la concentration de l'inoculum n'affecte que la quantité de biomasse (meilleure production à 3 et 4% inoculum).

Xie et al. (2014) ont étudié la production bactérienne d' α -amylase par SSF à partir de *Bacillus methylotrophicus* à l'aide de FML. elle utilisent l'amidon comme source de carbone, les peptones comme source d'azote et les extraits de levure comme source de vitamines. La fermentation a été réalisée à 37°C, à pH 7,2 et sous agitation à 200 rpm. La production a été initiée pendant la phase de croissance et a atteint un maximum de 144 U/ml après trois jours de culture.

Malgré quelques recherches sur la production d' α -amylase, la demande de nouvelles α -amylases continue de répondre aux exigences d'applications industrielles spécifiques (Wang et al., 2020).

4.7. Application des alpha-amylases dans l'industrie agro-alimentaire

L'amylase est l'une des enzymes les plus importantes de la biotechnologie actuelle. L'industrie de l'amidon est l'une des applications les plus répandues dans le processus de gélatinisation, la liquéfaction, la saccharification qui sont effectués à haute température, de textile, des aliments, de pâtisserie, de brassage et de distillation (Ardhi et al., 2020 ; Gupta et al., 2003).

4.7.1. Dans la panification

L' α -amylase extraite de champignons ou de grains maltés a été utilisée dans les produits de boulangerie, car cette enzyme est utilisée à la fois dans la farine et dans la préparation de la pâte pour compléter le taux de fermentation et réduire la viscosité de la pâte et améliorer ainsi sa qualité, le volume et la texture du produit (MOTTA et al., 2023).

Elle contribue également à former des additifs de sucre fermentescibles qui améliorent certaines propriétés du pain, telles que la couleur, la saveur, la qualité et la croûte (MOTTA et *al.*, 2023).

La réduction de la qualité du pain par le rassissement met en évidence le rôle enzymatique anti-rassissement. Il est rapporté que l'ajout d' α -amylase réduisait ce processus dans le pain (Sadeghian Motahar et *al.*, 2021).

4.7.2. Dans la liquéfaction de l'amidon et saccharification

L'hydrolyse enzymatique de l'amidon en glucose a depuis longtemps remplacé la voie d'hydrolyse acide par l'acide chlorhydrique. Les processus enzymatiques produisent moins de composés secondaires et n'impliquant pas d'acides corrosifs (Garske et *al.*, 2017 ; Yoo et *al.*, 2017a ; Mohanan et Satyanarayana, 2019).

Dans la plupart des cas le produit final obtenu par hydrolyse de l'amidon est un sirop de sucres, la composition glucidique dépendent de leur utilisation prévue (Garske et *al.*, 2017 ; Yoo et *al.*, 2017a ; Mohanan et Satyanarayana, 2019).

Les enzymes dans l'hydrolyse de l'amidon Comprend principalement l' α -amylase, la β -amylase, l'amyloglucosidase, la pullulanase et la glucose- isomérase. La composition finale du sirop dépend uniquement du type/nature des enzymes ou de la combinaison d'enzymes et la qualité des matières premières utilisées dans la production de sirop de glucose, de fructose ou de maltose (Yoo et *al.*, 2017b ; Mohanan et Satyanarayana, 2019 ; Okafor et *al.*, 2019 ; Singh et *al.*, 2019).

4.7.3. Dans la valorisation des déchets agro-alimentaire

L'amylose est également utilisée en décontamination et en recyclage des déchets (Chen et *al.*, 2007 ; Hmidet et *al.*, 2009), notamment les déchets alimentaires, par exemple les restes de produits de boulangerie, y compris pain, pâtisseries et autres féculents tels que les déchets céréaliers (blé, maïs, riz...) et les déchets agricoles (oranges, paille...), le contenu en amidon de ces déchets est converti en sucres réducteurs (glucose, du maltose et un mélange de malto-oligosaccharides) (El-Aty et Mostafa, 2015 ; Rashid. et *al.*, 2018).

5. Lipases

5.1. Définition

Les lipases sont des enzymes qui catalysent l'hydrolyse des triglycérides en glycérol et des acides gras libres et cela dans des conditions aqueuses (Ram et *al.*, 2019).

Au contraire, en fin de compte en conditions anhydres, des réactions inverses se produisent (estérification et Trans estérification), créant des glycérides à partir du glycérol et des acides gras. Ces enzymes ont une spécificité de substrat élevée et une activité optimale sur une large gamme plage de température, cela fait des lipases des biocatalyseurs polyvalents (Ram et *al.*, 2019).

5.2. Origine des lipases

Parmi les différentes sources de lipases, les sources microbiennes de lipases ont retenu l'attention de l'industrie en raison de leur sélectivité, de leur stabilité et de leur large spécificité de substrat (Kumar et *al.*, 2016 ; Mehta et *al.*, 2017 ; Mahfoudhi et *al.*, 2022).

Plusieurs microbes sont identifiés comme sources potentielles de lipases, et ces microbes sont regroupés en champignons, levures et bactéries (Kumar et *al.*, 2023).

- **L'origine fongiques des lipases**

Plusieurs souches fongiques sont capables de produire de la lipase avec différentes propriétés catalytiques, importantes pour différentes applications commerciales (Pandey et *al.*, 2016).

Dans le monde commercial et industriel, les espèces fongiques les plus importantes produisant de la lipase sont *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.*, *Fusarium sp.*, *Geotrichum sp.*, *Trichoderma sp.* Et *Mucor sp.* (Mohanasrinivasan et *al.*, 2009 ; Bharathi et Rajalakshmi, 2019 ; Joshi et *al.*, 2019).

De plus certains champignons récemment isolés se sont révélés capables de produire des enzymes lipases, tels que *Rhizopus oryzae R1* (Helal et *al.*, 2021), *Stemphylium lycopersici*, *Sordida sp.* (Rocha et *al.*, 2020), *Aspergillus niger 13 F*, *Fusarium solani 7 F* (Patel et Shah, 2020), *Aspergillus flavus* (Ezema et *al.*, 2022),

Aspergillus terreus AH-F2 (Shabbir et Mukhtar), 2018 *Thermomyces lanuginosus* (Tišma et al., 2019).

La production de lipase fongique varie en fonction de la composition et du milieu de croissance, de l'organisme fongique et des conditions physiques telles que la source d'azote, la source de carbone, le pH et la température (Pandey et al., 2016).

Parmi les sources fongiques, les champignons filamenteux sont reconnus comme d'importants producteurs de lipase, et les méthodes, notamment l'extraction, la purification et le traitement, sont relativement simples et directes par rapport à d'autres source (Kumar, A et al.,2023).

Rocha et coll. (2020) ont isolé deux champignons endophytes, à savoir *Stemphylium lycopersici* et *Sordida sp.*, à partir des feuilles d'*Humiria balsamifera* et de *Tocoyena bullata* et ont découvert que les deux champignons sont capables de produire une enzyme lipase à un taux de 397 U/ml/min et 286 U/ml/min, respectivement. Shabbir et Mukhtar (2018) ont également isolé *Aspergillus terreus* AH-F2 à partir d'échantillons de sol et d'huile avec une production maximale de lipase de 5,0 U/ml/min dans un milieu défini à pH 6,0. Dans une autre étude, Patel et Shah (2020) ont isolé deux champignons, à savoir *Fusarium solani* 7 F et *Aspergillus niger* 13 F, et les deux champignons sont capables de produire 5,95 U/ml/min de lipase brute après 4 jours d'incubation à 30 °C.

5.3. Structure des lipases

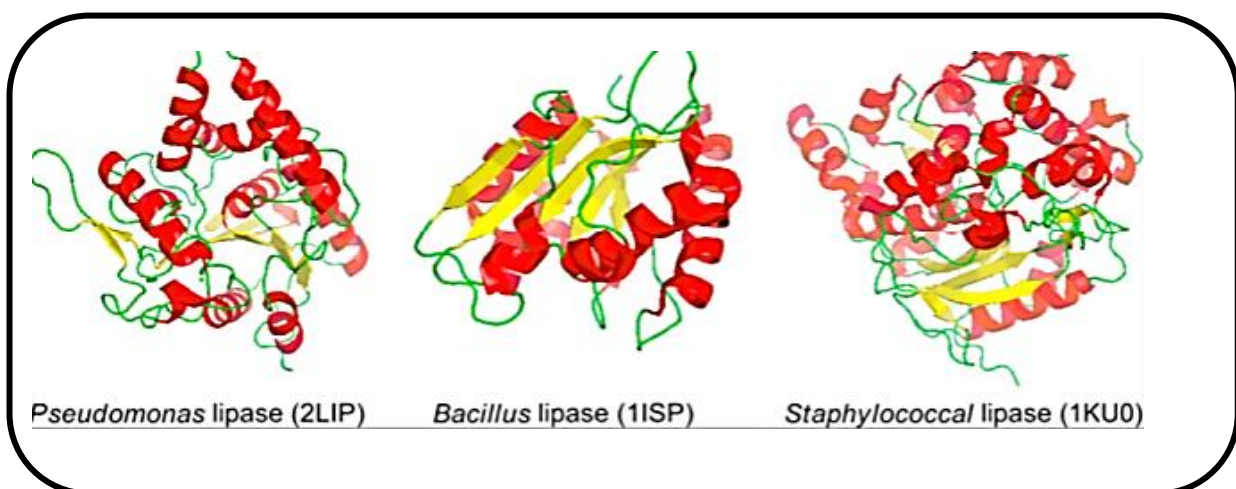


Figure 09 : Structure de lipase microbienne (Liu et Kokare, 2017).

5.4. Caractéristiques des lipases

Le poids moléculaire des lipases varie de 19 à 60 kDa et il a été rapporté qu'elles sont des protéines monomères (Chandra *et al.*, 2020).

Les lipases agissent sur les substrats insolubles émulsionnés dans l'eau et catalysent l'hydrolyse de triacylglycérides (liaisons de clivage ester) constitués d'acides gras à longue chaîne (plus de dix atomes de carbone) (Fatima *et al.*, 2020).

Elles peuvent également catalyser l'eau et les solvants organiques non miscibles, synthèse réversible et réaction d'échange de groupes ester et résolution miscible racémates en acides et alcools optiquement actifs. Certaines lipases peuvent hydrolyser les phospholipides, les esters de cholestérol et parfois même certains esters synthétique (Pabai, 1997 ; Fickers *et al.*, 2008).

Les lipases diffèrent des estérases en ce que ces dernières agissent sur des substrats solubles dans l'eau, sous forme d'esters simples d'acides gras à chaîne courte (moins de six atomes de carbone) (Fatima *et al.*, 2020).

5.5. Mode d'action

Le mécanisme commence par l'acylation. Cette étape implique le transfert d'un proton entre eux résidus d'aspartate de lipase, d'histidine et de sérine, provoquant l'activation du groupe hydroxyle de la sérine catalytique (Casas-Godoy *et al.*, 2018).

En conséquence, le résidu sérine hydroxyle avec une nucléophilie accrue, attaque le groupe carbonyle du substrat. Le premier milieu tétraédrique formé par la charge négative de l'oxygène du groupe carbonyle. Le trou d'oxydation stabilise la répartition des charges et réduit l'énergie spatiale du milieu tétraédrique formant au moins deux liaisons hydrogène. Une étape de désacidification a ensuite lieu où le nucléophile attaque l'enzyme libérant le produit et une enzyme régénératrice. Ce nucléophile peut être de l'eau ou un alcool lors de l'hydrolyse en cas d'alcoololyse (Casas-Godoy *et al.*, 2018).

5.6. Production des lipases

La fermentation est une approche de la transformation biologique de substrats complexes des molécules plus simples à travers divers micro-organismes. Elle est

largement utilisée pour la production industrielle de lipases et offre de grands avantages par rapport aux approches traditionnelles (Fatima et al., 2020).

La production de lipase est réalisée par fermentation solide (FMS ou en anglais Solid-State Fermentation, SSF) et fermentation liquide (FML ou en anglais Submerged Fermentation, SMF).

Plusieurs études ont été réalisées sur la production de lipase dans le FMS chez *Aspergillus niger* MTCC 872 (Nema et coll., 2019) ; *Yarrowia lipolytica* (Dominguez et al., 2003), *Candida rugosa* (Benjamin et Pandey, 2001) et *Candida utilis* par FMS (Grbavcic et al., 2007) et également dans FML *Candida guilliermondii* (Oliveira et al., 2014) et *Yarrowia lipolytica* (Lopes et al., 2009).

5.7. Amélioration de la production de la lipase

Dans l'industrie, il serait intéressant d'améliorer le rendement de production de lipase. Ceci peut être effectué par diverses méthodes statistiques ou par la manipulation de la souche par génie génétique (mutation, ADN recombinant) (Soleyman et al., 2017).

Plusieurs facteurs importants ont été testés pour améliorer la productivité de la production de lipase. Il est bien connu que des rendements enzymatiques élevés ont été obtenus grâce à l'optimisation de milieu de culture pour augmenter la production de lipase, différents schémas statistiques sont appliqués pour étudier et améliorer les effets de diverses variables importantes, notamment substrat, inducteur, sources d'azote et de carbone (Soleyman et al., 2017).

A l'échelle industrielle, la production de la lipase est produite à faible coût à partir de sources de carbone et d'azote. Ceci permet de réduire les coûts (Soleyman et al., 2017).

5.8. Application des lipases dans l'industrie agro-alimentaire

Les lipases sont souvent considérées comme l'une des classes d'enzymes les plus importantes dans le monde industrialisé, cet intérêt est principalement dû au fait que les lipases ont des propriétés catalytiques atypiques d'une part et d'autre part

technologies mises en œuvre avec des produits relativement simples ; leurs domaines sont donc très larges et diversifiés (Maarouf et *al.*, 2017).

Des lipases sont ajoutées pour améliorer et accélérer le développement des notes aromatique, les lipases suscitent un grand intérêt dans l'industrie agroalimentaire pour améliorer les propriétés émulsifiantes de l'industrie de transformation des œufs les lipides et les lipases du jaune sont couramment utilisés en cuisine dans la production de biscuits, de chocolat et de produits laitiers ou fermentés. Elles participent à l'affinage des fromages et de certaines pâtisseries (Guerrand., 2017).

Les lipases commerciales sont principalement utilisées dans l'industrie laitière, elle améliore le goût du fromage et accélère l'affinage. Également utilisé pour transformer des feuilles fraîches en thé noir en libérant les acides gras dans les feuilles (Al-Zuhair, 2016).

5.8.1. Dans l'industrie laitière

Les lipases sont largement utilisées dans l'industrie laitière pour hydrolyser la matière grasse du lait, modifier la longueur des chaînes d'acides gras et améliorer la saveur des fromages (Chandra, P et *al.*,2020).

Aujourd'hui, cela s'applique également à l'affinage des fromages et à l'accélération de la lipolyse des graisses du beurre et de la crème. L'effet des lipases sur les matières grasses du lait, divers produits, notamment les fromages à pâte molle, qui possèdent des propriétés aromatiques particulières produites par les acides gras libres (Hamdy et *al.*, 2017, Chandra.,2020).

Pour la production fromagère à partir des *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, etc..., toute une série de lipases microbiennes ont été développées par l'industrie technologique. L'utilisation des lipases microbiennes individuelles ou leurs mélanges pour produire des produits fromagers de haute qualité. Des fromages modifiés par une enzyme (FME) est produit à haute température en présence d'une enzyme et par incubation du fromage pour accumuler une arôme concentrée en utilisant une catalyse lipase. Comparé au fromage ordinaire, l'FME a une teneur en matières grasses 10 fois plus élevée et est utilisé comme ingrédient dans d'autres produits tels que les trempettes, les sauces, les soupes et les collations. L'acétoacétate, les acides β -céto, les esters

aromatiques, les méthylcétones et les lactones sont synthétisés à partir d'acides gras libres en initiant des réactions chimiques simples (Chandra.,2020).

Dans plusieurs types de fromages, comme le cheddar, le provolone et le ras, les lipases gastriques sont utilisées pour accélérer le mûrissement et améliorer la saveur. Le taux de libération des acides gras augmente après l'ajout de lipase, ce qui accélère également le développement de l'arôme. La libération d'acides gras augmente significativement avec l'ajout de lipase de veau et la température de maturation des agrégats (7–53 °C). La lipase reste active même après maturation et peut provoquer une intensification du goût rance, ce qui constitue un inconvénient. Les protéines hautement solubles et les acides gras libres ont montré une appétence améliorée dans les 3 mois suivant l'affinage dans l'industrie du fromage Cheddar en utilisant un cocktail de protéase fongique et de lipase (Chandra.,2020).

Pendant la maturation, des niveaux élevés d'enzymes peuvent provoquer une réaction excessive des enzymes, donnant une spécificité indésirable et réduisant la productivité. La technologie des liposomes introduite pour un affinage plus rapide du fromage réduit l'amertume et les pertes de productivité. Grâce à la lyse cellulaire, les enzymes intracellulaires bactériennes ne sont pas restreintes et soutiennent la saveur grâce à la lipolyse et à d'autres fonctions (Chandra.,2020).

Des microcapsules d'extraits acellulaires contenus dans la matière grasse du lait peuvent être ajoutées pour coaguler le lait maternisé. Les fromages fabriqués avec des capsules intactes contiennent plus de produits finaux enzymatiques que ceux obtenus par ajout direct d'enzymes. En encapsulant une fraction grasse à point de fusion élevé, la stabilité de la capsule peut être améliorée. Dans le cas du fromage, l'activité lipolytiques est significativement affectée par la lipase lactique préparée à partir de lait non pasteurisé (Fraga et al.,2018, Chandra.,2020).

Les fromages bleus veiné et camembert sont lipolytiques et produisent des lipases en utilisant la culture et la microflore secondaire telles que *Penicillium roqueforti* et *Penicillium camemberti*, respectivement. Le Parmesan, le Provolone et le Romano sont des fromages italiens conçus pour améliorer leur saveur après l'ajout général de lipases. Les acides gras progressifs et l'azote soluble total augmentent

continuellement pendant la nitrification. Le déclenchement du développement des lipases aromatiques du fromage libère les acides gras des triglycérides (Chandra.,2020).

Dans les produits laitiers, la synthèse d'acide linoléique conjugué (ALC) a permis l'immobilisation des lipases. Les lipases et les protéases accélèrent l'affinage des fromages individuels ainsi que du « cocktail ». En tant que telles, les enzymes peuvent être incorporées ou encapsulées. Au cours de l'affinage du fromage, des réactions enzymatiques se sont produites très progressivement, transformant le caillé frais auto-transformé en la texture et la saveur finales attendues d'un fromage affiné. Les lipases, les protéases et les enzymes lactase hydrolysent respectivement les lipides, les protéines et le lactose, augmentant ainsi le niveau de composants aromatiques (Dekker et *al.*,2019, Chandra.,2020).

5.8.2. Dans l'industrie des graisses et des huiles

Dans la transformation des aliments, la conversion des huiles et des graisses est l'un des principaux domaines qui nécessitent une technologie verte sur le plan économique et ce sont des ingrédients très importants dans les aliments (Titus D et *al.*,2018, Chandra.,2020).

La lipase peut modifier les composants actifs des lipides de la glycérine et échanger l'un d'entre eux avec de nouveaux composants. Par conséquent, des lipides relativement économiques et moins adaptés peuvent être convertis en graisses plus précieuses. L'estérification et l'interestérification sont utilisées pour obtenir des produits à valeur ajoutée entre la lipolyse d'huiles et de graisses telles que des graisses spéciales et des glycérines partielles à l'aide de lipases et d'acides gras détaillés, et ont en même temps des perspectives industrielles supérieures par rapport à la production d'acides gras en vrac par hydrolyse (Chandra.,2020).

5.8.3. Dans la transformation du thé

Le thé (le thé vert et le thé oolong) est la boisson la plus populaire au monde à base de l'arbre *Camellia sinensis*. Mais le processus est différent pour chacun : le thé vert non fermenté, le thé oolong semi-fermenté et le thé bien fermenté sont appelés thé noir (Chandra.,2020).

Le thé disponible dans le commerce est préparé à partir du bourgeon végétal et des deux feuilles supérieures de la plante *Camellia sinensis*. Afin de compléter le thé, le

renouvellement des feuilles de thé fraîches dépend de l'action de l'oxydase et de l'hydrolase endogènes des feuilles vertes. Le traitement du thé peut être effectué par un processus traditionnel ou par un processus de coupe-déchirage-roulage (CTC) (Chandra.,2020).

L'essentiel du processus CTC est qu'il est plus simple, mais le résultat est plus de ventouses et moins d'arômes. Pour ces raisons, le thé CTC est plus économique que le thé conventionnel. Si la saveur du thé CTC peut être élevée au niveau du thé orthodoxe, ce sera une bonne combinaison d'avantages et d'économie. La dégradation enzymatique des lipides membranaires déclenche la formation de produits volatils lors de la fabrication du thé noir, dont les profils aromatiques spécifiques soulignent l'importance des lipides dans l'amélioration de l'arôme (Chandra.,2020).

La qualité du thé noir dépend de la sécheresse des feuilles de thé, du broyage mécanique et de la fermentation enzymatique. L'amélioration de la teneur en lipides totaux par la lipase *Rhizomucor miehei* réduit les niveaux d'acides gras polyinsaturés détectés (Chandra.,2020).

5.8.4. Dans l'industrie de la viande et du poisson

La lipase est également utilisée pour éliminer l'excès de graisse de l'industrie de la viande et du poisson afin de produire de la viande maigre. Il est également utilisé pour améliorer sa saveur dans la fermentation des préparations de viande et pour augmenter la qualité des saucisses fermentées. Les lipases microbiennes sont également utilisées pour hydrolyser l'huile de poisson et les acides gras polyinsaturés agrégés (AGPI n-3) (Xiao.,2017).

Plusieurs sous-produits de la transformation du poisson contiennent des facteurs de croissance qui apportent une contribution précieuse en tant que milieu de culture comme en témoigne. L'utilisation des déchets de poisson pour la production de lipases microbiennes est associée à un problème majeur. L'utilisation de l'additif amaigrissant pour la viande de poisson *Staphylococcus epidermidis* CMST Pi2 a permis une production maximale de lipase (Chandra, .,2020).

Il existe donc un grand besoin d'améliorer la production de lipase microbienne, en tenant compte de plusieurs facteurs, notamment la composition des déchets de poisson et les besoins nutritionnels des souches microbiennes (Chandra.,2020).

Le salage à sec était utilisé comme méthode de conservation de la viande en raison de l'utilisation généralisée de la technologie du froid, qui a perdu de sa pertinence aujourd'hui. Cependant, le processus a été mis à jour et modifié pour produire un produit carné savoureux et beau (Wickramasinghe et *al.*,2019, Ribeiro et *al.*,2019).

Les lipides du tissu adipeux et du muscle participent également à une lipolyse intense, qui produit des acides gras libres grâce à l'action des lipases, qui dans un deuxième temps deviennent des substances volatiles après oxydation (Yang et *al.*, 2019). Ces réactions enzymatiques influencent fortement les profils sensoriels des jambons crus (Gligor et *al.*,2019). Le niveau d'activité des enzymes musculaires dépend de manière significative des caractéristiques du jambon cru, telles que l'âge du croisement, et des facteurs environnementaux de transformation tels que la température, le temps, l'activité de l'eau, le potentiel ox-red et la salinité (Zhou et *al.*, 2019, Lee et *al.*, 2019).

Par conséquent, les lipases et les protéases sont généralement régulées par le système enzymatique musculaire, qui sont essentielles pour normaliser la transformation et/ou améliorer la saveur du jambon sec (Chandra.,2020).

5.8.5. Lipase utilisée comme biocapteurs dans l'industrie alimentaire

Deux parties importantes des biocapteurs sont combinées avec leurs propriétés uniques, puisque le capteur physico-chimique est utilisé comme signal mesurable et le deuxième compartiment est d'origine biologique pour fournir une analyse spécifique, une des parties d'origine biologique appelée lipase (Chandra.,2020).

Il existe également un substrat commun, la tributyrine attribuée comme origine de diverses lipases. Pour les lipases, plusieurs bactéries *Bacillus subtilis* et *Chromobacter viscosus* et les champignons *Rhizomucor miehei*, *Rhizopus miehei*, *Fusariumsolani* sont cités pour l'hydrolyse de la tributyrine en dibutyryne et acide butyrique (Chandra.,2020).

Pour la détermination quantitative des triacylglycérols, les lipases immobilisées sont utilisées comme biocapteurs en raison de leur précision et de leur efficacité. Les lipases sont d'une importance vitale dans l'industrie alimentaire, en particulier dans les graisses, les huiles et les boissons gazeuses (Chandra.,2020).

En utilisant la lipase comme biocapteur dans les méthodes analytiques et quantitatives, les triacylglycérols sont décomposés en glycérol. Un biocapteur d'impédance d'onde acoustique de surface a été développé pour la détermination des pesticides organophosphorés

par l'hydrolyse de lipase. Il peut également être utilisé pour l'analyse des résidus de pesticides dichlorvos dans les légumes (Chandra.,2020).

En se mélangeant avec la glucose oxydase, la lipase peut être immobilisée sur une électrode pH/oxygène et utilisée comme biocapteur lipidique, et peut également être utilisée pour analyser des échantillons de triglycérides et de cholestérol sanguin (Chandra.,2020).

Actuellement, les méthodes chromatographiques et spectroscopiques sont insuffisantes pour la quantification et la détermination des résidus de pesticides dans l'eau. L'estimation et la détection des triglycérides sont un paramètre cliniquement important et sont associées à des problèmes cardiaques. Un autre biocapteur industriel pour l'analyse du méthyl parathion et de la tributyrine est un biocapteur potentiométrique basé sur la lipase de *Candida rugosa* (Chandra.,2020).

5.8.6. Dans la transformation des œufs

Un large éventail de propriétés telles que moussant, gélifiant, émulsifiant dans la pâte et la mayonnaise ainsi que l'amélioration de la texture des œufs de boulangerie fournissent des ingrédients pratiques pour l'industrie alimentaire (Chandra.,2020).

Les propriétés émulsifiantes des lipides de l'œuf sont renforcées par la lipase pour de meilleures performances et des taux d'ajout de jaune d'œuf plus faibles dans les recettes contrôlées, telles que les vinaigrettes et les produits de type sauce mayonnaise, de sorte que les lipides de l'œuf sont responsables de ses propriétés émulsifiantes (Chandra, P.,2020).

Le jaune d'œuf est composé de 50 % d'eau, de 32% lipides et de 16% protéines, une émulsion complexe huile-eau, dont 80% lipides sont de la phosphatidylcholine et environ 1/3 des lipides sont des phospholipides et il contient également de la phosphatidyléthanolamine (Chandra.,2020).

6. Xylanases

6.1. Définition

Les xylanases (EC 3.2.1.8) sont des protéines ou polymères d'acides aminés constitués d'une chaîne principale d'unités xylose reliées entre elles par des liens β (1,4). Ces enzymes extracellulaires sont produites par divers micro-organismes tels que des bactéries, des

actinomycètes, des levures, des champignons (*P. chrysogenum*) et de nombreux autres systèmes microbiens (Richhariya et al, 2021).

Et comme tous les enzymes ont une activité biologique particulière. Les xylanases sont un groupe important d'enzymes dépolymérisantes hydrolytiques qui décomposent le polysaccharide naturel xylane, qui est l'un des plus importants composants de la paroi cellulaire végétale dans le xylose (Richhariya et al, 2021).

Plus précisément, ces enzymes clés endohydrolyse des liaisons (1-4) - β -D-xylosidique dans la structure xylane de la biomasse (Basit et al, 2020).

6.2. Origine des xylanases

De nombreuses études ont rapporté la production de xylanase à partir de champignons, de bactéries, de levures, d'algues (Mandal, 2015), de graines et d'escargots, mais les principales sources de ces enzymes sont les champignons et les bactéries. Selon la source, les xylanases ont des propriétés différentes qui les rendent utiles pour une application ou une autre (Shah et al., 2019).

6.3. Structure des xylanases

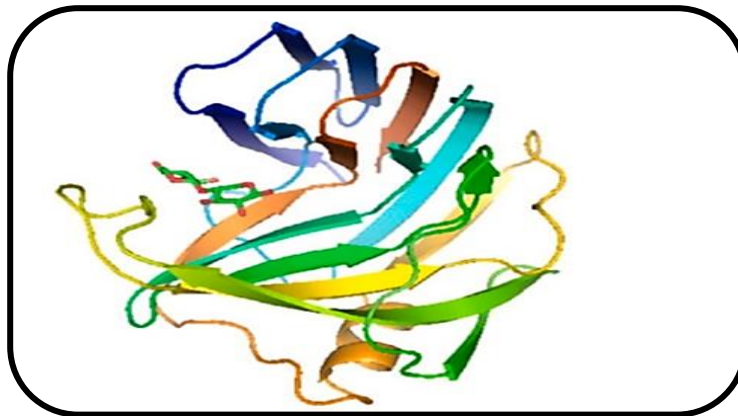


Figure 10 : Structure tridimensionnelle d'une xylanase (Chares et Muthiah., 2021).

6.4. Classification des xylanases

Les xylanases sont classées en fonction du poids moléculaire, du point isoélectrique (pI), de la structure cristalline et des propriétés cinétiques ou du mécanisme d'action, spécificité du substrat et profil du produit (Motta et al., 2013 et Walia et al., 2017).

- **En fonction de leurs propriétés physicochimiques et leur point isoélectrique (pI)**

Les xylanases sont divisées en deux groupes, une enzyme de faible poids moléculaire (30 kDa) avec un pI acide (Basit et *al.*,2018) et une enzyme de poids moléculaires élevés (Alvarez et *al.*,2016), et les valeurs de pI sont généralement alcalines (8,0-9,5) (Polizeli et *al.*,2005).

- **En fonction de leur structure primaire et la structure des domaines catalytiques**

Sur la base des similitudes dans la structure du domaine catalytique, les xylanases ont été classées en différentes familles par la base de données des enzymes activant les glucides (Basit et *al.*,2018).

- Les familles GH7, GH16, GH52 et GH62 sont des Endo-1,4- β xylanases (Uday et *al.*,2016 et Chadha et *al.*,2019).
- Les familles comprennent GH10 (anciennement F) et GH11 (anciennement G).

Il possède un domaine catalytique $\beta(1\rightarrow4)$ -xylanase. Ces deux familles diffèrent par la séquence, la structure tridimensionnelle, la spécificité du substrat, les propriétés catalytiques et le mécanisme (Basitetal.,2018).

- **En fonction de leur mode d'action**

Selon (Arokika et *al.*, 2019), un grand nombre d'enzymes d'hémicellulose et leurs mécanismes d'actions ont nécessaires pour une hydrolyse complète des polymères complexes en monomères. Les diverses enzymes dégradant le xylane sont :

- **Endo-1,4- β -xylanases (EC 3.2.1.8)**

L'endo-1,4- β -xylanase clive les liaisons β -1,4-glycosidiques internes du squelette du xylane et libère de petites molécules de xylooligosaccharides avec des degrés de polymérisation plus élevés, tels que la xylose, le xylobiose et le xylotriose (Burlacu et *al.*,2016).

Les liaisons sélectionnées pour l'hydrolyse du xylane ne sont pas attaquées au hasard, mais cette attaque dépend plutôt de la ramification, de la longueur de la chaîne et de la présence de substituants dans la molécule de substrat (Burlacu et *al.*, 2016).

- **β -Xylosidase (xylan-1,4- β -xylosidase ; EC.3.2.1.37)**

La β -D-xylosidase clive l'extrémité non réductrice des xylooligosaccharides, tels que les résidus xylose. Il peut s'agir de monomères, de dimères ou de tétramères dont le poids moléculaire varie de 26 à 360 kDa (Jordan et *al.*, 2010).

Après l'hydrolyse séquentielle du xylane par la xylanase, la β -xylosidase entre en jeu et joue un rôle important dans l'hydrolyse finale des oligomères courts en monomères (Andrade et *al.*, 2004). En général, le xylobiose est leur meilleur substrat car la β -xylosidase purifiée n'hydrolyse pas le xylane.

– **α -glucuronidase (α -glucosiduronase ; EC.3.2.1.139)**

Selon Polizeli et *al* (2005), l' α -glucuronidase est nécessaire pour le clivage de la liaison α -1,2-glycosidique entre l'acide D-glucuronique ou son 4-O-méthyl éther et l'unité xylopyranosyle terminale.

– **α -arabinofuranosidase (α -L-arabinofuranosidase EC.3.2.1.55)**

L'arabinofuranosidase est une alpha-(1,2), alpha-(1,3), alpha-(1,5) alpha-(L)-terminale. Elle est connue d'hydrolyser les résidus arabinofuranosyle. (Contesinia et *al.*, 2017).

6.5. Caractéristiques de xylanases

Xylanases provenant de divers micro-organismes (bactéries, champignons, algues, levures, protozoaires, crustacés, escargots, insectes, etc.), ont été caractérisées et ont des propriétés différentes telles que le pH et température, humidité, temps d'incubation pour maintenir leur fonctionnalité (Chadha et coll., 2019).

6.6. Production des xylanases

La xylanase est largement présente dans la nature, notamment dans les bactéries, les champignons, les algues, les levures, les protozoaires, les crustacés, les escargots, les protozoaires, les insectes, etc. utilisés dans leur production (Alokika et *al.*, 2019).

- **Production bactérienne**

Selon Gupta et *al* (2015), des bactéries telles que diverses *Bacillus sp.*, *Paenibacillus sp. N1*, *Arthrobacter sp. MTCC*, présentait une activité xylanolytique significative, la température optimale de l'endoxylanase variant entre 30 et 60 °C.

Tableau IX : Production de xylanase par des souches bactériennes (Alokika et *al.*, 2019).

Souches bactériennes						
	Température (C°)	PH	Période d'incubation(h)	Source de carbone	Source d'azote	Production de xylanase
<i>Bacillus pumilus</i>	35	09	96	Son de blé	Peptone, extrait de levure	35.156 U/g
<i>Bacillus circulans D1</i>	45	09	48	Xylan	Peptone, Extraite	19 U/ml
<i>Paenibacillus sp. N1</i>	50	09	72	xylose	(NH ₄) 2H ₂ P ₄	72U/g

- **Production fongiques**

Les niveaux de xylanase obtenus à partir de cultures fongiques sont généralement beaucoup plus élevés que ceux obtenus à partir de levures ou de bactéries (Andrade et *al.*, 2013).

6.7. Stabilité de la xylanase

La stabilité thermique accrue des xylanases est due à un rapport Thr/Ser plus élevé, une augmentation du nombre de résidus chargés, notamment Arg, résultant l'interaction polaires améliorées et amélioration de la stabilisation des structures secondaire, impliquant un plus grand nombre de résidus dans les brins bêta et une stabilisation de la région de l'hélice alpha (Nisha et *al.*, 2019).

Certaines xylanases améliorent leur stabilité en compactant la structure protéique avec un nombre plus élevé de paires d'ions ou de résidus aromatiques à la surface des protéines (Nisha et *al.*, 2019).

6.8. Application des xylanases dans l'industrie agro-alimentaire

6.8.1. Dans la Boulangerie

La xylanase est utilisée dans l'industrie alimentaire comme la pâtisserie, le pain fabriqué à partir de blé qui contient des hémicelluloses telles que l'arabinoxylane (Bhardwaj et *al.*, 2019).

La xylanase peut solubiliser les arabinoxylanes non extractibles par l'eau en arabinoxylanes extractibles par l'eau. Cela facilite une répartition homogène de l'eau et améliore la formation du réseau de gluten dans toute la pâte. L'ajout de xylanase améliore les propriétés rhéologiques de la pâte telles que la douceur, l'extensibilité et l'élasticité, ainsi que le volume spécifique du pain et la fermeté de la mie. Les produits de dégradation de l'arabinoxylane présents dans le pain, les arabinoxyloligosaccharides, ont des effets bénéfiques sur la santé (Bhardwaj et *al.*, 2019).

Des études montrées le rôle des endoxylanases GH11 de *Bacillus subtilis* dans la solubilisation de l'arabinoxylane. Cela augmente la viscosité et le volume de la pâte et réduit le caractère collant du gluten et de la pâte, ce qui donne une mie lisse et fine. La xylanase GH11 de *Penicillium occitanis* a amélioré le processus de fabrication des moules, notamment en réduisant l'absorption d'eau (8 %) et en améliorant l'augmentation de la pâte (36,8 %), le volume spécifique (34,9 %) et la cohésion. Les propriétés rhéologiques et sensorielles (texture, saveur, goût, moelleux et acceptabilité globale) du pain sont améliorées. Le pain à base de xylanase avait une faible élasticité et des propriétés caoutchouteuses (Bhardwaj et *al.*, 2019).

L'ajout de xylanase a également augmenté la durée de conservation, ce qui a réduit la résistance et le vieillissement pendant le stockage. Panzea, une xylanase de nouvelle génération issue de *Bacillus Licheniformis*, peut aider à améliorer les propriétés de la pâte à de faibles niveaux d'enzymes. Cela permet d'obtenir la texture, l'apparence, la structure du pain et de la mie souhaitée. De même, la xylanase recombinante (r-XynBS27) obtenue à partir de la plante *Pichia pastoris* (gène xynBS27 de *Streptomyces sp. S27*) utilisé comme additif dans le processus de fabrication du pain. La xylanase recombinante a amélioré le volume spécifique et réduit la teneur en sucre tout en réduisant la résistance, la consistance et la rigidité (Bhardwaj et *al.*, 2019).

6.8.2. Dans la clarification des jus de fruits

Le procédé enzymatique d'extraction et de clarification des jus de fruits est largement utilisé. Les jus de fruits crus contiennent des polysaccharides tels que la cellulose, l'hémicellulose, l'amidon-pectine et la lignine, qui sont liés à la surface et réduisent la qualité du jus, comme une couleur trouble et une viscosité élevée (Danalache et *al.* 2018).

L'utilisation d'enzymes réduit la viscosité et empêche l'agglutination en éliminant les solides en suspension et insolubles par centrifugation et filtration. Elle augmente l'éclat, l'arôme et la couleur du jus (Danalache et *al.* 2018). Xylanase *Streptomyces sp* utilisée pour éclaircir l'orange, le musamba et l'ananas avec une luminosité de 20,9 %, 23,6 % et 27,9 % (Rosmine et *al.* 2017).

La xylanase partiellement purifiée utilisée dans l'industrie des jus de fruits pour augmenter la luminosité des jus de pomme (17,8 %), d'orange (18,4 %) et de raisin (17,9 %) (Adigüzel et Tunçer 2016).

La xylanase utilisée dans la transformation des kiwis, des pommes, des pêches, des oranges, des abricots, des raisins et des grenades. (Adigüzel et *al.* 2019).

7. Glucose-oxydase

7.1. Définition

La glucose-oxydase (EC.1.1.3.4) est une oxydoréductase appartenant à la famille des GMC oxydoréductases (glucose/méthanol/choline) (Singh et al, 2019).

La glucose-oxydase est une holoenzyme avec un cofacteur flavine adénine dinucléotide constitué de deux sous-unités identiques (80 kDa). Elle utilise l'oxygène atomique comme accepteur d'électrons pour catalyser l'oxydation du glucose en glucono- δ – lactone avec la production concomitante de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). La glucono- δ -lactone est ensuite hydrolysée en acide gluconique par la β -lactamase, et le peroxyde d'hydrogène généré est dégradé en oxygène et en eau par la catalase (Singh et al, 2019).

7.2. Origine de glucose-oxydase

La glucose oxydase peut être produite par plusieurs souches fongiques, notamment : *Aspergillus sp.*, *Penicillium sp.*, *Aspergillus tubingensis*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus*

carbonarius, *Aspergillus flavus* et *Aspergillus niger*, *Penicillium notatum*, *P. fusiculosum*, *P. amagasakiense*, *P. variable* et *P. Fellutanum* (Singh et al., 2019).

7.3. Structure de glucose-oxydase

La glucose oxydase (β -D-glucose : oxygène 1-oxydoréductase, EC 1.1.3.4) appartient à la famille des glucose-méthanol-choline oxydoréductase, comprenant par exemple la cholestérol oxydase (EC1.1.3.6), pyranose oxydase (EC1.1.3.10) ou méthanol oxydase (EC 1.1.3.13) agent oxydant alcools primaires et secondaires (Mano.,2019).

Toutes ces enzymes partagent un domaine conservé impliqué dans la liaison au fragment adénosine diphosphate du FAD et, généralement, son résidu est retenu comme base lors de la demi-réaction de réduction. GOx cristallisé à partir de *Aspergillus niger* (PDB : 1CF3, 1GAL, 3QVP, *Penicillium amagasakiense* (PDB : 1GPE) est une glycoprotéine homodimérique avec une structure moléculaire relative la masse varie de 147 à 180 kDa, selon le degré de glycosylation (Mano.,2019).

Les structures d'*Aspergillus niger* et d'*Aspergillus amizakii* ont été largement comparées et analysées. Chaque monomère possède un dinucléotide flavine adénine profondément enfoui. Le cofacteur (FAD/FADH₂) se trouve à environ 15 Å de la surface de l'enzyme. FAD est serré mais pas lié de manière covalente. L'hydrophobie, les ponts salins et les liaisons hydrogène relient les deux monomères. Une grande poche profonde mesurant environ 10 Å × 10 Å permet d'accéder aux actifs, Le site est suffisamment grand pour accueillir le substrat. La comparaison directe des caractéristiques biochimiques de GOx devient difficile en raison de conditions expérimentales différentes (Mano.,2019).

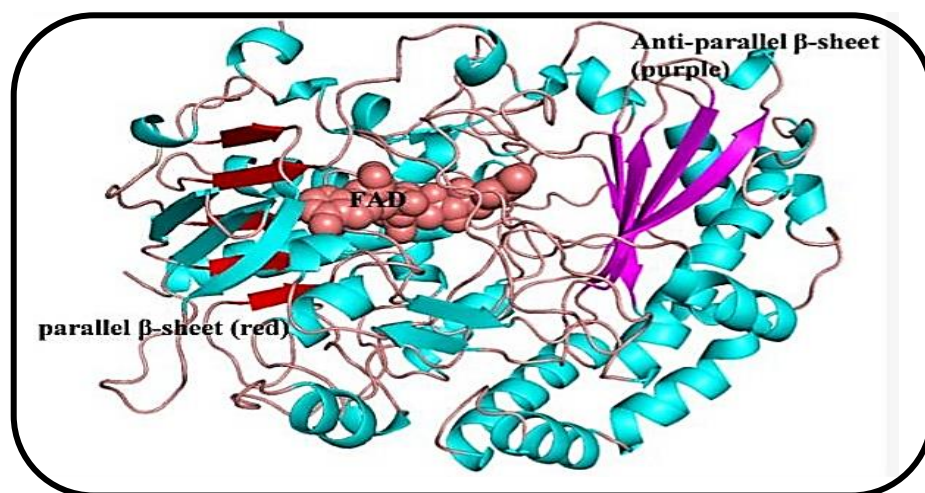


Figure 11 : La structure de la glucose oxydase du *penicillium amagasakiense* (Wang et al., 2022).

7.4. Caractéristiques et production de la glucose oxydase

La glucose oxydase (β -D-glucose : oxygène 1-oxydoréductase ; GOx. EC 1.1.3.4) est une oxydase avec plusieurs avancées technologiques dans des applications à grande échelle, parmi lesquelles la production de D-gluconate (Kornecki,2020).

La glucose oxydase est produite par un large éventail de micro-organismes, notamment des plantes, des animaux, des bactéries et des champignons. L'objectif principal de la glucose oxydase dans ces sources est de produire de l'hydrogène gazeux (Kornecki,2020).

Le peroxyde (un sous-produit de la catalyse enzymatique) agit comme un agent antibactérien et antifongique. Par exemple, la glucose oxydase est présente dans le miel et a des effets antibactériens et antifongiques. L'activité bactérienne dépend de l'accumulation de peroxyde d'hydrogène dans le produit. Pour les applications commerciales, la glucose oxydase est produite et purifiée à partir de champignons, notamment *Aspergillus* et *Penicillium* (Kornecki,2020).

La demande de glucose oxydase augmente en raison de ses applications croissantes dans différents domaines industriels. Cependant, les souches fongiques de type sauvage produisent généralement de la glucose oxydase, ont une faible capacité de fermentation, une purification compliquée et une faible efficacité enzymatique. De plus, les impuretés de la glucose oxydase, y compris d'autres enzymes (par exemple la catalase, les cellulases et l'amylase), empêchent son utilisation dans certaines applications et nécessitent une purification complète des enzymes (Kornecki,2020).

En plus du coenzyme FAD, les glucose oxydases d'*aspergillus niger* et de *penicillium amagasakiense* ont également deux histidines dans le site actif, His516 (pKa 6,9) et His559 (pKa > 8,0), qui agissent comme des bases et ont un effet acide. La demi-réaction oxydative du β -D-glucose en acide D-gluconique. His559 a une forte liaison d'hydrogène avec Glu412 (pKa 3,4) et la molécule d'eau devant le cycle flavine. Ces résidus d'acides aminés sont nécessaires à la catalyse, la protonation de ces résidus affecte fortement les constantes cinétiques (Kornecki,2020).

7.5. Mode d'action

La glucose oxydase catalyse l'oxydation du β -D-glucose en D-glucono-delta-lactone, produisant le sous-produit peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), l'oxygène moléculaire agissant

comme accepteur d'électrons. Le premier produit subit une hydrolyse non enzymatique pour acide D-gluconique (Kornecki et *al.*,2020).

La glucose oxydase est hautement spécifique de l'anomère β du D-glucopyranose (le meilleur substrat), tandis que l'anomère α est un substrat très pauvre (par rapport à l'activité du β -D-glucose est de 0,64 %). Le xylose et l'idose sont des substrats très pauvres (respectivement 0,03 % et 0,02 % d'activité par rapport au β -D-glucose). En général, l'affinité pour la glucose oxydase est au moins 20 et 5 fois plus élevée. Le β -D-glucopyranose a un taux de renouvellement plus élevé que tout autre monosaccharide. Pour le D-mannose, le D-galactose et le D-xylose, les constantes de spécificité étaient 400, 1 000 et 3 000 fois inférieures à celles du β -D-glucopyranose (Kornecki et *al.*,2020).

L'effet inhibiteur enzymatique de l'oxydation du β -D-glucopyranose et de la D-glucono-delta-lactone est très faible. L'action catalytique de la glucose oxydase dépend du cofacteur FAD qui agit comme un accepteur d'électrons initial (sous forme d'hydrure) et subit une réduction en FADH⁻. FADH⁻ est ensuite oxydé, transférant des électrons (sous forme d'hydrure) à l'oxygène moléculaire, qui est réduit en peroxyde d'hydrogène (Kornecki et *al.*,2020).

La cinétique à l'état d'équilibre de l'oxydation du β -D-glucopyranose par l'oxygène moléculaire suit un mécanisme bicinétique. Pour la demi-réaction réductrice, le β -D-glucopyranose est oxydé en D-glucono- δ -lactone en transférant un proton. Groupe C1-hydroxyle attaché au groupe basique situé sur l'enzyme (His516), un transfert direct d'hydrure se produit de sa position C1 vers la position N5 du cycle isoalloxazine cycle FAD. La demi-réaction d'oxydation se déroule via un ou deux mécanismes de transfert d'électrons, selon le type de substrat d'oxydation (oxygène, benzoquinones, naphthoquinones, sels Ferro cènes, etc.) (Kornecki et *al.*,2020).

En ce qui concerne l'oxygène, tout d'abord, la diffusion est très rapide dans le site actif (favorisant thermodynamiquement la diffusion de l'O₂ dans le site actif), et la coenzyme réduite (FADH⁻) est réoxydée par l'oxygène en FAD, qui à son tour est réduit en peroxyde d'hydrogène. La réaction se déroule via deux étapes de transfert d'électrons uniques ; l'anion superoxyde et le radical flavine semiquinone sont des intermédiaires de réaction (Kornecki et *al.*,2020).

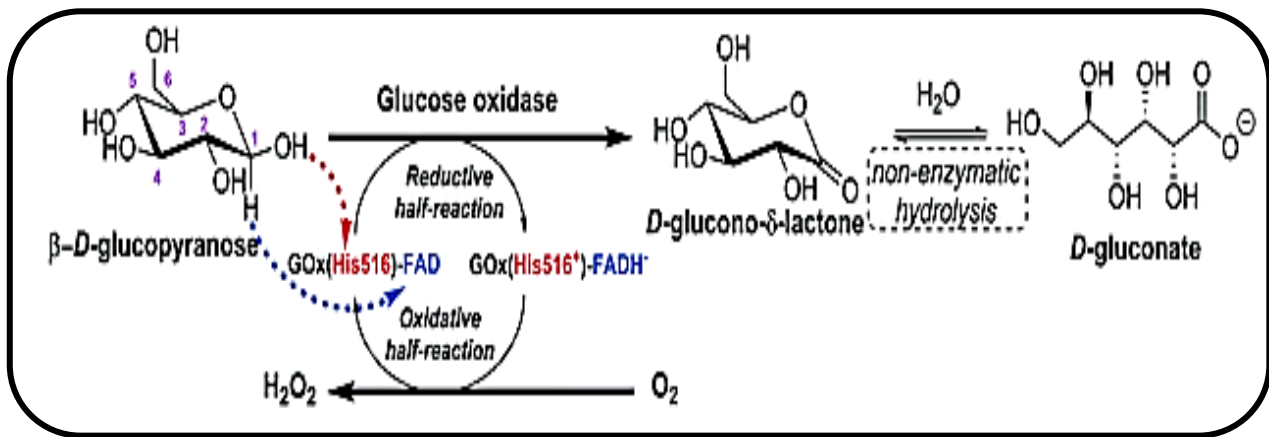


Figure 12 : Représentation du mécanisme d'action de la glucose oxydase dans l'oxydation du glucose en d -glucono-δ-lactone (Kornecki et al., 2020)

7.6. Application de la glucose oxydase dans l'industrie agro-alimentaire

GOx a plusieurs applications importantes dans l'industrie alimentaire, notamment l'industrie de la boulangerie, la production de boissons, la production de gluconate et la conservation des aliments. Dans l'industrie de la boulangerie, Gox a été utilisé comme antioxydant pour améliorer la qualité des produits de boulangerie. Le peroxyde d'hydrogène produit par GOx augmente l'élasticité et la viscosité de la pâte, et la lipase et GOx peuvent prolonger la qualité et la durée de conservation du pain (Bauer et al.,2022).

En général, la qualité du pain dépend de la qualité du blé et la rhéologie de la pâte dépend de la quantité d'enzyme ajoutées. GOx provoque la formation de fibres protéiques dans la pâte (Bauer et al.,2022).

GOx est également utilisé pour abaisser la teneur en alcool du vin. Des températures plus élevées pendant la saison de croissance peuvent augmenter la teneur en glucose des raisins. Gox peut réduire la teneur en alcool du vin résultant en abaissant le niveau de glucose converti en alcool par fermentation anaérobie. Le peroxyde d'hydrogène produit par GOx a un effet bactéricide contre les micro-organismes acides et caustiques du lait produits pendant le processus de fermentation. Le peroxyde d'hydrogène produit peut-être éliminer par l'enzyme catalase, qui convertit le H₂O₂ en oxygène et en eau. La combinaison de GOx avec la catalase entraîne des taux d'alcool plus faibles que la GOx seule car le glucose est converti en acides gluconique (Bauer et al.,2022).

GOx a également été intégré dans des dispositifs analytiques appelés biocapteurs pour mesurer la quantité de glucose dans les liquides. Ces dispositifs combinent un composant biologique (souvent une sorte d'enzyme ou d'anticorps) avec un transducteur physique ou

électrique et un composant électrique pour permettre la mesure de l'analyte d'intérêt avec un transducteur physique ou électrique et un composant électrique pour permettre la mesure de l'analyte d'intérêt. Par exemple ont utilisé une « langue » bioélectronique composée d'enzymes (tyrosinase et glucose-oxydase) et de nanoparticules de polypyrrole, pour mesurer la teneur en alcool du moût et du vin a été construite. Les informations de ce capteur permettent de prédire les propriétés du vin fini au début de la vinification (Bauer et *al.*,2022).

Lopez et al a développé un biocapteur à base de GOx et de peroxydase pour mesurer les niveaux de glucose dans les boissons telles que le jus d'orange et les boissons énergisantes. Enfin, Mason, Longo et Scampicchio ont développé un biocapteur électrochimique composé de GOx immobilisé sur une membrane en nano fibres de nylon pour mesurer les niveaux de glucose dans la bière brassée (Bauer et *al.*,2022).

En éliminant l'oxygène et le glucose des aliments, GOx peut être utilisé pour prolonger la durée de conservation pour deux raisons. Premièrement, lors de l'étape de conservation des aliments, une réaction secondaire entre les groupes fonctionnels nucléophiles des acides aminés et les carbonyles actifs des sucres peut se produire, conduisant à un brunissement non enzymatique par la réaction de Maillard. En éliminant les sucres indésirables des aliments en conserve, le brunissement est évité. Par exemple, l'utilisation de GOx pour éliminer le glucose résiduel des œufs séchés améliore leur digestibilité. Le peroxyde d'hydrogène produit lors de cette réaction aide également à tuer tous les microbes pathogènes pouvant être présents dans l'œuf cru. L'excès de peroxyde d'hydrogène peut ensuite être éliminé par l'enzyme catalase. La combinaison de GOx et de catalase peut également être utilisée pour contrôler le brunissement non enzymatique des fruits et de la pâte de tomates (Bauer et *al.*,2022).

La deuxième raison est que l'excès d'oxygène peut favoriser la croissance bactérienne et que l'élimination de l'excès d'oxygène inhibe la croissance bactérienne aérobie. L'élimination de l'excès d'oxygène est essentielle pour la mise en conserve et ont étudié l'élimination de l'oxygène dissous de l'eau par réduction catalysée par le glucose par la glucose oxydase et la catalase. GOx peut également être utilisé pour éliminer l'oxygène des boissons en conserve (comme la bière et le vin) afin de préserver la couleur et la saveur. La dégradation de la mayonnaise est associée à la peroxydase lipidique, et la GOx et la catalase peuvent retarder la peroxydation lipidique (Bauer et *al.*,2022).

GOx est également utilisé directement comme agent antimicrobien dans l'industrie alimentaire. Elle a été démontrée qu'il inhibe la croissance de nombreuses bactéries

pathogènes telles que *Clostridium perfringens*, *Campylobacter jejuni*, *Salmonella infantis*, *Staphylococcus aureus* et *Listeria monocytogenes*. (Vartiainen et al., 2005) ont découvert que la GOx immobilisée inhibait la croissance d'*E. coli* et de *Bacillus subtilis*, et Malherbe et al. ont découvert que *S. cerevisiae* produisait de la GOx à partir d'*A. niger* avait une activité antibactérienne contre les bactéries qui produisent de l'acide lactique et de l'acide acétique. Les films de polyamide et d'ionomère immobilisés par GOx ont amélioré la croissance de *E. coli* CNCTC 6859, *Pseudomonas fluorescens* CNCTC 5793, *Lactobacillus helveticus* CH-1, *Listeria ivanovii* CCM 5884 et *Listeria innocua* CCM 4030 sur milieu gélosé inhibée. (Yuan et al., 2015) ont développé un système antibactérien photodynamique composé de glucose, de GOx et de peroxydase de raifort pour inactiver les pathogènes bactériens et fongiques (Bauer et al., 2022).

Enfin (Xu et al., 2016), un biocapteur composé d'anticorps, de GOx, de nanoparticules d'or, de billes magnétiques, de polydopamine et de nanocomposites polymères a été développé pour détecter les pathogènes dans les aliments tel que *E. coli* O157 :H7.

Conclusion générale

Les enzymes sont utilisées en industrie agroalimentaire pour diverses applications, telles que la production de sucre, la transformation de l'amidon, l'amélioration de la texture des produits, la clarification des jus de fruits et la production de vin. Les entreprises du domaine de l'agroalimentaire continuent de rechercher des enzymes plus efficaces pour minimiser les coûts de production, améliorer la qualité des produits et répondre aux demandes des consommateurs pour des produits plus sains.

De plus, les dernières avancées technologiques en matière de biotechnologie ont également permis le développement d'enzymes personnalisées pour répondre aux besoins spécifiques de l'industrie agroalimentaire.

A

Abada E. (2019). Application of Microbial Enzymes in the Dairy Industry. *Enzymes in Food Biotechnology*, 61-72.

Adigüzel AO, Tunçer M (2016) Production, characterization and application of a xylanase from *Streptomyces* sp. AOA40 in fruit juice and bakery industries. *Food Biotechnol* 30:189–218

Adiguzel G, Faiz O, Sisecioglu M et al (2019) A novel endo- β -1,4-xylanase from *Pediococcus acidilactici* GC25; purification, characterization and application in clarification of fruit juices. *Int J Biol Macromol* 129:571–578.

Adrio J.L., Demain L.A. (2014). Microbial enzymes: Tools for biotechnological process. *Biomolecules*, 4: 117-139.

Aguilar C.N., Gutiérrez-Sánchez G., Rado-Barragán P. A., Rodríguez-Herrera R., Martínez-Hernandez J.L., Contreras-Esquivel J.C. (2008): Perspectives of solid state fermentation for production of food enzymes. *American J. Biochem. Biotechnol.* 4:354-366p

Ahmad, I. Z., Tabassum, H., Ahmad, A., & Kuddus, M. (2018). Food enzymes in pharmaceutical industry: perspectives and limitations. In M. Kuddus (Ed.), *Enzymes in food technology* (pp. 41-62). Singapore: Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-1933-4_3.

Ali, S., Khan, SA, Hamayun, M. et Lee, IJ (2023). Les progrès récents dans l'utilité des lipases microbiennes : un examen. *Microorganismes*, 11 (2), 510.

Alokika., Singh B. (2019). Production, caractéristiques et applications biotechnologiques des xylanases microbiennes. *Appl Microbiol Biotechnol* 103, 8763–8784.DOI : org / 10.1007 / s00253-019-10108-6.

Alvarado-Ramírez, L., Rostro-Alanis, M., Rodríguez-Rodríguez, J., Sosa-Hernández, JE, Melchor-Martínez, EM, Iqbal, HMN et Parra-Saldívar, R. (2021). Biocapteurs enzymatiques (simples et multiples) et nanozymes : développements récents et leurs nouvelles applications dans le nexus eau-alimentation-santé. *Biocapteurs*, 11(11), 410.

Álvarez-Cervantes, J., Díaz-Godínez, G., Mercado-Flores, Y. (2016). Analyse phylogénétique de la β -xylanase SRXL1 de *Sporisorium reilianum* et sa relation avec les

familles (GH10 et GH11) des ascomycètes et des basidiomycètes, 6 (24010), 1-9, DOI : org / 10.1038 / srep24010.

Andrade SV, Polizeli, Terenzi, Jorge JA. (2004). Effet de la source de carbone sur les propriétés biochimiques de la β xylosidase produite par *Aspergillus versicolor*. *Process Biochem* 39 (12), 1931–1938. DOI: org/10.1016/j.procbio.2003.09.024.

Artificial enzymes, ed. Ronald Breslow, 2005. Print (ISBN 9783527311651); Online (ISBN 9783527606641).

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

Atek, Y., & Benouali, Y. (2016). Mise en évidence des activités cellulolytiques, xylanolytiques et amylolytiques issues de différentes souches fongiques (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

B

Badgujar R.T.M.a.S.B (2010). Biological aspects of proteolytic enzymes: A Review. *J. Pharm Res.*, 3(9) : 2048-2068.

Badruna, L. (2017). Création d'enzymes multimodulaires à façon dédiées à la dégradation de substrats complexes. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

Bahouli, M., Zidalmal, B. (2020). Valorisation des déchets lignocellulosiques par fermentation en milieu solide pour la production de cellulases microbiennes. Mémoire de Master en Biochimie, Université des Frères Mentouri, Constantine 1.

Barrios-González. J. (2012). Fermentation à l'état solide : physiologie du milieu solide, sa base moléculaire et ses applications. *Processus of Biochemistry*. (Oxford, Royaume-Uni), 47(2), 175–185.

Basit A., Jiang W., Rahim K. (2020). Xylanase and Its Industrial Applications. *Biotechnological Application of Biomass* [en ligne], (page consultée le 04/05/2022). DOI : 10.5772/ intechopenxylanase

Basit, A., Liu, J., Rahim, K., Jiang, W., et Lou, H. (2018). Xylanases thermophiles : du banc au flacon. *Revue critiques en biotechnologie*, 1–14. DOI : 10.1080 / 07388551.2018.1425662.

Bauer, JA, Zámocká, M., Majtán, J. et Bauerová-Hlinková, V. (2022). La glucose oxydase, une enzyme « Ferrari » : sa structure, sa fonction, sa production et ses propriétés à la lumière de diverses applications industrielles et biotechnologiques. *Biomolécules*, 12 (3), 472. <https://doi.org/10.3390/biom12030472>

Begum, M. F., & Absar, N. (2009). Purification et caractérisation de la cellulase intracellulaire d'*Aspergillus oryzae* ITCC-4857.01. *Mycobiology*, 37, 121-127.

Belmessikh A. Optimisation de la production de la protéase neutre par *Aspergillus oryzae* sur milieu à base de déchets de tomates. Comparaison entre milieu solide et milieu liquide. Mémoire de Magister en Microbiologie Appliquée, Université Mentouri, Constantine, Algérie. 2011.

Belmessikh A., Benkahoul M., Boukhalfa H., et Mechakra-Maza A (2013). Optimisation à l'aide d'un plan d'expériences de la production d'une protéase fongique sur milieu à base de déchets agroindustriels. *Déchets sciences et techniques*, 2268-7289.

Benjamin, S., & Pandey, A. (2001). Isolation and characterization of three distinct forms of lipases from *Candida rugosa* produced in solid-state fermentation. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 44(2), 213–221.

Berry, D. R., & Paterson, A. (1990). Enzymes in the food industry. In *Enzyme Chemistry* (pp. 306-351). Springer, Dordrecht

Bhardwaj, N., Kumar, B., & Verma, P. (2019). A detailed overview of xylanases: an emerging biomolecule for current and future prospective. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(1), 1-36.

Bhunja, B., Basak, B., Chakraborty, S., Dey A. (2014). A review on application of microbial protease in bioremediation. *Industrial & Environmental Biotechnology*, Chapter 14.

Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2020). State-of-the-art strategies and applied perspectives of enzyme biocatalysis in food sector: current status and future trends. *Critical Reviews in Food*

Science and Nutrition, 60(12), 2052-2066. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2019.1627284>. PMID:31210055.

Binod, P., Papamichael, E., Varjani, S., & Sindhu, R. (2019). Introduction to green bioprocesses: Industrial enzymes for food applications. In *Green Bio-processes* (pp. 18). Springer, Singapore.

Boukhalfa.H.(2015). Etude de la production de la protéase par *Aspergillus oryzae* sur milieu solide en fermenteur fujiwara. Utilisation des déchets de tomate comme substrat de fermentation. Doctorat en Sciences. Spécialité : Biochimie et Microbiologie Appliquées. Université Mentouri, Constantine, Algérie.

Bourehida F. et Brachene A. (2016). Etude de l'effet de la température sur la production de la protéase alcaline. Tests d'applications biotechnologiques sur l'enzyme. Mémoire de Master en Microbiologie, Université Mentouri, Constantine, Algérie.

Burlacu A, Cornea CP, Roming FI. (2016). Xylanase microbienne : une revue, *Appl Microbiol Biotechnol*, 921(9), 1-9.

C

Cano, N., Barnoud, D., Schneider, S. M., Vasson, M. P., Hasselmann, M., ... & Lavoinne, A. (2007). La Société Francophone de Nutrition Entérale et Parentérale, *Enzymologie. Traité de nutrition artificielle de l'adulte*, 3-12.

Cassas-Goday, L; Duquesne, S; Bordes, F; Sandoval, G; et Marty, A. (2012).

Lipases and phospholipases : Méthodes and protocols. Méth. Mol. Bio. 861.

Chadha, B.S., Kaur, B., Basotra, N., Tsang, A., et Pandey, A. (2019). Xylanases thermostables de champignons et bactéries thermophiles : perspective actuelle. *Bioresource Technology*, 277,195-203, DOI : 10.1016 / j. biortech.2019.01.044

Chandra P., Enespa, Singh R. and Arora P. K. (2020). Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review. *Microb Cell Fact.* 19:169.

Collados, A., Conversa, V., Fombellida, M., Rozas, S., Kim, J. H., Arboleya, J. C., ...&Perezábad, L. (2020). Applying food enzymes in thekitchen. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 100212.

Contesini. F. J, Rodrigues de Melo. R et Harumi .S .H. (2017). An overview of Bacillus proteases: from production to application. *Critical Reviews in Biotechnology*: 38:321– 334.

Contesinia FJ, Liberato MV, Rubio MV, Calzado F, Zubieta MP, Riaño Pachón DM, Squina FM, Bracht F, Skaf MS, Damásio AR. (2017). Caractérisation structurelle et fonctionnelle d'une Larabinofuranosidase α hautement sécrétée d'*Aspergillus nidulans* cultivée sur la bagasse de canne à sucre. *Biochim Biophys Acta Proteins Proteom* 1865 (12),1758–1769. DOI : org/10.1016/j.bbapap.09. 001.

Contrera Gimenes. N, Silveira. E et Tambourgi. E.B. (2019). An Overview of Proteases: Production, Downstream Processes and Industrial Applications,Separation& Purification Reviews, 50(3) :223–243.

D

Dakhmouche-Djekrif, S. (2016). Production et caractérisation de l'amylopullulanase de la levure *Clavispora lusitaniae* ABS7 isolée de blé cultivé et stocké en zones arides [Thèse doctorat]. Université de **Technologie** de Compiègne.

Damodaran, S., & Parkin, KL (2017). La chimie alimentaire de Fennema (5e éd.). Boca Raton: CRC Press.

Danalache F, Mata P, Alves VD, Moldão-martins M (2018) Enzyme-assisted extraction of fruit juices. Elsevier Inc., New York

Das, G., Prasad, M.P. (2010). Isolation, purification & mass production of proteases enzyme from *Bacillus subtilis*. *Int. Res. J. Microbiol.*, 1 (2), 26-31.

Dhillon, A., Sharma, K., Rajulapati, V., Goyal, A. (2017). Proteolytic enzymes. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Production, Isolationand Purification of Industrial Products*.

Dominguez, A., Costas, M., Longo, M. A., & Sanroman, A. (2003). A novel application of solid state culture: Production of lipases by *Yarrowia lipolytica*. *Biotechnological Letters*, 25, 1225–1229.

Dos Santos, A. J.G, Sato, H (2018). Protéases microbiennes : production et application dans l'obtention d'hydrolysats de protéines. *Food Research International* 103 :253–262.

E

Edwards D.R., Handsley M.M. et Pennington C.J. The ADAM metalloproteinases. *J. Mol Aspects Med.*, 2008, 29: 258-289.

Ejaz, U., Sohail, M., & Ghanemi, A. (2021). Cellulases : de la bioactivité à une variété d'applications industrielles. *Biomimétique*, 6 (3), 44.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics6030044>.

Elhadi, R. (2019). Isolement et sélection d'une souche bactérienne productrice de cellulases à partir des excréments d'un dromadaire (*Camelus dromedarius*) (Biskra). Mémoire de Master en Microbiologie Appliquée, Université de Biskra, Algérie.

En ligne Ur **Rehman, H. (2023).** Applications des enzymes pectinolytiques dans les industries de transformation. *Intech Open*. Doi : 10.5772/intechopen.110033.

Ezeilo, U. R., Wahab, R. A., et Mahat, N. A. (2019). Études d'optimisation de la production de cellulase et de xylanase par *Rhizopus oryzae* UC2 en utilisant des feuilles de palmier à huile brutes comme substrat sous fermentation à l'état solide, 156, 1301- 1312. DOI : [org/10.1016/j.renene.2019.11.149](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.149).

F

FatimaS., FaryadA., AtaaA., JoyiaF.A. et Parvaiz A. (2020). Microbial lipase production: A deep insight into the recent advances of lipase production and purification techniques. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, - Wiley Online Library.445-458.

Federsel, H.-J., Moody, TS et Taylor, SJC (2021). Tendances récentes en matière d'immobilisation d'enzymes : concepts pour élargir la boîte à outils de biocatalyse. *Molécules*, 26 (9), 2822.

Fernandes, P. (2016). Enzymes dans la transformation du poisson et des fruits de mer. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 4, 59

Fickers, P; Destain, J; Thonart, Ph. (2008). Les lipases sont des hydrolases atypiques : principale caractéristique et application. *biotechnol. agron. Soc. Environ* 12(2) 119-130.

Fincan, S. A., Özdemir, S., Karakaya, A., Enez, B., Mustafov, S. D., Ulutaş, M. S., & Şen, F. (2021). Purification and characterization of thermostable α -amylase produced from *Bacillus licheniformis* So-B3 and its potential in hydrolyzing raw starch. *Life Sciences*, 264, 118639. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118639>

G

Garet, G. (2014). Classification et caractérisation de familles enzymatiques à l'aide de méthodes formelles (Doctoral dissertation, Université Rennes 1).

Gaur S., Agrahari S. et Wadhwa N (2010). Purification of Protease from *Pseudomonas thermaerum* GW1 Isolated from Poultry Waste Site. *J. Open Microbiol.*, 4: 67-74.

Gençkal H. et Tari C (2004). Studies on Alkaline Protease Production from *Bacillus* sp. Thèse de Magistère en Biotechnologie. Institut of Technology. Izmir-Turkey.

Giese, E. C., Dussán, K. J., Pierozzia, M., Chandela, A. K., Pagnocad, F. C., da Silvae, S. S. (2017). Cellulase Production by *Trichosporon laibachii*. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, 9 (4), 271278. <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v9i4.1024>

Gimenes N.C., Silveira E. et Tambourgi E.B. An Overview of Proteases: Production, Downstream Processes and Industrial Applications. *Rév. Purif sept.*, 2019, 00:1–21.

Glover-Bondeau, A.S. (2020). Enzyme : définition, rôle, types, dosage, taux, normes. *Journal des femmes* [en ligne] (consulté le 04 /04/2022) . Disponible sur : Enzyme : définition, rôle, types, dosage, taux, normes (journaldesfemmes.fr)

Gomes, HAR, Moreira, LRS et Edivaldo, XF Fo. (2018). Enzymes et agroalimentaire : un mariage consolidé. Dans AM Grumezescu & AM Holban (Eds.), *Advances in biotechnology for food industry* (pp. 55-89).

Grbavcic S.Z., Dimitrijević-Brankovic S.I., Bezbradica D.I., Siler-Marinkovic S.S. and knezević Z.D. (2007). Effect of fermentation conditions on lipase production by *Candida utilis*. *J. Serb. Chem. Soc.* 72: 757-765.

Guerrand, D. (2018). Economics of food and feed enzymes: Status and perspectives. In C. S. Nunes & V. Kumar (Ed.), *Enzymes in human and animal nutrition* (Chap. 26, pp. 487-514). Cambridge: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-805419-2.00026-5>.

Gupta, V. K. (2016). *Microbial Cellulase System Properties and Applications*. Galway : Elsevier. 300 p

H

Haile, Setegn & Ayele, Abate. (2022). Pectinase from Microorganisms and Its Industrial Applications. *The Scientific World Journal*. 2022. 1-15. 10.1155/2022/1881305.

Himmel ME, Xu Q, Luo Y. (2010). Systèmes enzymatiques microbiens pour la conversion de la biomasse : paradigmes émergents. *Biocarburants*, 1 ,323–341. DOI : 10.4155 / bfs.09.25.

Hölker. U, Hofer .M, Lenz.J. (2004). Avantages biotechnologiques de la fermentation à l'état solide à l'échelle du laboratoire avec des champignons. *Applied of Microbiology and Biotechnology*. 64(2), 175–186

Holliday, G.L., Andreini, C., Fischer, J.D., Rahman, S.A., Almonacid, D.E., Williams, S.T., Pearson, W.R. (2012). MACiE : exploring the diversity of biochemical reactions. *Nucleic Acids Research*, 40, 783-789.

I

Imran, M., Anwar, Z., Irchad, M., Asad, J. M., Ashfaq, H. (2016). Cellulase Production from species of Fungi and Bacteria from Agriculture wastes and its Utilization in Industry: A Review. *Advances in Enzyme Research* [en ligne], 4 (2) : 44-55 (page Consultée le 28/03/2022) <http://dx.doi.org/10.4236/aer.2016.42005>

J

Janičková, Z., & Janeček, Š. (2020). Fungal α -amylases from three GH13 subfamilies: Their sequence-structural features and evolutionary relationships. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 763-772. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.069>

Jordan DB, Wagschal K (2010). Propriétés et applications des β -D-xylosidases microbiennes contenant l'enzyme catalytiquement efficace de *Selenomonas ruminantium*. Appl Microbiol Biotechnol 86 (6): 1647–1658.DOI: org/10.1007/s00253-010-2538-y.

K

Kalia, S., Bhattacharya, A., Prajapati, S. K., & Malik, A. (2021). Utilization of starch effluent from a textile industry as a fungal growth supplement for enhanced α -amylase production for industrial application. Chemosphere, 279, 130554. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130554>

Kannan, T. R., & Kanagaraj, C. (2019). Molecular characteristic of α -AMYLASE enzymes producing from *Bacillus licheniformis* (JQ946317) using solid state fermentation. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 20, 101240. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101240>

Kasana. R.C, Salwan. R, Yadav. S.K (2011). Protéases microbiennes : détection, production et amélioration génétique. Critical Reviews in Microbiology 37(3):262–276.

Kerényiová, L., & Janeček, Š. (2020). A detailed in silico analysis of the amylolytic family GH126 and its possible relatedness to family GH76. Carbohydrate Research, 494, 108082. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108082>

Khairuddin M, Norazan M, Parasuraman R, Othman N, Roslinda Abd M, Ramlan, A, Azzam A, El Enshasy H. (2016). Production of Cysteine Proteases by Recombinant Microorganisms: A Critical Review. Institute Bioproduct Development, Universiti Teknologi Malaysia. Journal of Pharmacy and Biological Sciences, Vol. 11

Khokha R., Murthy A. et Weiss A (2013). Metalloproteinases and their natural inhibitors in inflammation and immunity. J. Nat Rev Immunol., , 13(9): 649.

Klein T., Eckhard U., Dufour A., Solis N. et Overall C.M. Proteolytic Cleavage-Mechanisms, Function, and "Omic" Approaches for a Near-Ubiquitous Posttranslational Modification. ChemRev., 2018, 118 : 1137-1168.

Kuhad RC, Gupta R., Singh A. Cellulases microbiennes et leurs applications industrielles. Rés enzymatique. 2011 ; 2011 :280696.

Kumar A.G., Nagesh N., Prabhakar T.G., Sekaran G. (2008). Purification of extracellular acid protease and analysis of fermentation metabolites by *Synergistes* sp. Utilizing proteinaceous solid waste from tanneries. *Bioresour. Technol.*, 99; 2364–2372

Kumar L, Nagar S, Mittal A et al (2014) Immobilization of xylanase purified from *Bacillus pumilus* VLK-1 and its application in enrichment of orange and grape juices. *J Food Sci Technol* 51 :1737–1749

Kumar S. Rôle des enzymes dans le traitement des jus de fruits et son amélioration de la qualité. *Pelagia Res. Libr. Adv. Appl. Sci. Rés.* 2015 ; 6 : 114–124.

L

Laiche, A. touhami. (2019). Production d'enzymes amylolytiques chez des souches levuriennes isolées à partir de deux origines (sol saharien et blé) et cultivées sur milieu à base de lactosérum [Thèse doctorat]. Université Kasdi Merbah.

Lajolo, F., & Mercadante, AZ (2017). *Química e bioquímica de alimentos* (2e éd.). São Paulo : Athéneu.

Lakba H. et Soucha H. Production des protéases par les mycètes isolés de milieux sahariens. Mémoire de Master en Microbiologie, Université Mentouri, Constantine, Algérie. 2015.

Lakhundi, S., Ruqaiyyah, S., Naveed, A. K. (2015). Cellulose degradation: a therapeutic strategy in the improved treatment of *Acanthamoeba* infections. *Parasites & Vectors*, 8, 23.

Lee JH. (2010). Revêtement de β -glucosidase sur des nanofibres de polymère pour une production améliorée d'éthanol cellulosique. *Bioprocess Biosyst Eng.*, 33, 141–147.

Lefèvre, F., Ravot, G., Nguyen, HK, Lagarde, D., Fourage, L., Sonet, JM, & Dupret, D. (2002). Découverte et optimisation de nouvelles enzymes pour la catalyse enzymatique industrielle. *ACTUALITÉ CHIMIQUE*, (8/9), 27-30.

Leisola M., Jokela J., Pastinen O. et Turunen O., (2001). Industrial use of enzymes. *Laboratory Bioproc. Eng.*, Helsinki University of Technology, Finland, nd Hans Schoemker, DMS Reserch, MD Geleen, The Netherlnds. 2001.

Lim S.J. Oslan S, N. (2021). Native to designed: microbial α -amylases for industrial applications. *Peer J*. Vol. 9. P11-15. <http://doi.org/10.7717/peerj.1131>.

Linden, G. (1998). Processing of foods by enzymes. Techniques de l'Ingénieur. Agroalimentaire (France).

Liu, J., Ma, R. T., & Shi, Y. P. (2020). “Recent advances on support materials for lipase immobilization and applicability as biocatalysts in inhibitors screening methods”-A review. *Analytica Chimica Acta*, 1101, 9-22.

Lopes, M., Gomes, N., Mota, M., & Belo, I. (2009). *Yarrowia lipolytica* growth under increased air pressure: Influence on enzyme production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*.

Loudjani H. et Belmerabet K. Etude des paramètres physico-chimiques de la production de protéase par le champignon entomopathogène *Metarhiziumanisopliae*. Mémoire de Master en Microbiologie, Université Mentouri, Constantine, Algérie. 2016.

M

Madhusankha, GDMP et Thilakarathna, RCN (2021). Mécanisme d'attendrissement de la viande et impact des protéases exogènes végétales : une revue. *Journal arabe de chimie*, 14(2), 102967.

Matsuo T., Miyake T., Hirota S. Recent developments on creation of artificial metalloenzymes. *Tetrahedron Lett.* 2019 ; 60 :151226.

Melnichuk, N., Braia, M. J., Anselmi, P. A., Meini, M.-R., & Romanini, D. (2020). Valorization of two agroindustrial wastes to produce alpha-amylase enzyme from *Aspergillus oryzae* by solid-state fermentation. *Waste Management*, 106, 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.025>

Michael Ibba et Dieter Söll, « Aminoacyl-tRNA synthesis », *Annual Reviews Biochemistry*, vol. 69, juillet 2000, p. 617650) PMID 10966471, DOI 10.1146/annurev.biochem.69.1.617

MOTTA, J. F. G., FREITAS, B. C. B. D., ALMEIDA, A. F. D., MARTINS, G. A. D. S., & BORGES, S. V. (2023). Use of enzymes in the food industry: a review. *Food Science and Technology*, 43, e106222.

Mukesh,M. Andleeb,Z. Manish,K. et al. , (2018). New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Penicillium Enzymes for the Food Industries [en ligne] ,167–186. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63501-3.00009-0>

Mukhtar. H, Haq. I. 2013. Évaluation comparative des sous-produits agro-industriels pour la production de protéase alcaline par des souches sauvages et mutantes de *Bacillus subtilis* en fermentation submergée et à l'état solide. *Sciences MondeJournale*, 1–6.

N

Nema, A., Patnala, S.H., Mandari, V, S. Kota and S. Kumar. (2019). Production and optimization of lipase using *Aspergillus niger* MTCC 872 by solid-state fermentation. *Bull Natl Res Cent*43, 82.

Nigam, PS (2013). Enzymes microbiennes avec des caractéristiques spéciales pour les applications biotechnologiques. *Biomolécules*, 3 (3), 597-611.

Nisha Sharma¹ et Nivedita Sharma. (2019). Les Xylanases microbiennes et leurs applications industrielles ainsi que les perspectives d'avenir : une revue. *G.J.B.A.H.S.*, Vol.6(3):5-12. DOI:10.24105/gjbahs.6.3.1702.

Nouadri T, Meraihi Z, Djekrif-Dakhmouche S Bennamoun L, (2010) Purification and characterization of the α -amylase isolated from *Penicillium camemberti* PL21. *Research Laboratory in Enzymatic Engineering, Department of Biochemistry and Microbiology, Mentouri- University, Constantine- Algeria*, Vol. 4(6), pp. 155-162

O

Okafor, DC, Ofoedu, CE, Nwakaudu, A., & Daramola, MO (2019). Enzymes comme additifs dans le traitement de l'amidon : un bref aperçu. Dans M. Kuddus (Ed.), *Enzymes in food biotechnology* (pp. 149-168).

Ordoñez, JA, Rodríguez, MIC, Álvarez, LF, Sanz, MLG et Minguillón, G. (2005). *Tecnología de alimentos: componentes dos alimentos e processos* (1^a éd.). Porto Alegre: Artmed.

P

Pabai F. (1997). Purification, Characterization of selected microbial lipases and their application for inter esterification of better fat. Department of food science & agricultural chemistry. McGill University, Montréal, Canada. Applied image. INC. PP:179.

Palomo, J. M. (2021). Artificial enzymes with multiple active sites. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100452.

Pinto, É. S. M., Dorn, M., & Feltes, B. C. (2020). The tale of a versatile enzyme: Alpha amylase evolution, structure, and potential biotechnological applications for the bioremediation of n-alkanes. *Chemosphere*, 250, 126202. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126202>

Polizeli MLTM, Rizzatti ACS, Monti R, Terenzi HF, Jorge JA, Amorim DS. (2005). Xylanases de champignons : propriétés et applications industrielles. *ApplMicrobiol Biotechnol* 67 (5) : 577–591. Doi :org/10. 1007 / s00253-005-1904-7.

Porter L.J., Rukhairu A.R., Ollis L.D. (2016). Directed evolution of enzymes for industrial biocatalysis. *Combining Chemistry and Biology*, 17: 197-203.

Porter L.J., Rukhairu A.R., Ollis L.D. (2016). Directed evolution of enzymes for industrial biocatalysis. *Combining Chemistry and Biology*, 17: 197-203.

Prajapati, V. S., Trivedi, U. B., & Patel, K. C. (2015). A statistical approach for the production of thermostable and alklophilic alpha-amylase from *Bacillus amyloliquefaciens* KCP2 under solid-state fermentation. *3 Biotech*, 5(2), 211-220. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0213-1>

Priyadarshini, S., Pradhan, S. K., & Ray, P. (2020). Production, characterization and application of thermostable, alkaline α -amylase (AA11) from *Bacillus cereus* strain SP-CH11 isolated from Chilika Lake. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 804-812. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.149>

Pulgar, E. M., Saadeddin, A. (2013). The cellulolytic system of *Thermobifidafusca*. *Critical Reviews in Microbiology*, 40, 236-247. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2013.776512>

Raghuwanshi S., Deswal D., Karp M. (2014). Biotraitement de la production améliorée de cellulase à partir d'un mutant de *Trichoderma asperellum* RCK 2011 et son application dans l'hydrolyse de la cellulose. *Carburant*; 124, 183–189.

Raimi O.G., Kappo M.A., Fajana O., Oku S.S. et Adeniji M.A. Alkaline protease from maggots: a likely source of industrial enzyme. *J. Cell Tissue Res.*, 2010, 10(3): 2419-2422.

Ram S S., Taranjeet S., Ashok P. (2019). Microbial Enzymes-An Overview. ELSEVIER, In book:biomas, Biofuels, Biochemicals: Advances in Enzymes Technology, Ed:1: p1-40.

Rane, A. S., Joshi, R. S., &Giri, A. P. (2020). Molecular determinant for specificity: Differential interaction of α -amylases with their proteinaceous inhibitors. *Biochimica et BiophysicaActa (BBA) - General Subjects*, 1864(12), 129703. <https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2020.129703>

Rao, H., Huan, R., Chen, Y., Xiao, X., Li, W. et He, H. (2023). Caractéristiques et application d'une nouvelle protéase adaptée au froid et tolérante au sel EK4-1 produite par une bactérie arctique *Mesonia algues* K4-1. *Journal international des sciences moléculaires*, 24 (9), 7985. <https://doi.org/10.3390/ijms24097985>

Ray, L., Pramanik, S., & Bera, D. (2016). Enzymes-an existing and promising tool of food processing industry. *Recent Patents on Biotechnology*, 10(1), 58-71. <http://dx.doi.org/10.2174/1872208310666160727150153>. PMID:27468817.

Razzaq. A, Shamsi. S, Ali .A, Ali. Q, Sajjad .M, Malik. A, Ashraf. M (2019). Microbialproteases applications. *FrontiersBioengineering and Biotechnology* 7:110.

Reffas, F. Z. I. (2017). Isolement et caractérisation de bactéries productrices de cellulase (Doctoral dissertation).

Richhariyan J., Sharma T.K., Dassani S. (2021). Production and Optimization of Xylanase by *Penicillium chrysogenum* through Liquid State and Solid State Fermentation. *Journal of Scientific Research*, 65(1), 104-11.

Rigoldi, F., Donini, S., Redaelli, A., Parisini, E. et Gautieri, A. (2018). Ingénierie d'enzymes thermostables pour applications industrielles. *APL Bioingénierie*, 2(1), e11501.

Rogers L.D. et Overall C.M. Proteolytic post-translational modification of proteins: proteomic tools and methodology. *J. Mol Cell Proteomics.*, 2013, 12(12): 3532-3542.

Rosmine E, Edassery Sainjan NC, Silvester R, Varghese SA (2019) Utilisation of agrowaste xylan for the production of industrially important enzyme xylanase from aquatic *Streptomyces* sp. and potential role of xylanase in deinking of newsprint. *Int J Curr Microbiol Appl Sci* 8:2061–2076.

Roth, C., Moroz, O. V., Turkenburg, J. P., Blagova, E., Waterman, J., Ariza, A., Ming, L., Tianqi, S., Andersen, C., Davies, G. J., & Wilson, K. S. (2019). Structural and Functional Characterization of Three Novel Fungal Amylases with Enhanced Stability and pH Tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(19), 4902. <https://doi.org/10.3390/ijms20194902>

S

Sadhu, S., Maiti, T. (2013). Production de cellulase par les bactéries: une revue. *MicrobiologyResearch Journal International*, 3 (3), 235-258. DOI : [org/10.9734/BMRJ/2013/2367](https://doi.org/10.9734/BMRJ/2013/2367).

Saini, A., Aggarwal, N. K., Yadav, A. (2017). Cost-effective cellulase production using *Partheniumhysterophorus* biomass as an unconventional lignocellulosic substrate. *3 Biotech* [en ligne], 7(12) (page consultée le 02/04/2022) <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0604-1>

Sajith S, P Priji, Sreedevi S e, Benjamin S. (2016). Un aperçu sur les celluloses fongiques dans une perspective industrielle 6(1), 1-13.

Sanromán, M. A., & Deive, F. J. (2017). 5 - Food Enzymes. In A. Pandey, M. A. Sanromán, G. Du, C. R. Soccol & C. G. Dussap (Eds.), *Current developments in biotechnology and bioengineering* (Chap. 5, pp. 119-142). Amsterdam: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63666-9.00005-4>.

Sebti, C., Deghdak, M. (2018). Production de cellulase par *Trichoderma longibrachiatum* cultivée sur grignon d'olive. Mémoire de Master en Mycologie et Biotechnologie Fongique, Université des Frères Mentouri Constantine 1.

Seidah N.G. et Prat A. The biology and therapeutic targeting of the proprotein convertases. *J. Nat Rev Drug Discov.*, 2012, 11(5): 367-383.

Severac, E. (2010). Valorisation enzymatique des huiles végétales (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).

Shah, K., & Vishwa, A. P. (2019). Microbial xylanase production and their industrial applications in industry: A Review. *Microbiology and Biotechnology in Human Life*, 112-132.

Shahrestani H, Taheri-Kafrani A, Soozanipour A, Tavakoli O (2016) Enzymatic clarification of fruit juices using xylanase immobilized on 1, 3, 5-triazine-functionalized silica-encapsulated magnetic nanoparticles. *Biochem Eng J* 109:51–58

Sharada R., Venkateswarlu G., Venkateswar S., Anandrao M. Applications of Cellulases—eview. *Int. J.Pharm. Chim. Biol. Sci.* 2014 ; 4 : 424–437.

Shariq M., Sohail M. Pelures de limette d'agrumes : un substrat prometteur pour la production d'une préparation multienzymatique à partir d'un consortium de levures. *Bioressource. Bioprocédé.* 2019; 6: 1–15

Sharma M., Gat Y., Arya S., Kumar V., Panghal A. et Kumar A. A Review on Microbial Alkaline Protease: An Essential Tool for Various Industrial Approaches. *J. Ind Biotechnol.*, 2019, 15(2): 69-78

Siala, R., Kamoun, A.S., Hajji, M., Abid, I., Gharsallah, N., Nasri, M. (2009). Extracellular acid protease from *Aspergillus niger* II: purification and characterization. *African J. Biotechnol.*, 8 (18), 4582-4589.

Simon,J.Barry,V.(2005).les enzymes : applications industrielles et analytiques. Megazyme international Ireland Ltd[en ligne],(116),(consulté le 29/03/2022) URL www.Megazyme.com

Simpson, B. K., Rui, X., & Klomklao, S. (2012). Enzymes in food processing. *Food biochemistry and food processing*, 181-206.

Singh R., Singh T., Pandey A. (2019). Microbial enzyme –An over view. *Advances in Enzyme Technology*.

Singh, R., Kumar, M., Mittal, A., & Mehta, P. K. (2016). Microbial enzymes: industrial progress in 21st century. 3 Biotech, 6(2), 174. <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-016-0485-8>.

Smith Y., Pharm B. (2019). Mecanismesd'enzymes. News Medical Life Science.

Steiner K., Schwab H. (2012). Recent advances in rational approaches for enzyme engineering. Computational and Structural Biotechnology Journal.

Steinreiber J., Ward T.R. Artificial metalloenzymes as selective catalysts in aqueous media. Coord. Chem. Rev. 2008; 252:751–766.

Subin, S. R., &Bhat, S. G. (2015). Enzymes: concepts, nomenclature, mechanism of action and kinetics, characteristics and sources of food-grade enzymes. Enzymes in food and beverage processing, 3-38.

T

Taheri-Kafrani, A., Kharazmi, S., Nasrollahzadeh, M., Soozanipour, A., Ejeian, F., Etedali, P., Mansouri Tehrani, H. A., Razmjou, A., Yek, S. M., & Varma, R. S. (2021). Recent developments in enzyme immobilization technology for high-throughput processing in food industries. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(19), 3160-3196. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2020.1793726>. PMID:32715740.

Touijer, H., Benchemsi, N., Mohamed, E., Janati Idrissi, A., Chaouni, B., Bekkari, H. (2019). Thermostable Cellulases from the Yeast *Trichosporon* sp. Enzyme Research, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2019/2790414>

Toumi, salima. (2018). Isolement et caractérisation des souches levuriennes productrices d'amylase à partir de sol saharien Algérien et cultivée sur un milieu à base de lactosérum [Thèse doctorat]. Université de Sidi Bel Abbès.

Treichel H., Deoliveira D., Mazutti M., Di luccio M., Oliveira J.V. (2010). A review on microbial lipase productions. Food Bioprocess Technology, 3: 182-196.

U

Uday, U.S.S. P, Choudhury, P., Bandyopadhyay, T.K., et Bhunia, B. (2016). Classification, mode d'action et stratégie de production de la xylanase et son application pour

la production de biocarburants à partir de jacinthe d'eau. *Journal international des macromolécules biologiques*, 82, 1041–1054. DOI : 10.1016 / j. ijbiomac.2015.10.086.

W

Walia, A., Guleria, S., Mehta, P., Chauhan, A., et Parkash, J. (2017). Les xylanases microbiennes et leur application industrielle dans le blanchiment des pâtes et papiers : une revue. *3 Biotech*, 7 (1). DOI : 10.1007 / s13205-016-0584-6.

Wang, W., & Gunasekaran, S. (2020). Biocapteurs à base de nanozymes pour la qualité et la sécurité des aliments. *Tendances en chimie analytique*, 126, 115841

Y

Yushkova, E. D., Nazarova, E. A., Matyuhina, A. V., Noskova, A. O., Shavronskaya, D. O., Vinogradov, V. V., Skvortsova, N. N., & Krivoshapkina, E. F. (2019). Application of immobilized enzymes in food industry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(42), 11553-11567. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04385>. PMID:31553885.

Résumé

Les enzymes sont des catalyseurs de nature protéique capables de catalyser des réactions chimiques, peuvent être d'origine animale, végétale ou microbienne. Largement utilisées en industrie notamment l'industrie agro-alimentaire, aujourd'hui, l'application de ces dernières est très vaste et elles jouent un rôle important dans la transformation des produits alimentaires de manière efficace par divers processus : la fermentation des aliments, la maturation du fromage, la production et clarification de jus de fruit...etc. Dans l'industrie alimentaire, les enzymes utilisées pour améliorer la texture, la saveur et la valeur nutritive des aliments, par exemple l'amylase est utilisée pour décomposer l'amidon en sucre simples, tandis que la protéase est utilisée pour la maturation du fromage. Le défi aujourd'hui consiste à découvrir des enzymes qui répondent très exactement aux contraintes techniques et économiques, des procédés de biocatalyse industriels modernes : enzyme plus stable (résiste à la température, aux solvants...), plus actives (rendement, gain du temps), plus sélectives (pureté des produits, élimination des sous-produits ...), ou catalysant des réactions que les enzymes actuelles n'arrivent pas à réaliser.

Mots clés : Enzymes, aliments, actualité, industrie, agro-alimentaire.

Abstract

The enzymes are natural protective catalytic agents capable of catalyzing chemical reactions, such as the origin of animals, vegetables or microbes. Large applications in the agro-alimentary industry, today, are very large and there is an important role in the transformation of the most efficient products in different processes: the fermentation of the aliments, the Maturation of age, the production of jus of fruit, the clarification of jus. In the industrial environment, the enzymes are used to improve the texture, the preservation and the nutritional value of the aliments, and also the amylase is used to decomposer the amidon in sugar in simple ways, as the protease is used for the maturation of the skin. The new day consists of discovering enzymes that respond to exact opposite techniques and economics, modern industrial biocatalysts: more stable enzyme (temperature control, solvents...), more active (reduction, temperature gain) , more selections (purification of products, elimination of sous-products...), or catalytic reactions that the enzymes act on do not arrive in real time.

Keywords: Enzymes, food, news, industry, agri-food.